

Université de Limoges

École Doctorale Sciences et Ingénierie pour l'Information, Mathématiques (ED 521)

Laboratoire XLIM-SYSTEMS RF

Thèse pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges

Discipline / Spécialité : Électronique Des Hautes Fréquences, *Optoélectronique et Photonique*

Présentée et soutenue par

Mohamed Khalil Drissi

Le 15 décembre 2016

Composants céramiques 3D innovants pour des applications spatiales de télécommunications millimétriques en bandes Q et V

Thèse confidentielle

Thèse dirigée par Nicolas DELHOTE, Olivier TANTOT, Serge VERDEYME

JURY :

Président du jury

M. Thierry Chartier, Professeur, laboratoire SPCTS, Université de Limoges

Rapporteurs

M. Jorge Daniel Martinez Perez, Maitre de Conférences, ETSI, Universitat Politècnica de València

M. Hartmut Gundel, Professeur, Laboratoire IETR, Université de Nantes

Examineurs

M. Ludovic Carpentier, Ingénieur Hyperfréquences, CNES, Toulouse

M. Nicolas Delhote, Maitre de Conférences, Laboratoire XLIM, Université de Limoges

M. Tuamo Lasri, Professeur, Laboratoire IEMN, Université de Lille 1

M. Hervé Leblond, Ingénieur Hyperfréquences, Thales Alenia Space, Toulouse

M. Serge Verdeyme, Professeur, Laboratoire XLIM, Université de Limoges

Invités

M. Christophe Chaput, Directeur de 3DCERAM, Limoges

M. Pierre-Marie Geffroy, Chargé de Recherche, Laboratoire SPCTS, Université de Limoges

M. Emile de Rijk, Directeur de Swissto12, Lausanne

M. Olivier Tantot, Maitre de conférences, Laboratoire XLIM, Université de Limoges

Derrière chaque réussite une MÈRE

À ma chère mère CHADLIA



Remerciements

Ces travaux de thèse ont été effectués au sein de l'Institut de Recherche XLIM de l'Université de Limoges, unité mixte de recherche CNRS n°7252, dirigé par Monsieur le Professeur Dominique BAILLARGEAT. Ma profonde gratitude lui est adressée.

J'exprime mes sincères remerciements à Thierry CHARTIER, Professeur à l'Université de Limoges et directeur du laboratoire SPCTS, pour l'honneur qu'il me fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.

Je tiens tout particulièrement à adresser mes remerciements à Monsieur Serge VERDEYME, Professeur à l'Université de Limoges, Monsieur Nicolas DELHOTE, Maître de conférences à l'université de Limoges, et Monsieur Olivier TANTOT, Maître de conférences à l'université de Limoges pour avoir suivi mes travaux de thèse, pour leur soutien permanent, l'efficacité de leurs aides, la qualité de ses conseils et pour la grande disponibilité dont ils ont toujours fait preuve à mon égard. Je tiens à leurs exprimer ma profonde gratitude en leurs dédiant cette thèse, concrétisation de notre collaboration qui fut toujours agréable et très enrichissante.

J'adresse toute ma gratitude à Monsieur Jorge Daniel Martinez PEREZ, Maître de Conférences, ETSI, Universitat Politècnica de València et à Monsieur Hartmut GUNDEL, Professeur, Laboratoire IETR, Université de Nantes, pour l'intérêt qu'ils ont portés à ces travaux en acceptant de les rapporter.

J'exprime mes remerciements à Monsieur Tuamo LASRI, Professeur, Laboratoire IEMN, Université de Lille 1, Monsieur Hervé Leblond, Ingénieur Hyperfréquences, Thales Alenia Space, Toulouse et à Monsieur Ludovic Carpentier, Ingénieur Hyperfréquences, CNES, Toulouse, pour prendre part au jury en qualité d'examineur. J'adresse également toute ma gratitude à Monsieur Emile de Rijk, Directeur de Swissto12, Lausanne, pour l'intérêt accorder à mes travaux et pour avoir accepté de participer à ce jury.

Mes remerciements vont aussi à Damien DI MARCO, post-doctorant, laboratoire SPCTS, Christophe Chaput, Directeur de 3DCERAM, et Pierre-Marie Geffroy, Chargé de



Recherche, Laboratoire SPCTS, pour les échanges nombreux et enrichissants que nous avons eus durant ces trois dernières années.

Mes chaleureux remerciements vont à Madame Marie-Claude LEROUGE, secrétaire du département, pour sa disponibilité et son efficacité, et pour sa grande gentillesse.

Je ne saurais oublier dans ces remerciements tous les membres de ma famille en Tunisie et en Suisse qui m'ont donné tous les moyens nécessaires pour réussir dans cette épreuve (ma mère, mon père, Aymen, Alaeddine, Ruth, Cristian, Miro, Sophie, Ursula, Ruedi).

Mes pensées se tournent vers mes amis de l'extérieur qui ont contribué directement ou indirectement à soutenir mes activités de recherche : Lotfi, Oussama, Gassen, Ala Adnane, Wafa. La liste des remerciements est encore longue et beaucoup de noms ne pourront pas être cités dans ces quelques lignes, bien qu'ils le méritent tous.

A ma mère, qui a toujours trouvé les mots pour me donner de la force, pour tous les moments que nous avons partagés ensemble. Merci de croire en moi et merci de m'avoir appris à croire que l'impossible n'est qu'un mot.

A Corina, pour partager mon quotidien, pour ton soutien de tous les instants, à supporter mon humeur, surtout en cette fin de thèse. Pour toujours trouver les mots justes pour me remettre en selle, et me faire envisager notre avenir sereinement.



Droits d'auteurs



Cette création est mise à disposition selon le Contrat : « **Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** » disponible en ligne :

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/>



Table des matières

Introduction générale	x
Chapitre I	6
II.1 Introduction	9
II.2 L'industrie satellitaire.....	10
II.3 Le grand public moteur de la télécommunication.....	11
III.1 Filtres à lignes couplées	15
III.2 Filtre Hairpin	15
III.3 Filtre DBR	16
III.4 Filtres interdigités.....	16
III.5 Filtres SIW	17
III.6 Filtres à ondes acoustiques	17
III.7 Filtres à matériaux supraconducteurs.....	18
VI. Fabrications additives.....	34
VI. 1 Introduction	34
VI. 2 Binder Jetting	34
VI.3 Selective Laser Sintering : Frittage sélectif par laser.....	36
VI.3 Selective Laser Sintering : Frittage sélectif par laser.....	36
VI.4 Fused Deposition Modeling	37
VI.5 Photopolymer Jetting :	38
VI.6 Injection basse pression.....	39
VI.7 Stéréolithographie.....	42
VI.8 Applications de la stéréolithographie en télécommunication	44
Chapitre II	50



I.1	L'impact de la composition chimique et de la microstructure de l'alumine....	53
I.2	Dopage de l'alumine et son effet sur la microstructure	56
I.3	Autres matériaux diélectriques potentiellement intéressants en bandes Q-V	61
III.1	Caractérisation par résonateur diélectrique.....	62
I.2	Méthode de caractérisation en bande Q et V	67
III.2	Conclusion partie technique de Caractérisation.....	67
IV.1	Mises en forme et frittage des échantillons.....	70
IV.2	Caractérisation et analyse des résultats	76
VI.1	Préparation des poudres et mise en forme.....	82
VI.2	Caractérisation et analyse des résultats	87
VI.3	Comparaison de la TM-DAR dopée à la littérature	90
VII	Conclusion chapitre II	90
Chapitre III.....		96
I Introduction.....		99
II.1.	Spécifications.....	99
II.2.	Estimation du nombre de pôles nécessaires.....	100
II.3.	Choix de la forme du résonateur	103
II.4.	Etude du système d'excitation	105
II.5.	Excitation coplanaire.....	106
II.6.	Excitation micro-ruban.....	108
II.7.	Dispersion de Q_e face à la tolérance de gravure	109
II.8.	Filtre passe-bande deux pôles.....	110
II.9.	Filtre quatre pôles bandes Q et V.....	114
III	Etude de dispersion.....	114
IV	Conclusion Chapitre III	132



Chapitre IV	132
I. Introduction chapitre IV	135
II Usinage en cru	135
III. Filtres fabriqués par moulage basse pression et Stéréolithographie	151
IV. Correction post-Fabrication	155
IV.1. Introduction	159
IV.2. Motifs de compensation compatibles avec les bandes Q et V	160
IV.3. Etude du motif rectangulaire	161
IV.3.a. Variation hautes fréquences.....	161
IV.3.b. Variation basses fréquences	162
IV.3.c. Variation du couplage inter-résonateur.....	163
IV.3.d. Impact des motifs de compensation sur le facteur de qualité	165
V. Conclusion chapitre IV	171
Conclusion générale	174
Références	180
Annexe 1 : Règles de conception pour le moulage basse pression.....	184
Annexe 2 : Règles de conception moulage et étude de sensibilité	187
Annexe 3 : Photos de l'usinage en cru	196
Annexe 4 : Photos de la rectification	197





Introduction générale





Les filtres hyperfréquences jouent un rôle primordial dans de nombreux dispositifs de communication. La position de ses filtres dans le système détermine les contraintes à respecter (poids, encombrement, coût...) afin de répondre aux spécifications électriques. Dans le cas d'un répéteur de satellite, les filtres dans les multiplexeurs de sortie sont souvent basés sur des cavités ou des résonateurs diélectriques à fort facteur de qualité (Q), pour répondre aux besoins en termes de pertes et de tenue en puissance. Ceci est moins vrai pour les filtres du récepteur car les pertes d'insertion ainsi que la tenue en puissance sont moins un point critique pour ceux-ci. Cela permet l'utilisation de filtres plus compacts et plus faciles à intégrer avec les composants actifs du récepteur. Le défi des filtres de réception est de réaliser des fonctions passe-bande avec des forts niveaux de réjection hors bandes et une bonne platitude pour la bande utile, l'impact des pertes d'insertion étant plus modéré.

Ces travaux de thèse ont été effectués dans le cadre du projet ANR ATOMIQ (Technologies avancées pour les solutions de filtrages millimétriques intégrés en bandes Q et V) coordonné par Thales Alenia Space (Toulouse) en partenariat avec le SPCTS, Xlim, 3DCeram, le Labsticc et le CNES. Ce projet s'inscrit dans l'axe thématique « Technologies pour les infrastructures » de l'appel à projets INFRA. Il fait partie des programmes de Télécommunications multimédias par satellite qui visent à apporter des solutions au retard de l'ADSL face à la fibre optique afin d'éviter une fracture numérique. Les communications bidirectionnelles par satellite offrent un meilleur débit par rapport à l'ADSL mais avec une quantité de services limitée. L'objectif majeur du projet est de contribuer à augmenter le débit des communications par satellite et le rendre compétitif face à la fibre optique. Cette augmentation passe par l'utilisation de nouvelles bandes de fréquences comme la bande Q (autour de 40 GHz) et la bande V (autour de 50 GHz). Travailler dans les bandes Q et V conduit à des défis scientifiques et technologiques pour les équipements des charges utiles de la prochaine génération de télécommunications. Cette étude vise à contribuer au développement des fonctions de filtrage des convertisseurs de fréquence de la charge utile.

ATOMIQ se divise en deux thématiques : la première vise à développer une nouvelle formulation d'Alumine (faibles pertes, stable en température). La réalisation de la formulation de l'Alumine est assurée par le laboratoire de recherche SPCTS (Science des Procédés Céramiques et Traitements de Surface) et la caractérisation des matériaux à très hautes fréquences est la mission de XLIM. L'amélioration de l'Alumine passe par la sélection d'une poudre ultra pure (supérieure à 99%) pour éviter la présence de phases intergranulaire riches



en impuretés qui dégrade les pertes diélectriques. Un dopage de l'Alumine ultra pure par le dioxyde de titane (TiO_2) servira à faible concentration à améliorer le facteur de qualité est donc diminuer les pertes diélectriques. À forte concentration le dopant rend cette alumine stable en température mais au détriment du facteur de qualité.

La deuxième thématique du projet consiste à concevoir des filtres 3D de forme complexe en bandes Q et V pour les fabriquer en **stéréolithographie (SLA)** par **3DCERAM** (PME partenaire du projet). Une évaluation de la technique de fabrication par stéréolithographie a été effectuée dans le projet ANR FILIPX antérieur à ATOMIQ. Cette dernière a permis de mettre en évidence la pertinence de cette technique pour fabriquer des objets 3D pour les charges utiles. ATOMIQ visera l'amélioration de la précision de fabrication de cette technique par l'utilisation de machines nouvelle génération travaillant avec un laser de diamètre $30\mu\text{m}$ à la place d'un laser de $180\mu\text{m}$ de diamètre précédemment. Des solutions de correction post-fabrication par ablation laser seront aussi regarder pour compenser les tolérances de fabrication de cette technologie.

D'autres filtres seront conçus dans les mêmes bandes mais qui seront adaptés à la technologie du moulage basse pression. Cette technologie représente une alternative intéressante vue les précisions de fabrication atteignables. Son principe repose sur une suspension de matériaux céramiques ensuite injectée à l'intérieur d'un moule en silicone ou en Aluminium par l'application d'une pression modérée. Vu que la qualité des pièces est directement liée à la qualité de fabrication du moule (précision, état de surface), le recours à des techniques d'usinage de moules d'excellente précision ($10\mu\text{m}$ typiquement) rend plus aisé le respect du cahier des charges. Le moule est fabriqué pour être utilisé un grand nombre de fois, ce qui permet la production répétable de très nombreuses pièces à un coût faible. La fabrication des filtres en **moulage basse pression** sera assurée par le **CTTC** (sous-traitant dans le projet ATOMIQ).

Le **premier chapitre** commence par la présentation de l'industrie spatiale et l'importance de la télécommunication dans ce domaine d'activité. Ensuite nous parlons des projets innovants qui visent à rendre internet accessible à tous par le biais de l'espace. L'importance de monter en fréquence pour pouvoir répondre aux besoins à moyen et long terme de la communication bidirectionnelle sera aussi discutée. Dans la deuxième partie de ce chapitre, une vue rapide sur les technologies de filtrages sera abordée, ensuite nous nous focalisons sur les filtres existant



en bandes Q et V. La dernière partie sera consacrée à la présentation des techniques de prototypage rapide et nous détaillerons les deux techniques de fabrication retenues dans le cadre du projet ATOMIQ (stéréolithographie 3D et moulage basse pression).

Le **deuxième chapitre** sera dédié aux développements de la formulation de la nouvelle Alumine (très faibles pertes, stable en température). Dans un premier temps une étude bibliographique sur l'alumine pure et dopée ainsi que l'impact de la microstructure sur leur performance diélectrique sont présentés. Ensuite les techniques de caractérisation d'échantillons utilisées dans le projet sont montrées. La dernière partie de ce chapitre est dédiée à la formulation et la mise en forme des échantillons d'Alumine. Trois paramètres ont été étudiés dans ce chapitre (pureté, densité et taille des grains) afin de voir leur impact sur les performances diélectriques de l'Alumine.

Le **troisième chapitre** sera consacré à la conception de filtres en bande Q et V. Il commence par une présentation des spécifications de filtrage recherchées dans le projet ATOMIQ. Ensuite une étude détaillée sur la conception des filtres est donnée (choix de la topologie, nombre de pôles nécessaires, choix de la forme du résonateur et type d'excitation utilisée). Les structures de filtrage conçues en respectant les gabarits de filtrage en bande Q/V sont présentées. La dernière partie de ce chapitre sera dédiée à l'étude de sensibilité des filtres face aux tolérances technologiques (dispersion dimensionnelle, dispersion de la permittivité et variation de la température).

Le **quatrième chapitre** détaille la technique de fabrication par usinage en cru. Une alternative est proposée par le SPCTS pour fabriquer des démonstrateurs à base de l'Alumine stable en température. Différentes techniques de métallisation sont présentées. Une présentation des différents filtres fabriqués par moulage basse pression et stéréolithographie est détaillée. Les essais de fabrication et les problèmes rencontrés sont aussi précisés. La dernière partie est dédiée à la technique de correction post-fabrication par ablation laser. Une recherche de motifs qui répondent à nos attentes est effectuée puis ces motifs sont appliqués dans le but de corriger la correction de la fréquence et les couplages internes de nos filtres.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale sur l'ensemble des travaux effectués et sur les perspectives de recherche associées. Ce travail est financé par l'agence nationale de la recherche (ANR ATOMIQ 2014-2018).





Chapitre I

Filtrage spatial et technologies multicouches céramiques



I. Introduction du chapitre I

De nos jours, faire partie du monde connecté est devenue une nécessité vu les nombres de services offerts par internet. Vérification des transports, paiement des factures, information sur la météo et beaucoup d'autres prestations sont assurées directement à travers internet. Mais en raison de l'absence d'infrastructure terrestre dans beaucoup d'endroits dans le monde, 4 milliards de personnes sont privées d'internet selon les chiffres de Google. L'absence d'infrastructures terrestres est souvent due au coût élevé de son déploiement. L'internet via satellite propose une alternative à cette fracture numérique entre les différents points de la planète. Mais cette technologie a besoin d'une amélioration de son débit afin de devenir un concurrent à la technologie fibre optique.

Les travaux de recherche décrits dans ce manuscrit concernent le développement de la nouvelle génération de filtrage en bande Q et V pour les convertisseurs de fréquence des charges utiles. Avec cette nouvelle génération, nous offrirons une connexion Internet à très haut débit pour les foyers des zones rurales, à coût équivalent à la fibre optique.

Le premier chapitre se partage en trois grandes parties, la première concerne l'industrie des satellites et les projets innovants qui visent à connecter plus de monde à la toile. La deuxième partie présentera les différentes technologies de filtrage, ensuite nous nous intéressons aux filtres en bande Q et V.

La troisième partie de ce chapitre va décrire quelques techniques de fabrications 3D et nous détaillerons deux techniques en particulier : la stéréolithographie 3D et le moulage basse pression. Ces deux techniques seront utilisées dans le cadre de notre projet afin de fabriquer des démonstrateurs pour la nouvelle génération de filtre en bande Q et V.



II. Les satellites, un moyen de communication

II.1 Introduction

Avec le premier satellite télécom lancé en 1959, les télécommunications spatiales n’ont cessé de se développer. Dans les années 1980, la technologie de transmission bidirectionnelle a vu le jour sous le nom de VSAT (Very Small Aperture Terminal). Elle était dédiée, au départ, à des domaines bien spécifiques, comme les plateformes pétrolières, les bases polaires, les camps d’expédition, etc. Mais rapidement les entreprises multi-sites ont manifesté leurs intérêts à déployer des réseaux dans des zones délaissées ou inaccessibles aux opérateurs en France et à l’étranger. Depuis, les technologies des satellites se sont développées rapidement, et les applications ont augmenté sans interruption. Non seulement les satellites peuvent être utilisés pour les communications radio et la transmission de la télévision numérique, mais également pour l’astronomie, les prévisions météorologiques, la radiodiffusion, la cartographie et de nombreuses autres applications. En raison de leur utilisation accrue, le nombre et la taille des satellites augmentent, la congestion est cependant devenue un grave problème dans les bandes de fréquences inférieures. Les nouvelles technologies sont à l’étude afin que des bandes plus élevées puissent être utilisées, permettant la gestion de débits plus importants. La Figure I-1 présente les différentes bandes de fréquences utilisées aujourd’hui pour les satellites de télécommunication.

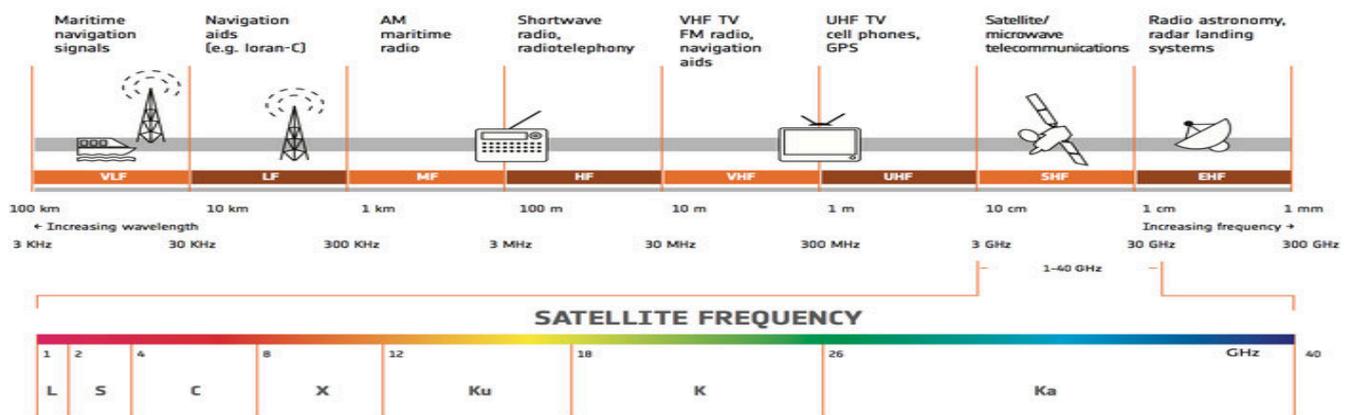


Figure I-1- Bandes de fréquences pour les satellites de télécommunication [1]



II.2 L'industrie satellitaire

Le marché de l'industrie des satellites n'a pas cessé d'augmenter dans la dernière décennie, avec un chiffre d'affaire de deux cents huit milliards de dollars [2] en 2015 face à cent six milliards de dollars en 2006. Ce secteur a doublé ses revenus en dix ans et signale une hausse de 3% de 2014 à 2015. La Figure I-2 montre que les Etats-Unis sont les leaders mondiaux de l'industrie des satellites avec une moyenne annuelle de 43% du marché sur les six dernières années.

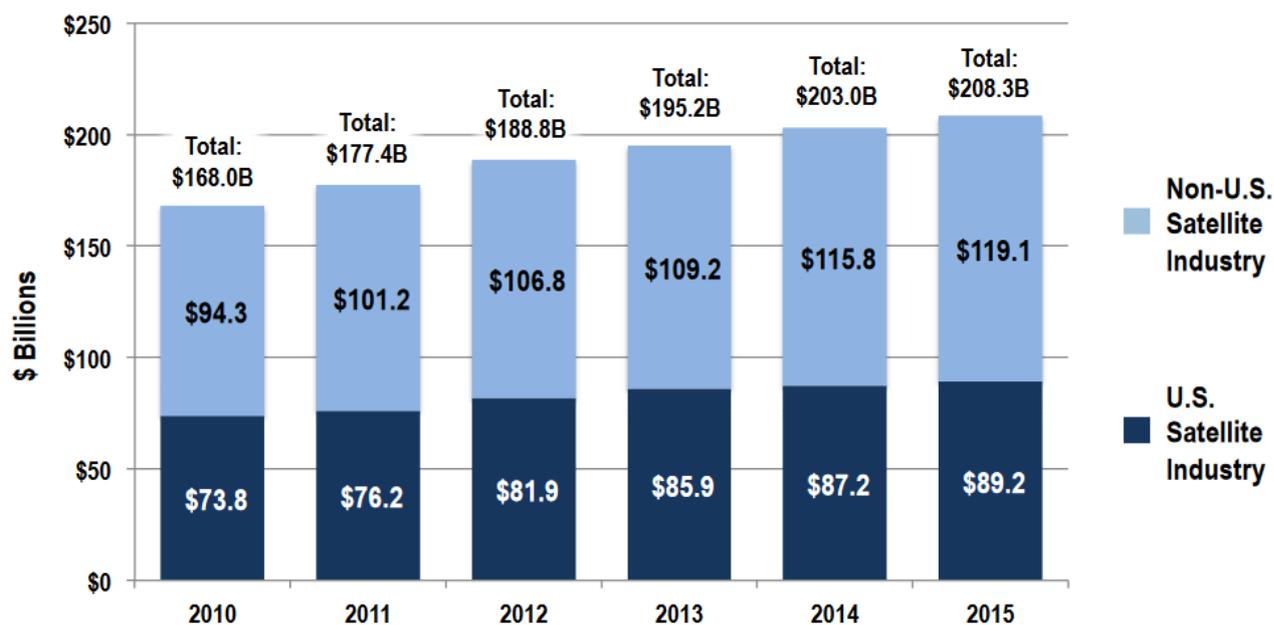


Figure I-2- Revenu de l'industrie satellitaire de 2010 à 2015 [2]

D'après les derniers chiffres de l'année 2015, il y a 1381 satellites opérationnels, 51% de ces derniers sont utilisés pour des besoins de télécommunication (37% commercial, 14% militaire). Pour lutter contre les zones dites « blanches », l'internet par satellite ou appelé sous le nom de broadband présente une piste intéressante pour les industriels afin d'offrir l'internet à haut débit en tous les points de la planète. Nous trouvons aujourd'hui cinq fournisseurs d'accès broadband à travers le monde : Eutelsat Tooway, HughesNet, ViaSat Exede, Immersat Global Xpress, O3B. Le broadband est en expansion exponentielle au cours des cinq dernières années avec des revenus augmentés de 50% et une croissance de 14% du nombre d'utilisateurs [4]. Nous présentons dans le paragraphe suivant quelques nouveaux programmes emblématiques.



II.3 Le grand public moteur de la télécommunication

II.3.a Satellite à basse altitude

Pour améliorer l'efficacité de l'internet par satellite, il faut passer par un développement de la technologie. L'utilisation de satellites en orbite basse est une solution pour augmenter significativement le débit et fournir une couverture planétaire de la toile. L'avantage majeur des constellations en orbite basse par rapport aux autres constellations réside dans la réduction du temps de latence ainsi que le nombre de terminaux terrestres [5] [6]. Travailler à orbite basse fait gagner 250ms par bond par rapport aux satellites géostationnaires (altitude de 36 785 Km). En orbite basse, la couverture mondiale est uniforme, elle ne défavorise aucune région à cause de sa position géographique. Grâce à sa mise en place progressive, nous diminuons les risques financiers de cette technologie tout en gardant la possibilité de réorienter leurs missions en fonction de leurs réussites. Vu le nombre important de satellites nécessaires pour couvrir toute la planète, le nombre de lancement est plus important par rapport aux autres systèmes de constellation. Le coût plus élevé et la complexité des dispositifs RF, présentent un obstacle pour la constellation en orbite basse.

II.3.b Vers une meilleure couverture internet

II.3.b.1 Facebook

Le réseau social « Facebook » s'est lancé dans la recherche d'un moyen physique qui rend internet accessible dans les zones rurales qui souffrent d'une fracture numérique souvent par défaut d'infrastructures. Dans cette optique, un projet a été lancé en partenariat avec Ascenta qui vise à utiliser des milliers de drones pour compenser le manque des infrastructures au sol. Comme nous voyons sur la Figure I-3, le drone aquila de Facebook est équivalent à un Boing 747 en termes de taille mais les matériaux qui le constituent sont ultralégers ce qui le rend si particulier [7] [8].





Figure I-3- Drone Aquila de Facebook

Ce drone utilise des panneaux solaires pour s'alimenter et voler à des altitudes comprises entre 18km et 27 km pour éviter les problèmes d'occupation aérienne et la communication s'opère par faisceau laser. Le premier démonstrateur a été lancé avec succès le 21 Juillet 2016. Nous trouvons « Facebook » présent sur d'autres projets qui ont les mêmes objectifs que ce projet là mais en utilisant d'autres techniques telles que les satellites.

II.3.b.2 Google

Google de son côté estime que 4 milliards de personnes sont privées d'internet. Ce chiffre qui dépasse la moitié des occupants de cette planète, a poussé Google à chercher des solutions. Parmi les pistes qui sont étudiées, nous trouvons le projet LOON [10], basé sur l'utilisation de ballons stratosphériques [11].



Figure I-4- Ballons stratosphériques de Google

Ces ballons seront à une altitude comprise entre 18 km et 20 km, ils ont une couverture de 5000 Km². L'espace entre les ballons est de 40 km et ils utilisent les ondes radiofréquences pour effectuer les transmissions des données. Cette technique s'avère moins



coûteuse que les infrastructures au sol. Google étudie d'autres solutions avec Titan Aerospace qui reposent sur l'utilisation des drones.

III. Conclusion partie I

Fournir un accès web planétaire est devenu une nécessité de nos jours vu l'importance d'être connecté à la toile. Souvent le défaut d'infrastructure terrestre a été le frein qui nous sépare du monde connecté. Pour contourner cette problématique, plusieurs techniques basées sur l'utilisation de satellites ont été proposées au cours des trois dernières décennies. Aujourd'hui l'internet via satellite a connu une grande progression et se positionne comme une alternative à la fibre optique. Cependant le besoin des utilisateurs change et impose une évolution technologique des satellites de télécommunication. La hausse du débit pour la communication bidirectionnelle prévue dans le cadre d'Horizon 2020, va modifier les bandes de fréquences utilisées. Nous serons amenés à travailler en bandes Q et V ce qui impose la conception de nouveaux filtres dans ces bandes de fréquences. Le projet ATOMIQ (Technologies avancées pour les solutions de filtrages millimétriques intégrés en bandes Q et V) vise à concevoir les nouvelles techniques de filtrage en bande Q et V des convertisseurs de fréquences pour les futurs satellites de télécommunication. La Figure I-5 illustre le principe de la chaîne RF du convertisseur de fréquence.

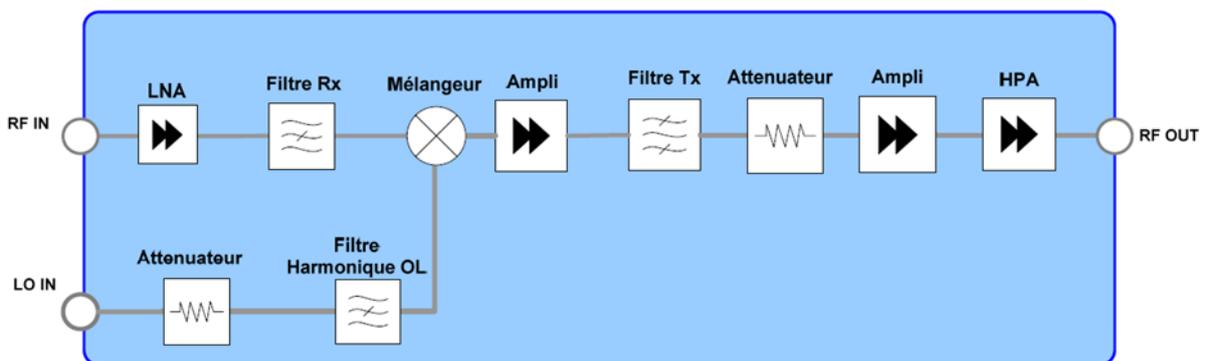


Figure I-5- Chaîne RF du convertisseur de fréquence

Une analyse poussée des charges utiles du futur a été menée, des contraintes sur les filtres ont été définies par l'opérateur. La mission du projet ATOMIQ est de concevoir le filtre Tx qui est situé après le mélangeur. L'établissement des spécifications de filtrage a été déduit des besoins des missions de télécommunications et des besoins systèmes. Les contraintes du filtrage Tx dépendent de la performance du mélangeur. Dans ATOMIQ la réjection de la



bande Rx doit être supérieure à 55 dBc et la réjection du produit du mélange doit être supérieur à 40 dBc. Une analyse bibliographique sera présentée dans la suite du chapitre, elle servira à sélectionner la technologie sur laquelle le travail sera basé.

Les filtres qui seront conçus dans le cadre de notre projet doivent avoir une bande passante étroite inférieure à 2%. Le facteur de qualité des résonateurs devra être élevé afin de minimiser les pertes. Nous devons aussi garantir des niveaux d'isolation hors bande assez élevés et sur des bandes de fréquences supérieures à 10 GHz tout en gardant un encombrement inférieur à 10x20x5 mm³. Les variations des températures en orbite sont toujours responsables du décalage fréquentiel induit par les filtres. Souvent les gabarits de filtrage prévoient une bande passante plus large afin de couvrir toute la bande utile pour contourner le problème de la variation de la température. Dans le cadre de notre projet, nous proposons d'étudier une nouvelle formulation d'alumine stable en température qui répondra au besoin du filtrage spatial.

Dans la partie deux de ce chapitre nous présenterons les techniques de filtrage conventionnelles et ensuite nous aborderons les différents filtres en bandes Q et V que nous avons trouvé dans la littérature.



IV. Technologies de filtrage conventionnelles

III.1 Filtres à lignes couplées

Les filtres à lignes couplées sont composés de plusieurs sections de lignes $\lambda/4$ comme nous pouvons le voir sur la Figure I-6.

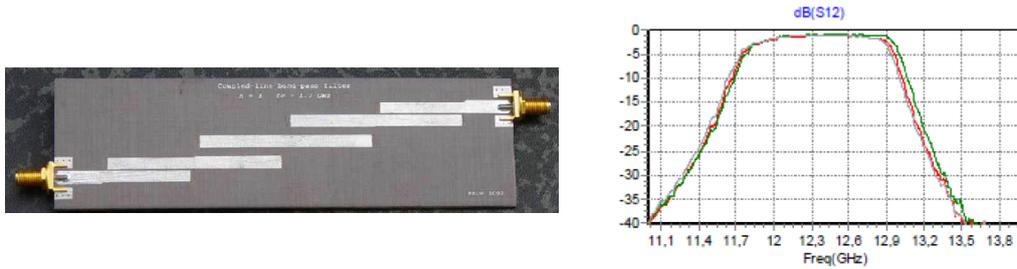


Figure I-6- Filtre à lignes couplées [46]

Le choix de la fréquence dépend de la longueur de la ligne et le couplage de proximité est contrôlé par le gap qui sépare les lignes. Cette technologie est utilisée pour concevoir des filtres avec des bandes passantes inférieures à 20%. L'encombrement important de cette technologie ainsi que son niveau de réjection hors bande faible réduit son intérêt pour les convertisseurs de fréquence.

III.2 Filtre Hairpin

Les filtres Hairpin de Thales Alenia Space sont réalisés sur des substrats d'alumine de 254 μ m d'épaisseur. Ils sont compatibles avec l'environnement hermétique du packaging. Ces filtres ont des facteurs de qualité à vide de l'ordre de 150, ce qui limite leurs performances. Plusieurs filtres sur substrat d'alumine ont été étudiés et fabriqués pour répondre aux besoins de filtrage pour les convertisseurs de fréquence dans les bandes C et Ku.

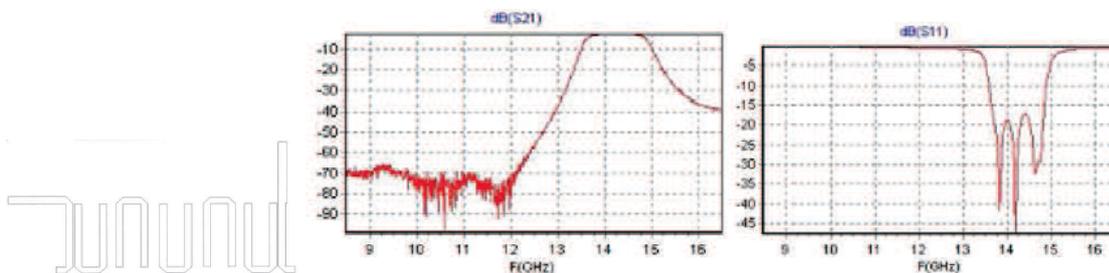


Figure I-7- Topologie et réponse fréquentielle d'un filtre conventionnel « hairpin »



Nous présentons sur la Figure I-7 la topologie ainsi que la réponse fréquentielle d'un filtre conventionnel de type « hairpin » [17]. Cette topologie de filtre présente plusieurs avantages, tout d'abord c'est une technologie simple avec un cycle de conception rapide. Elle est parfaitement maîtrisée et bénéficie d'une très bonne reproductibilité avec une faible sensibilité envers les tolérances technologiques jusqu'en bande Ku. Le filtre « hairpin » permet d'obtenir de large bande passante (jusqu'à 20%), mais avec de faibles niveaux de réjections proches de la bande utile.

III.3 Filtre DBR

Pour répondre aux contraintes de réjection proche de la bande, nous trouvons la topologie de filtrage DBR (Dual Behaviour Resonator) développée par le LAB-STIC [18] ou des topologies pseudo-elliptiques (Figure I-8). Les topologies de filtrage de type DBR nécessitent une complexification de la structure de base pour maîtriser les remontées hors bande, ce qui limite son utilisation au-delà de la bande Ku. Par contre les filtres à topologie pseudo-elliptique rendent possible l'obtention d'une forte réjection au plus près de la bande utile. Cependant ces filtres sont sensibles aux dispersions technologiques comme nous pouvons le voir sur la Figure I-8.

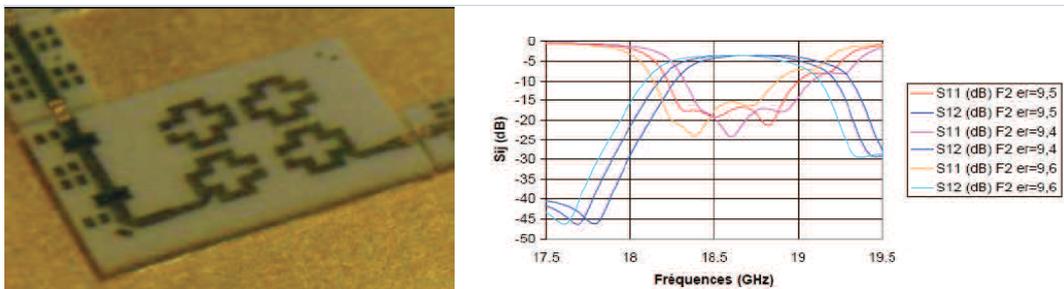


Figure I-8- Dispersion de la permittivité d'un filtre pseudo-elliptique en bande Ka

III.4 Filtres interdigués

Ces filtres présentent un gain d'encombrement par rapport aux filtres Hairpin grâce à l'utilisation des lignes quart d'onde et non pas des lignes demi ondes comme dans les filtres Hairpin. Ils sont caractérisés par un zéro de transmission à droite de la bande utile. Cela rend son utilisation intéressante pour les filtres Tx. La Figure I-9 présente un filtre interdigué ainsi que sa réponse fréquentielle.



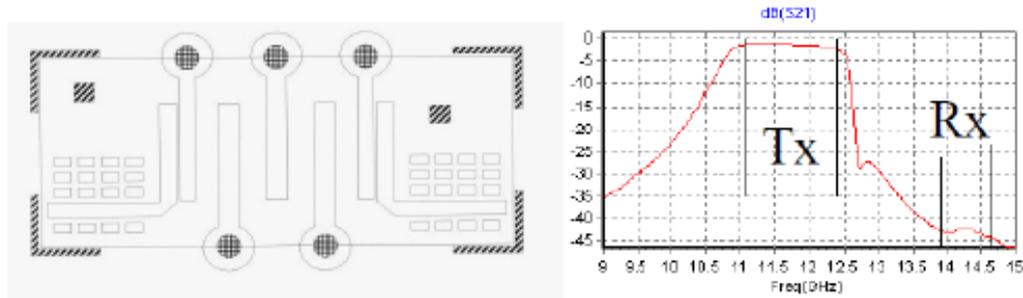


Figure I-9- Filtrage spatial et technologies multicouches céramiques [46]

Les filtres interdigités sont parmi les filtres les plus compacts mais ils sont aussi des filtres sensibles aux dispersions technologiques.

III.5 Filtrage SIW

La technologie planaire même si elle propose un faible encombrement avec une intégrité aisée et un faible coût, elle atteint ses limites à cause de son faible facteur de qualité qui implique des pertes d'insertion élevées. La technologie SIW (substrate integrated waveguide) se positionne comme un compromis entre les filtres planaire et les filtres volumique en termes de taille. Les filtres SIW sont des guides d'ondes rectangulaires réalisés dans le substrat à l'aide de vias. Ensuite le substrat ainsi que les trous sont métallisés pour définir les cavités SIW.

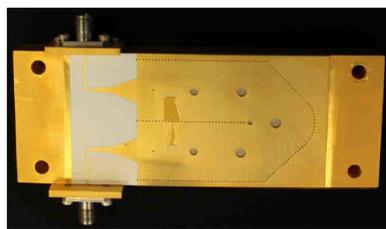


Figure I-10- Filtre SIW en bande C [46]

III.6 Filtrage à ondes acoustiques

Les filtres à ondes acoustiques sont basés sur deux variantes, la première concernant les filtres à ondes acoustiques de surface ou SAW (pour Surface Acoustic Waves), et la deuxième concernant les filtres à ondes acoustiques de volume ou BAW (Bulk Acoustic Waves). Ces filtres sont fabriqués à base de matériaux piézoélectriques comme le Lithium (LiNbO_3). Le principe est basé sur la conversion de l'oscillation électrique en oscillation mécanique ou bien dans le sens inverse. Les signaux mécaniques se propagent avec une vitesse inférieure à celle des signaux électriques, ce qui explique le gain d'encombrement et de poids offert par cette



technologie. Les filtres à ondes acoustiques ne sont pas sensibles aux interférences électromagnétiques. Par contre le fonctionnement de ces filtres est très dépendant des caractéristiques des matériaux qui les composent, ce qui rend la reproductibilité difficile.

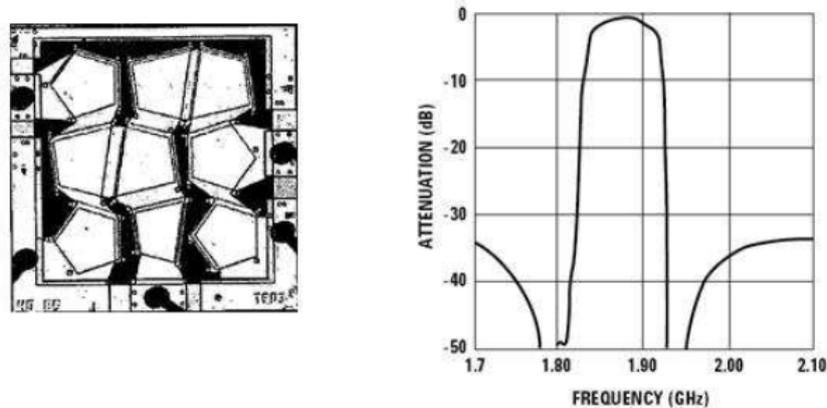


Figure I-11- Filtre BAW [47]

III.7 Filtrage à matériaux supraconducteurs

L'utilisation des matériaux supraconducteurs conduit à la réduction de l'encombrement et du poids du dispositif mais conduit aussi à l'amélioration des pertes d'insertion. En technologie supraconducteur les filtres planaires sont caractérisés par leurs compacités. L'utilisation de matériaux SHTC (Supraconducteur à Haute Température Critique) offre des facteurs de qualités à vide assez élevés ($Q_0 = 10^5$ à 1,95 GHz et 77 K) comparables à ceux des résonateurs volumiques à température ambiante [47]. Les films minces SHTC perdent leurs comportements supraconducteurs si la température de travail est supérieure à la température critique, de même pour le courant surfacique et la fréquence de travail. A cause de ces limitations, ces filtres doivent fonctionner à des faibles niveaux de puissances et nécessitent un système de refroidissement ce qui limite le gain en poids de ces filtres face aux filtres volumiques.

IV. Technologie de filtrage en bande Q et V

Une étude bibliographique sur les filtres en bande Q et V sera présentée dans cette partie ainsi que leurs techniques de fabrication afin d'évaluer leur pertinence et leur compatibilité avec notre activité. Cette étape servira à sélectionner la topologie de filtrage optimale pour le projet. Un tableau comparatif sera présenté à la fin de cette partie. La comparaison sera basée



sur les éléments clés de notre application. Dans ces bandes de fréquences, les précisions de fabrication nécessaires sont le point critique pour répondre aux exigences de filtrage dans ces bandes. Nous trouvons dans la littérature plusieurs technologies utilisées afin de garantir des performances intéressantes jusqu'à 60 GHz et au-delà.

Alberto del Olmo-Olmeda [19] présente un filtre en bande Q, qui se compose de deux blocs de métal séparés par un gap d'air. Ce filtre est réalisé en Aluminium en deux parties, un bloc inférieur qui contient les broches et un bloc supérieur. La Figure I-12 présente le filtre qui a été fabriqué. Il est centré à 40 GHz avec des pertes d'insertion de 1,1 dB, un facteur de qualité de 2630 et une bande passante de 2,5%. Le filtre fait 23 mm de longueur, 9 mm de largeur et une épaisseur de 300 μm . La technologie GGP (Groove Gap Waveguide) présente un intérêt pour la fabrication des composants passifs opérant aux fréquences millimétriques en raison de son processus de fabrication simple. La topologie de filtrage proposée ne présente pas une forte réjection près de la bande utile (Figure I-12) ce qui est un point très recherché dans notre projet.

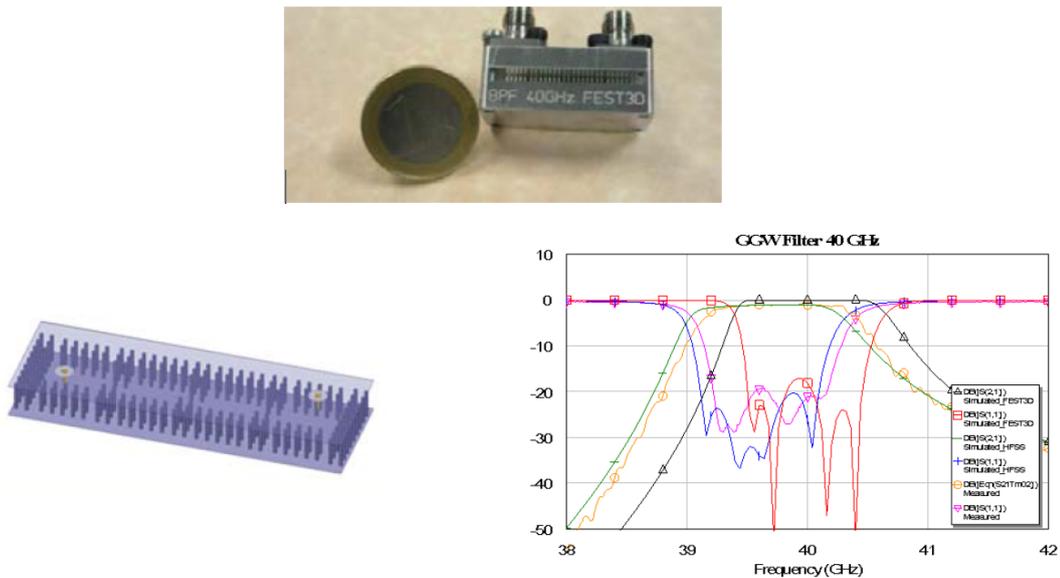


Figure I-12- Filtre quatre pôles en technologie GGP [19]

Un filtre quasi-elliptique 4 pôles développé par Jong-Hoon Lee [20] est présenté sur la Figure I-13. Ce filtre est choisi car il fournit une seule paire de zéro de transmission à des fréquences sélectionnées pour satisfaire le cahier des charges. Ce filtre présente beaucoup d'amélioration sur la sélectivité et en fait un intermédiaire possible entre les filtres type Tchebychev et elliptique.



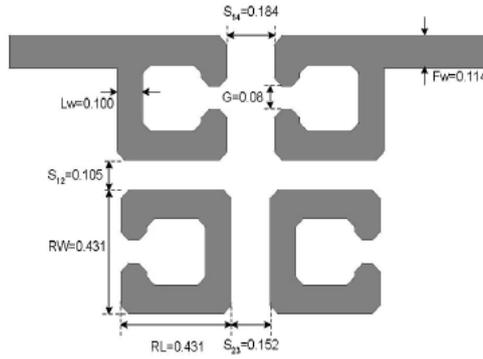


Figure I-13- Vue de dessus du filtre 4 pôles quasi-elliptique [20]

Il est fabriqué sur un substrat LTCC ($\epsilon_r=7,1$, $\tan \delta=0,0019$). Il est centré à 62 GHz avec des pertes d'insertion inférieures à 3 dB, et une bande passante de 3,5 GHz à -15 dB. Les dimensions du filtre sont : $3,075 \times 1,455 \times 0,106 \text{ mm}^3$. Nous remarquons sur la Figure I-14 un bon accord entre la simulation et la mesure. Ce filtre est fabriqué en technologie LTCC ce qui limite son facteur de qualité et le rend non exploitable dans notre application.

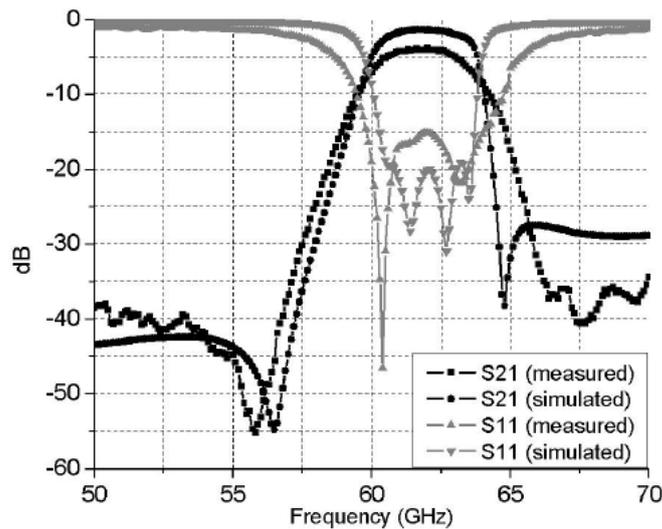


Figure I-14- Comparaison simulations et mesures du filtre quasi-elliptique [20]

T-M Shen [21] a présenté un filtre 4 pôles quasi-elliptique en technologie LTCC. Les résonateurs sont blindés par des vias métalliques qui jouent le rôle de murs verticaux. La particularité de ce type de filtre est le gain en encombrement ainsi que la très bonne sélectivité autour de la bande utile du filtre. Le couplage inter-résonateur est assuré par des fentes étroites au bord du mur commun ou au niveau des murs latéraux en utilisant des fentes inductives.



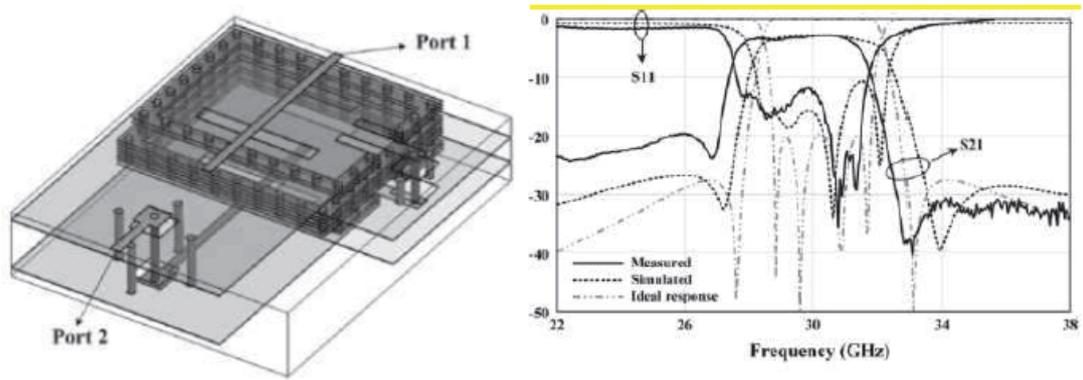


Figure I-15- Vue 3D du filtre - simulations et mesures de la réponse fréquentielle [21]

Sur la Figure I-15, nous avons la comparaison des réponses fréquentielles simulées et mesurées. Le filtre est centré à 29,5 GHz avec une bande passante de 3,93GHz à -3 dB. Les pertes d'insertion sont estimées à 2,8 dB avec une adaptation dans la bande supérieure à -12 dB. Un décalage fréquentiel entre la réponse théorique et celle mesurée est due à la dispersion dimensionnelle selon les auteurs. Ce filtre ne présente pas assez de rejection hors bande.

L. Rigaudeau [22] a présenté plusieurs travaux dans la bande Q, avec deux cavités résonantes autour de 35 GHz et 45 GHz, un filtre 2 pôles à 39 GHz et un filtre 3 pôles à 38 GHz. La cavité résonante est formée par un résonateur en U qui est constitué d'une ligne métallique planaire et de deux vias métalliques comme nous pouvons le remarquer sur la Figure I-16.

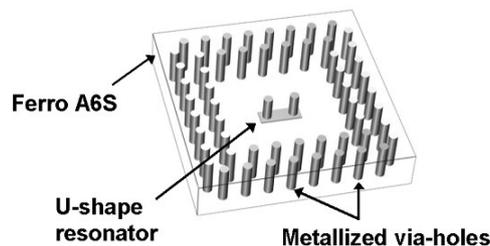


Figure I-16- Cavité résonante basée sur un résonateur en U [22]

Aucune extrémité des vias métalliques n'est connectée aux deux plans de masse ce qui nous donne un résonateur en circuit ouvert. Ce résonateur est fabriqué en technologie LTCC, il est centré à 45,5 GHz et présente un facteur de qualité mesuré de 230 (Figure I-17).



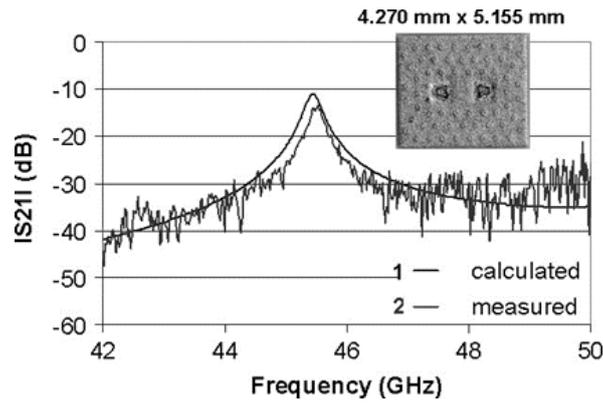


Figure I-17- Réponse fréquentielle du résonateur (comparaison mesure et théorie) [22]

La différence entre les deux cavités résonantes présentées par L.Rigaudeau [22], réside dans le fait que pour la deuxième cavité, le plot de masse supérieur est connecté à l'extrémité des vias métalliques. Cette deuxième cavité est appelée « résonateur en court-circuit ». Ce résonateur présente un facteur de qualité de 330 à 34,5 GHz. Sur la Figure I-18, nous pouvons voir le principe du résonateur 3D ainsi que la comparaison entre la réponse fréquentielle théorique et celle mesurée.

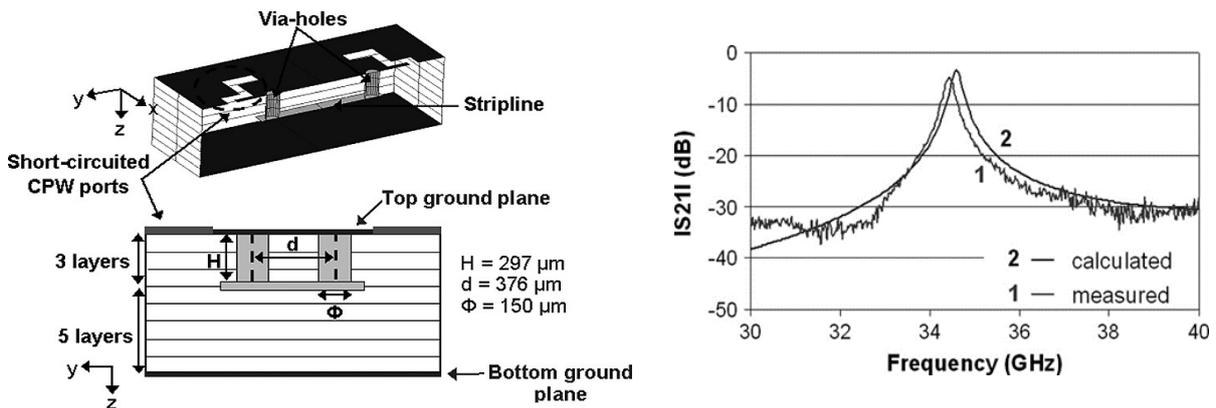


Figure I-18- Résonateur court-circuit (vue 3D) – réponse fréquentielle théorique/mesurée [22]

Le résonateur en court-circuit a été utilisé par la suite pour réaliser un filtre deux pôles, le couplage entre les résonateurs est assuré par l'espacement entre deux vias [22]. La Figure I-19 présente le filtre ainsi que la comparaison de la réponse fréquentielle du modèle théorique et celle mesurée. Nous remarquons un bon accord entre les deux réponses avec une fréquence centrale aux alentours de 39,4 GHz, une bande passante de 10,8% et des pertes d'insertion estimées à 0,7 dB.



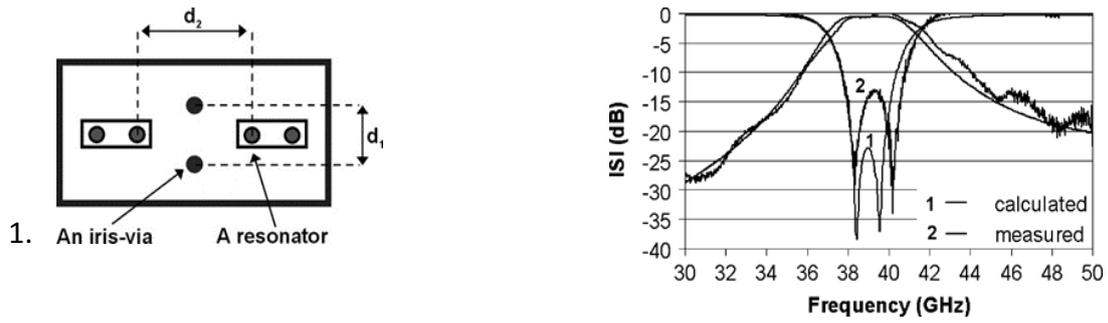


Figure I-19- Vue de dessus du filtre deux pôles – réponse fréquentielle théorie/mesure [22]

Un filtre trois pôles a été conçu sur le même principe avec l'introduction d'un couplage négatif pour réaliser un zéro de transmission proche de la bande utile. Le filtre mesuré est centré à 38,2 GHz avec une bande passante de 7,2% à -3 dB. Le niveau des pertes d'insertion est de 1,7 dB avec une adaptation inférieure à -10 dB dans la bande. L'ajout du zéro de transmission a rendu possible une bonne réjection en bande haute à 39,5 GHz (Figure I-20).

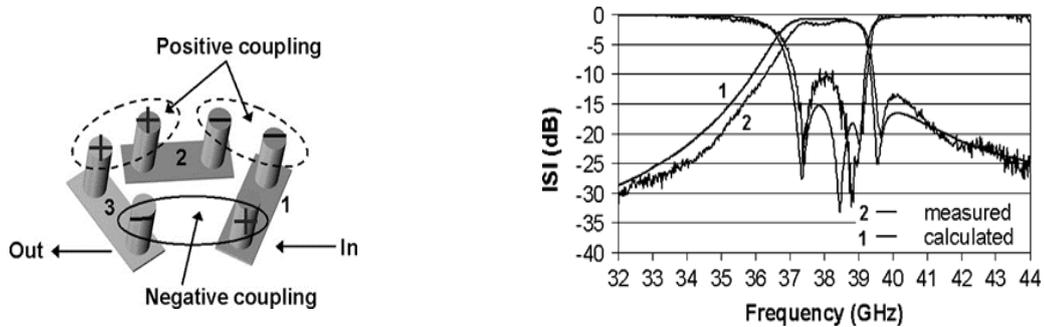


Figure I-20 – Types de couplage entre résonateurs – réponse fréquentielle théorie/mesure [22]

Un filtre en bande Q centré à 42,6 GHz a été conçu par P. Ferrand [23]. Ce filtre présente une bande passante de 7% à -3 dB avec une adaptation supérieure à 15 dB sur toute la bande utile. Les pertes d'insertion sont de l'ordre de 0,6 dB. Les cavités sont délimitées par des vias métalliques dans le diélectrique et pour réduire l'encombrement, il a utilisé des plots capacitifs. Le filtre ainsi que sa réponse fréquentielle sont présentés sur la Figure I-21.

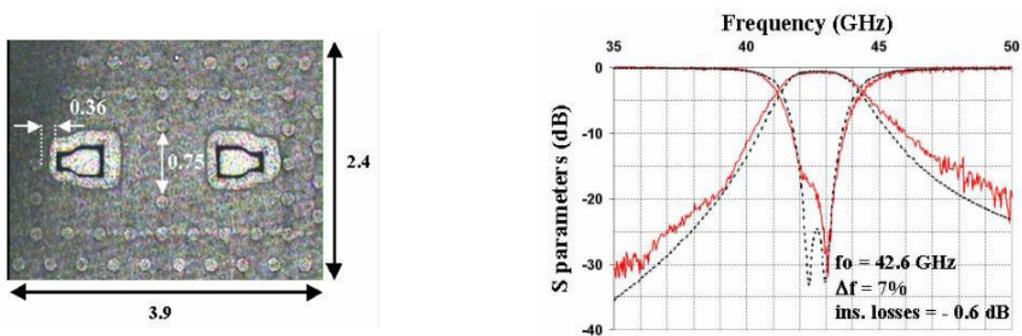


Figure I-21 – Vue de dessus du filtre – réponse fréquentielle théorie/mesure [23]



Dans le cadre du système MWS (système de multimédia sans fils), Y. H. Cho [24] présente un filtre en bande Q centré à 41,8 GHz avec une bande passante de 10,8%. Le filtre a des pertes d'insertion de l'ordre de 1,9 dB avec un encombrement totale de $5,5 \times 2,3 \times 0,6 \text{ mm}^3$. La Figure I-22 montre un bon accord entre la simulation et la mesure avec une meilleure réjection hors bande pour la mesure. La réponse fréquentielle a subi un décalage de la fréquence de l'ordre de 0,4% suite à une erreur technologique de 0,3%.

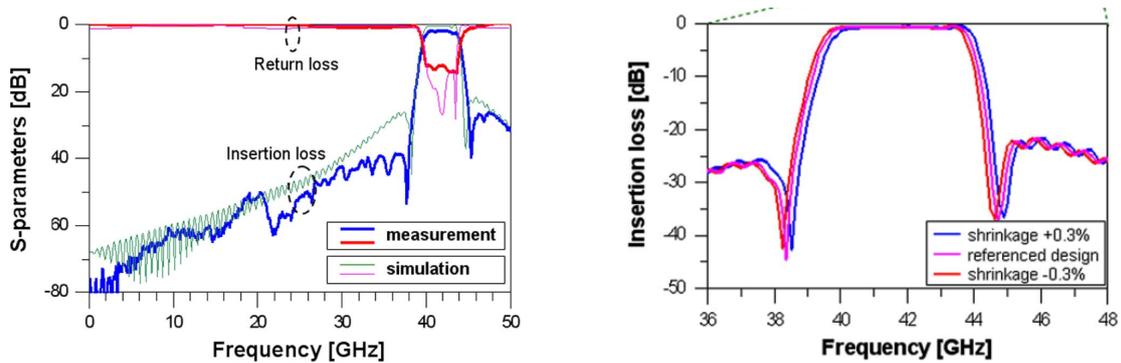


Figure I-22 – Comparaison des réponses fréquentielles simulée et mesurée – étude de dispersion technologique [24]

Un filtre deux pôles en guide d'onde a été réalisé dans le cadre des travaux de thèse de R. Valois [25], fonctionnant à 41,5 GHz. Il présente des pertes d'insertion de 1,6 dB et une bande passante de 7,2%. La Figure I-23 montre un bon accord entre la simulation et la mesure, mais nous remarquons des rejections hors bande qui sont inférieures à 30 dB.

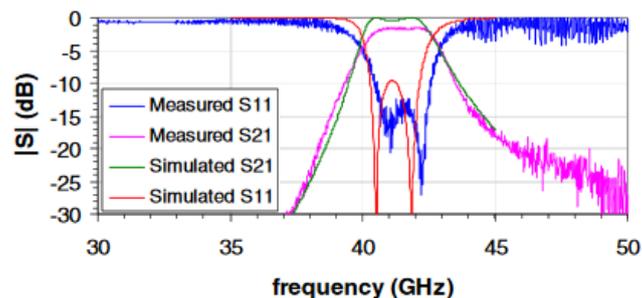


Figure I-23 – Comparaison de la réponse fréquentielle simulée et mesurée [25]

Paola Farinelli [26] présente la conception, la fabrication et l'essai d'un nouveau type de filtre à faibles pertes en bande Ka fabriqué en technologie micro-usinage multicouche. C'est un filtre pseudo-elliptique 4 pôles réalisé par l'empilement de six couches de silicium pour un encombrement réduit. Le filtre est basé sur des résonateurs $\lambda/2$ sur une membrane Si placés à l'intérieur des cavités (de blindage) et court-circuités aux deux extrémités (Figure I-24).



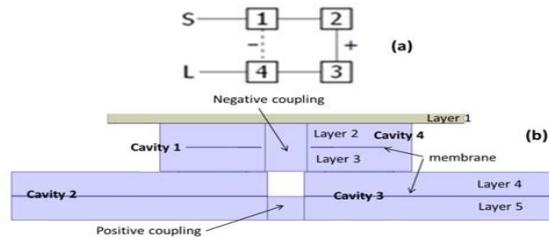


Figure I-24 – (a) Topologie filtre 4 pôles avec zéro de transmission. (b) Coupe transversale [26]

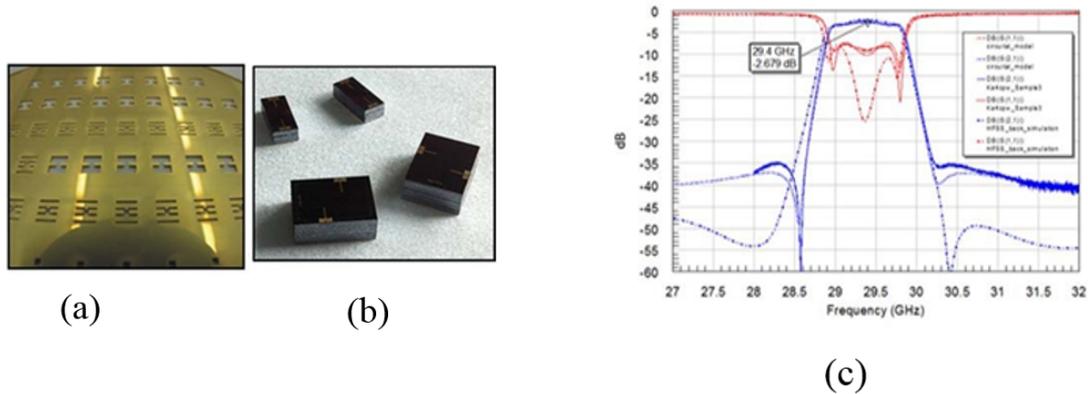


Figure I-25 – (a) Wafer après métallisation or (b) Filtre 4 pôles après découpe (c) Réponse fréquentielle théorie/mesure [26]

En ce qui concerne les cavités conventionnelles basées sur le mode de résonance TE_{101} , l’empreinte des résonateurs proposés est réduite de plus de 50% au détriment du facteur de qualité inférieur de 20%. Les mesures du filtre d’ordre 4 en bande Ka montrent des pertes d’insertion inférieures à -3 dB et un facteur de qualité supérieur à 500 (Figure I-25). La robustesse du filtre face aux tolérances de fabrication et d’assemblage a été vérifiée sur huit échantillons, montrant une bonne reproductibilité de la réponse du filtre.

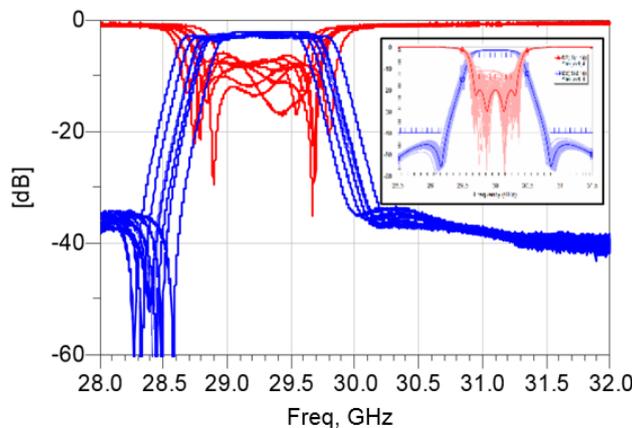


Figure I-26 – Mesures des performances des huit performances échantillons/ analyse de MonteCarlo [26]



Zhaosheng He [27] présente une nouvelle conception de filtre passe-bande bi-bande basé sur une structure hybride de type de structure SIW et de substrat ligne coaxiale intégrée (SICL). La structure hybride est réalisée par l'insertion du SICL dans le volume de SIW afin qu'il puisse effectuer la transmission des deux modes orthogonaux couplés.

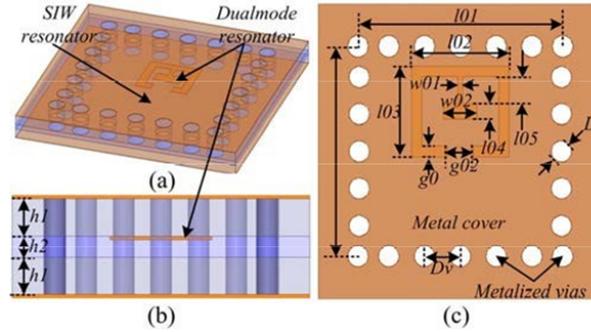


Figure I-27- (a) Layout du filtre hybride – (b) Vue 3D de la coupe transversale de la structure – (c) Vue du dessus [27]

Grâce à la structure hybride proposée, la bande de fréquence supérieure du filtre à double bande est partiellement contrôlée par le SIW, tandis que la bande de fréquence inférieure est principalement déterminée par les sous-résonateurs SICL individuellement. Ensuite, les deux structures sont assemblées entre elles par des ports d'entrée / sortie communs. Par conséquent, la structure hybride obtient une grande flexibilité pour concevoir des filtres bi-bande avec deux bandes passantes largement séparées, des bandes passantes arbitraires pour chaque bande et deux bandes passantes contrôlées indépendamment.

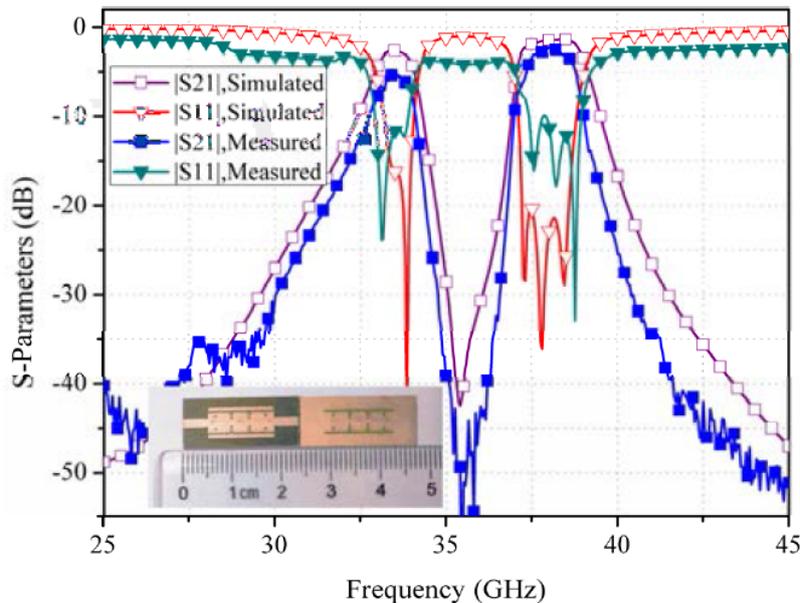


Figure I-28 – Réponse fréquentielle (théorie/mesure) du filtre Bi-bande [27]



La Figure I-28 illustre les paramètres S mesurés et simulés du filtre bi-bande. Le filtre proposé fonctionne aux fréquences 33,55 GHz et 38 GHz avec une bande passante à -3 dB de 900 MHz et 1,4 GHz respectivement. Les pertes d'insertion mesurées sont de 5 dB à 33,55 GHz et 2,2 dB à 38 GHz. L'adaptation dans la bande est meilleure que 12 dB pour la fréquence basse et 10 dB pour la fréquence haute. En raison des tolérances de fabrication et des défauts des connecteurs, les pertes d'insertion mesurées du filtre passe-bande proposé sont plus élevées que celles simulées. Le niveau d'isolement entre les deux bandes passantes est supérieur à 46 dB ce qui indique une bonne suppression des interférences entre canaux.

Jum Ye Jim [28] présente un nouveau filtre en guide d'onde compact à l'aide de plusieurs résonateurs, qui conduisent à de multiples zéros de transmission. La clé de la méthode proposée est de contrôler les emplacements des zéros de transmission. Quatre zéros de transmission, dont deux sont situés dans la bande d'arrêt supérieure, tandis que les deux autres sont dans la bande d'arrêt inférieure, sont réalisés par quatre résonateurs. Les accouplements entre les résonateurs et les emplacements des zéros de transmission sont soigneusement analysés et conçus, ce qui améliore la sélectivité ainsi que les performances hors-bande. L'auteur a développé le filtre en plusieurs étapes, il a conçu le premier résonateur pour la basse fréquence et il a créé deux zéros de transmission en couplant les deux résonateurs comme nous pouvons le voir sur la Figure I-29.

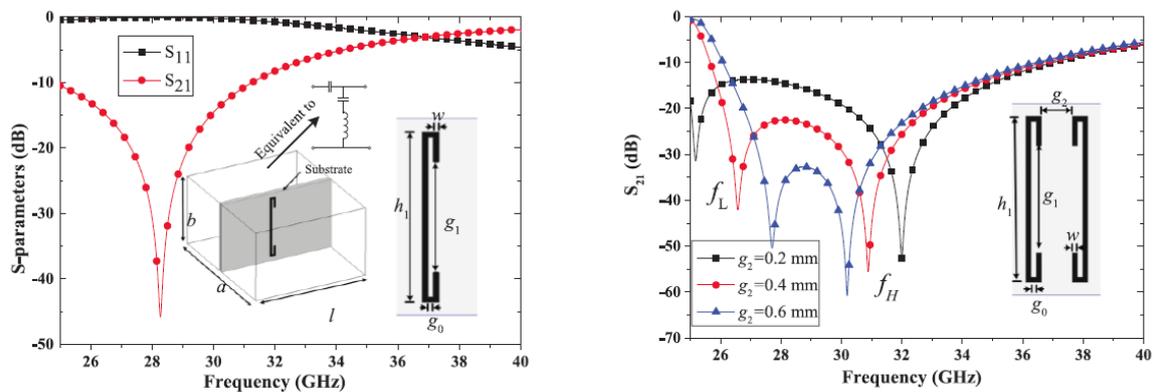


Figure I-29- Génération de deux zéros de transmission dans un guide d'onde à la fréquence basse [28]

Ensuite il a refait le même travail pour la fréquence haute pour retrouver deux zéros de transmission à 38 GHz comme nous pouvons le remarquer sur la Figure I-30.



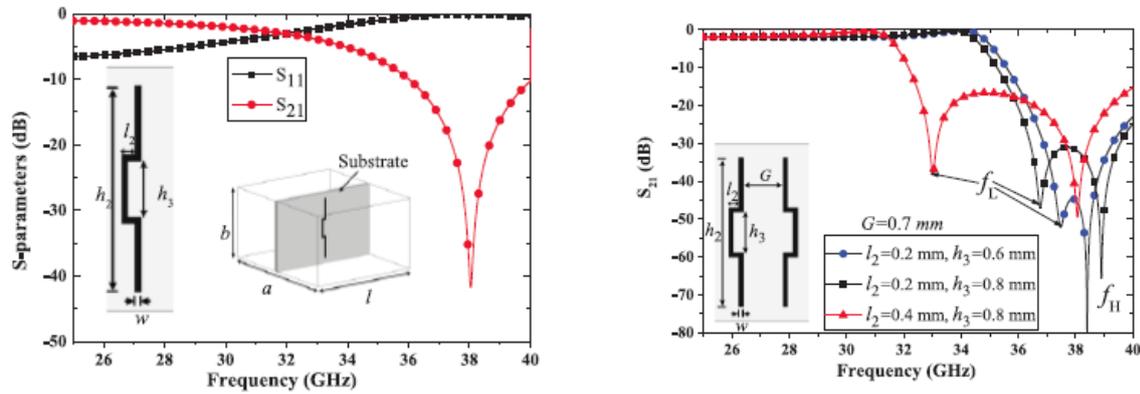


Figure I-30- Génération de deux zéros de transmission dans un guide d'onde à la fréquence haute [28]
 Enfin, il a assemblé toutes les parties pour réaliser la fonction de filtrage passe-bande. La Figure I-31 montre le filtre fabriqué ainsi que ses réponses fréquentielles simulée et mesurée. Deux zéros de transmission sont situés à 33,5 GHz et 36,6 GHz dans la bande d'arrêt supérieure et un troisième à 26 GHz dans la bande d'arrêt inférieure. Ces zéros améliorent grandement le niveau de rejection hors bande.

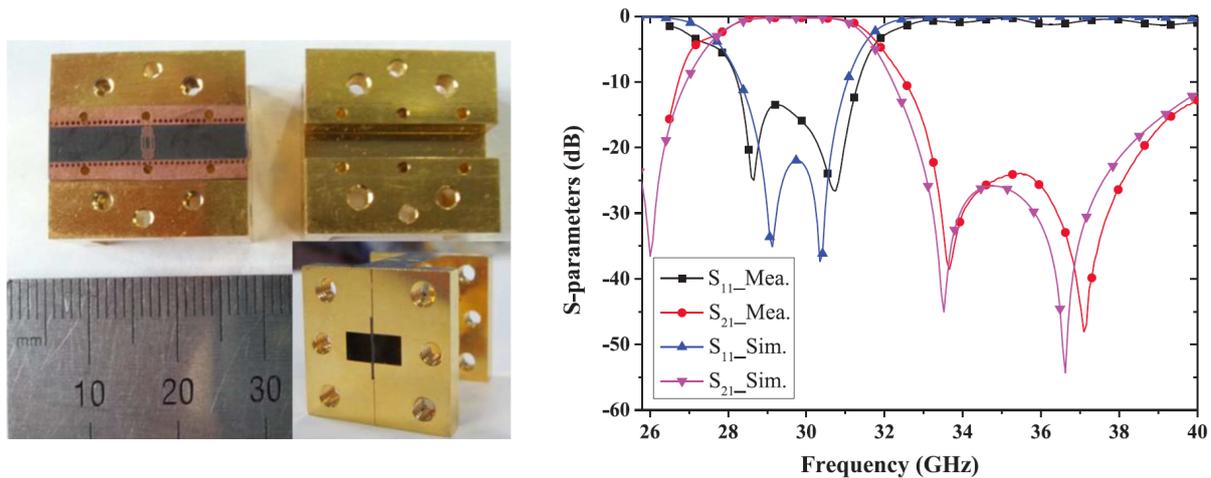


Figure I-31- Filtre fabriqué et ses réponses fréquentielles théoriques et mesurées [28]

Deux zéros de transmission à 33,66 GHz et 37,1 GHz sont clairement présentés dans les résultats de mesure. Les pertes d'insertion mesurées sont de 0,2 dB et la bande passante à 0,5 dB est de 2,5 GHz. Un léger décalage de fréquence peut être vu entre la simulation et les mesures, ceci est dû aux tolérances de fabrication et à la permittivité mal maîtrisée.

Behzad Ahmadi [29] propose un filtre centré à 35 GHz avec une bande passante utile de 1%. Les résonateurs sont composés de deux plaques séparées et sont fabriqués par fraisage de blocs métalliques. L'écart entre les deux plaques métalliques élimine la nécessité d'un contact électrique entre eux. Cette fonction permet aux résonateurs d'être empilés dans des couches



différentes. La fonction de filtrage est réalisée en produisant un couplage entre les résonateurs empilés comme nous pouvons voir sur la Figure I-32.

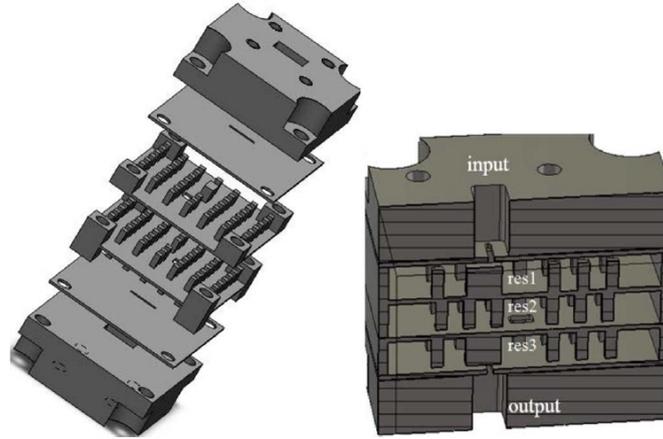


Figure I-32- Structure du filtre à base de résonateurs empilés [29]

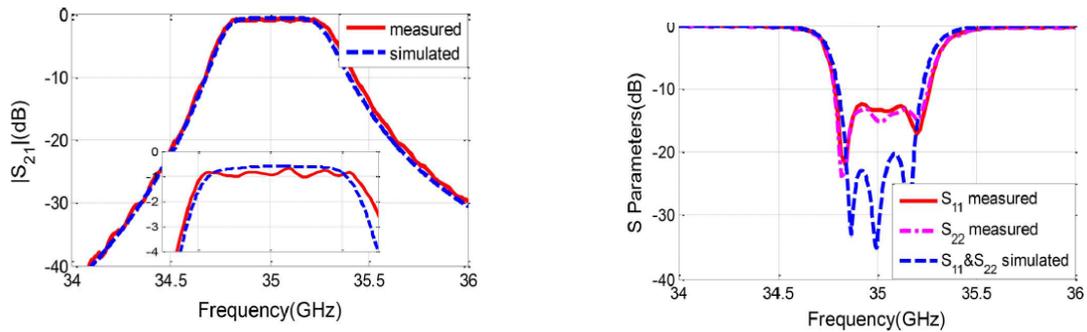


Figure I-33- Paramètres S théoriques/mesures [29]

Comme c'est montré sur la Figure I-33, un léger décalage de fréquence est induit, de plus, le coefficient de réflexion mesuré est supérieur à celui simulé. Cela pourrait être dû aux erreurs de fabrication ou plus probablement d'une certaine courbure sur la plaque mince (0,5 mm) qui assure le couplage d'entrée / sortie. Il convient de noter ici qu'aucun mécanisme de réglage n'a été utilisé. Les pertes d'insertion mesurées comme représentées sur la Figure I-33 sont d'environ 1 dB. Si nous ne prenons pas en compte les pertes dues à la dissymétrie, les pertes d'insertion du filtre produites par les pertes ohmiques et les pertes de fuite sont d'environ 0,48 dB, ce qui est très proche des 0,42 dB simulés. Le facteur de qualité mesuré est d'environ 1090.

Chan-Sei Yoo [30] présente un filtre en bande V en technologie Si-BCB. Dans ce travail, la résonance à 60 GHz est obtenue par la longueur de $\lambda_g/10$. Le filtre passe-bande utilisant des résonateurs en ligne couplés, est conçu sur la base de la fonction quasi-elliptique pour une



sélectivité plus élevée. Pour la fonction de filtrage quasi-elliptique les couplages positifs et négatifs entre les résonateurs en ligne couplées sont évalués. Le couplage positif est réalisé en plaçant deux résonateurs parallèles et antiparallèles pour le couplage négatif, comme illustré sur la Figure I-34.

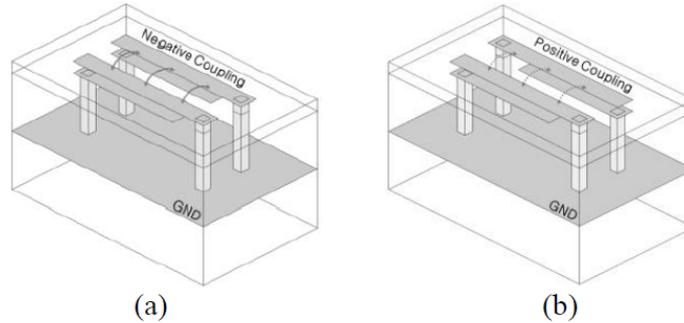


Figure I-34 – Les structures de couplage entre résonateurs : (a) Couplage positif (parallèle) (b) Couplage négatif (antiparallèle) [30]

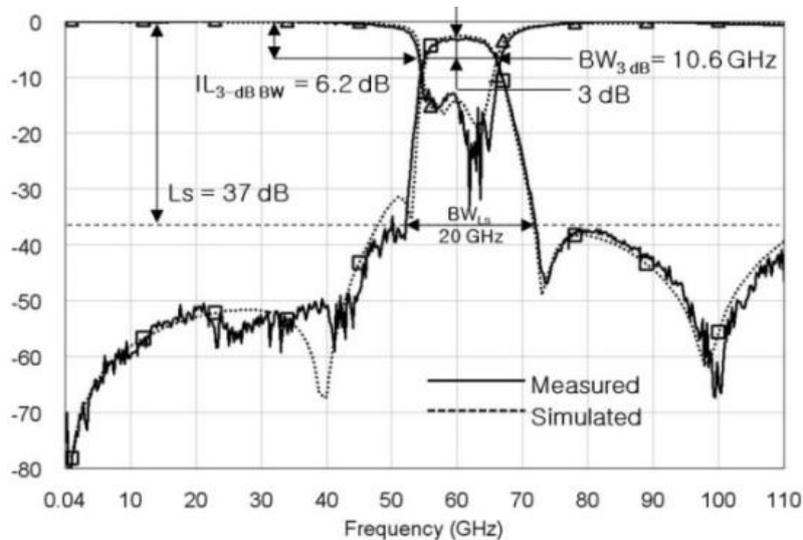


Figure I-35- Réponse fréquentielle du filtre théorie/mesure [30]

Nous remarquons un bon accord entre la réponse simulée et celle mesurée. Ce filtre présente des réjections hors bande très intéressantes avec un niveau inférieur à -38 dB entre 0,04 GHz et 110 GHz. Le filtre est centré à 60,4 GHz avec une bande passante à -3 dB de 17,5%. Les pertes d'insertion sont de l'ordre de 3,2 dB avec une adaptation dans la bande supérieure à 13 dB. A l'issue de cette étude bibliographique, nous avons comparé l'ensemble des filtres présentés précédemment dans le Tableau I-1. Les critères de comparaison ont été la fréquence de travail, les pertes d'insertion, la bande passante, l'encombrement, le facteur de qualité, la technologie utilisée et le niveau de réjection hors bande.



Références	Fréquence GHz	Bande passante	Pertes d'insertion	Dimensions	Facteur de qualité	Technologies	Réjection hors bande
[19]	40	2,5%	1,1 dB	$3,06 \lambda_g \times 1, 2 \lambda_g \times 0, 46 \lambda_g$	2630	GGP	-
[20]	62	5,7%	<3 dB	$0,69 \lambda_g \times 0, 88 \lambda_g \times 0, 06 \lambda_g$	500	LTCC	++
[21]	29,5	13,3%	2,8 dB	$0,91 \lambda_g \times 0, 55 \lambda_g \times 0, 16 \lambda_g$	103	LTCC	++
[22]	38,2	7,2%	1,7 dB	$1,56 \lambda_g \times 1, 79 \lambda_g \times 0, 24 \lambda_g$	330	LTCC	++
[23]	42,6	7%	0,6 dB	$1,34 \lambda_g \times 0, 83 \lambda_g \times 0, 2 \lambda_g$	350	LTCC	+
[24]	41,8	10,8%	1,9 dB	$2,05 \lambda_g \times 0, 86 \lambda_g \times 0, 22 \lambda_g$	333	LTCC	+++
[25]	41,5	7,2%	1,6 dB	***	400	LTCC	+
[26]	29,4	3%	2,6 dB	$0,87 \lambda_g \times 1, 13 \lambda_g \times 0, 063 \lambda_g$	500	micromachining technology	+
[27]	33,5 38	2,7% 3,7%	5 2,2	$0,63 \lambda_g \times 1, 5 \lambda_g \times 0, 09 \lambda_g$	153 263	SICL SIW	+ +
[28]	30	8,5%	0,2 dB	$1,69 \lambda_g \times 1, 55 \lambda_g \times 1, 49 \lambda_g$	***	Guide d'onde	++
[29]	35	1%	0,48 dB	$0,15 \lambda_g \times 0, 124 \lambda_g \times 0, 019 \lambda_g$	1090	Guide d'onde	-
[30]	60,4	17,5%	3,2 dB	$0,2 \lambda_g \times 0, 1 \lambda_g \times 0, 15 \lambda_g$	500	Si BCB	+++

Tableau I-1 – Comparaison des filtres en bandes Q et V

- GGP (Groove Gap Waveguide)
- LTCC (Low Temperature Co-fired Ceramic)
- SICL (substrate integrated coaxial line)
- SIW (substrate integrated waveguide)



V. Conclusion partie II

L'ensemble des filtres présentés dans le Tableau I-1 ne présente pas une stabilité en température. Dans le cadre notre projet nous cherchons à concevoir des filtres à bande étroite inférieure à 3%. Un grand nombre des filtres trouvés dans la littérature sont à large bande à l'exception des filtres trouvés dans les travaux [19], [27] et [29] qui ont une bande passante inférieure à 3%.

Pour le filtre présenté dans le travail [19], il présente un niveau de rejection à droite de bande utile de l'ordre de 29 dBc insuffisant pour notre application car nous cherchons des niveaux supérieurs à 40 dBc. Pour le travail [27], le facteur de qualité est insuffisant et les pertes d'insertion sont élevées. Concernant le travail [29], nous retrouvons le même problème que le travail [19] avec des niveaux de rejection de l'ordre de 30 dBc et s'ajoute à ça l'encombrement de cette structure. Nous avons remarqué aussi que LTCC occupe une grande place dans les techniques de fabrication pour les applications en bande Q et V.

Les différentes technologies de fabrication présentées au cours de ce chapitre à l'exception du guide d'onde qui ne répond pas aux contraintes d'encombrement de notre application, ont des facteurs de qualité insuffisants.

Pour répondre aux besoins du projet, la cavité résonante diélectrique a été choisie pour la conception des filtres. Cette technique de cavité complètement remplie de matériaux céramiques et avec un blindage métallique sur les parois extérieures, offre un facteur de qualité assez élevé et compatible avec notre application (typiquement >1000).

Pour cette raison nous avons choisi de travailler avec des technologies de fabrication additive 3D céramique immature par rapport aux technologies présentées dans le Tableau I-1. Le moulage basse pression nous offre la possibilité d'avoir des filtres avec une dispersion dimensionnelle inférieure à 30 μ m et des facteurs de qualité supérieurs à ce que nous avons trouvé dans la littérature tout en gardant un encombrement qui répond à notre problématique. L'utilisation du moulage basse pression sera utilisé pour profiter de son reproductibilité afin de réaliser des séries importantes de pièces.

Nous allons travailler avec la stéréolithographie céramique et profiter de sa souplesse de conception d'objets 3D complexes non accessibles par moulage et la réalisation de



maquettage. Ces deux techniques de fabrications seront détaillées dans la troisième partie de ce chapitre afin de définir les contraintes de conception relative à chaque technique. Une présentation de différentes techniques de fabrications additives sera aussi présentée. Toutes ces techniques de fabrication seront comparées dans un tableau de synthèse qui sera présenté à la fin de ce chapitre.



VI. Fabrications additives

VI.1 Introduction

Dans le cadre de notre projet, deux techniques de fabrication seront évaluées. Nous allons utiliser la technologie de moulage basse pression (LPIM : Low Pressure Injection Moulding) pour la fabrication des filtres dans le but de profiter de sa pertinence en terme de précision atteignable (10 μ m en objectif principal). La réutilisation du même moule rend cette technique à faible coût si nous fabriquons un grand nombre de pièces. Nous allons aussi évaluer la technologie de fabrication additive SLA (stéréolithographie céramique) en bande Q et V et profiter de sa souplesse dans la conception des objets. Nous visons dans le projet d'améliorer la précision des objets fabriqués à travers l'utilisation d'un laser de diamètre 30 μ m. Cette technique de fabrication a été évaluée en bande Ku dans le cadre du projet FILIPX coordonnée par Thales Alenia Space France [42]. Au cours de ce projet, la stéréolithographie céramique a montré sa pertinence à fabriquer des objets 3D complexes. Dans cette partie du chapitre nous présentons quelques techniques de fabrications additives et nous détaillons plus particulièrement le moulage basse pression ainsi que la stéréolithographie céramique.

VI.2 Binder Jetting

VI.2.a Principe

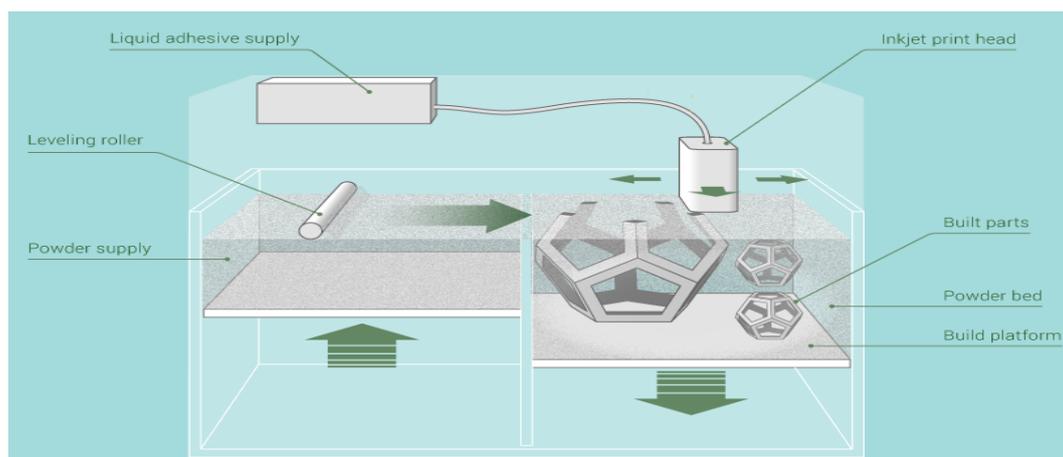


Figure I-36- Binder Jetting [31]



Une tête d'impression jet d'encre appliquant un liant liquide sur de minces couches de poudre est présenté sur la Figure I-36. Par collage des particules entre elles, la pièce est construite couche par couche. Un agent liquide de liaison est appliqué à travers la tête d'impression à jet d'encre pour coller les particules entre elles. La plate-forme de construction se baisse chaque fois que la couche précédente est achevée. Ensuite une nouvelle couche de poudre est étalée sur la surface d'impression grâce à un rouleau et la tête d'impression colle la couche suivante de la pièce. Avec cette technique de fabrication il n'y a pas besoin de support. Les pièces construites se trouvent dans le lit de poudre non liée.

VI.2.b Avantages et inconvénients

L'impression 3D par Projection de Liant fonctionne avec tous les matériaux qui sont disponibles sous forme de poudre. Le procédé est rapide, simple et de faible coût basé sur le collage de particules de poudre. Certaines machines peuvent imprimer des couleurs avec l'agent de liaison créant des pièces multi-couleurs. Les pièces produites avec cette technologie sont essentiellement des particules collées ensemble entraînant une fragilité dans la pièce et donc des propriétés mécaniques limitées (sinon traitées ultérieurement).

VI.2.c Caractéristiques / restrictions

- Volume du bac de fabrication maximale : 4000 x 2000 x 1000 mm³
- Taille minimale : 0,1 mm
- Tolérance typique : +/- 0,13 mm
- Epaisseur de couche minimale : 0,09 mm
- Vitesse de construction rapide



VI.3 Selective Laser Sintering : Frittage sélectif par laser

VI.3.a Principe

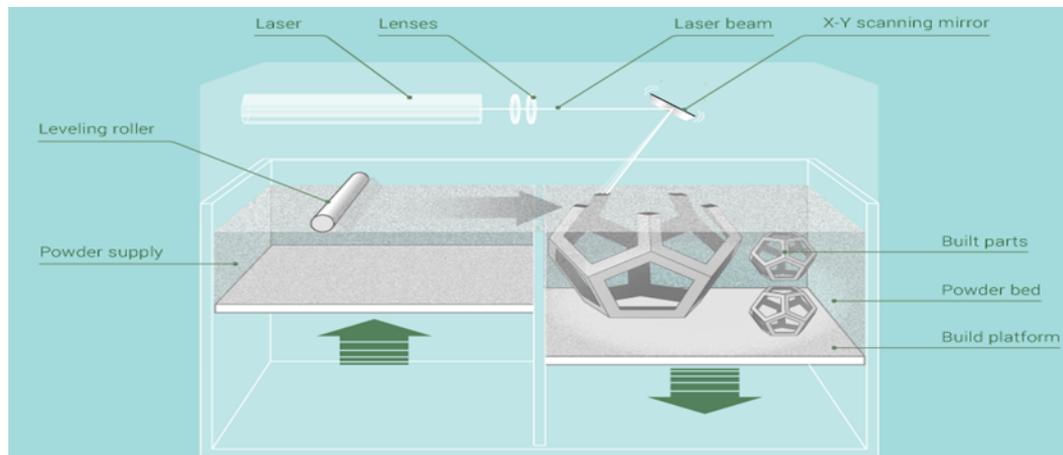


Figure I-37 - Laser sintering [31]

La machine de frittage par laser présentée sur la Figure I-37, va densifier une couche de poudre céramique sur une plate-forme de construction, qui est fondue par un laser IR (ou plusieurs lasers). La plate-forme de construction sera ensuite baissée d'une épaisseur de couche et la prochaine couche de poudre sera déposée sur le dessus. En répétant le processus, les pièces sont construites dans le lit de poudre. Le frittage laser ne nécessite pas de structures de support. Les pièces construites sont soutenues par la poudre de plastique non liée. Le volume de la construction entière, peut donc être rempli de plusieurs pièces, y compris l'empilage des pièces, qui sont alors toutes produites ensemble. La chambre de traitement est préchauffée et installée sous une atmosphère de gaz protecteur.

VI.3.b Avantages et inconvénients

Le frittage sélectif par laser peut réaliser des pièces en plastique standard avec de bonnes propriétés mécaniques. Le nombre de matériaux disponibles ne cesse de croître. Toutefois, les pièces n'ont pas exactement les mêmes propriétés que leurs homologues moulés par injection. Le frittage laser est souvent la solution la moins chère.



VI.3.c Caractéristiques / restrictions

- Volume du bac de fabrication maximal : $550 \times 550 \times 750 \text{ mm}^3$
- Taille minimale : 0,15 mm
- Tolérance typique : $\pm 0,025 \text{ mm}$ (peut être améliorée par post-traitement)
- Epaisseur de couche minimale : 0,1 mm

VI.4 Fused Deposition Modeling

VI.4.a Principe

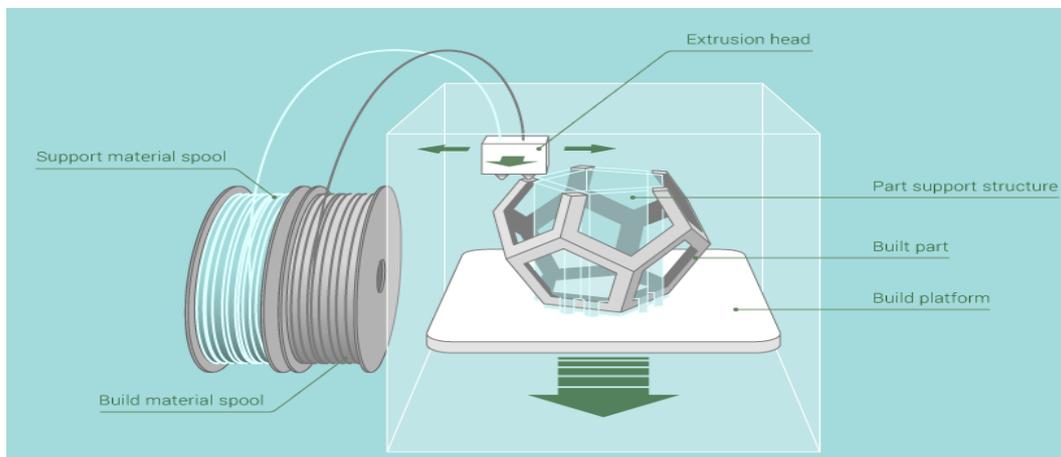


Figure I-38- Fused Deposition Modeling [31]

Le principe de l'impression 3D par dépôt de matière fondue est illustré sur la Figure I-38. Elle est basée sur le dépôt d'un filament plastique à travers une buse. Le matériau fondu est fixé sur la plate-forme de construction, où il se refroidit et se solidifie. En fixant couche sur couche, la pièce est construite. Le dépôt de fil fondu nécessite des structures de soutien qui ancre les pièces sur la plate-forme de construction. Grâce à l'utilisation d'une seconde buse, la structure de support peut être construite dans un matériau différent. Plusieurs pièces peuvent être fabriquées en même temps dans la mesure où elles sont toutes ancrées sur la plate-forme.

VI.4.b Avantages et inconvénients

La technique "Fused Deposition Modeling" utilise des matériaux standards, par exemple l'ABS ou le PC. Par conséquent, les pièces ont de bonnes propriétés mécaniques et sont durables dans le temps. Les pièces peuvent être post-traitées comme une partie plastique



produite par la fabrication conventionnelle. Avec cette technique de dépôt couche par couche, les pièces ont une anisotropie dans la direction z (direction verticale). En outre, les détails fins ne peuvent pas être réalisés.

VI.4.c Caractéristiques / restrictions

- Volume du bac de fabrication maximal : 914x610x914 mm³
- Taille minimale : 0,178 mm
- Tolérance typique : +/- 0,100 mm (peut être améliorée par post-traitement)
- Epaisseur de couche minimale : 0,178 mm

VI.5 Photopolymer Jetting :

VI.5.a Principe

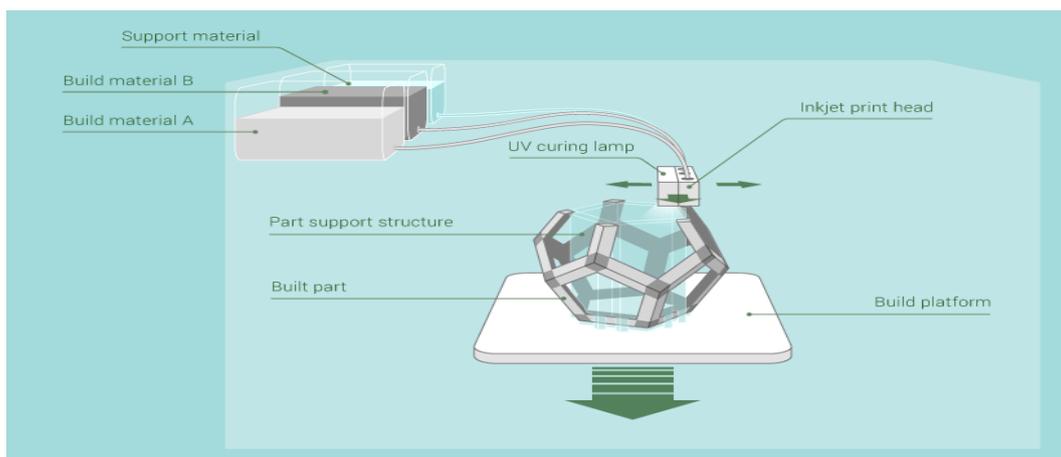


Figure I-39- Photopolymer Jetting [31]

La Figure I-39 présente le principe de la machine qui utilise des têtes d'impression pour déposer des liquides photopolymères durcissables sur une plate-forme de construction. Le matériau est durci immédiatement par des lampes UV et solidifié ce qui permet de construire des couches les unes sur les autres. En déposant couche sur couche, la pièce est construite. Plusieurs matériaux peuvent être déposés en même temps. Cette machine nécessite des structures de soutien. Ces dernières sont habituellement construites avec un matériau différent.



VI.5.b Avantages et inconvénients

Grâce à l'utilisation de têtes d'impression, divers matériaux peuvent être traités en même temps. Ceci permet de faire des pièces multi-couleurs et multi-matériaux. La technologie peut obtenir une bonne précision et finition de surface. Comme la stéréolithographie, la technique "Photopolymer Jetting" travaille avec des polymères photosensibles. Par conséquent, les pièces ne sont pas durables dans le temps pour les pièces plastiques et ont des propriétés mécaniques restreintes.

VI.5.c Caractéristiques / restrictions

- Volume du bac de fabrication maximal : 2540 x 800 x 500 mm³
- Taille minimale : 0,15 mm
- Tolérance typique : +/- 0,025 mm
- Epaisseur de couche minimale : 0,016 mm

VI.6 Injection basse pression

VI.6.a Principe :

La technologie d'injection basse pression (LPIM) consiste à injecter dans un moule à de très faibles pressions et températures des pâtes constituées d'une poudre céramique et d'un liant à base de paraffine. La température et la pression maximales d'utilisation (150°C et 5 bars) ainsi que la large variété de matériaux de moules qui en découle (acier, aluminium, silicone...) permettent de diminuer fortement les coûts de fabrication dans le cas d'une grande production car les moules sont réutilisables. Le cycle d'injection se fait de manière automatique, mais la manipulation des moules et le démoulage se font manuellement. Cette presse à injecter est constituée d'une cuve chauffante équipée d'un mélangeur, d'un tuyau d'alimentation et d'une platine destinée à recevoir les moules. Le moule est maintenu sur cette platine par un vérin pneumatique. Lors de l'injection, la pression est appliquée via de l'air comprimé directement dans le réservoir. S'il est possible de réguler indépendamment les températures de la cuve, du tuyau d'alimentation et de la platine, ces trois températures sont, dans la plupart des cas, identiques. L'injection de pièces de petites tailles nécessite de chauffer et de refroidir le moule. Par conséquent, la machine d'injection basse pression est



couplée avec un système de régulation par eau qui permet d'ajuster la température des moules de manière quasi instantanée. Ce dispositif permet ainsi à la fois de chauffer le moule jusqu'à 70°C puis de le refroidir quasi instantanément (dans le cas d'un moule en aluminium). La Figure I-40 présente le dispositif décrit précédemment.



Figure I-40 - Presse à injection basse pression et système de thermorégulation

Les formes que nous pourrions faire avec cet équipement et les différentes règles à appliquer pour garantir l'obtention d'une pièce en bon état dans la phase finale du processus de fabrication et surtout dans la phase de démoulage sont détaillées dans l'annexe 1.

VI.6.b Description du processus

Un organigramme des différentes étapes du procédé d'injection basse pression est présenté sur la Figure I-41.



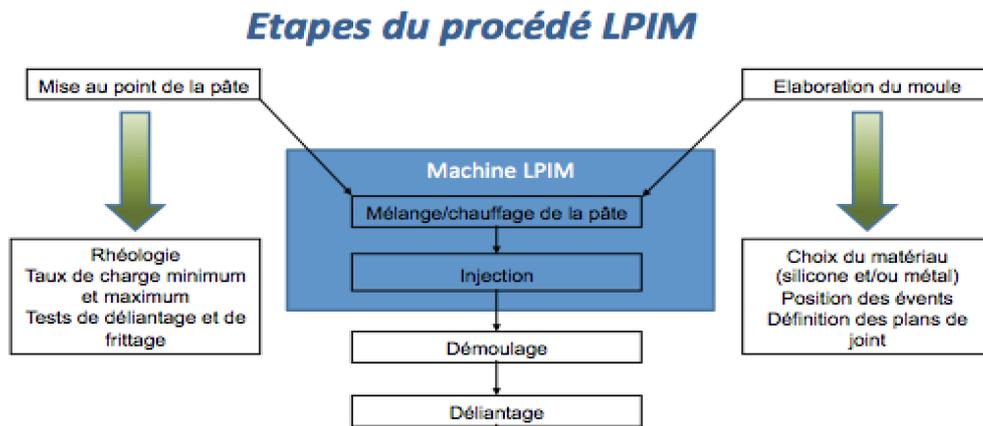


Figure I-41 - Etapes de procédé d'injection basse pression

Il y a deux principales actions : la mise au point de la pâte et la conception du moule. La formulation consiste à adapter le taux de charge et la rhéologie de la pâte au procédé et d'optimiser les traitements thermiques de sorte à obtenir une pièce dense et sans défaut. Quant à l'élaboration du moule, cette étape implique de bien choisir le matériau en fonction de la pièce à réaliser et surtout de parfaitement étudier la position des événements et la définition des plans de joint. Les pâtes d'injection sont optimisées en termes de taux de charge, de viscosité et d'ajouts afin de conférer au produit final une densité optimale sans déformation des pièces. Le moule est usiné en aluminium ensuite un revêtement en silicone est appliqué sur le moule pour servir par la suite au démoulage de la pièce.

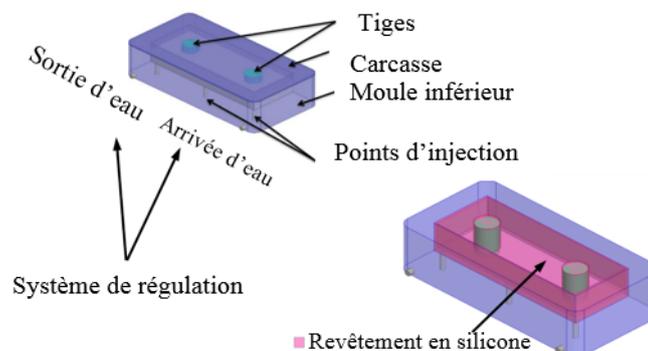


Figure I-42 - Moule pour injection basse pression

- Tiges pour assurer les vias dans la pièce.
- Système de régulation d'eau qui permet l'ajustement de la température du moule.
- Carcasse qui a pour rôle de maintenir les empreintes et d'assurer le bridage sur le plateau de la machine à moule.
- Points d'injections qui assurent l'injection de la pâte céramique dans le moule.
- Revêtement en silicone qui sert au démoulage de la pièce.



VI.7 Stéréolithographie

VI.7.a Principe

Une technique qui a été développée en premier lieu par J.C. André au laboratoire DCPR, à l'ENSIC [32] puis par Hull [33], cette technique de prototypage rapide est la première à avoir été commercialisée [34]. Elle utilise un laser UV qui polymérise un monomère liquide photosensible dans une cuve et est pilotée par ordinateur [35]. La pièce est construite couche par couche par l'abaissement de la plate-forme de construction dans la cuve.

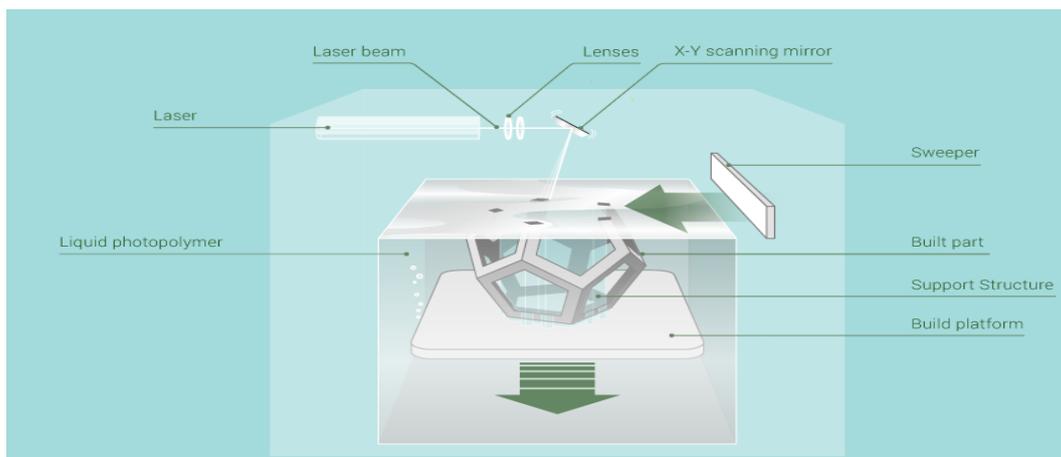


Figure I-43 - Stéréolithographie [31]

Le processus de fabrication par stéréolithographie commence par l'obtention d'un fichier de l'objet en 3D dessiné par CAO. L'objet est tranché en plusieurs couches permettant de définir les formes à réaliser comme il est illustré sur la Figure I-44 .

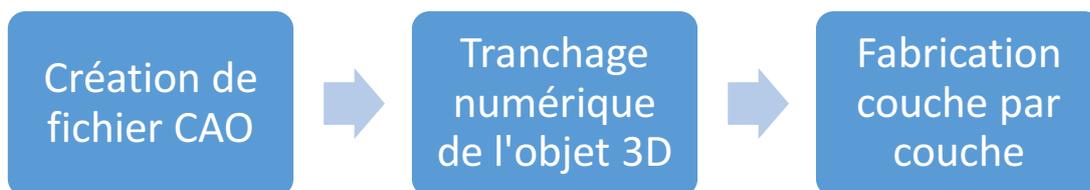


Figure I-44- Les étapes principales de la stéréolithographie [36]

Une réaction de polymérisation est déclenchée à partir d'une résine visqueuse composée d'un monomère et d'un photo-initiateur. Pour pouvoir contrôler l'épaisseur de dépôt, il faut jouer sur le réglage de la profondeur de la platine élévatrice, donnant la possibilité d'avoir des épaisseurs comprises entre 10 μm et plusieurs centaines de micromètres.



La Figure I-45 présente les deux techniques de fabrication utilisant un laser pour une polymérisation sélective.

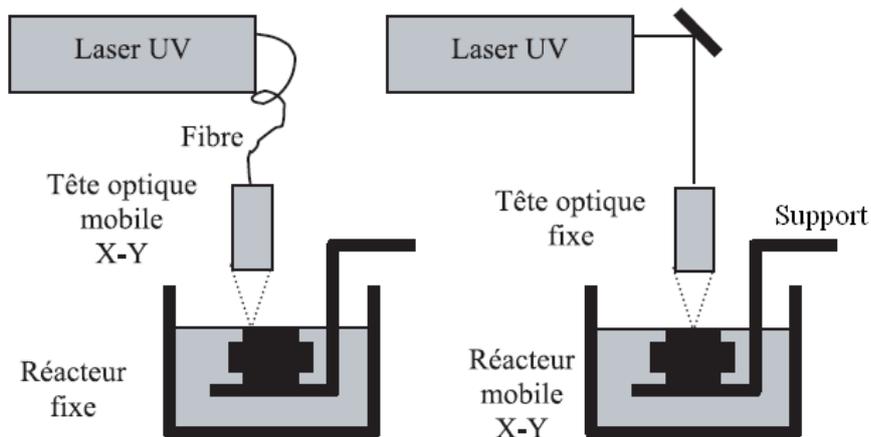


Figure I-45 - Fabrication SLA 3D avec systèmes d'illuminations vectoriels

Ces deux techniques utilisent un laser UV. Dans la première configuration (Figure I-45 à droite), le laser est envoyé sur un miroir galvanométrique géré par un ordinateur pour les déplacements sur les axes x et y . Pour la deuxième configuration (Figure I-45 à gauche), la tête optique est mobile et elle gère les déplacements sur les axes x et y . Le laser construit l'objet couche par couche selon les tranches définies précédemment, l'empilement des couches est assuré par le mouvement (selon l'axe Z) du support qui maintient la plate-forme baignant dans la résine. Pour assurer une bonne adhérence entre les différentes couches, il faut que l'épaisseur polymérisée soit supérieure à l'épaisseur de couche déposée. La fabrication d'une couche prend environ 1 minute mais tout dépend de la surface à polymériser et de la vitesse de balayage. La fin de cette étape est marquée par la désolidarisation de la pièce de la platine élévatrice ensuite il faut la rincer et pour achever la polymérisation l'objet est placé dans un four UV. Il existe une autre technique « stéréolithographie 3D par masque dynamique » [37] basée sur la projection d'une image bidirectionnelle en utilisant un masque dynamique, cette empreinte est donc polymérisée sur la surface de la résine. La répétition de cette étape avec différents masques donne à la fin l'objet 3D souhaité. L'utilisation de masques à cristaux liquides dynamiques et reconfigurables élimine les complications relatives à la fabrication de pièces très complexes [36]. La Figure I-46 explique le principe de la fabrication d'objets 3D céramiques par SLA 3D.



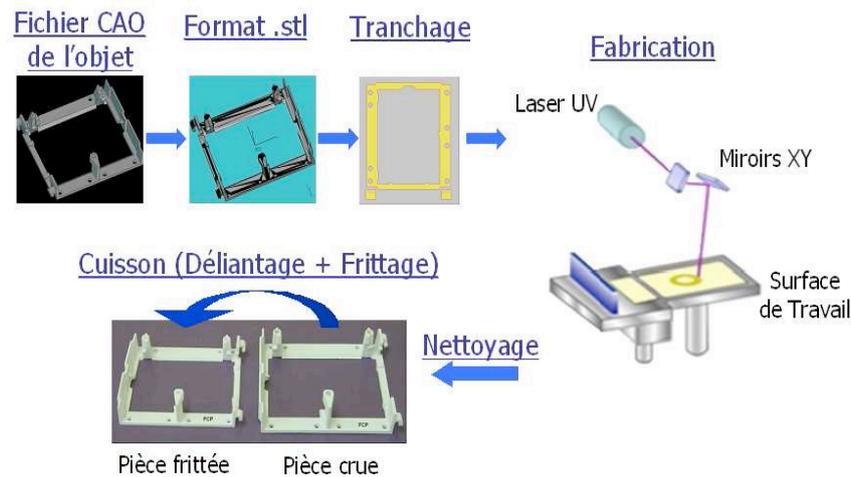


Figure I-46 - Principe de fabrication d'objets 3D céramiques par SLA 3D [38]

VI.7.b Avantages et inconvénients

La stéréolithographie peut construire de grandes pièces avec une très bonne précision. Une large gamme de matériaux permet de construire des pièces ayant des caractéristiques spécifiques. Cependant, la stéréolithographie appliquée aux plastiques fonctionne uniquement avec des photopolymères qui ne sont pas stables dans le temps et qui ont des propriétés mécaniques restreintes ce qui n'est pas le cas pour les pièces céramiques après densification.

VI.7.c Caractéristiques / restrictions

- Volume du bac de fabrication maximal : 2100 x 700 x 800 mm³
- Taille minimale : 0,1 mm
- Tolérance typique : +/- 0,1 mm (peut être améliorée selon le laser utilisé)
- Epaisseur de couche minimale : 0,01 mm

VI.8 Applications de la stéréolithographie en télécommunication

Grâce à l'utilisation de matériaux céramiques qui possèdent des permittivités élevées et de faibles pertes, la stéréolithographie (SLA) a sollicité l'attention du secteur des télécommunications. Plusieurs dispositifs hyperfréquences ont été élaborés par cette technique de fabrication additive pour profiter de la souplesse qu'elle propose [39].



N. Delhote [40] a conçu un résonateur monobloc avec le support et la cavité adaptée, la permittivité du résonateur diélectrique est de 8,3 et sa tangente de pertes est de $1,3 \cdot 10^{-4}$. La Figure I-47 montre l'objet fabriqué par stéréolithographie ainsi que sa réponse fréquentielle.

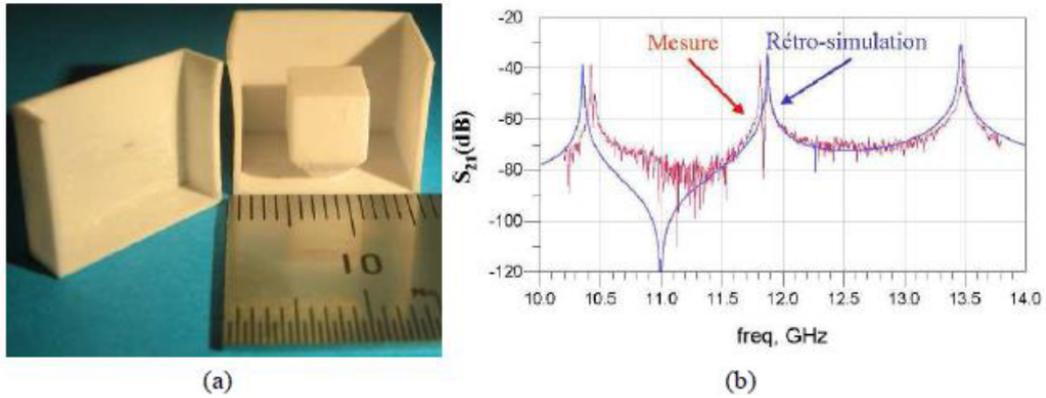


Figure I-47- Résonateur monobloc (a), Comparaison simulation/mesure (b) [40]

La cavité est métallisée sur les faces extérieures et une excitation coplanaire a été gravée pour coupler le résonateur. La fréquence de résonance du mode TE_{018} du résonateur est 11,88 GHz et il présente une isolation fréquentielle de 3 GHz comme nous pouvons le voir sur la Figure I-47.

C. Duterte et N. Delhote [41] ont également travaillé sur la micro-stéréolithographie pour réaliser un guide d'onde à bande interdite en bande D. Le μ SLA développée par le SPCTS repose sur des micro-miroirs pour dévier le chemin du faisceau laser et créer l'image de la surface polymérisée. Le guide d'onde à bande interdite est composé par un réseau de tiges cylindriques en alumine fonctionnant entre 110 GHz et 180 GHz. La Figure I-48 (c) montre un bon accord entre la simulation et la mesure et valide cette technique de fabrication au-delà de 100 GHz.

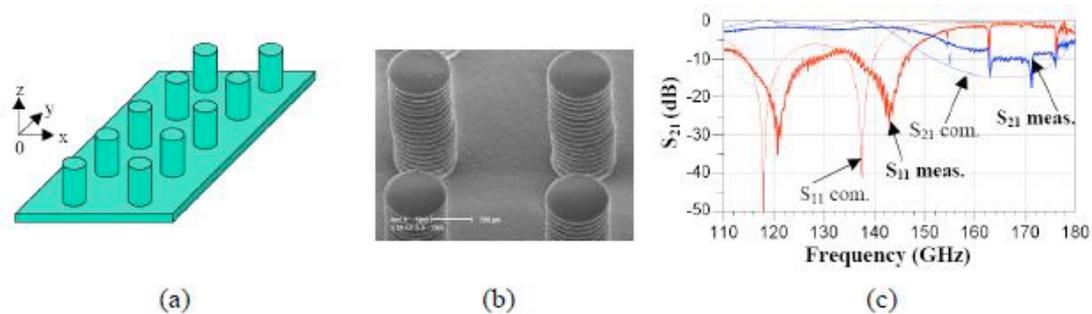


Figure I-48 - (a) Vue 3D du cristal ; (b) Photographie SEM de quatre cylindres ; (c) Réponses simulées et mesurées correspondantes [41]



A. Khalil [42] a proposé pendant sa thèse un filtre 4 pôles dans la bande Ku fabriqué par stéréolithographie. Vues les dispersions dimensionnelles un changement de la réponse fréquentielle du filtre a été identifié. Nous pouvons observer un léger décalage fréquentiel et une désadaptation sur la Figure I-49. Au-delà de ces défauts de fabrication, la stéréolithographie a prouvé de nouveau sa pertinence pour les applications RF.

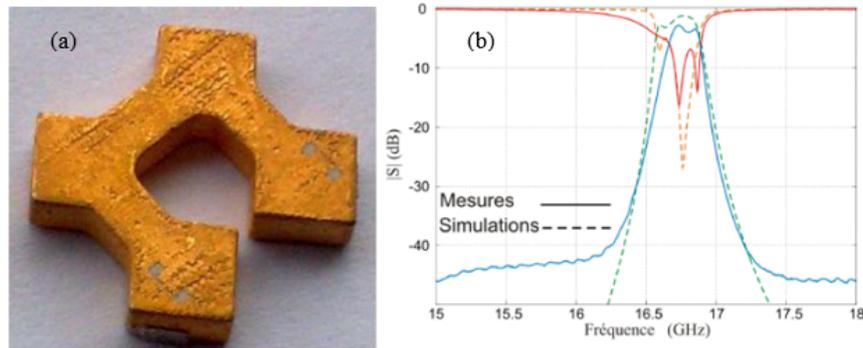


Figure I-49 - a) Photographie du filtre fabriqué par stéréolithographie céramique et métallisé. b) Comparaison entre les réponses mesurée et retro-simulée du filtre [42]

N. T. Nguyen, N. Delhote [43] ont aussi réalisé une antenne lentille à 60 GHz en utilisant le procédé de la stéréolithographie.

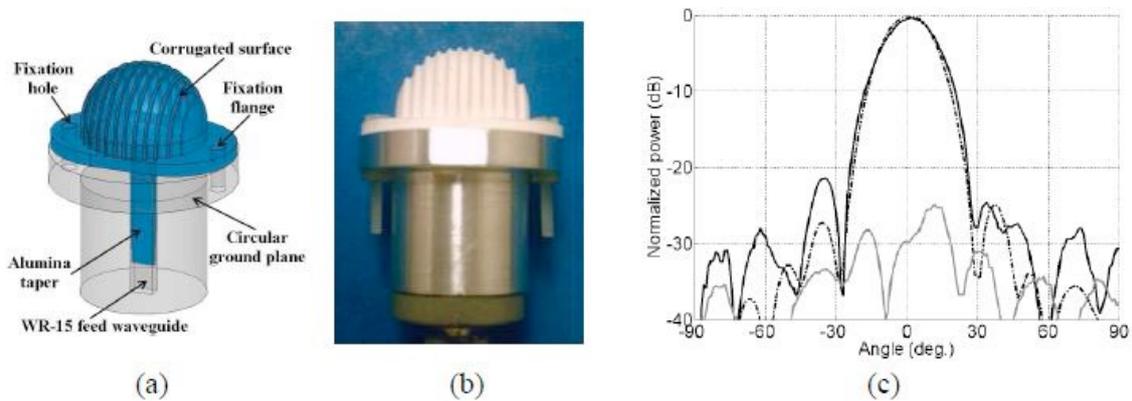


Figure I-50- (a) Vue 3D de l'antenne ; (b) Photographie du prototype ; (c) Diagramme de rayonnement à 60,5 GHz [43]

L'amélioration des performances de l'antenne est assurée par la surface linéairement corruguée. Cette antenne est mesurée à 60 GHz et ils ont utilisé un guide d'onde WR15 pour réaliser l'excitation. La Figure I-50 montre le bon accord entre la simulation et la mesure mais aussi la capacité de la stéréolithographie à fabriquer des objets exotiques.

F. Kouki [44] a réalisé au cours de sa thèse une antenne à 60 GHz fabriquée par stéréolithographie. La Figure I-51 montre le dispositif fabriqué par 3DCERAM [45]. La petite taille de l'antenne cornet fabriquée montre encore d'avantage l'adaptation de la



stéréolithographie à la fabrication de petits objets et donc son adaptation aux applications RF dans les bandes Q et V.

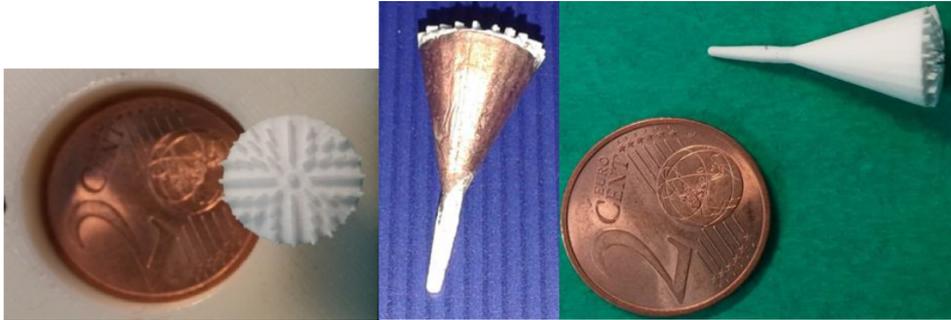


Figure I-51- Antenne cornet fabriquée par stéréolithographie céramique



VII. Conclusion partie III

Le Tableau I-2 présente une comparaison des différentes techniques de fabrication présentées dans cette partie. L'objectif du projet ATOMIQ est de travailler avec des technologies qui présentent des faibles dispersions dimensionnelles avec un bon état de surface et une rugosité la plus faible possible $< 1\mu\text{m}$ pour répondre aux exigences de métallisation.

Technologie	Avantages	Inconvénients	Tolérances de fabrication
SLS	-forme complexe -faible coût	-très lente -objet poreux et granuleux -rugosité importante ($10\mu\text{m}$)	$\approx 25\ \mu\text{m}$
BJ	-rapide -faible coût	-pièces fragiles -propriété mécanique limitée	$\approx 130\ \mu\text{m}$
FDM	-bonne propriété mécanique -durable dans le temps	-surface granuleuse -reproduction des petits détails	$\approx 100\ \mu\text{m}$
PJ	-multi matériaux -bonne précision -bonne finition de surface	-pièce pas durable dans le temps -propriétés mécanique restreint	$\approx 25\ \mu\text{m}$
SLA 3D	-réalisation de structures complexes -plusieurs matériaux céramiques à faibles pertes disponibles -faible rugosité ($< 1\mu\text{m}$)	-fabrication de volume fermé	$\approx 50\ \mu\text{m}$
Moulage basse pression*	-reproductibilité -état de surface -rugosité	-forme 3D complexe	$\approx 30\ \mu\text{m}$

Tableau I-2- tableau comparatif des différentes techniques de fabrication, * fabrication des moules par fabrications additives

Photopolymer Jetting présente une piste intéressante pour le projet ATOMIQ vu les tolérances de fabrication qu'elle offre ainsi que la possibilité d'avoir une pièce multi-matériaux. Cependant nous ne disposons que de la stéréolithographie céramique et du moulage basse pression dans le consortium d'ATOMIQ.



VIII. Conclusion chapitre I

Nous avons montré à travers ce chapitre l'évolution de l'industrie des satellites et la nécessité de monter en fréquence afin de répondre aux exigences des utilisateurs. Pour cela il est nécessaire de développer les nouvelles techniques de filtrage dans les bandes Q et V pour les charges utiles. Les filtres présentés dans la partie deux ne répondent pas à nos besoins de filtrage pour le spatial dans les bandes Q et V. Nous cherchons à répondre à des exigences sévères en termes de réjection hors bande et surtout à côté de la bande utile. L'utilisation de la stéréolithographie avec des matériaux ultra purs et très faibles pertes va nous permettre de concevoir des objets 3D innovants qui répondront aux besoins de filtrage liés au spatial à moyen et long terme.

Nous avons aussi présenté plusieurs techniques de fabrication additive et nous nous sommes focalisés sur la stéréolithographie et le moulage basse pression. Le choix de la stéréolithographie vient tout d'abord du fait que cette technique a démontré sa pertinence dans le cadre du projet FILIPX [42]. Dans le cadre de ce projet, plusieurs structures en bande Ku ont été fabriquées et testées et elles ont montré des bonnes performances (Figure I-52). Cette technique de fabrication est passée de l'étape de développement dirigée par le CTTC à l'étape d'industrialisation opérée par la société 3DCERAM. La fabrication des filtres dans le cadre de notre projet se fait par le biais de 3DCERAM à Limoges, cette proximité représente un avantage pour notre projet et facilite l'interaction pour la réussite de cette activité. Les filtres seront fabriqués sur la base de l'alumine ultra-pure développée par le SPCTS. Les détails de l'élaboration de cette alumine seront présentés dans le chapitre II. Des démonstrateurs seront aussi fabriqués par moulage céramique basse pression. Cette tâche sera effectuée par le CTTC sous-traitant dans le projet ATOMIQ. Cette piste est intéressante pour améliorer les tolérances de fabrication.



Figure I-52- Pièces fabriquées par SLA dans le cadre du projet FILIP



Chapitre II

Alumine Faible Pertes et Stable en Température



I. Introduction – Etude bibliographique

L'alumine a souvent été un sujet d'étude dans le cadre des applications électroniques hyperfréquences de par sa faible tangente de pertes et sa permittivité élevée. Cependant une grande partie de ces études a été réalisée dans des fréquences entre 10 et 14 GHz comme le montre la Figure II-1- Comparaison des fréquences de caractérisation utilisées pour les alumines [48]. Les propriétés diélectriques des matériaux dépendent de la fréquence de travail, raison pour laquelle nous ne pouvons pas appliquer directement les résultats de ces études au projet ATOMIQ. Certes la fréquence de travail impacte directement les propriétés diélectriques du matériau mais les tendances observées et les effets de la microstructure devraient être assez similaires malgré la montée en fréquence de caractérisation (20-75 GHz).

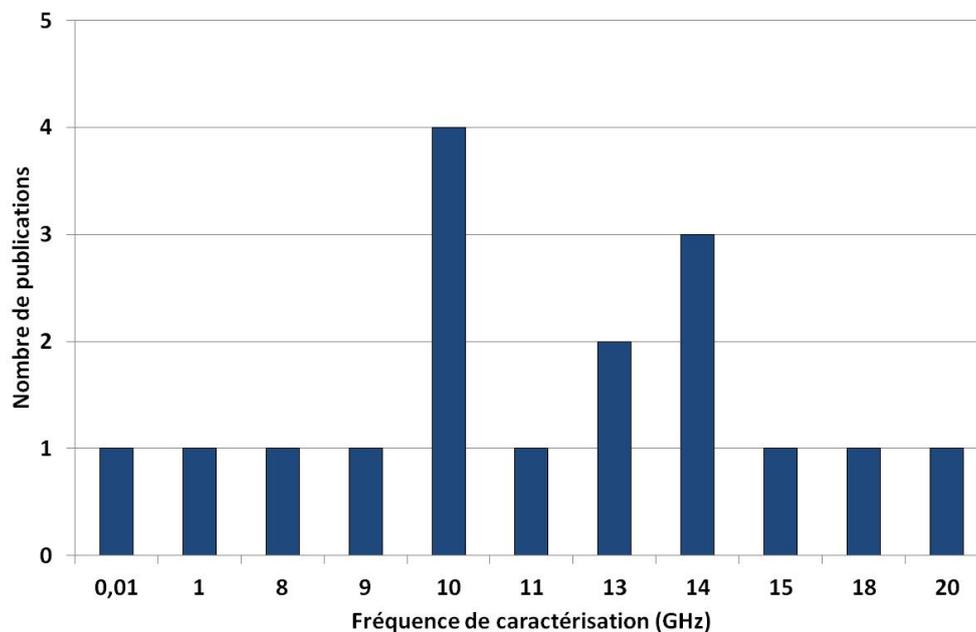


Figure II-1- Comparaison des fréquences de caractérisation utilisées pour les alumines [48]



I.1 L'impact de la composition chimique et de la microstructure de l'alumine

Dans la littérature, nous ne trouvons pas de publications réalisées sur l'impact des impuretés sur les performances diélectriques. Les impuretés présentes dans l'alumine viennent se ségréger aux joints de grain pendant le frittage engendrant ainsi une baisse de la constante diélectrique et une dégradation importante du facteur de qualité comme nous pouvons le remarquer sur le Tableau II-1. Si nous prenons l'exemple du Na₂O (Oxyde de sodium) et pour une quantité en m²g⁻¹ variant entre 6 et 800, la densité relative de l'alumine passe de 97,8 % à 99 % respectivement. Cette variation de la densité impacte directement le facteur de qualité qui passe de 3500 à 35000.

		Powder				
Impurity (ppm)	Na ₂ O	800	300	600	20	6
	MgO	400	1000	1800	16	5
	SiO ₂	400	400	400	85	18
	Fe ₂ O ₃	300	100	200	29	11
	CaO	200	40	300	...	...
	SO ₃	...	...	...	...	...
	CuO	...	...	...	13	4
Surface area (m ² g ⁻¹)		7	5	3	5–10	9–16
Density (%)		97.8	98.2	79.2	98	99
Q (at 9 GHz)		3500	1000	4500	37 000	35 000

Tableau II-1- Impact des impuretés sur la densité et sur le facteur de qualité de l'alumine [48]

L'objectif du projet ATOMIQ est de travailler avec des aluminés à très faibles pertes d'où la nécessité de focaliser les travaux sur des poudres de très hautes puretés comme celles produites par Sumitomo ou Taimei. Dès la fin des années 1990, les impacts des facteurs microstructuraux sur les propriétés diélectriques de l'alumine ont été bien analysés. S.J. Penn et N. McN. Alford ont étudié l'impact de la taille des grains de l'alumine et de la porosité sur les performances RF [49]. La Figure II-2 montre que la présence d'une porosité résiduelle dans le matériau après frittage cause une dégradation de la permittivité et de la tangente de pertes de l'alumine. En se basant sur des précédents travaux [50], la dégradation des propriétés diélectriques dépend de la surface de pores dans le matériau.



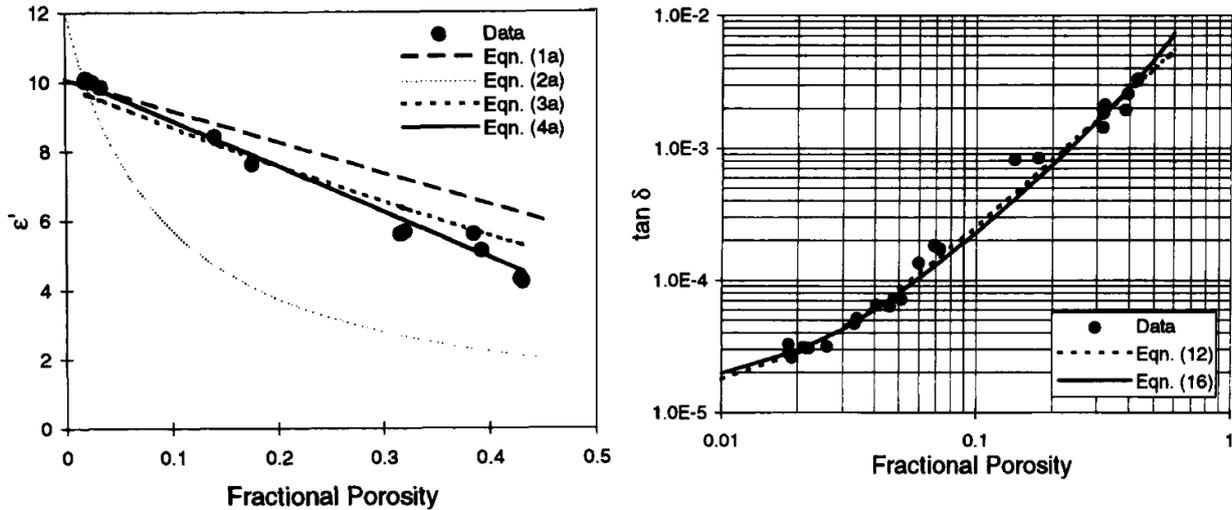


Figure II-2- Impact de la porosité sur la constante diélectrique et la tangente de pertes [51]

Une alumine présentant une taille de grain nanométrique (≈ 120 nm) a été utilisée dans les travaux de Huang et al [51]. Cette alumine a été mise en forme par pressage uniaxial à 400 MPa. La Figure II-3 illustre l'effet de la température de frittage de l'alumine avec un palier de 4 heures sur la constante diélectrique et la densité.

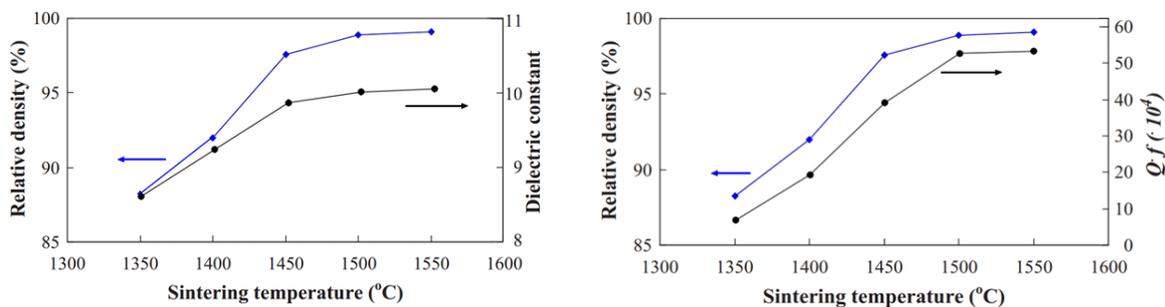


Figure II-3- Impact de la température de frittage sur la densité, la constante diélectrique et le facteur de qualité [51]

Nous pouvons voir que pour un passage de la température de frittage de 1350°C à 1550°C, avec un temps de maintien de la température de consigne constant de 4 heures, nous favorisons la densification de la céramique. La permittivité de l'alumine suit le même comportement que la densité et elle passe de 8,5 à 10 pour une température de 1350°C à 1550°C respectivement, la même chose est remarquée au niveau du facteur de qualité avec une hausse de ce dernier lorsque la densité augmente. Les différents résultats trouvés dans la littérature sont donc cohérents et tendent à démontrer que la constante diélectrique et le facteur de qualité dépendent fortement de la densité du matériau après frittage. Une étude



complète pour chaque alumine testée sera donc à prévoir pour déterminer le cycle thermique conduisant à la densité maximale du matériau après frittage.

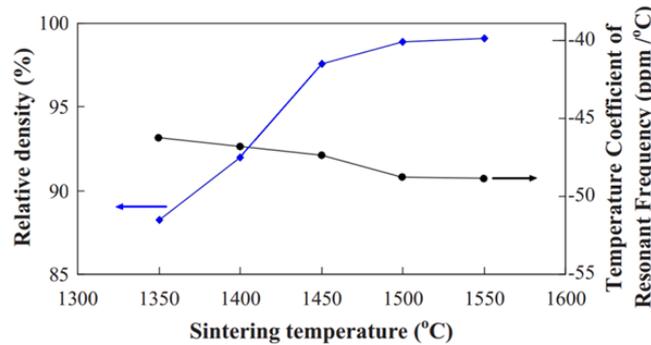


Figure II-4- Impact de la température de frittage sur la densité et le facteur de température [51]

L'impact de la densité sur le facteur de température a été analysé par Huang et al [51], ce dernier montre que la densification de l'alumine ne favorise pas le facteur de température qui doit être le plus proche de zéro. Contrairement aux facteurs de qualité et constante diélectrique, l'augmentation de la densité entraîne une dégradation du facteur de température mais qui reste néanmoins faible et de l'ordre de 2-3 ppm°C⁻¹ pour une variation de la densité entre 88% et 99% comme le montre la Figure II-4. Ce dernier résultat met en évidence un phénomène important : les paramètres favorables au facteur de température ne sont pas forcément favorables à la constante diélectrique et au facteur de qualité, et inversement. L'impact de la taille des grains d'alumine après frittage sur la tangente de pertes a été évalué par S.J. Penn et N.McN. Alford [49]. Sur la Figure II-5, nous voyons bien que les petits grains limitent davantage les pertes que les gros grains, montrant dans le cas d'une alumine à faible quantité d'impuretés que les joints de grains ne sont pas les seuls responsables des pertes diélectriques dans le matériau.

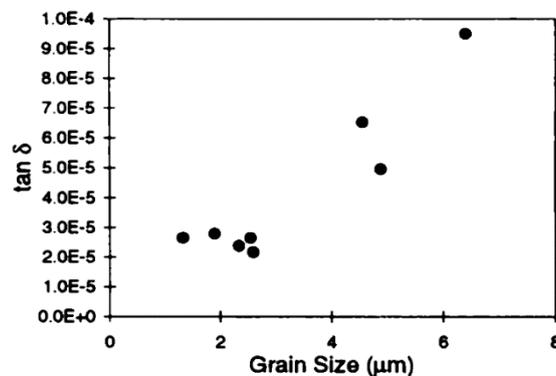


Figure II-5- Impact de la taille de grains d'alumines sur tanδ (densité = 98,1 ± 0,5%) [49]



Un résultat similaire a été obtenu en regroupant les données de deux autres publications [51, 52]. La Figure II-6 démontre ainsi que non seulement une faible taille de grain est favorable au facteur de qualité, mais aussi au facteur de température, ce dernier augmentant d'environ 10ppm. °C⁻¹ lorsque la taille des grains est divisée par 4.

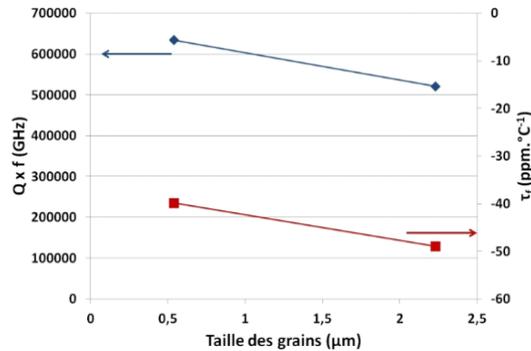


Figure II-6- Impact de la taille de grains sur les facteurs de qualité et température [51-52]

En conclusion, cette première étude concernant l'alumine seule a permis de mettre en relation certains facteurs microstructuraux avec les propriétés diélectriques du matériau. Il est possible d'obtenir un matériau présentant une constante diélectrique de l'ordre de 10 et un facteur de qualité élevé pour des fréquences allant jusqu'à 50 GHz mais pour cela il faut :

- Une alumine très pure afin de limiter voire empêcher la présence de phases secondaires aux joints de grains.
- Une taille de grains la plus petite possible, idéalement accompagnée d'une distribution granulométrique bimodale, pour assurer une bonne densification du matériau lors du frittage.

En revanche, le facteur de température étant propre au matériau, ce dernier semble peu impacté par ces modifications de la microstructure et varie entre -50 et -40 ppm. °C⁻¹. L'optimisation de ce facteur passe donc par d'autres procédés comme le dopage de l'alumine.

1.2 Dopage de l'alumine et son effet sur la microstructure et les propriétés diélectriques

Comme nous l'avons évoqué précédemment, l'optimisation du cycle thermique du frittage de l'alumine conduit à une amélioration significative de sa constante diélectrique ainsi que de son facteur de qualité. En revanche, le facteur de température appelé τ_f reste fortement négatif (-40 et -50 ppm°C⁻¹), des valeurs nécessitant des dispositifs de correction du signal dont le poids s'avère problématique dans le cas d'une application spatiale. Pour surmonter



cette problématique, il faut doper l'alumine avec des oxydes possédant des facteurs de température positifs, ce dopage va conduire à la stabilisation de l'alumine et permettre de retrouver une céramique dont le facteur de température est très faible voire idéalement nul. Les éléments grisés de la Figure II-7 montrent les différents dopants qui ont été testés dans des précédentes études.

Tableau périodique des éléments chimiques. Les éléments grisés indiquent des dopants mentionnés dans la littérature. Les éléments grisés sont : H, Li, Na, K, Rb, Cs, Fr, Be, Mg, Ca, Sr, Ba, Ra, Sc, Ti, Zr, Hf, Lu, Y, Nb, Ta, W, Re, Os, Ir, Pt, Au, Hg, Tl, Pb, Bi, Po, At, Rn, Th, U, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf, Es, Fm, Md, No, Yb, Uuo, et Uus.

Figure II-7- Dopants mentionnés dans la littérature

Le dopant le plus répandu dans la littérature pour la stabilisation en température de l'alumine est le dioxyde de titane TiO_2 ($\epsilon_r = 100$, $Q^*f = 50000$ GHz et $\tau_f = 450$ ppm $^{\circ}C^{-1}$). Ce dopant possède deux effets différents en fonction du taux de dopage. Pour un faible taux (<1%*m*), il favorise la densification de l'alumine en formant une phase secondaire aux joints de grains qui limite la coalescence. L'amélioration de la densification par un faible taux de TiO_2 conduit à l'augmentation du facteur de qualité. A forte concentration et à haute température (>1200 $^{\circ}C$) une formation importante du composé Al_2TiO_5 , étant moins dense que l'alumine entraîne une dé-densification accompagnée par une coalescence rapide des grains. La Figure II-8 montre que la présence importante de TiO_2 dans l'alumine aura un impact négatif sur le facteur de qualité, nous voyons aussi que l'optimum se situe à 0,5 %*m* pour obtenir le facteur de qualité le plus élevé.



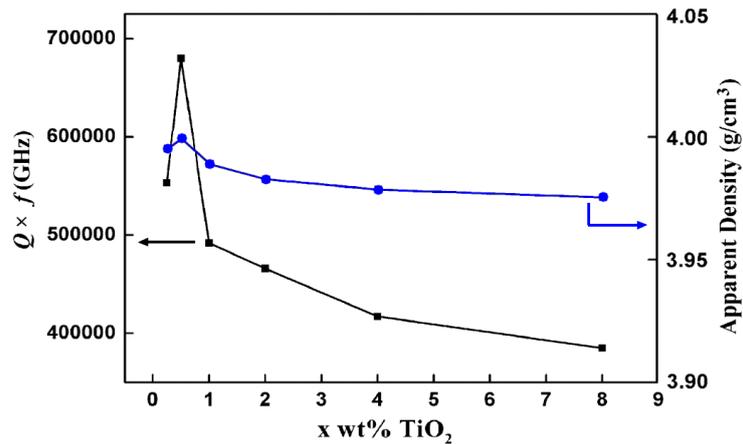


Figure II-8- Evolution du facteur de qualité et de la densité en fonction du taux de TiO₂ après frittage à 1400°C [53]

La correction du facteur de température ne réagit pas de la même manière que le facteur de qualité, ce dernier nécessite un faible de taux de dopage pour avoir une valeur élevée, cependant le premier a besoin d'une quantité plus importante pour être stable en température [53]. La température de frittage joue un rôle important puisque seul le TiO₂ semble impacter le facteur de température. À partir du TiO₂ et de l'Al₂O₃ et à des températures au-delà de 1200°C la formation du Al₂TiO₅ vient réduire remarquablement l'effet du dopant. A première vue, l'optimisation par le dopage au TiO₂ des facteurs de qualité et de température s'oppose donc.

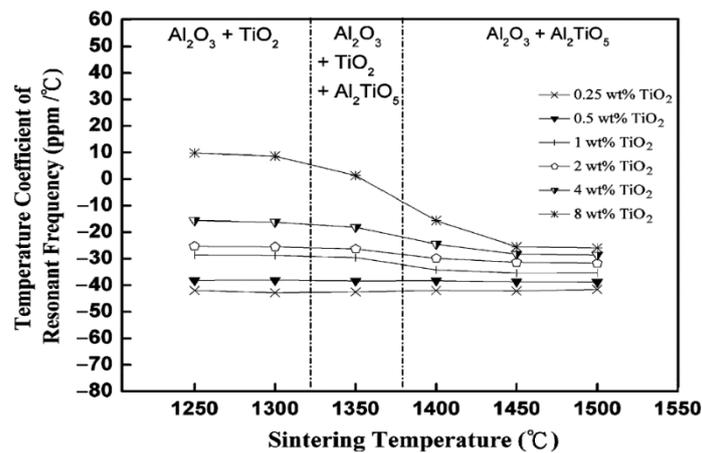


Figure II-9- Impact de la température de frittage et de la teneur en TiO₂ sur le facteur de température [53]

Une compensation partielle de la dégradation des performances RF a été démontrée par plusieurs études [54-55] en utilisant le recuit du matériau. L'objectif de ce recuit est de décomposer l'Al₂TiO₅ formé à des températures supérieures à 1200°C pendant la phase de



frittage. La reformulation de l'alumine et du dioxyde de titane via le recuit à 1100°C contribue dans le cas d'un ratio 90% Al₂O₃ – 10% TiO₂, à avoir un matériau avec un facteur de température proche de zéro et une constante diélectrique élevée. De plus, le facteur de qualité subit une légère amélioration par rapport à l'alumine dopée non recuit mais reste en dessous de celui d'une alumine pure. La Figure II-10 montre l'impact du temps de recuit à 1100°C sur la constante diélectrique, le facteur de température ainsi que le facteur de qualité pour une céramique de 90% Al₂O₃ -10%TiO₂ frittée à 1350°C.

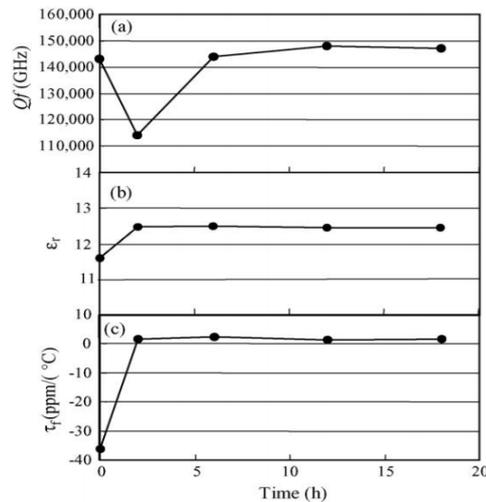


Figure II-10- Impact du temps de recuit à 1100°C sur τ_f , ϵ_r et $(Q \cdot f)$ d'une céramique 90% Al₂O₃ –10% TiO₂ frittée à 1350°C [56]

Le dioxyde de titane peut être utilisé de deux manières différentes pour doper l'alumine. La première configuration consiste à doper faiblement l'alumine (< 0,5%*m*), le dopant favorise, au frittage, la densification par réduction de la coalescence des grains d'alumine et contribue à l'amélioration du facteur de qualité et à l'augmentation de la constante diélectrique. Le facteur de température reste le même pour ces faibles teneurs de TiO₂. La deuxième configuration consiste à utiliser un dopage plus fort (<5%*m*). Dans ce cas, le TiO₂ modifie le facteur de température. Afin de maximiser le facteur de qualité, un frittage à 1350°C est nécessaire afin d'améliorer la densification du matériau. Dans ces gammes de température, une formation d'Al₂TiO₅ nécessite un recuit à 1100°C pour le décomposer en Al₂O₃ et TiO₂. Malgré une amélioration de la densité du matériau à l'issue du recuit, cette dernière reste inférieure à celle d'une alumine pure ou faiblement dopée. L'augmentation de la teneur en TiO₂ entraîne donc une diminution irréversible du facteur de qualité. Le choix de la teneur en dopant dépend donc de l'application et des propriétés recherchées.



K.X. Song et al. [57] ont étudié l'impact d'autres dopants comme Y_2O_3 , et, en particulier l'impact du taux d'yttrium dans l'alumine et de la température de frittage sur les propriétés diélectriques de la céramique. Les résultats de ce dopant ne sont pas intéressants dans le cadre de notre projet car seule la constante diélectrique est modifiée positivement tandis que le facteur de qualité diminue fortement lorsque la concentration de l'yttrium augmente (Figure II-11).

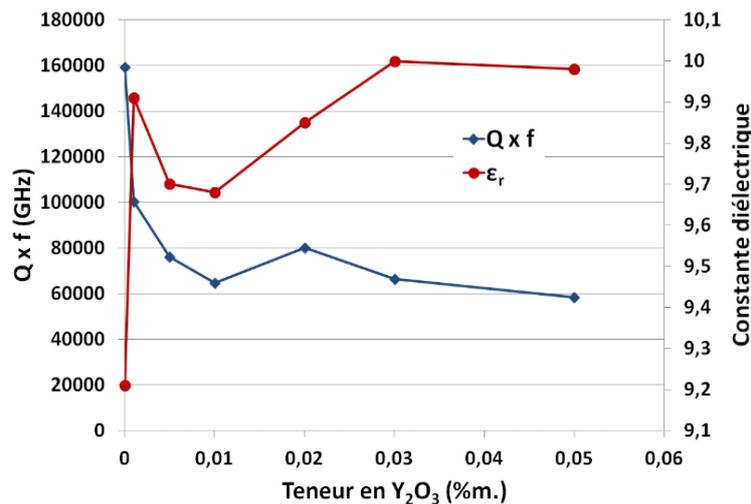
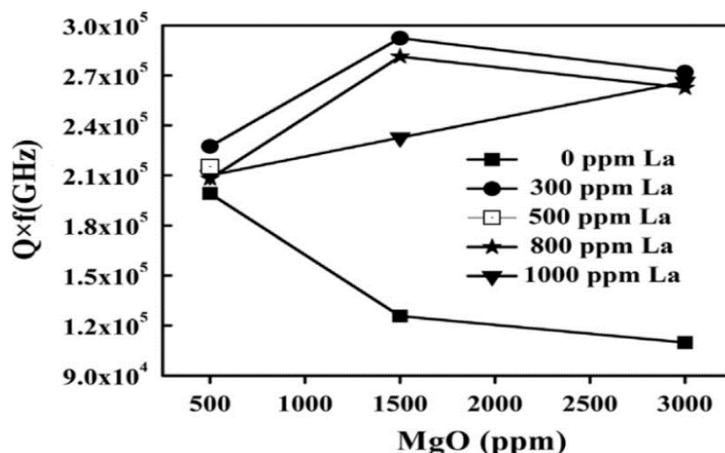


Figure II-11- Impact de la teneur en Y_2O_3 sur le facteur de qualité et la constante diélectrique [57]

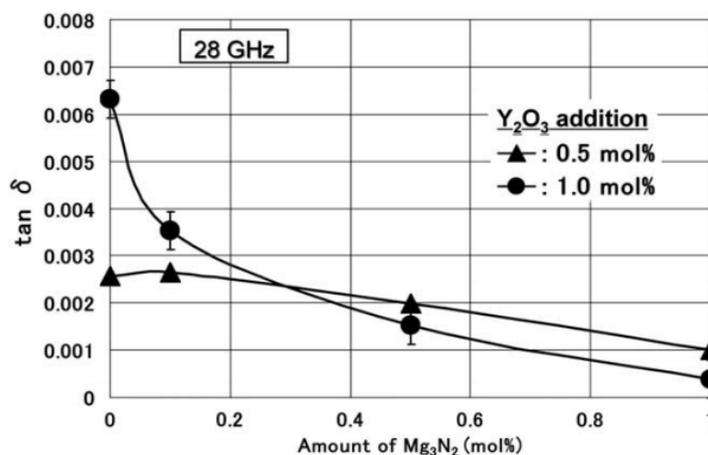
D'autres études ont été menées sur l'utilisation de MgO et La_2O_3 ou une combinaison des deux pour le dopage de l'alumine [58-60]. A faible taux (≈ 500 ppm), l'oxyde de magnésium améliore la densification de la céramique et donc le facteur de qualité [58], ce dernier décroît rapidement avec l'augmentation de la teneur de MgO . Le dopage avec La_2O_3 offre des résultats sensiblement équivalents à ceux de l'oxyde de magnésium [59]. La combinaison de ces deux dopants conduit à une amélioration des résultats mais le facteur de qualité reste inférieur à celle d'une alumine nanométrique seule (Figure II-12). Dans la littérature, plusieurs oxydes ont été utilisés dans l'objectif de doper l'alumine, seul le TiO_2 permet d'améliorer significativement les propriétés diélectriques de l'alumine.



Figure II-12- Evolution du facteur de qualité en fonction de la teneur en MgO et La_2O_3 [60]

I.3 Autres matériaux diélectriques potentiellement intéressants dans les bandes Q-V

La recherche bibliographique a été étendue vers d'autres types de céramiques : oxydes, nitrures et carbures [61] [62]. Dans les bandes Q et V, aucune de ces céramiques ne présente des caractéristiques compétitives à celle de l'alumine. Nous trouvons le nitrate d'aluminium qui se distingue des autres céramiques mais qui présente des facteurs de qualité faibles en comparaison à ceux mesurés sur l'alumine comme nous pouvons le remarquer sur la Figure II-13 [63-64]. La fréquence utilisée pour la caractérisation est cependant ici nettement supérieure (28 GHz) à celle utilisée pour les caractérisations des alumines présentées dans la littérature.

Figure II-13- Evolution de la $\tan \delta$ du nitrate d'aluminium en fonction de la teneur en Y_2O_3 et Mg_3N_2 [63]

II. Conclusion de la partie bibliographique

Cette étude bibliographique sur l'état de l'art des céramiques diélectriques à base d'alumine nous a permis d'avoir une bonne connaissance de ces matériaux. Grâce à cette étude, nous avons vu qu'il est impossible d'avoir une alumine avec un facteur de qualité très élevé et avec un facteur de température proche de zéro. Ainsi, un compromis est nécessaire entre les deux caractéristiques en fonction de l'application visée. Dans le cadre de notre projet, l'alumine qui servira à la fabrication des éléments diélectriques dans les bandes Q et V doit être la plus pure possible avec une granulométrie la plus fine possible et un taux de densification le plus haut possible dans l'objectif de maximiser le facteur de qualité et la constante diélectrique. L'utilisation de TiO_2 à faible taux conduit à l'amélioration de la densification de l'alumine et donc à l'optimisation du facteur de qualité. Pour le facteur de température, il faut un taux de dopage de l'ordre de 10% ce qui pénalise fortement le facteur de qualité. Dans la suite de ce travail, nous allons commencer par vérifier les performances de l'alumine pour des fréquences supérieures à celles présentées dans la littérature et en particulier dans les bandes Q et V. Nous proposons donc de débiter les essais par une étude des propriétés diélectriques de différentes aluminés en faisant varier les taux d'impuretés et les tailles de grain. Suite à ce premier travail, la sélection de l'alumine la plus adaptée permettra de tester différents dopants et d'en optimiser les teneurs.

III. Techniques de caractérisation

III.1 Caractérisation par résonateur diélectrique

Le résonateur diélectrique est l'élément clé dans la plupart des systèmes de télécommunication. Il est utilisé dans de nombreuses industries qui nécessitent la détection radar, la détection de proximité, ainsi que dans des applications militaires [65]. Dans notre projet, ce type de résonateur permet de caractériser les matériaux mis à notre disposition par le laboratoire de céramiques SPCTS entre 8 GHz et 22 GHz. La méthode de caractérisation utilisée dans ce travail consiste à poser un résonateur sur un support téflon et l'ensemble est placé au milieu d'une cavité métallique. Il faut ensuite exciter la cavité cylindrique à l'aide de sondes coaxiales terminées par des boucles magnétiques afin de couvrir l'ensemble des fréquences de résonance du résonateur diélectrique. Le mode fondamental est le mode TE_{018}



en coordonnées cylindriques. Dans l'optique de réduire les incertitudes liées au positionnement du résonateur à l'intérieur de la cavité cylindrique, nous présenterons le dispositif qui a été développé pour maîtriser le centrage du résonateur diélectrique. Ce système vient placer le résonateur diélectrique au centre de la cavité en observant la fréquence de résonance qui doit passer par un minimum en fonction des déplacements en X et Y.

I.1.a Système de centrage de la cavité

Le système utilisé pour la caractérisation des résonateurs diélectriques est composé d'une cavité cylindrique et de deux plans de masse métalliques (Figure II-14). La caractérisation passe par trois étapes. Dans un premier temps, nous mesurons les fréquences de résonances des modes TE_{011} et TE_{013} de la cavité vide (sans RD et sans support). Ces dernières seront utilisées pour déterminer les dimensions exactes de la cavité (hauteur et diamètre) ce qui réduit l'incertitude sur la permittivité complexe liée à ces dimensions. La mesure du facteur de qualité du mode TE_{011} de la cavité vide est utilisée pour identifier la conductivité des parois métalliques de la cavité. Dans un deuxième temps, nous insérons le support à l'intérieur de la cavité et nous mesurons le pseudo mode TE_{011} (fréquence et facteur de qualité). La permittivité complexe du support sera alors déterminée à partir de ces dernières mesures. Enfin, nous insérons l'ensemble (RD + support). Le mode TE_{018} est mesuré (fréquence et facteur de qualité) pour identifier la permittivité et la tangente de pertes du résonateur diélectrique.

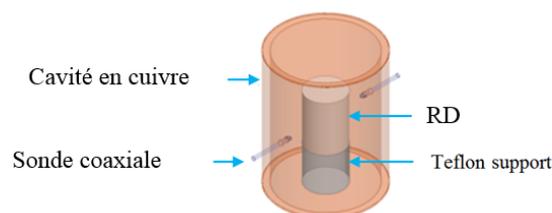


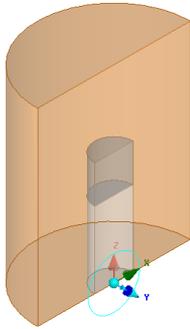
Figure II-14- Caractérisation d'un RD placé dans une cavité cylindrique

Les fréquences de résonance ainsi que les facteurs de qualité du dispositif sont calculés à l'aide d'une modélisation par éléments finis (M.E.F) en 2D et en oscillations libres (OL) [68]. L'utilisation d'un processus itératif conduit à l'extraction de la permittivité complexe des résonateurs en tenant compte de la conductivité des parois métalliques et de la permittivité complexe du support en Téflon avec la convergence de la fréquence de résonance et du facteur de qualité théorique vers ceux mesurés. Le modèle numérique que nous utilisons pour



la détermination de la permittivité et la tangente de pertes de nos alumines considère que le résonateur diélectrique est centré à l'intérieur de la cavité. La Figure II-15 montre l'intérêt de bien centrer le résonateur afin de réduire au maximum les incertitudes de mesures.

Modèle numérique :



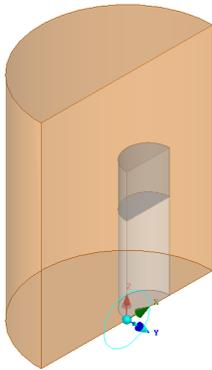
Etape 1 : Calcul de la conductivité de la cavité à vide

Etape 2 : Fixer la valeur de la conductivité

Etape 3 : Calcul de ϵ_r et $\tan\delta$ du support

Etape 4 : Calcul de ϵ_r et $\tan\delta$ du résonateur diélectrique par la convergence de la fréquence de résonance et du facteur de qualité théorique vers ceux mesurés

Mesure :



Dans ce cas, le résonateur est décentré. Il s'approche des parois métalliques, impliquant une augmentation des pertes métalliques et une augmentation de la fréquence de résonance. Les calculs étant basés sur le modèle numérique, l'augmentation des pertes métalliques ne seront pas prises en compte et nous aurons donc une surestimation de la valeur de $\tan\delta$ pour compenser la dégradation du facteur de qualité (Q_0).

Figure II-15- Intérêt du centrage du RD à l'intérieur de la cavité cylindrique

La Figure II-16 présente le système développé pour répondre à cette problématique. La cavité cylindrique et le plan de masse supérieur sont fixes, un système micrométrique vient faire varier la position du plan de masse inférieur sur lequel sont posés le support en Téflon (à faible pertes diélectriques) et le résonateur diélectrique afin de les positionner très précisément au centre de la cavité pour affiner la valeur de la fréquence de résonance.



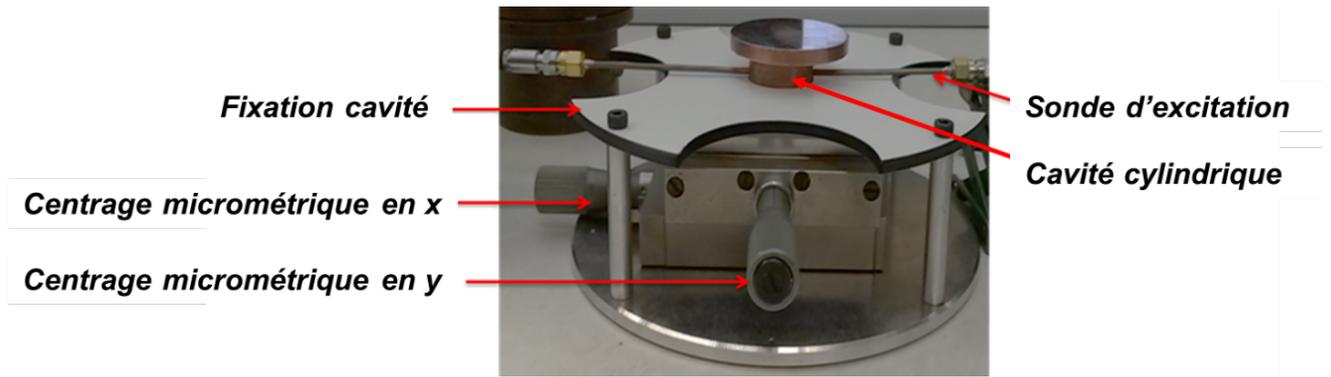


Figure II-16- Système de centrage du résonateur diélectrique (RD)

Les mesures de la fréquence de résonance et du facteur de qualité du système doivent se faire avec un niveau de couplage faible pour réduire l'influence du couplage sur la résonance. Il faut respecter un ratio entre le RD et la cavité ($2 \cdot \varnothing_{RD} = \varnothing_{cavité}$, $3 \cdot H_{RD} = H_{cavité}$). La Figure II-17 montre l'évolution de l'erreur sur le relevé de la fréquence de résonance quand le RD (Alumine, \varnothing 8 mm) est décentré. Nous observons ainsi expérimentalement que pour un décentrage du résonateur diélectrique de 200 μm , un décalage fréquentiel de 8 MHz est généré. Ce décalage fréquentiel induit une erreur de 0,15 % sur la détermination de la permittivité.

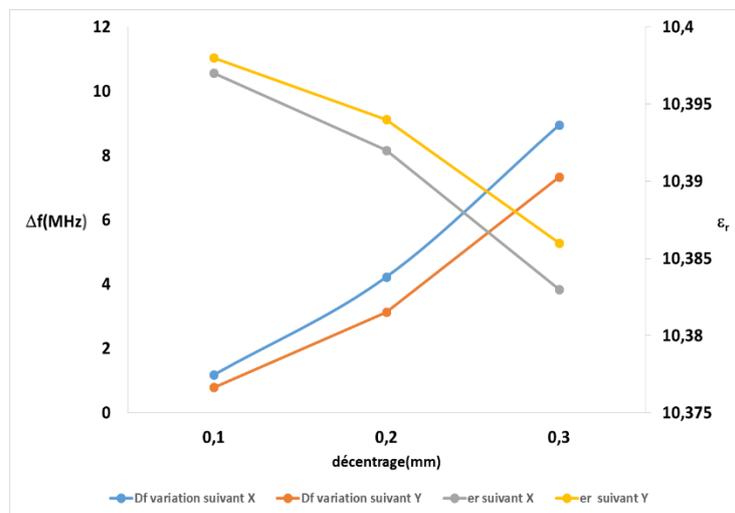


Figure II-17- Variation de la fréquence et ϵ_r en fonction du décentrage

Nous observons aussi sur la Figure II-18, que pour un décentrage de 200 μm , une variation ± 227 sur le facteur de qualité est induite. Cette variation provoque une erreur de 2,25 % sur la détermination de la tangente de pertes.



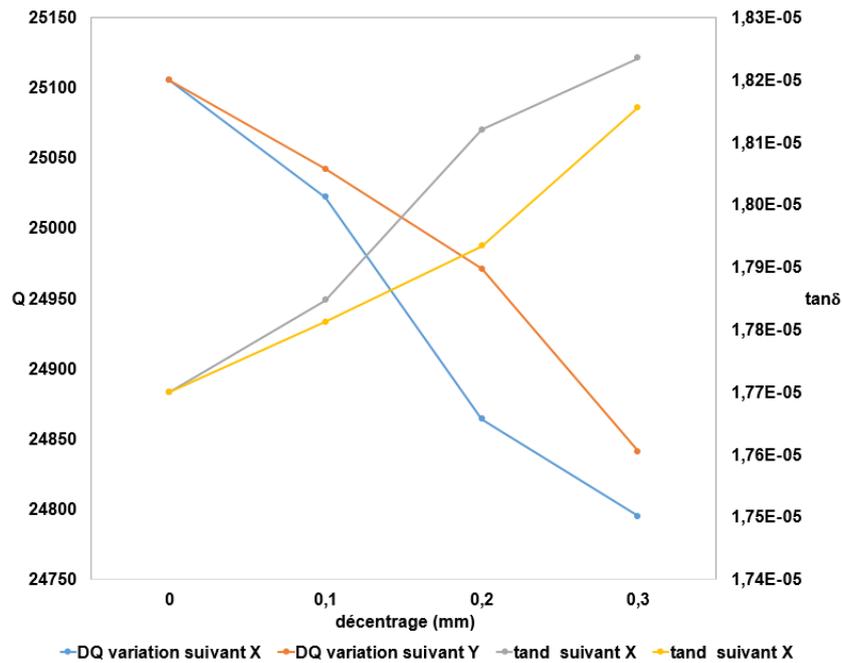


Figure II-18- Variation du facteur de qualité et de la tangente de pertes en fonction du décentrage

Cette étude sur le centrage du RD dans la cavité en utilisant un système de réglage micrométrique rend l'erreur de positionnement moins déterminante parce qu'elle devient typiquement inférieure à celle due à l'incertitude de la mesure de la fréquence de l'analyseur qui est relevée à 0,25 % pour le cas considéré.

I.1.b Incertitudes sur ϵ_r et $\tan\delta$ des RD

L'incertitude sur le diamètre du RD ($\varnothing = 8$ mm) de quelques dizaines de μm induit une incertitude sur la permittivité du même ordre (moins de 1 %). L'incertitude sur la hauteur du RD de l'ordre de $5\mu\text{m}$ induit une erreur sur la permittivité autour de 0,08 %. L'incertitude sur le relevé de la fréquence de résonance qui est de l'ordre de 200 KHz induit une erreur sur la permittivité généralement faible. L'incertitude sur la partie réelle de la permittivité est donc la somme de ces incertitudes. L'incertitude sur la partie imaginaire de la permittivité provient de celle sur la conductivité des parois métalliques de la cavité, de l'incertitude de la bande passante à -3 dB, du facteur de qualité et de l'incertitude sur le diamètre du RD.



I.2 Méthode de caractérisation en bande Q et V

Afin de déterminer les propriétés diélectriques de nos alumines, une méthode par cavité résonante (split cylinder resonator- SCR) [66] [61] [62] a été utilisée pour les mesures de la permittivité et de la tangente de pertes dans les bandes Q et V (55 GHz et 73 GHz). Cette méthode permet une mesure précise sans préparation de l'échantillon. La Figure II-19 présente la cavité utilisée pour les caractérisations avec les guides d'excitation.



Figure II-19- Cavité (SCR) 60 GHz

L'échantillon est inséré entre les deux moitiés de la cavité cylindrique excitée sur le mode $TE_{01, 2q+1}$ (nous utilisons le TE_{013} pour les mesures à 55 GHz et TE_{015} pour les mesures à 73 GHz). Pour un échantillon donné, les fréquences de résonances dépendent des dimensions de la cavité mais aussi de l'épaisseur de l'échantillon et de sa permittivité. Le diamètre interne de la cavité est d'environ 7,8 mm, pour cette raison, les dimensions des substrats doivent être supérieures à 7,8 mm avec une épaisseur inférieure à 0,4 mm pour considérer comme négligeable le rayonnement au niveau de la fente séparant les deux parties de la cavité.

La permittivité et la tangente de pertes du matériau sont calculées à partir de la mesure de la fréquence de résonance et du facteur de qualité de la cavité chargée. La fréquence théorique d'un modèle analytique de la structure converge vers celle mesurée par itération sur la permittivité [66]. Les erreurs de détermination de la permittivité et de la tangente de pertes sont principalement liées aux incertitudes de l'épaisseur de l'échantillon et aux dispersions dimensionnelles de la cavité.

III.2 Conclusion partie technique de Caractérisation

Dans les procédés habituels de développement de céramiques, les échantillons à caractériser sont la plupart du temps sous forme de pastilles cylindriques. Cette forme est bien adaptée à la méthode du résonateur diélectrique placé dans une cavité elle-même cylindrique.



Pour réduire les pertes métalliques, nous éloignons le RD des parois métalliques avec un support à très faible pertes diélectriques. Pour minimiser les incertitudes dues aux erreurs de positionnement du RD dans le centre de la cavité, nous avons développé une technique de centrage qui permet d'éliminer cette erreur. Enfin, pour la montée en fréquence où les RD seraient trop difficiles à fabriquer et à positionner, des échantillons sous forme de plaque sont élaborés et caractérisés par la méthode de la cavité fendue SRC sur deux modes supérieurs TE_{013} et TE_{015} .



IV. Alumine hautes performances

Partant de l'étude bibliographique, nous distinguons trois facteurs pouvant impacter les propriétés diélectriques de l'alumine, ces facteurs sont :

- Pureté initiale de la poudre
- Densité
- Taille de grain dans la pièce finale

Pour répondre aux attentes du projet en termes de performances diélectriques de l'alumine, nous avons cherché une alumine la plus pure possible avec une granulométrie suffisamment fine donnant ainsi un matériau dense à petits grains. Trois poudres d'alumine ont été sélectionnées : TM-DAR fournie par Taimei, SMA6 fournie par Baikowski et l'AKP30 fournie par Sumitomo. Le Tableau II-2 illustre les principales caractéristiques de ces poudres.

Référence	TM-DAR	SMA6	AKP30	
Producteur	Taimei	Baikowski	Sumitomo	
Taille des particules (μm)	0,1	0,3	0,3	
Surface spécifique ($\text{m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$)	14,5	6	6,6	
Impuretés (ppm)	Fe	8	6	4
	Na	8	12	2
	Si	10	10	11
	K	3	20	2
Prix (€/kg)	123	160	-	
Disponibilité	< 8 semaines	Selon production	indisponible	

Tableau II-2- Principales caractéristiques des alumines retenues dans le cadre du projet

ATOMIQ



En raison de l'indisponibilité de L'AKP30 en Europe, cette poudre a été écartée de l'étude malgré des caractéristiques intéressantes. Cette étude s'est déroulée en deux étapes avec, dans un premier temps, la mise en forme des alumines faite par le laboratoire SPCTS (Science des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface) partenaire dans le projet ATOMIQ.

La deuxième étape réalisée par Xlim consiste à caractériser les échantillons sur une large plage de fréquence (8 GHz-75 GHz) et à analyser les résultats.

IV.1 Mises en forme et frittage des échantillons

La caractérisation de l'alumine sur une large plage de fréquence, nécessite la fabrication de plusieurs échantillons de différentes dimensions. L'incertitude de mesure est proportionnelle aux erreurs dimensionnelles de la pièce, les tolérances de fabrication doivent être minimisées et maîtrisées. Dans cette optique, nous avons choisi de fixer une tolérance de planéité de 10µm, et de plus, trois exemplaires ont été réalisés pour minimiser l'impact des défauts de microstructure et détecter tout résultat aberrant. Le Tableau II-3 présente les différentes dimensions sélectionnées pour les échantillons. Ces dimensions résultent pour les cylindres (Résonateur Diélectrique) du rapport optimal entre diamètre et hauteur tel que $H_{RD} = R_{RD}$ pour un meilleur facteur de qualité possible. Pour les plaques, les dimensions viennent des cavités disponibles dont les échantillons sous test doivent couvrir entièrement la section cylindrique. Les épaisseurs des plaques liées à l'épaisseur maximale autorisée pour une insertion dans la fente des cavités, ne doivent pas dépasser quelques pourcents de la longueur d'onde du mode utilisé.

La fabrication des échantillons passe par trois étapes (préparation de la poudre et mise en forme, frittage, usinage) qui seront présentées ci-dessous.

Cylindres			Plaques		
f (GHz)	Diamètre (mm)	Hauteur (mm)	f (GHz)	Longueur (mm)	Epaisseur (mm)
8	12	6	55	20	0,3
13	8	4	75	20	0,3
22	4	2			

Tableau II-3- Dimensions des échantillons en fonction de la fréquence de caractérisation



IV.1.a Préparation des poudres et mise en forme

Étant donné que la microstructure est un paramètre important dans notre étude, nous avons choisi de travailler avec un seul procédé de fabrication. De cette manière, nous garantissons une reproductibilité entre les différentes pièces quelles que soient leurs dimensions tout en gardant une microstructure constante. Les poudres TM-DAR et SMA6 ont été mises en suspension, désagglomérées par attrition puis atomisées. Pour la fabrication des cylindres, le procédé de mise en forme par pressage uniaxial a été retenu. La fabrication des plaques nécessite une force de pressage trop élevée par rapport aux cylindres (> 130 tonnes), le procédé de mise en forme par pressage isostatique a donc été retenu pour la fabrication des plaques. Deux contraintes de pressage ont été appliquées, 100 MPa pour la poudre TM-DAR et 80 MPa pour la SMA6. Ces contraintes ont été identifiées après une étude de compacité des deux matériaux en cru, et, elles permettent d'obtenir une densité en cru de 54 %. Il est important de noter qu'au cours de ces étapes de fabrication et de mise en forme, il faut veiller à minimiser la contamination des poudres. Dans cette optique il faut limiter les contacts avec les objets métalliques, et bien nettoyer tout objet avant qu'il ne soit en contact avec les poudres, et enfin, d'utiliser des solvants de qualité supérieure notamment pour l'éthanol absolu.

IV.1.b Etude de frittage

Étant donné que les propriétés diélectriques sont dépendantes de la densité et de la taille de grain selon la littérature, une étude de frittage s'avère indispensable. Dans cette partie, l'ensemble des frittages se sont déroulés dans un four super kanthal dédié. Les pièces sont frittées à l'intérieur d'un réfractaire NABERTHERM en alumine (ref. 691600177) qui sert de mouflage intégral (Figure II-20). À l'aide ce système, nous évitons la contamination des pièces par le four et aussi nous diminuons les effets radiatifs des résistances.



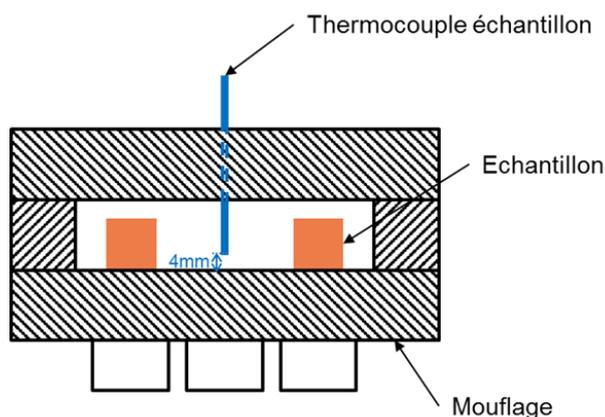


Figure II-20- Schéma du mouflage utilisé pour le frittage des échantillons

Les températures sont rapportées à l'aide d'un thermocouple inséré au travers d'un trou de perçage dans la plaque supérieure du mouflage et relié à un enregistreur en continu. L'étude effectuée sur les deux alumines a pour but de déterminer, pour une densité constante, les températures de frittage optimales en fonction de la rampe de montée ainsi que les tailles de grains associées. Pour éviter les contraintes mécaniques induites par le refroidissement des pièces, nous avons fixé la rampe de descente à $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Nous avons évalué le retrait linéaire au frittage à 19 % pour les deux alumines avec une densification complète (densité > 99,9 %). Les résultats de frittage des deux alumines en fonction de la vitesse de montée, sont rapportés sur la Figure II-21.

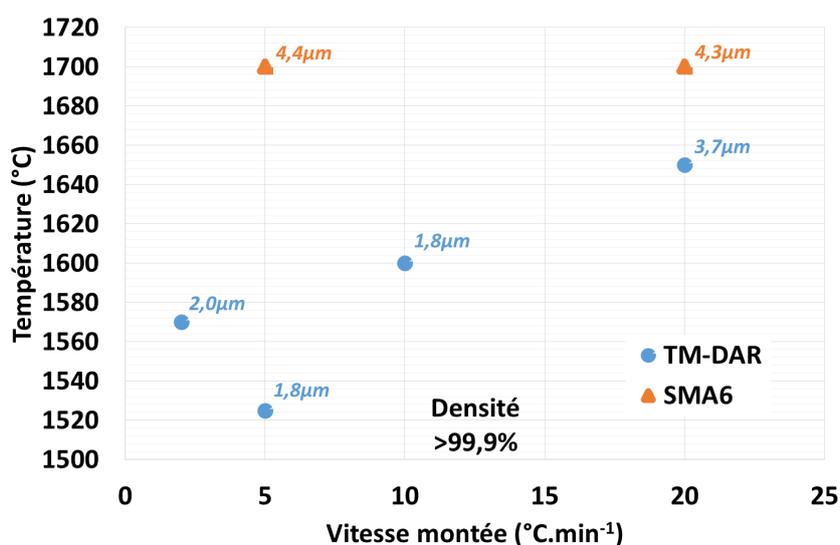


Figure II-21- Evolution de la température de frittage de la TM-DAR et de la SMA6 en fonction de la rampe de montée en température



Avec un profil en V, le minimum est obtenu pour une rampe de montée de $5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ pour la TM-DAR. Nous pouvons noter une bonne adéquation entre l'apport d'énergie et la cinétique de frittage de l'alumine pour cette rampe. À cette vitesse de montée, nous avons la taille minimale des grains de $1,8\mu\text{m}$ (Figure II-22), qui reste quand même élevée sachant que la TM-DAR avant frittage a une taille de grain initiale de $0,1\mu\text{m}$.

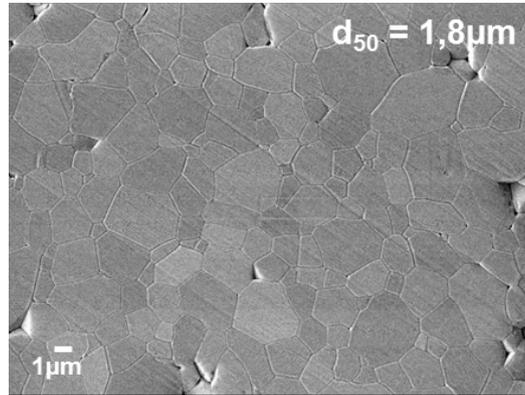


Figure II-22- Microstructure de la TM-DAR après frittage à 1525°C ($5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)

Les deux rampes de montée effectuées sur la SMA6 ($5^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$, $20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$) montrent que cette alumine a un comportement différent de la TM-DAR avec des températures de frittage plus élevées. Nous retrouvons le même comportement que la TM-DAR, avec une coalescence très importante lors du frittage, et, un passage de la taille des grains de $0,3\mu\text{m}$ avant frittage à $4,3\mu\text{m}$ après frittage (Figure II-23).

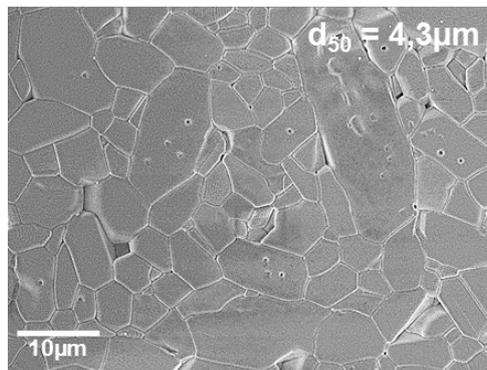


Figure II-23- Microstructure de la SMA6 après frittage à 1700°C ($20^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$)

À l'issue de cette étude, nous avons défini les cycles thermiques qui seront appliqués par la suite pour vérifier l'impact de la densité et de la taille des grains sur les propriétés diélectriques. La TM-DAR qui présente moins d'impureté, a été choisie suite à l'étude menée.



Les Tableau II-4 et Tableau II-5, reportent les cycles thermiques utilisés pour la fabrication des échantillons TM-DAR et SMA6.

Taille de grain (μm)	Rampe de montée ($^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$)	Température de frittage ($^{\circ}\text{C}$)	Palier (min)	Rampe de descente ($^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$)
0,9	5	1450	1	5
1,8	5	1525	1	5
3,7	20	1650	1	5
4,8	20	1650	60	5

Tableau II-4- Cycles thermiques retenus pour l'alumine TM-DAR

Taille de grain (μm)	Rampe de montée ($^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$)	Température de frittage ($^{\circ}\text{C}$)	Palier (min)	Rampe de descente ($^{\circ}\text{C}.\text{min}^{-1}$)
4,3	20	1700	1	5

Tableau II-5- Cycles thermiques retenus pour l'alumine SMA6

IV.1.c Usinage des échantillons

Pour satisfaire les contraintes sur les dimensions et les tolérances, le passage par une rectification des pièces s'avère indispensable. La rectification des faces planes des cylindres a été effectuée sur une surface plane équipée d'une meule en diamant afin d'assurer une tolérance inférieure à 10 μm . Les cylindres ont été bridés à l'aide d'un plateau givrant utilisant une détente d'air comprimé pour congeler l'eau se trouvant autour des échantillons. La mise en forme des diamètres des échantillons est assurée par un tour équipé d'une meule en diamant. Après rectification, l'échantillon est fixé entre deux barreaux métalliques. Le premier barreau est serré dans le mandrin du tour tandis que le deuxième est maintenu en position par une contre pointe. Les Figure II-24 et Figure II-25 illustrent les différentes étapes de rectification pour les cylindres et les plaques respectivement.



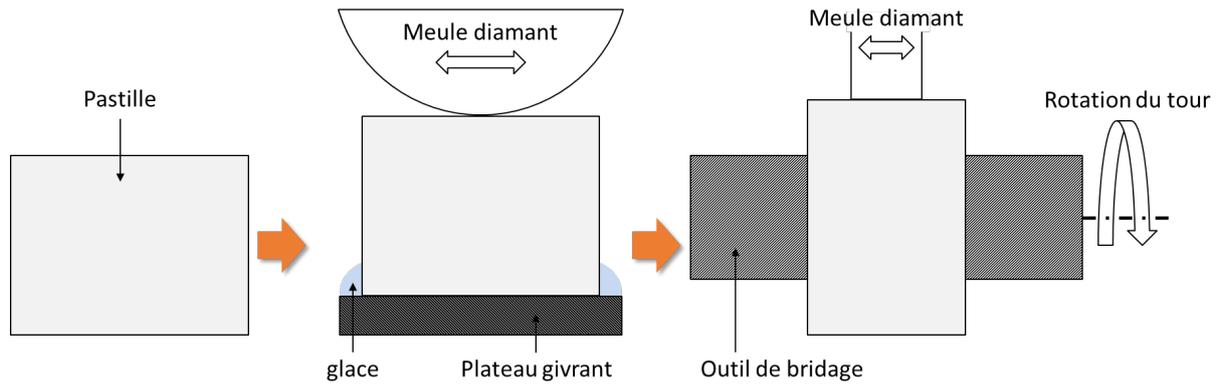


Figure II-24- Schéma des étapes d'usinage des cylindres

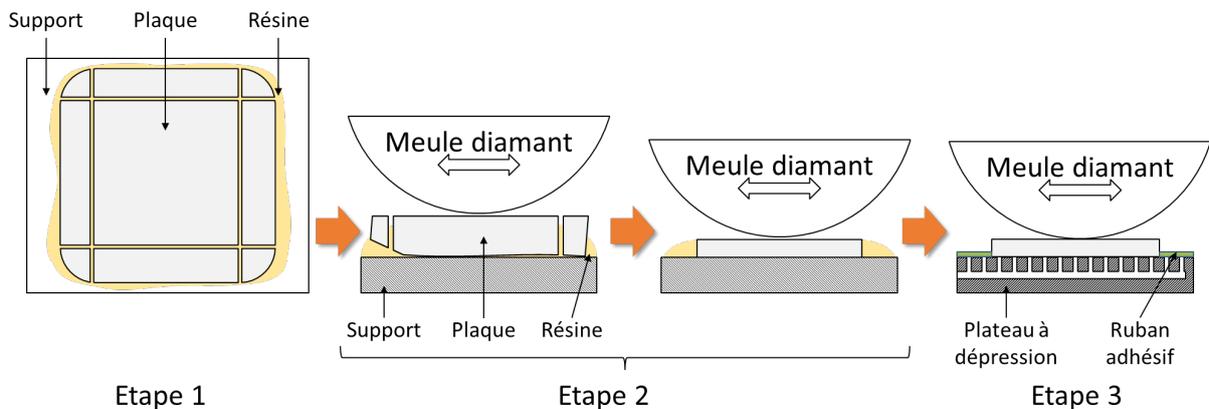


Figure II-25- Schéma représentant les étapes d'usinage des plaques

L'usinage des plaques relève plus de difficulté de réalisation que les cylindres au vu des épaisseurs demandées ainsi que les tolérances recherchées. La réussite de cette fabrication nécessite trois étapes. Dans un premier temps, les plaques ont été collées avec de la résine sur un support, et ensuite découpées aux dimensions finales par une tronçonneuse. La deuxième étape consiste à surfacer et réduire l'épaisseur totale de plaque à plus de 0,5mm de l'épaisseur finale, cette étape est réalisée en deux temps. La rectification de la première face est achevée après l'obtention d'une surface plane sans défaut. Ensuite, la plaque est décollée et ensuite recollée sur la face rectifiée. Cette dernière est réduite en épaisseur jusqu'à +0,5mm de l'épaisseur recherchée. La dernière étape consiste à la rectification de précision. Elle est assurée par un plateau à dépression, monté sur le même équipement que celui utilisé précédemment. Le bridage de la céramique est assuré par la dépression créée par une pompe à vide à pistons. Les deux faces de la plaque d'alumine sont rectifiées de la même manière que



l'étape 2. Après rectification, toutes les pièces ont été nettoyées dans des bains ultrasons pour éliminer toutes les pollutions.

IV.2 Caractérisation et analyse des résultats

Les caractérisations des échantillons (cylindres – plaques) fabriqués par le laboratoire SPCTS sont effectuées dans un premier temps entre 8 GHz et 13 GHz afin de confirmer la tendance observée lors de l'étude bibliographique. Pour répondre aux besoins du projet d'autres campagnes de caractérisation sont réalisées à 22 GHz, 55 GHz et 75 GHz. Les facteurs critiques identifiés dans la littérature, ont été l'objet de cette étude. Il s'agit de l'impact des impuretés, la taille des grains et la densité.

IV.2.a Impact des impuretés de la poudre

L'impureté présente le seul élément intrinsèque à l'alumine pouvant dégrader les performances diélectriques. Les impuretés n'impactent pas toutes de la même manière mais leurs effets restent proportionnels à leur quantité. Les deux alumines mises en comparaison présentent une composition chimique des impuretés similaire. La TM-DAR présente une impureté totale entre 35 ppm et 37 ppm, tandis que la SMA6 présente une impureté totale entre 50 ppm et 57 ppm. Les échantillons caractérisés ont été fabriqués en minimisant la différence de taille de grain afin de caractériser l'impact de la teneur totale en impureté. La Figure II-26 présente la variation de la permittivité des deux alumines en fonction de la fréquence.

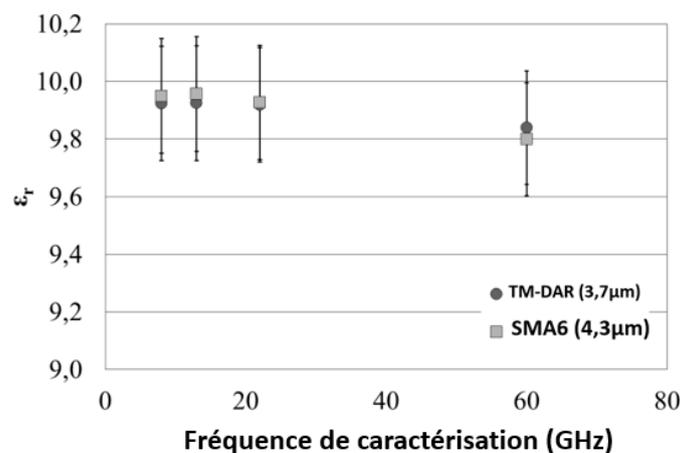


Figure II-26- Impact des impuretés sur la permittivité



Pour les basses fréquences, la SMA6 présente une permittivité supérieure à celle de la TM-DAR. Cette tendance s'inverse pour des fréquences supérieures à 20 GHz avec une dégradation de la permittivité plus rapide pour la SMA6. La TM-DAR présente une permittivité plus forte dans les bandes Q et V (40-60 GHz). La tangente de pertes présente un comportement similaire à la permittivité, avec des valeurs très proches jusqu'à 25 GHz (Figure II-27). Nous observons une forte dégradation à 60 GHz pour la SMA6 contrairement à la TM-DAR.

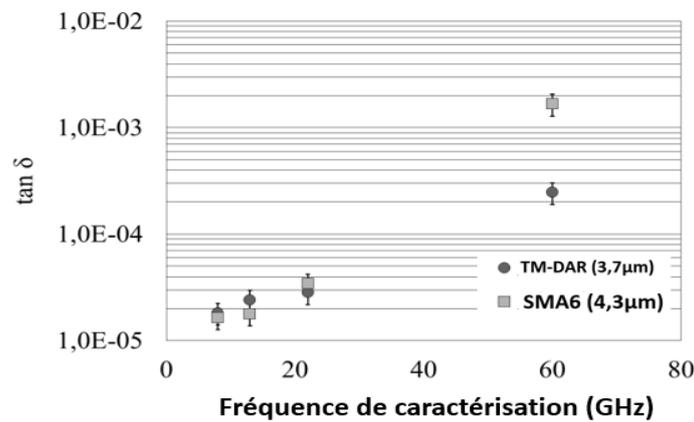


Figure II-27- Impact des impuretés sur la tangente de pertes

La présence d'impuretés dans l'alumine dégrade ses performances diélectriques, cet impact est amplifié avec la montée en fréquence, surtout sur la tangente de pertes. La différence de taille de grain entre les deux alumines rend ces résultats de mesures qualitatifs et non quantitatifs.

IV.2.b Impact de la densification

L'étude de l'impact de la densité a été réalisée sur l'alumine TM-DAR. Pour retrouver une alumine moins dense, il faut faire un sous frittage. Pour cela, les pastilles ont été frittées à 75°C en dessous de la température de frittage optimale. En conséquence du sous frittage, la densité passe de 3,991 (99,9 %) à 3,9198 (98,2 %) et la taille de grain passe de 1,8 μm à 0,9 μm. La Figure II-28 illustre l'impact de la densité sur la permittivité.



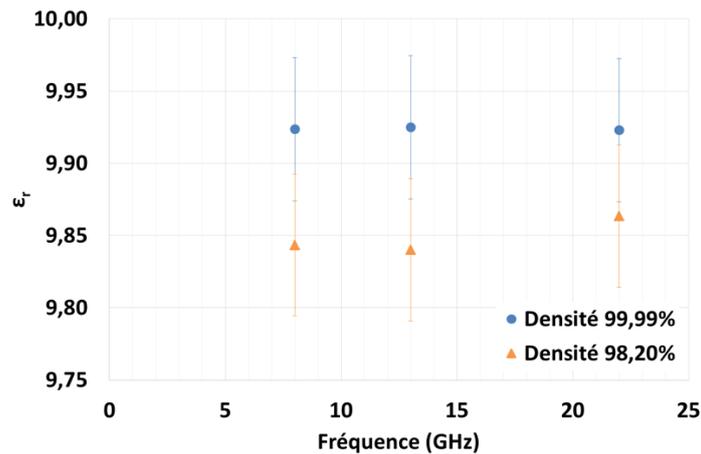


Figure II-28- Impact de la densité sur la permittivité

Nous pouvons voir une diminution de la permittivité suite à la variation de la densité, mais elle reste faible (inférieure à 0,8%) mais notable malgré les barres de tolérance qui se recourent. Les valeurs mesurées sont en concordance avec ce que nous trouvons dans la littérature [48] [51] [52]. Comme le montre la Figure II-29, la variation de densité impacte plus la tangente de pertes. Nous remarquons aussi que la tangente de pertes de l'alumine sous frittée se dégrade moins par rapport à l'alumine dense avec la montée en fréquence.

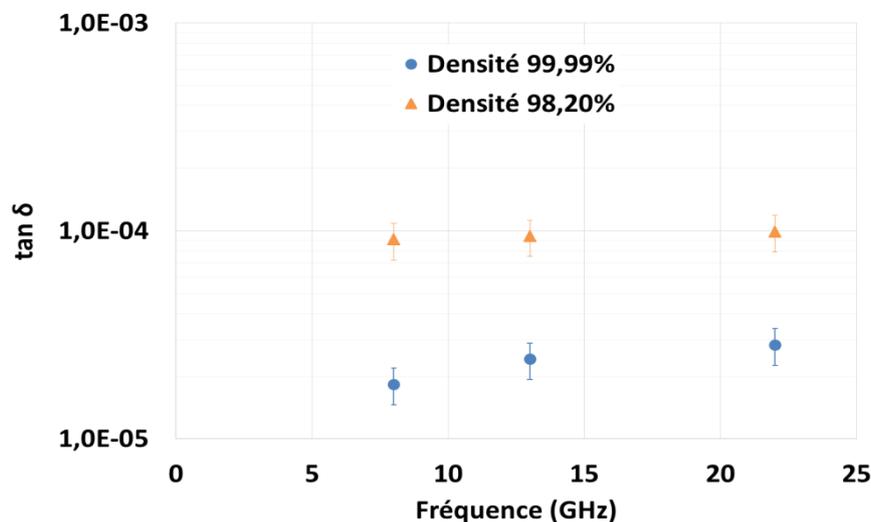


Figure II-29- Impact de la densité sur la tangente de pertes

À défaut de caractérisation à haute fréquence d'alumine sous frittée, nous ne pouvons pas conclure avec certitude mais il semble impossible physiquement d'avoir une tangente de pertes pour une alumine sous frittée meilleure que celle d'une alumine dense. Cette étude



nous a permis de confirmer que la densité impacte les performances diélectriques de l'alumine. En revanche, il reste à découpler les effets de la densité de celui de la taille de grain, sachant que dans le cas présent le dernier paramètre est quasiment divisé par deux suite à la variation de densité.

IV.2.c Impact de la taille des grains

La TM-DAR a été choisie pour réaliser l'étude sur l'impact de la taille des grains. Trois tailles de grains moyens (1,8 μm , 3,7 μm , 4,8 μm) ont été choisies, soit un intervalle couvrant 60 % de ce que nous avons trouvé dans la littérature. Il est considéré comme représentatif compte tenu des résultats publiés [49]. Les échantillons mesurés ont tous une densité supérieure ou égale à 99,9 %. Nous pouvons voir sur la Figure II-30 que la taille des grains n'impacte pas la permittivité de l'alumine. Les barres d'incertitude de tous les points se chevauchent jusqu'à 60 GHz.

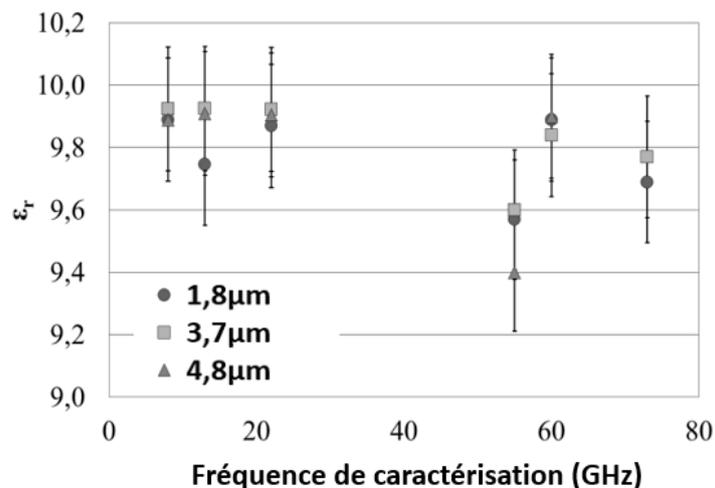


Figure II-30- Impact de la taille des grains sur la permittivité

Nous observons le même comportement sur la tangente de pertes. Pas d'impact de la microstructure jusqu'à 22 GHz (Figure II-31). Au-delà, les points commencent à se dissocier.



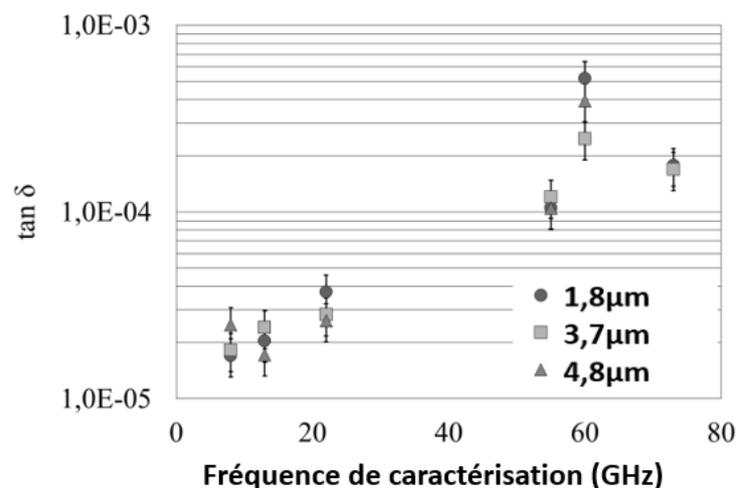


Figure II-31- Impact de la taille des grains sur la tangente de pertes

Ces résultats montrent que, ce n'est pas l'échantillon qui possède la microstructure la plus fine qui a les meilleurs résultats, contrairement à ce qui est observé dans la littérature. Cette étude montre que la taille des grains n'impacte pas ou peu la tangente de pertes de l'alumine. De plus, le facteur de température de la TM-DAR a été regardé lors de cette étude. Une valeur de $-60 \text{ ppm. } ^\circ\text{C}^{-1}$ a été mesurée qui est en concordance avec ce que nous trouvons dans la littérature pour des alumines de même type. Nous retrouvons le même comportement que C.-L. Huang [51], avec une légère baisse τ_f avec la variation de la taille des grains (Figure II-32).

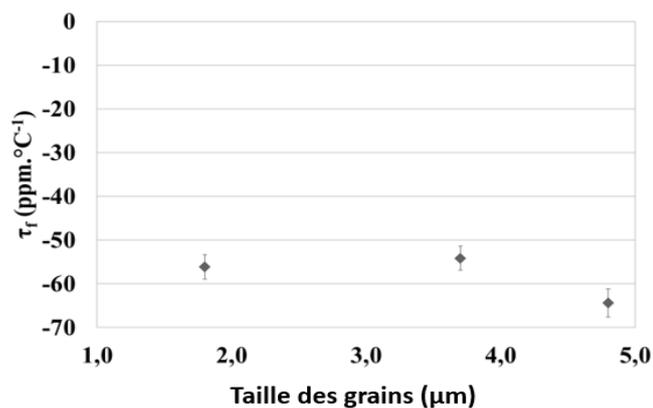


Figure II-32- Impact de la taille des grains sur le facteur de température



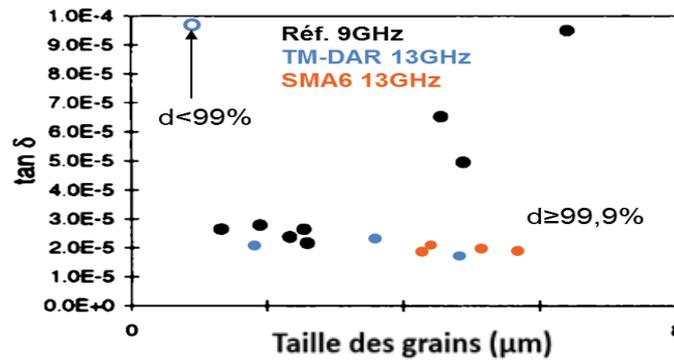


Figure II-33- Comparaison des résultats du projet ATOMIQ avec la littérature [49]

La Figure II-33 rassemble les différents points de mesures effectuées dans le cadre de notre projet et les compare à ce que nous avons trouvé dans la littérature. Notre étude montre que la taille des grains n'impacte pas ou faiblement les performances diélectriques de l'alumine. Pour S.L. Penn, la taille des grains a un fort impact sur la tangente de pertes au-delà de $3\mu\text{m}$ [49]. Le nombre d'échantillons caractérisés ainsi que la plage de taille de grain balayée au cours de notre étude met en doute les résultats de la littérature. Impossible de conclure sur les causes de divergence du fait du manque de détails concernant la publication de Penn. Une variation de densité indésirable lors de la variation de la taille des grains peut être l'auteur de cette divergence comme le montre le point à 98,2% sur la Figure II-33. En conclusion, et sur un intervalle de variation de la taille des grains proche de celui mesuré, l'impact de la microstructure peut être considéré comme nul sur permittivité et la tangente de pertes.

V. Conclusion

Trois facteurs microstructuraux ont été étudiés au cours de ce projet, et les résultats de caractérisation nous ont permis de bien identifier leurs impacts sur les performances diélectriques. La taille des grains, avec un impact quasi-nul sur la permittivité et la tangente de pertes, nous donne la possibilité de le découpler des effets des impuretés et de la densité. Concernant la densité, elle est le seul facteur qui impacte négativement à basse fréquence (<25 GHz) la tangente de pertes de l'alumine. Concernant les impuretés à basse fréquence, nous pouvons remarquer sur la Figure II-26 que la permittivité de la SMA6 est meilleure que celle de la TM-DAR à 8 GHz et 13 GHz. Cependant, la SMA6 présente plus d'impureté que la TM-DAR. Cela peut être lié à une impureté présente dans la SMA6 qui améliore la permittivité à basse fréquence. À haute fréquence, l'effet de l'impureté rejoint celui de la



densité avec une forte dégradation de la tangente de pertes. Seulement 20 ppm d'impuretés suffisent pour dégrader significativement la tangente de pertes, ce qui la rend comme facteur primordial dans les propriétés diélectriques de l'alumine. Cette conclusion impose de prendre toutes les précautions possibles lors de la manipulation des poudres afin de réduire au maximum les contaminations avec le milieu externe. La comparaison des résultats à la littérature présente un point très important. Elle nous a permis d'affiner le rôle des impuretés, de voir que l'impact de la densité sur les performances diélectriques est conforme à la littérature, et enfin de réengager la discussion sur le rôle de la taille des grains sur les performances diélectriques. A ce stade d'étude, nous sommes satisfaits des performances des alumines caractérisées : des résultats à l'état de l'art pour la TM-DAR avec une tangente de pertes de $2,06 \cdot 10^{-5}$ à 13 GHz. Cette alumine présente un grand intérêt pour la poursuite du projet que ce soit pour la fabrication des pièces industrielles, ou pour l'étude de dopage.

VI. Alumine et dopage par TiO_2

Comme nous avons vu dans la partie bibliographique, l'amélioration des performances diélectriques de l'alumine passe par le dopage par un oxyde : le dioxyde de titane, un dopant qui améliore la tangente de pertes à faible teneur, et qui corrige le facteur de température à plus forte teneur. Dopée, l'alumine ajoute d'autres facteurs qui peuvent impacter les performances diélectriques. En plus des trois facteurs mis en évidence dans la première partie de l'étude (impuretés de l'alumine, densité et taille des grains), il vient s'ajouter d'autres facteurs intrinsèques et extrinsèques. En tenant compte du temps consacré à cette tâche dans le projet, nous ne pouvons pas balayer l'ensemble de ces facteurs. Ainsi nous nous sommes concentrés dans cette partie à déterminer, pour un précurseur et un protocole de dopage donné, les teneurs en TiO_2 optimales pour avoir une alumine avec une meilleure tangente de pertes et une autre stable en température. Comme pour l'alumine pure, l'étape de préparation des poudres et la mise en forme ont été réalisées par le SPCTS et la caractérisation et l'analyse des résultats ont été menées par Xlim.

VI.1 Préparation des poudres et mise en forme

L'utilisation du dioxyde de titane sous forme d'oxyde est protégée par plusieurs brevets, d'où la nécessité de choisir une autre forme pour le TiO_2 . Nous avons choisi d'utiliser un sel



métallique, vu que le nitrate de titane n'existe pas commercialement, nous avons choisi d'utiliser l'isopropoxyde de titane. Ce dernier présente une pureté de 99,999%, il est un produit du catalogue de Sigma Aldrich référence 377996. Comme il a été présenté dans la partie précédente, l'étude de dopage a été réalisée sur la TM-DAR. Elle a été faite pour six teneurs en dioxyde de titane : 0,1%_m, 0,5%_m, 0,9%_m, 5%_m, 10%_m et 12%_m.

VI.1.a Mise en forme et usinage des échantillons

Les étapes de préparation de la poudre, la mise en forme des échantillons et leurs usinages, sont communes avec celles présentées pour l'alumine dans la première partie.

VI.1.b Etude de frittage

L'étude sur le frittage de l'alumine dopée se décompose en deux parties, la première concerne le frittage tandis que la deuxième est dédiée au recuit. Trois rampes de montée ont été réalisées : 2 °C.min⁻¹, 5 °C.min⁻¹ et 20 °C.min⁻¹ avec une rampe de descente fixée à 5 °C.min⁻¹. La Figure II-34 illustre les variations des températures de frittage en fonction du taux de dopage et de la vitesse de montée pour une densité cible supérieure à 99,99%.

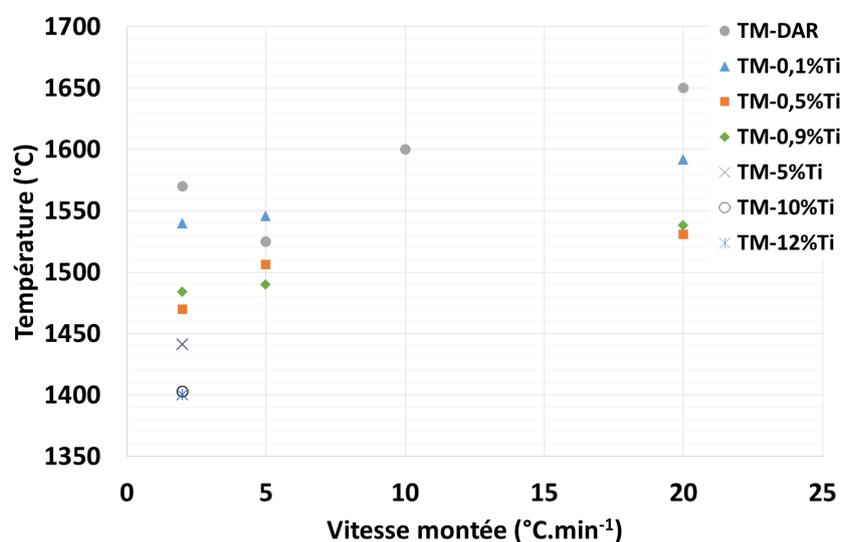


Figure II-34- Evolution de la température de frittage des alumines dopées en fonction de la vitesse de montée en température

D'après les résultats obtenus au cours de l'étude sur l'alumine pure, le choix de la rampe de montée qui donne la plus faible température de frittage a été retenue. L'objectif a été



de retrouver la taille de grain la plus faible. Sauf que nous avons remarqué par la suite que les deux alumines ne se comportent pas de la même manière, ce qui ne nous donne pas systématiquement les températures de frittage correspondant à la microstructure la plus fine. La Figure II-35 montre l'évolution de la taille des grains en fonction de la teneur en TiO_2 dans le cas d'une rampe de montée à $2^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$. Seul le point à 0,5 %m de TiO_2 ne suit pas le profil exponentiel de la baisse de la température de frittage. Nous retrouvons aussi une microstructure contraire à la littérature [53]. Le dioxyde de titane est utilisé souvent pour bloquer la croissance granulaire en modifiant la température de frittage, sauf que dans notre cas l'ajout de 0,1 % de TiO_2 engendre une augmentation de la taille moyenne de grains de $3\ \mu\text{m}$.

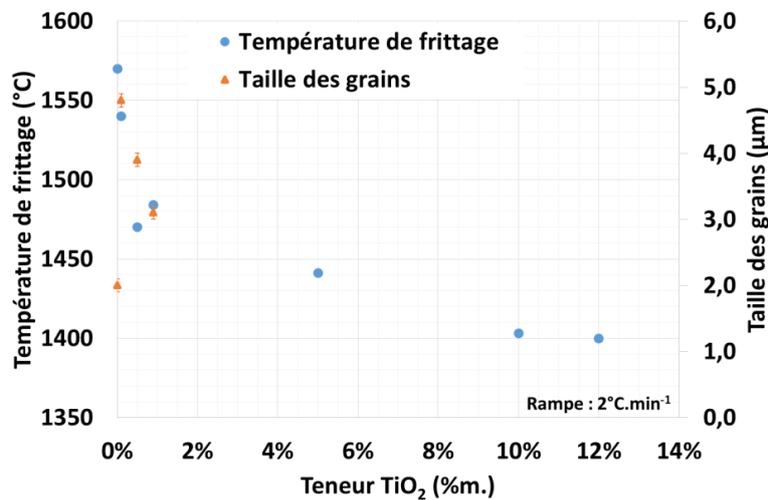


Figure II-35- Impact de la teneur en TiO_2 sur la température de frittage et la microstructure

La taille de grain décroît par la suite lorsque le taux de TiO_2 augmente mais reste au-dessus de la TM-DAR pure. L'utilisation de la poudre de dioxyde de titane reste le meilleur moyen pour optimiser la microstructure (Figure II-36). Une diminution de la taille des grains de dioxyde de titane de 30 nm dans la littérature à 5nm dans le cadre de notre projet est certainement la cause de l'augmentation de la taille des grains, en modifiant probablement le mécanisme de frittage pour obtenir la densité visée. Nous remarquons que l'effet du TiO_2 sur la diminution de la température de frittage est maintenu pour les différentes tailles des grains. Sauf que le blocage de la croissance granulaire s'inverse en dessous d'une certaine taille. La variation inattendue à l'origine de la taille de grain de l'alumine dopée nous a servi à évaluer l'impact de la microstructure sur les performances diélectriques et de les comparer à la littérature. Un



retrait entre 20 % et 22 % a été mesuré sur l'échantillon lors de la fabrication et il subit une très légère augmentation de l'ordre de 1% lorsque la teneur en TiO_2 augmente.

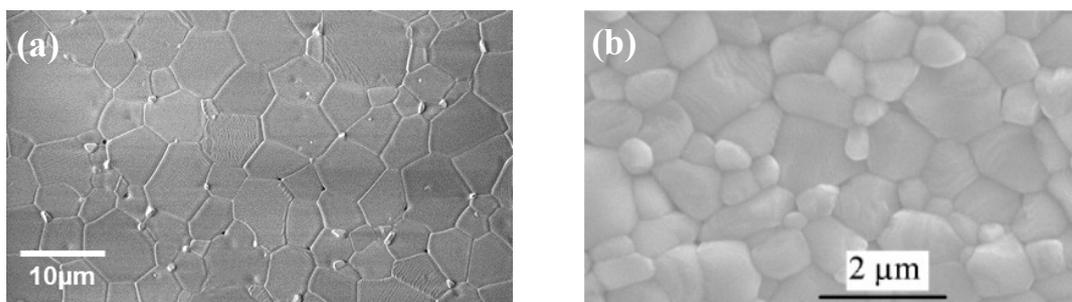


Figure II-36- Microstructures d'alumines dopées 0,5 %m. TiO_2 obtenues par dopage avec un isopropoxyde de titane (a) et par dopage avec un oxyde [53] (b)

Le dopage de l'alumine par le dioxyde de titane est caractérisé par la présence d'une phase secondaire pour des taux supérieurs à 0,5% de TiO_2 qui génère des températures de frittage proche de 1200 °C du titanate d'aluminium. Ce dernier, avec sa faible densité, dégrade fortement les performances diélectriques de l'alumine. Une analyse par diffraction aux rayons X (Figure II-37) montre que pour une température de recuit de 1100 °C, le titanate d'aluminium se décompose en Al_2O_3 et TiO_2 . Donc, grâce au recuit nous allons pouvoir contourner ce problème. Nous avons choisi de fixer la durée de recuit à dix heures pour être en concordance avec la littérature [55]. Les rampes de montée et descente ont été fixées à 2 °C.min⁻¹.

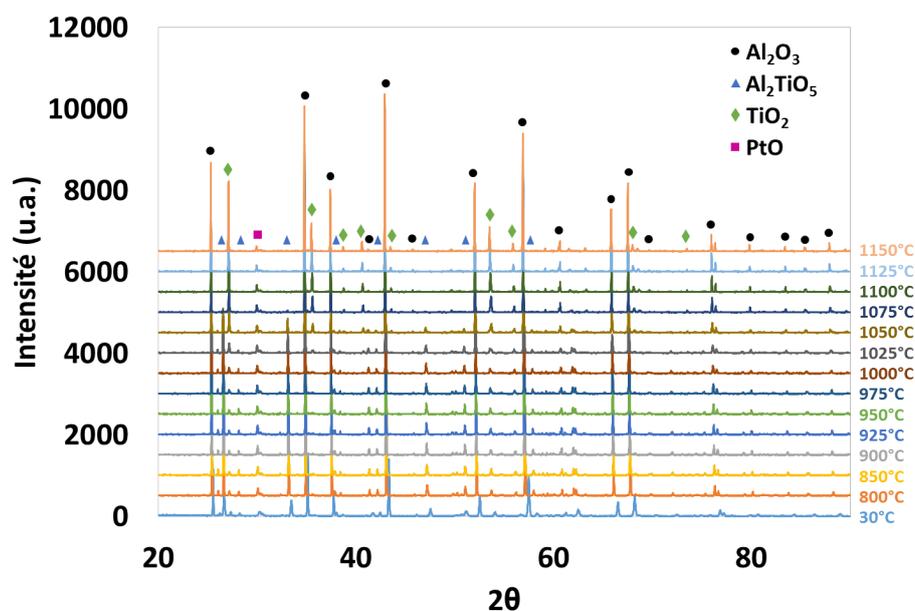


Figure II-37- Suivi RX de la décomposition de la phase Al_2TiO_5 en fonction de la température



Une modification de la densité est causée par la présence et la décomposition du titanate d'aluminium (Figure II-38). Nous n'avons remarqué ni modifications dimensionnelles ni changement de la taille des grains suite au recuit. L'introduction d'oxyde de titane cause une dégradation de la densité du matériau. À 0,5 %m de TiO_2 , nous observons un maximum de densité, ensuite, elle décroît pour atteindre son minimum à 10 %m et finit par remonter légèrement à 12 %m. Le recuit améliore la densification du matériau pour des taux de dopage faibles (<5 %m), mais reste incapable de compenser les pertes causées par l'introduction du dioxyde de titane.

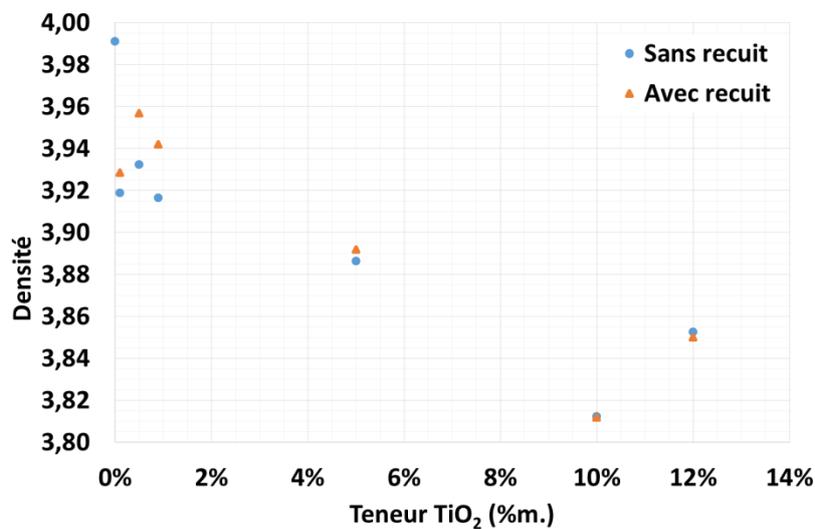


Figure II-38- Evolution de la densité du matériau, avec et sans recuit, en fonction de la teneur en TiO_2

Les mesures des échantillons dopés avec le sel de titane et non recuit montrent la différence majeure avec ce que nous avons trouvé dans la littérature (Figure II-39). L'utilisation de ce dopant sous cette forme génère des grains de TiO_2 plus petits, ce qui entraîne une hausse de la taille des grains et une perte de la densité. Si le premier facteur ne joue pas sur les performances diélectriques, le deuxième les dégrade.



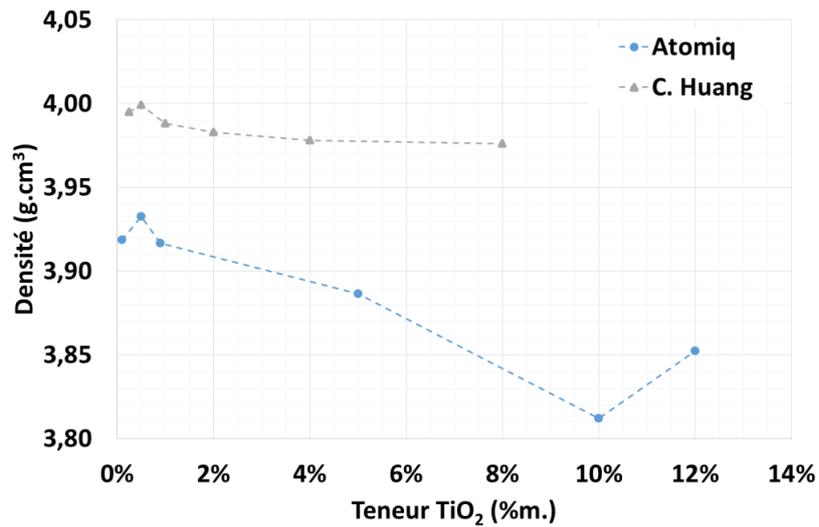


Figure II-39- Comparaison avec la littérature des valeurs de densité sans recuit en fonction de la teneur en TiO₂ [53]

VI.2 Caractérisation et analyse des résultats

Du fait que la quantité de poudre disponible est inférieure à celle nécessaire à la fabrication de tous les échantillons, nous avons choisi de fabriquer seulement les cylindres de 8 mm de diamètre et des plaques de 20 mm*20 mm pour les campagnes de caractérisation. Nous pouvons voir sur la Figure II-40 l'augmentation de la permittivité de la TM-DAR en fonction du taux de dopage. Cette augmentation est proportionnelle au taux de dopage de d'alumine, et est liée aux permittivités des deux matériaux ($\epsilon_r \text{ Al}_2\text{O}_3 \approx 10$, $\epsilon_r \text{ TiO}_2 \approx 89$).

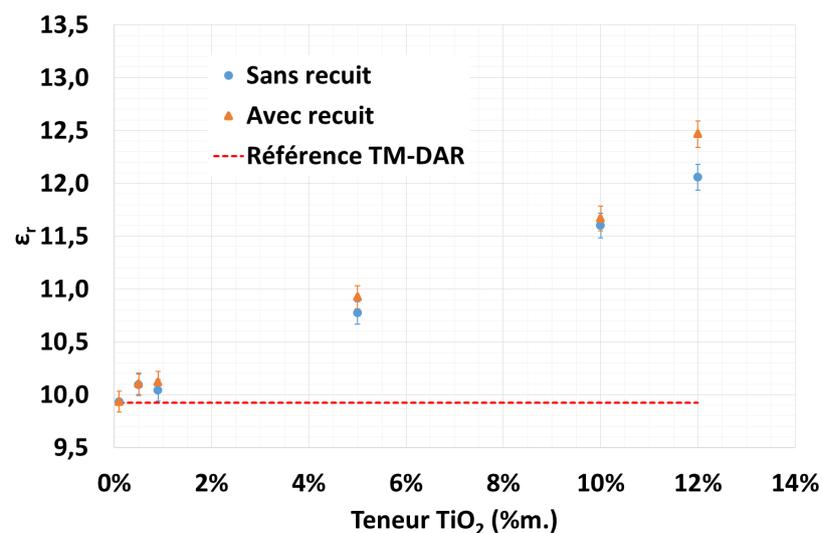


Figure II-40- Evolution de la permittivité des alumines dopées en fonction de la teneur en TiO₂



Nous pouvons aussi tirer deux remarques de ce graphe. Pour un taux de dopage inférieur à 12 %m, il n'y a pas de différence avec et sans recuit aux erreurs de mesure près. Au-delà de 12 %m, nous gagnons 0,4 sur la permittivité avec le recuit. Cela veut dire qu'il y a un seuil à partir duquel le titanate d'aluminium dégrade la permittivité. Deuxième point, tous les échantillons TM-DAR dopés qui ont été mesurés, présentent une permittivité supérieure à celle de la TM-DAR pure. Ainsi, les faibles densités et la taille de grains n'impactent pas la permittivité. Contrairement à la permittivité, le dioxyde de titane semble impacter différemment la tangente de pertes (Figure II-41). A faible taux de TiO_2 (<0,7 %m), nous remarquons une amélioration de la tangente de pertes avec un optimum à $1,5 \cdot 10^{-5}$ pour 0,5 %m de TiO_2 , soit un gain de 25 %. Ensuite, la tangente de pertes se dégrade avec l'ajout du dopant jusqu'à un maximum de 10 %m. A 12 %m de TiO_2 la tangente de pertes semble présenter un début de stabilisation.

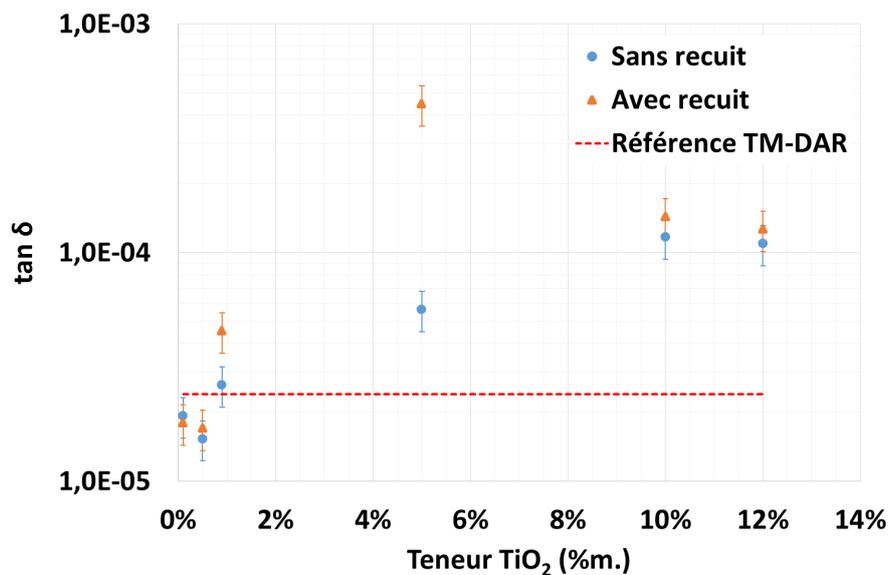


Figure II-41- Evolution de la tangente de pertes des alumines dopées en fonction de la teneur en TiO_2

Nous retrouvons le même comportement du titanate d'aluminium sur la tangente de pertes observé auparavant sur la permittivité. Pas de modification significative à l'issue du recuit sauf pour les deux points à 0,9 %m et 5 %m qui restent actuellement inexplicables. Une forte hypothèse est qu'un défaut d'homogénéité du dopant dans la poudre a créé une zone avec une quantité anormale de titanate d'aluminium. Il faut noter que malgré une taille de grains plus grande de 50% et une densité inférieure à la TM-DAR au départ, l'ajout de dioxyde de titane



à 0,5%_m améliore la tangente de pertes de 25%. Cela veut dire qu'à cette fréquence, l'alumine dopée présente un comportement différent de l'alumine pure où le faible taux de TiO₂ présente le facteur dominant devant la densité et la taille de grains.

La correction du facteur de température de l'alumine représente le deuxième point important dans cette étude de dopage. Nous avons rapporté sur la Figure II-42 les résultats de mesure du facteur de température en fonction du taux de dopage en TiO₂. L'utilisation de ce dopant s'avère important pour corriger le facteur de température. Ce dernier passe de -60ppm. °C⁻¹ pour un taux de dopage <1%_m à -14ppm. °C⁻¹ pour 12%_m de TiO₂. Contrairement à la tangente de pertes et à la permittivité, la présence du titanate d'aluminium dégrade le facteur de température. Nous remarquons qu'à l'issue du recuit, nous retrouvons un matériau stable en température pour un taux de dopage de 12%_m de dioxyde de titane. Une caractérisation de l'alumine dopée dans les bandes Q et V a eu lieu pour vérifier l'évolution de leurs propriétés diélectriques (Figure II-43).

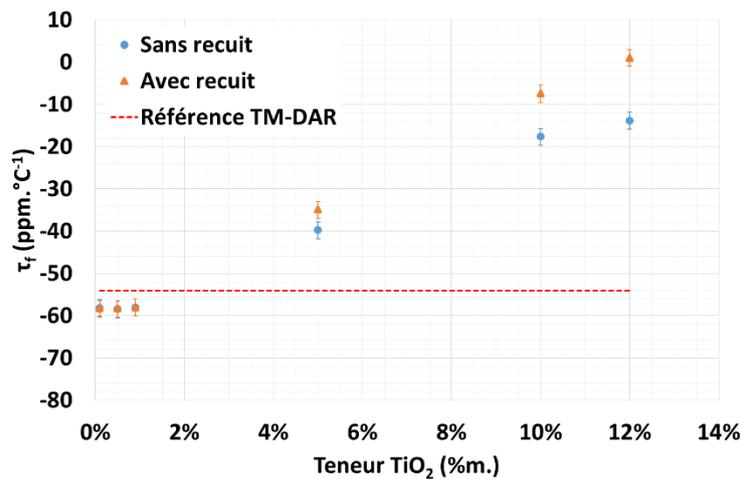


Figure II-42- Evolution du facteur de température des alumines dopées en fonction de la teneur en TiO₂



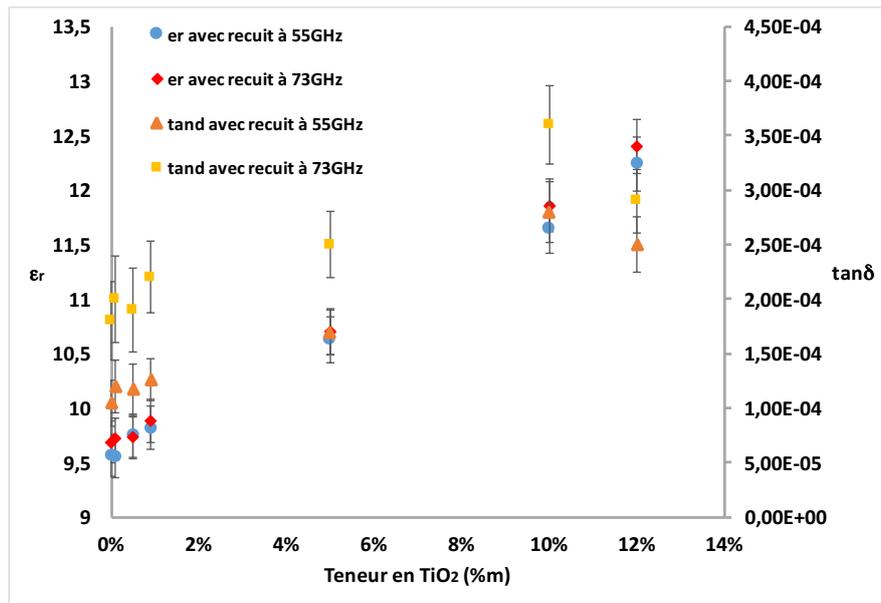


Figure II-43- Evaluation des performances diélectriques des aluminés dopés TiO₂ à 55 GHz et à 73 GHz

Au niveau de la permittivité, nous retrouvons les mêmes tendances observées à 13 GHz, avec une augmentation de la permittivité à chaque augmentation du taux de dioxyde de titane. Pour la tangente de pertes, l'amélioration est aussi maintenue avec une augmentation des pertes en fonction du taux du dopage. Sauf que l'amélioration de la tangente de pertes à 0,5 %m est supprimée. À très haute fréquence, le dopage à faible taux n'apporte pas d'amélioration en termes de pertes diélectriques de l'alumine mais il garde son intérêt à forte concentration pour corriger le facteur de température.

VI.3 Comparaison de la TM-DAR dopée à la littérature

Dans le cadre du projet ATOMIQ, nous avons opté pour l'utilisation du sel de titane comme dopant pour l'alumine dans l'optique de contourner les propriétés intellectuelles existantes. Le dopage a été utilisé pour deux objectifs majeurs :

- ➔ Rechercher un optimum pour la tangente de pertes
- ➔ Rechercher un optimum pour le facteur de température

L'utilisation du titane sous forme de sel a généré des microstructures très différentes de ce que nous avons observé dans la littérature. Etant donné que la taille des grains de TiO₂ (<5 nm) est très petite, ces microstructures sont probablement la cause de cette différence.



Dans la phase d'optimisation de l'alumine pure, nous avons identifié trois paramètres influant potentiellement sur les performances diélectriques. Dans les cas d'une alumine dopée au TiO₂ et pour des applications de hautes fréquences, le nombre de paramètres influents s'amplifie ce qui rend cette tâche complexe. Les caractérisations à 13 GHz des aluminés dopés synthétisés au cours de notre projet montrent des performances intéressantes pour ce matériau. Une comparaison avec les données trouvées dans la littérature est présentée sur la Figure II-44.

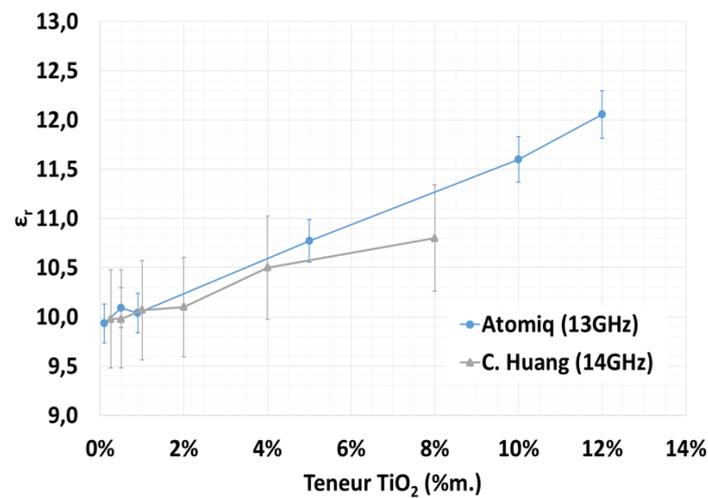


Figure II-44- Comparaison des permittivités des aluminés dopés sans recuit à la littérature [53]

Nous pouvons remarquer une concordance entre nos mesures et celle de C. Huang jusqu'à 5%_m, ensuite les deux courbes semblent diverger. Une constatation cependant difficile à confirmer au regard de l'absence de point au-delà de 8 %_m. La microstructure du matériau de C. Huang est différente de la nôtre, elle montre que la permittivité des matériaux dopés n'est pas trop sensible à la densité ou à la microstructure. Nous avons ajouté les travaux de McN. Alford [48] à l'étude de C. Huang [53] pour comparer les comportements à celle de la tangente de pertes de notre projet (Figure II-45).



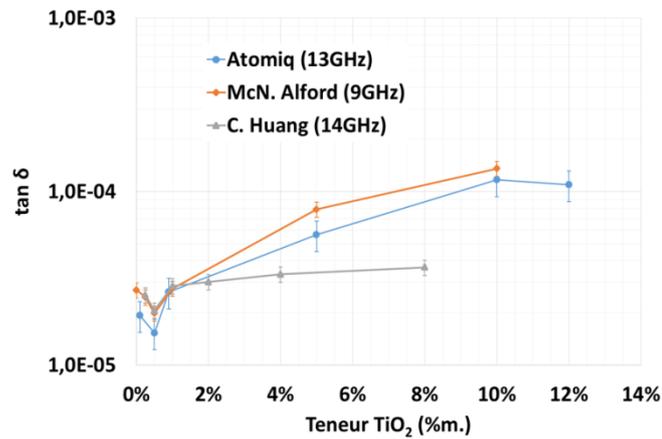


Figure II-45- Comparaison des tangentes de pertes des alumines dopées sans recuit à la littérature [48] [53]

Les trois matériaux, quelles que soient leurs différences (alumines, dopage, microstructure...), ont la même allure avec un optimum à 0,5 %m de TiO₂, avec ensuite une dégradation de la tangente de pertes au-delà de cette valeur. Nous pouvons aussi indiquer qu'à 0,5 %m de TiO₂, notre alumine propose la meilleure valeur de tangente de pertes trouvée dans la littérature avec un gain de 25 %. Une valeur à prendre avec précaution car l'alumine TM-DAR pure présente une tangente de pertes de 2.10^{-5} à 13 GHz soit les performances des alumines dopées trouvées dans la littérature. Il faut noter aussi que McN. Alford a réalisé un gain de 25% par rapport à l'alumine pure [60]. Au-delà de 1%_m de TiO₂, nos valeurs restent proches de celles de McN. Alford mais éloignées de celles de C. Huang qui a une meilleure microstructure et une densité plus élevée. Ce constat confirme que la microstructure et la densité dégradent la tangente de pertes pour des teneurs supérieures à 1 %_m. Cet impact est plus visible sur le facteur de température. La Figure II-46 présente la comparaison de la TM-DAR non dopée à celle de C. Huang. Nous pouvons remarquer rapidement que les deux alumines sont très différentes. Celle de C. Huang présente une amélioration importante du facteur de température au-dessous de 2 %_m, et au-delà l'effet diminue. Dans notre cas, nous n'observons pas d'effet au-dessous de 1 %_m, ensuite un effet maximal entre 1%_m et 10%_m, ensuite l'effet s'atténue au-delà de cette zone. En raison du manque d'information sur l'alumine de départ utilisée dans les travaux de C. Huang, il est quasiment impossible d'identifier la raison de cette différence.



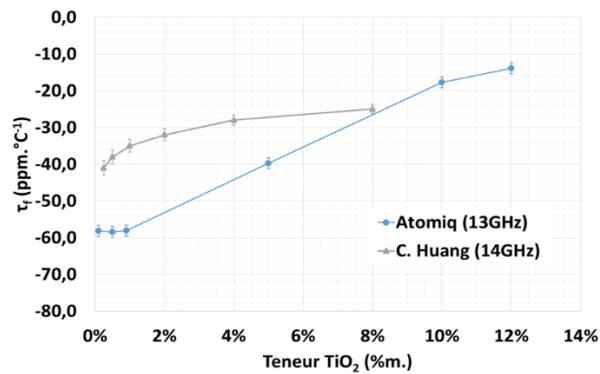


Figure II-46- Comparaison des facteurs de température des alumines dopées sans recuit à la littérature [53]

Nous avons aussi comparé l'effet du recuit sur les performances diélectriques aux travaux de Y. Miyauchi [55] (Figure II-47). Selon ces derniers, le recuit améliore les trois paramètres diélectriques de l'alumine (permittivité, tangente de pertes, facteur de température) par dissociation du titanate d'aluminium.

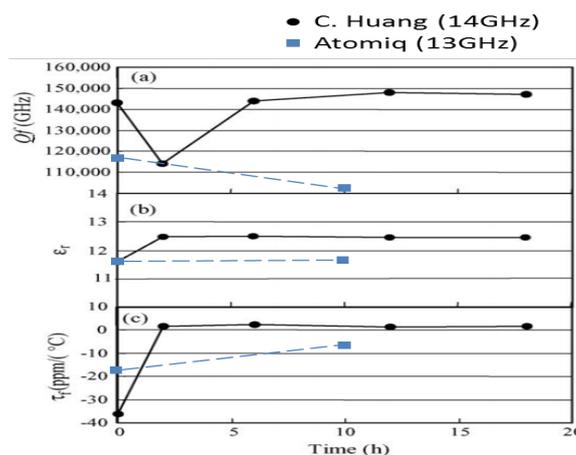


Figure II-47- Impact du temps de recuit à 1100°C sur τ_f , ϵ_r et $Q \cdot f$ d'une céramique 0,9 Al₂O₃ – 0,1 TiO₂ [55]

Nous pouvons voir sur ce graphe que seulement le facteur de température s'améliore grâce au recuit, ainsi la microstructure et la manière par laquelle le titanate d'aluminium a été conçu impactent sa dissociation. Le recuit n'a pas été étudié d'une manière approfondie par défaut de temps qui lui a été accordé dans le projet. Le cycle thermique utilisé dans le recuit a été choisi selon la littérature et n'est peut-être pas adapté à notre projet. Des taches grises ont été parfois remarquées sur les échantillons pouvant être causées par la durée du traitement thermique qui n'a été pas assez longue pour que la dissociation du titanate d'aluminium soit



achevée. Cependant, les objectifs fixés dans le cadre de ATOMIQ pour une l'alumine dopée ont été atteints, avec une très bonne valeur de tangente de pertes à $1,5 \cdot 10^{-5}$ à 13 GHz pour 0,5 %m de TiO_2 et un facteur de température proche de zéro pour 12 %m de TiO_2 .

VII. Conclusion chapitre II

L'ensemble des études menées conjointement entre Xlim et SPCTS dans le cadre du projet ATOMIQ a donné naissance à une céramique avec des performances diélectriques très intéressantes dans les bandes Q et V pour les applications visées dans cette étude. Nous avons choisi de travailler avec l'alumine TM-DAR qui offre une tangente de pertes de $2 \cdot 10^{-5}$ à 13 GHz et $1,78 \cdot 10^{-4}$ à 73 GHz. Dans les bandes de fréquences de notre projet, l'impureté présente le premier facteur de dégradation des performances diélectriques de l'alumine devant la densification. Cette alumine a un facteur de température très négatif ($-60 \text{ ppm} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$) qui n'est pas suffisant pour les applications qui nécessitent un matériau stable en température. Cette limitation nous a conduit à la recherche d'un dopant capable de corriger le facteur de température. Pour contourner les propriétés intellectuelles, nous avons choisi d'utiliser le sel de titane pour le dopage de l'alumine. Dans un premier temps, nous avons synthétisé une alumine dopée à 0,5%_m de TiO_2 , qui a donné une très bonne tangente de pertes de $1,5 \cdot 10^{-5}$ à 13 GHz, mais qui n'est pas stable en température. Dans un deuxième temps, nous avons augmenté la teneur en TiO_2 jusqu'à l'obtention d'une alumine stable en température à 12%_m, au détriment de la tangente de pertes qui devient de l'ordre de $1 \cdot 10^{-4}$ à 13 GHz. Le dopage de l'alumine a répondu à ces attentes en optimisant la tangente de pertes et en corrigeant le facteur de température. Cette étude a dégagé trois pistes d'amélioration. Tout d'abord, il faut optimiser la densité et réduire la microstructure de l'alumine dopée. Dans la littérature, nous avons vu que l'ajout d'oxyde de manganèse bloque la formation du titanate d'aluminium [64], cette piste semble intéressante pour réduire la dégradation de la densité. Enfin, une optimisation du recuit est nécessaire pour réduire la dégradation du facteur de qualité.





Chapitre III

Conception Filtres bande Q/V des convertisseurs de fréquence pour la charge utile



I. Introduction du chapitre III

Les travaux de recherche présentés dans ce chapitre s'inscrivent dans le cadre d'un programme de recherche de télécommunication multimédia par satellite. L'objectif de ce programme est d'éviter une fracture numérique entre la France des villes et celle des campagnes, en proposant des alternatives à la fibre optique comparable en termes de débit et de coût. L'augmentation de débit passe principalement par l'utilisation de nouvelles bandes de fréquence : les bandes Q (autour de 40 GHz) et les bandes V (autour de 50 GHz). Le présent projet vise à développer les nouvelles générations de fonctions de filtrage pour les convertisseurs de fréquence afin de répondre aux besoins à moyen et long terme de télécommunication à très haut débit par satellite dans les bandes de fréquence Q et V. Sur le plan technique, le principe des satellites en bandes Q et V sera de couvrir la totalité du sol français à l'aide d'antennes multifaisceaux. La liaison entre les utilisateurs et les satellites s'opérera en bande Ka (30 GHz voie montante, 20 GHz voie descendante) pour être compatible avec le prochain déploiement des terminaux utilisateurs. De l'autre côté, les liaisons entre les stations au sol et les satellites seront effectuées en bande V (autour de 50 GHz) pour la voie montante et en bande Q (autour de 40 GHz) pour la voie descendante (Figure III-1).

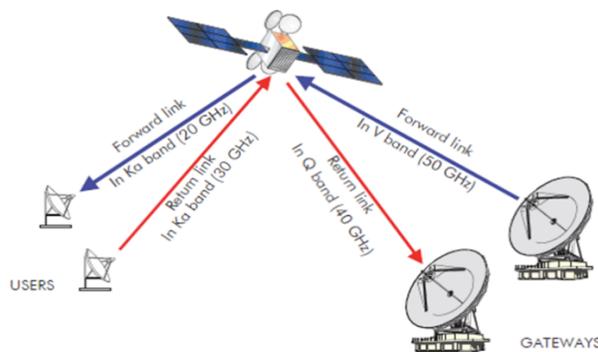


Figure III-1- Exemple d'allocation des fréquences entre les terminaux utilisateurs et les stations au sol

Ce chapitre sera donc organisé de la manière suivante. Une présentation des spécifications de filtrage en bandes Q et V du projet ATOMIQ sera exposée en premier temps. Ensuite une étude sur les topologies de filtrage sera réalisée pour choisir la topologie qui sera adoptée pour le projet. Dans ce chapitre nous allons aussi présenter la conception des différents filtres bandes Q et V. Une étude de sensibilité dimensionnelle et à la variation de la température sera présentée en dernière partie de ce chapitre.



II. Filtrages en bandes Q et V

II.1 Spécifications

L'utilisation des bandes Q et V, dans le cadre du projet ANR ATOMIQ (Technologies avancées pour les solutions de filtrages millimétriques intégrés en bandes Q et V), pour des applications de filtrage apporte plusieurs contraintes techniques et technologiques qui sont critiques pour ce type d'équipement. En fonction des analyses menées au niveau système chez Thales Alenia Space France et au CNES, des gabarits de filtrage ont été établis pour répondre aux besoins pour les prochaines générations de convertisseurs de fréquence dans les bandes Q et V comme nous pouvons les voir sur la Figure III-2. Ce projet, sous la coordination de Thales Alenia Space France (TAS-F), regroupe sept partenaires TAS-F, CNES, XLIM, 3D Ceram, SPCTS, Lab-STICC et Thin Film Product (TFP).

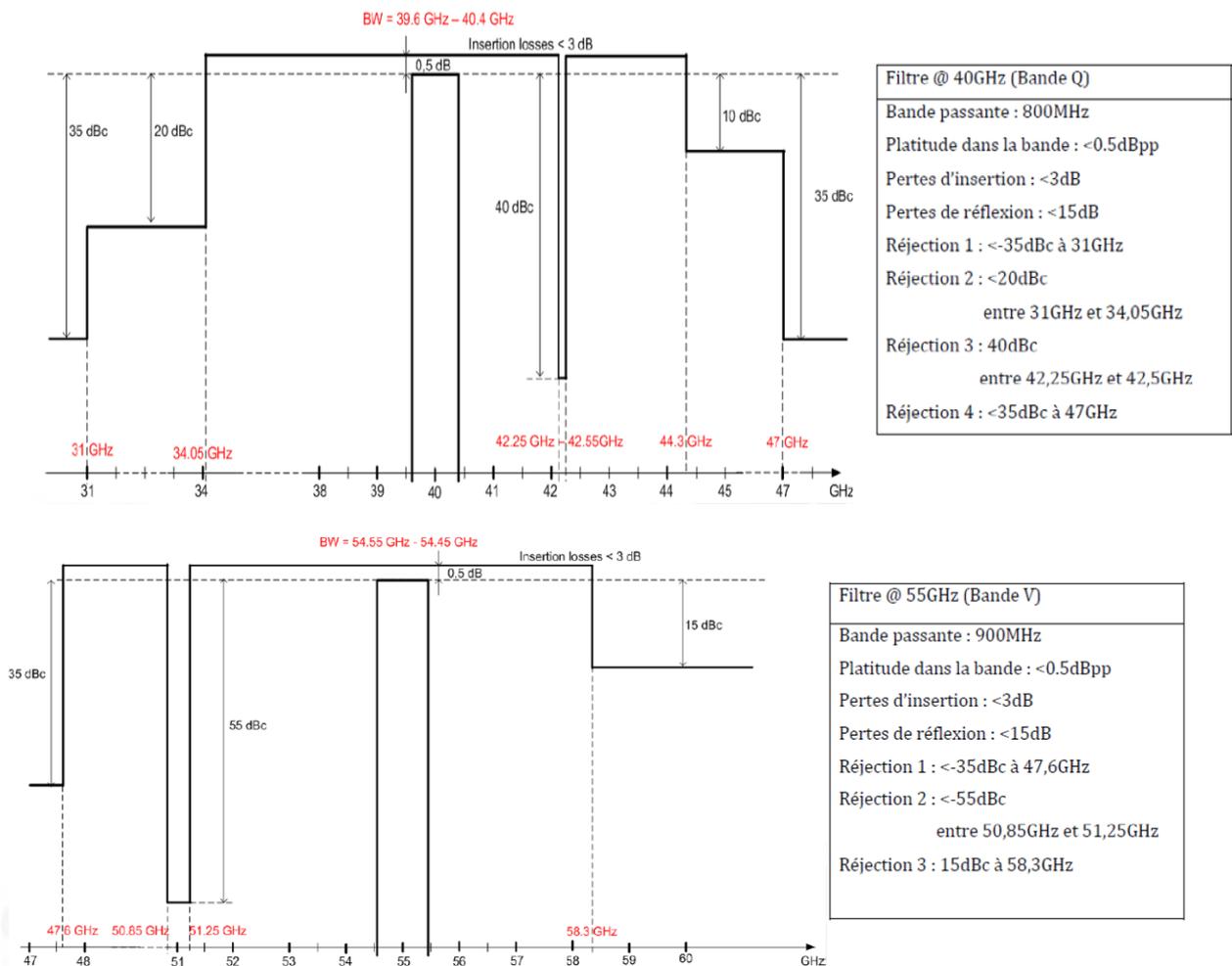


Figure III-2- Gabarit de filtrage Bande Q/V



Pour ces gammes de fréquence, nous allons travailler sur des objets de petites tailles (< quelques mm²) pour réaliser les fonctions de filtrage demandées. Les objectifs recherchés sont :

- Une précision de fabrication $\leq 50\mu\text{m}$
 - ✓ Une étude de sensibilité sera présentée dans la suite du chapitre pour étudier l'impact de telles erreurs dimensionnelles.
- Une isolation modale ≥ 10 GHz (au niveau du filtre)
- Une solution de réglage post-fabrication (afin de compenser les tolérances de fabrication si nécessaire)
- Une facilité d'intégration (report du filtre) dans un module RF
- Une stabilité en fréquence lors de la variation en température du dispositif de -20°C à $+60^{\circ}\text{C}$.

Le choix des matériaux céramiques s'est donc fait naturellement car ils permettent d'obtenir

- De faibles pertes
- Une relative stabilité en température.
- Une compatibilité avec les environnements spatiaux.
- Une compatibilité avec les techniques de fabrication 3D retenues dans le projet.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à deux technologies de fabrication (le moulage basse pression et la stéréolithographie) sur la base des objectifs recherchés dans ce projet. Les règles de conception liées au moulage seront présentées en annexe 1.

II.2 Estimation du nombre de pôles nécessaires

Pour répondre aux spécifications de filtrage présentées précédemment, nous avons utilisé le logiciel Felo développé par Stéphane Bila (Xlim) et Fabien Seyfert (INRA) basé sur la théorie de S.B. Cohn [69]. Cet outil a été utilisé pour déterminer le nombre de pôles nécessaires ainsi que la matrice de couplage associée. Le Tableau III-1 présente les variations des pertes d'insertion et les réjections hors bandes en variant le facteur de qualité tout en gardant un coefficient de réflexion meilleur que -20 dB. Les différentes simulations préliminaires permettent de comparer les performances du filtre passe-bande de type Tchebychev par rapport au gabarit de filtrage. Nous remarquons qu'avec un filtre 3 pôles nous avons les meilleures pertes d'insertion, le niveau de pertes du filtre 4 pôles restant acceptable dans le



cadre du projet. Avec la version quatre pôles nous avons beaucoup plus de marge dans la bande 42,25-42,5 GHz ce qui n'est pas le cas pour la version trois pôles d'où le choix de conserver le filtre quatre pôles pour la suite de l'étude pour la réalisation du filtre bande Q.

	Q0	500	1000	1500	Objectif
Pertes d'insertion/ dB	Filtre 3 pôles	1,2	0,6	0,4	< 3
	Filtre 4 pôles	2	1,05	0,7	< 3
Réjection=Rj à 31 GHz	Filtre 3 pôles	-76	-76	-76	-35 dBc
	Filtre 4 pôles	-110	-110	-110	-35 dBc
Rj entre 31&34,05 GHz	Filtre 3 pôles	-65	-65	-65	-20 dBc
	Filtre 4 pôles	-95	-95	-95	-20 dBc
Rj entre 42,25 &42,5 GHz	Filtre 3 pôles	-40	-40	-40	-40 dBc
	Filtre 4 pôles	-58	-58	-58	-40 dBc
Rj entre 44,3 &47 GHz	Filtre 3 pôles	-55	-55	-55	-10 dBc
	Filtre 4 pôles	-79	-79	-79	-10 dBc
Rj à 47 GHz	Filtre 3 pôles	-65	-65	-65	-35 dBc
	Filtre 4 pôles	-100	-100	-100	-35 dBc

Tableau III-1- Les variations des pertes d'insertion et des réjections hors bande filtre bande Q

	Q0	500	1000	1500	Objectif
Pertes d'insertion/ dB	Filtre 3 pôles	1,5	0,7	0,5	< 3
	Filtre 4 pôles	2,4	1,2	0,8	< 3
Rj à 47,3 GHz	Filtre 3 pôles	-68	-68	-68	-35 dBc
	Filtre 4 pôles	-100	-100	-100	-35 dBc
Rj entre 50,85&51,25 GHz	Filtre 3 pôles	-50	-50	-50	-55 dBc
	Filtre 4 pôles	-72	-72	-72	-55 dBc
Rj à 58,3 GHz	Filtre 3 pôles	-44	-44	-44	-15 dBc
	Filtre 4 pôles	-67	-67	-67	-15 dBc

Tableau III-2- Les variations des pertes d'insertion et des réjections hors bande filtre bande V

On retrouve les mêmes constatations pour le Tableau III-2 étudiant cette fois-ci les besoins en bande V. Pour respecter les spécifications de filtrage dans les deux bandes de fréquences (Q & V) il faut un filtre 4 pôles avec un facteur de qualité assez élevé (supérieur à 500). Les fonctions de transfert des filtres quatre pôles (bande Q centrée à 40 GHz et bande V centrée



55 GHz) ainsi que les gabarits de filtrage sont présentés sur les Figure III-3 et Figure III-4 ci-dessous.

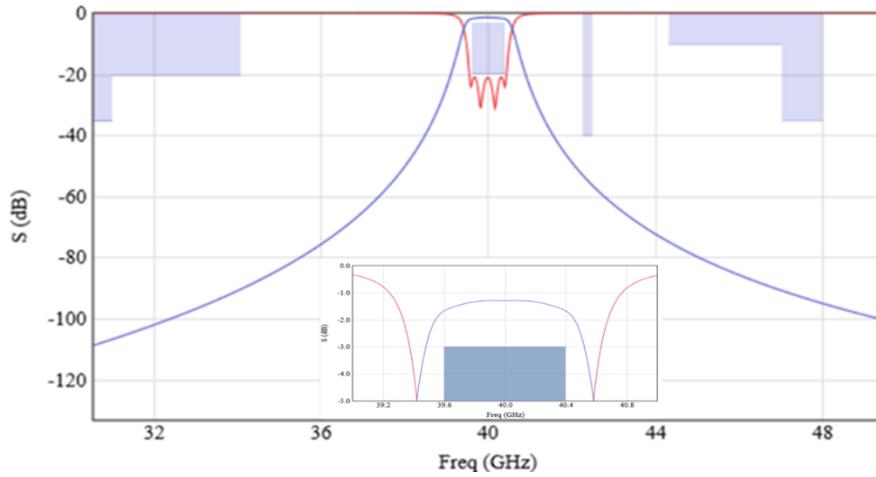


Figure III-3- Fonction de transfert du filtre 4 pôles en bande Q à 40 GHz

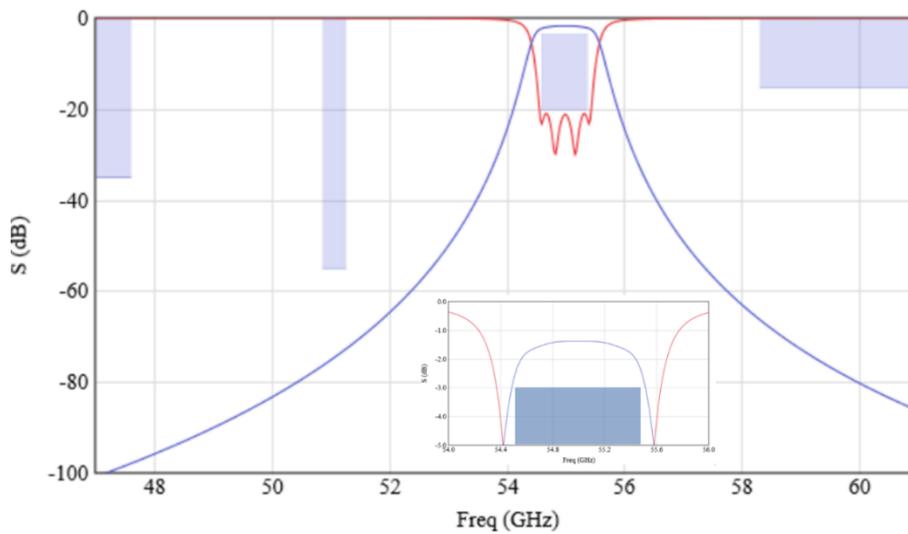


Figure III-4- Fonction de transfert du filtre 4 pôles en bande V à 55 GHz



II.3 Choix de la forme du résonateur

Une étude dimensionnelle a été réalisée sur trois différentes géométries de résonateurs présentées ci-dessous afin de choisir la géométrie la plus adaptée à notre application pour concevoir un filtre hyperfréquence et par la suite le fabriquer par moulage basse pression et stéréolithographie. Les trois géométries sélectionnées sont :

- ° Le résonateur parallélépipédique (1)
- ° Le résonateur hexagonal (2)
- ° Le résonateur de forme pyramidale tronquée (3)

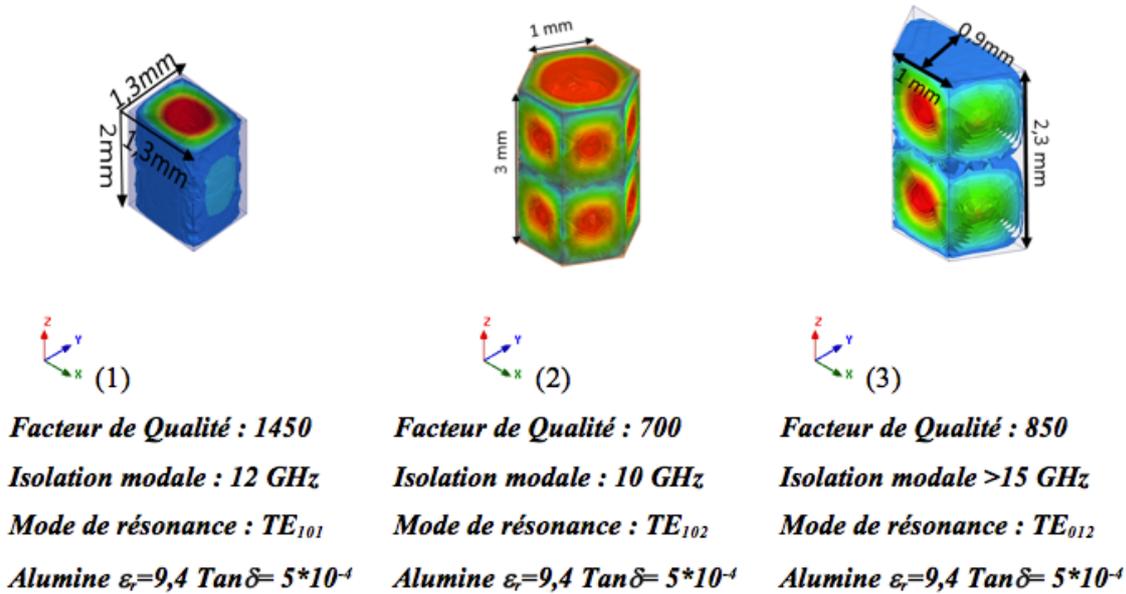


Figure III-5- Géométries des résonateurs étudiés

Le choix de faire cette analyse sur la fréquence 55 GHz qui est la plus haute à considérer dans le projet entre dans la logique de connaître les dimensions typiques et les plus contraignantes des résonateurs que nous allons utiliser, car plus nous augmentons la fréquence plus les objets deviennent petits. Le mode de résonance sélectionné pour chaque résonateur est choisi pour satisfaire les besoins en termes d'isolation fréquentielle et de facteur de qualité. La comparaison des différentes formes est basée sur la variation des dimensions principales des résonateurs afin de sélectionner la configuration qui s'adapte le mieux aux procédés de fabrication choisis. Chacune des 3 formes envisagées (bloc de céramique recouvert de Cuivre $\sigma_{\text{cuivre}}=30S/\mu\text{m}$) permet d'y placer les accès coplanaires. Pour cette première approche, les



tolérances de fabrication prévues sont volontairement fortes ($\pm 100\mu\text{m}$) et nous étudions le décalage fréquentiel lié à une homothétie isotrope Figure III-6.

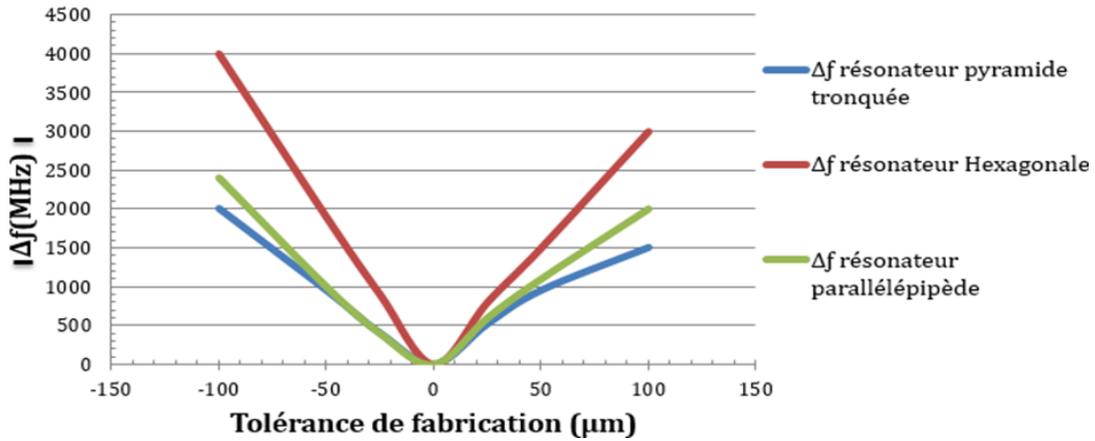


Figure III-6- Impact des tolérances de fabrication

Suite à la comparaison des formes géométriques des résonateurs et de l'impact de la tolérance de fabrication sur les décalages fréquentiels, nous remarquons que le résonateur pyramidal tronqué représente la meilleure isolation fréquentielle des 3 formes étudiées et un facteur de qualité suffisant pour notre activité de recherche. Le résonateur de forme pyramidale tronquée montré sur la Figure III-5 présente une meilleure robustesse vis à vis des tolérances de fabrication du procédé ainsi qu'une forme géométrique avantageuse par rapport aux autres formes pour la métallisation par PVD. Pour des raisons d'intégration dans le bloc RF, des modifications au niveau de l'entrée et de la sortie du résonateur ont été réalisées (Figure III-7). Ces modifications consistent à ajouter une pente suivie par une plateforme d'accueil d'une épaisseur $254\mu\text{m}$ (même épaisseur que les substrats utilisés par TAS) ce qui facilite le bonding du filtre avec les autres PCB du bloc RF (Figure III-8) en utilisant des fils de bonding de longueur totale $450\mu\text{m}$ au maximum (limite technologie).

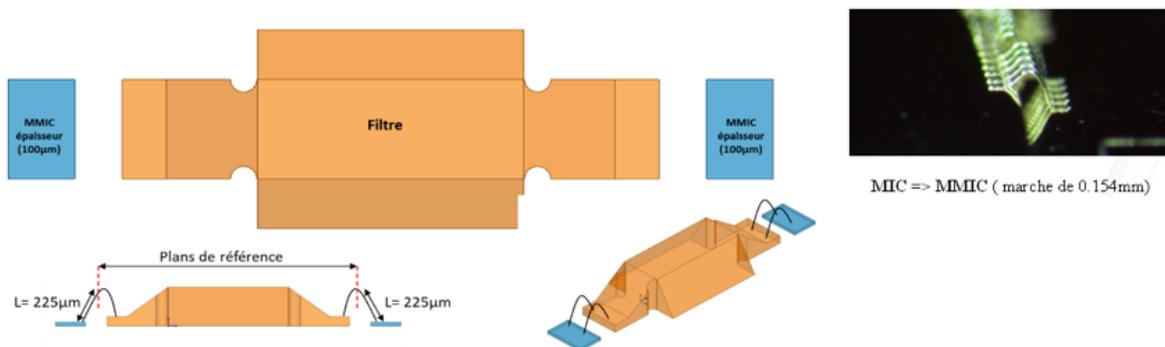


Figure III-7- Bonding du filtre avec substrat (cable de bonding de longueur totale $< 450\mu\text{m}$)



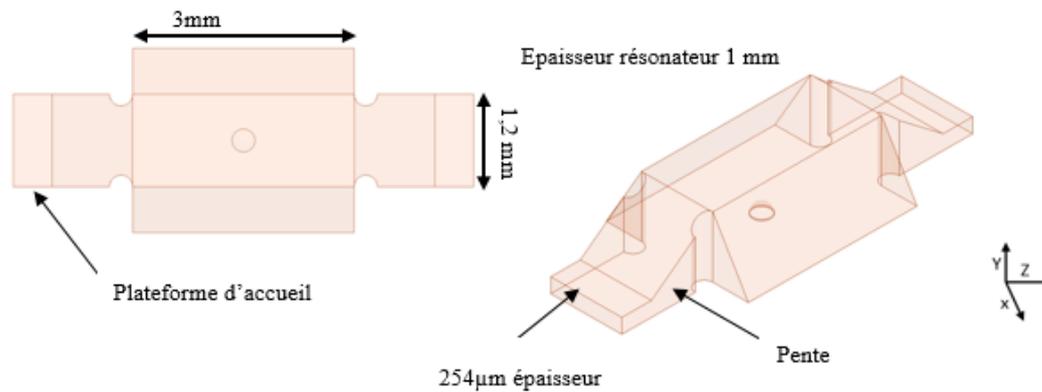


Figure III-8- Modifications du résonateur toujours recouvert de Cuivre

II.4 Etude du système d'excitation

Après avoir pris en compte les contraintes d'intégration demandées dans le cadre du projet, il faut maintenant choisir le système d'excitation que nous allons utiliser dans notre application. Deux systèmes d'excitation seront comparés dans ce chapitre afin de vérifier leurs compatibilités avec les objectifs souhaités :

- Excitation coplanaire
- Excitation micro-ruban

Ces deux systèmes présentent l'avantage d'être compatibles avec les techniques de câblage par bonding dans un environnement planaire (Figure III-8). Ils seront positionnés par gravure laser au niveau de la face supérieure de la métallisation de notre filtre là où nous avons un maximum de champ (Figure III-5). Le couplage du résonateur avec les autres éléments du circuit hyperfréquence présente un des points importants du dispositif RF. Le couplage avec l'environnement extérieur est quantifié par le coefficient de couplage externe Q_e qui est de ≈ 90 dans notre application.

$$\text{Équation III - 1: } Q_{e_thorique} = \frac{g_0 g_1}{\frac{\Delta f}{f_0}} \quad (1)$$

Pour un niveau d'ondulation dans la bande passante inférieure à 0,5 dB, nous avons :

$$\begin{aligned} g_0 &= 1 & g_1 &= 1.67 \\ \Delta f &= 0.9 \text{ GHz} & f_0 &= 40 \text{ GHz}. \end{aligned}$$

Ce coefficient sera réglé en modifiant la position et les dimensions de l'excitation. Pour calculer la valeur de $Q_{e_simulé}$, nous avons utilisé un seul motif d'excitation en réalisant la



simulation sans pertes dans le dispositif. À l'aide de la phase du coefficient de réflexion S_{11} , il est possible de calculer sa valeur. Sur le graphe de la phase de S_{11} (Figure III-9) nous relevons les deux fréquences ($f_{\phi(S_{11}) + 90^\circ}$ et $f_{\phi(S_{11}) - 90^\circ}$) et enfin nous calculons la valeur de Q_e en utilisant l'équation (2).

$$\text{Équation III - 2: } Q_{e_{\text{simulé}}} = \frac{f_0}{f_{\phi(S_{11})-90^\circ} - f_{\phi(S_{11})+90^\circ}} \quad (2)$$

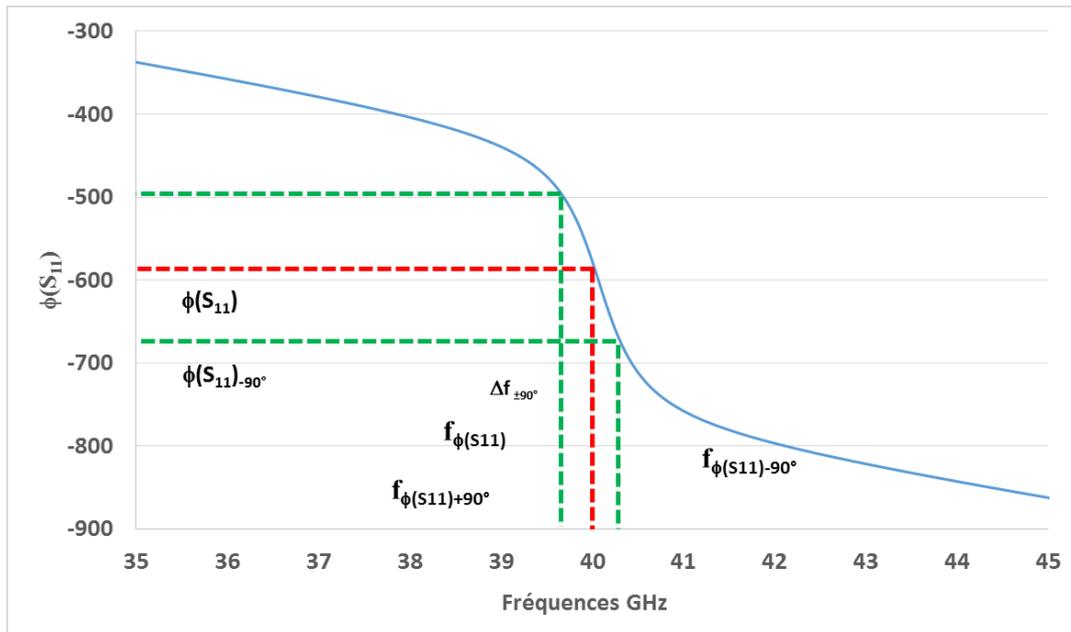


Figure III-9- Calcul de Q_e à partir $\phi(S_{11})$

II.5 Excitation coplanaire

II.5.a Excitation sur le dessus de la structure

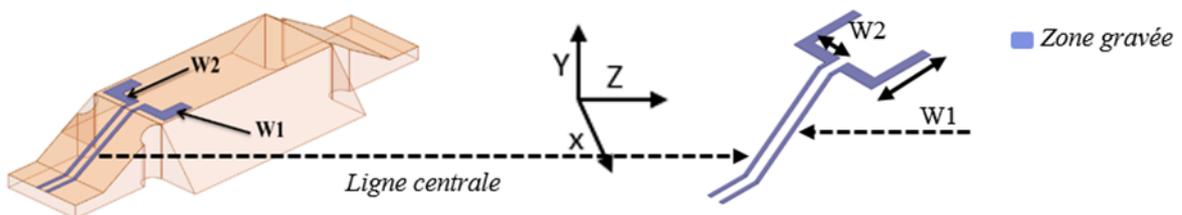


Figure III-10- Excitation coplanaire sur le dessus du résonateur

La Figure III-10 présente l'excitation coplanaire gravée sur la face supérieure de la métallisation. Nous avons fixé sa position et nous allons étudier l'influence des dimensions



(W_1 , W_2) sur le facteur Q_e par des simulations électromagnétiques en régime forcé. Les valeurs du gap et de la ligne centrale sont fixées respectivement à $55 \mu\text{m}$ et $100 \mu\text{m}$ afin de respecter les sondes de mesures Cascade Microtech qui seront utilisées dans cette étude avec une distance entre les pointes de $125 \mu\text{m}$. Les Figure III-11 et Figure III-12 tracent l'évolution du facteur de qualité extérieur Q_e du résonateur de forme pyramide tronquée. Le mode de résonance TE_{012} reste le même dans toutes les configurations.

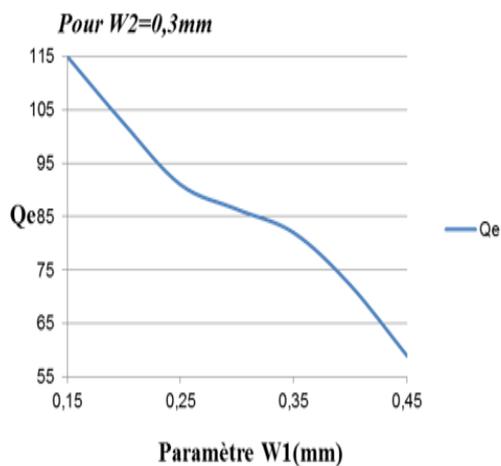


Figure III-11- Variation du facteur de qualité extérieur Q_e en fonction du paramètre W_1

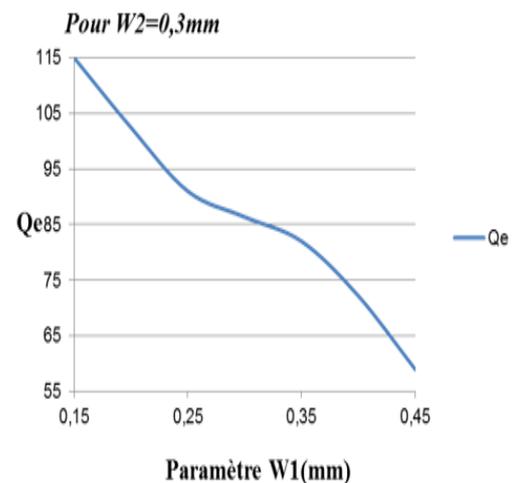


Figure III-12- Variation du facteur de qualité extérieur Q_e en fonction du paramètre W_2

Ces figures nous indiquent que l'utilisation d'une excitation coplanaire sur le dessus du résonateur donne une large gamme de valeur de Q_e suffisante pour notre application et peut être adaptée à la fonction de filtrage souhaitée.

II.5.b Excitation sur la pente

L'idée de graver l'excitation sur la pente du résonateur a pour objectif de diminuer le niveau de pertes (Figure III-13). Les abaques de la Figure III-14 montrent l'évolution de Q_e en fonction des dimensions de l'excitation.



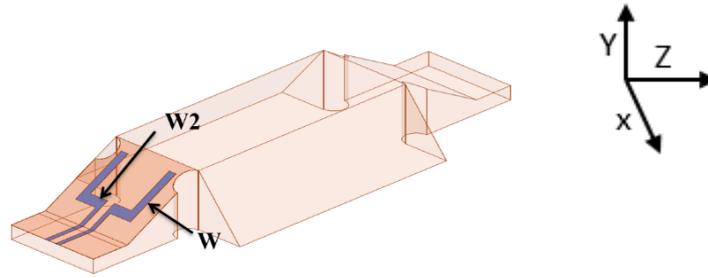


Figure III-13- Excitation coplanaire sur la pente

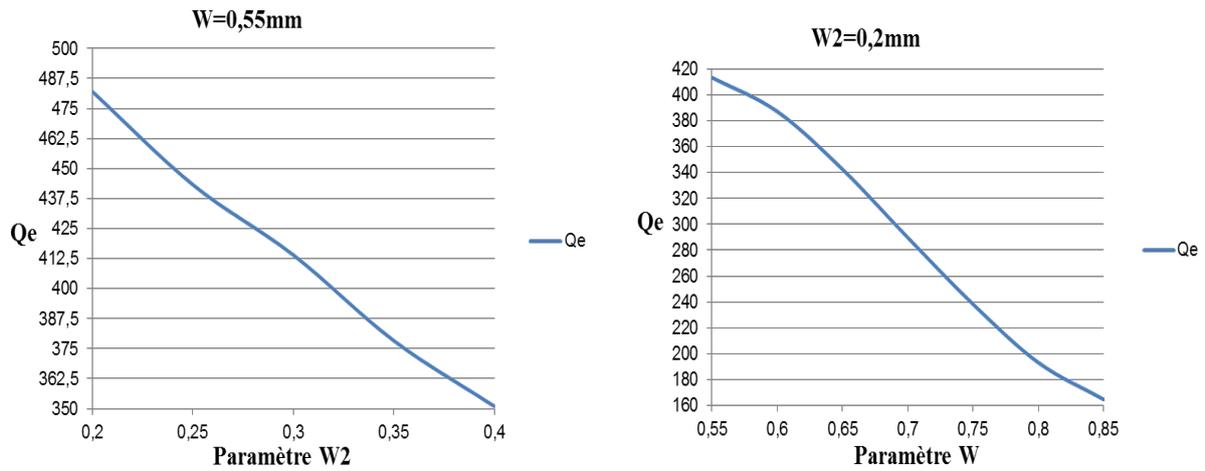


Figure III-14- Variation du facteur de qualité extérieur Q_e en fonction des paramètres W et W_2

Ces deux abaques montrent que l'utilisation sur la pente du résonateur donne un niveau de Q_e très élevé pour les variations dimensionnelles possibles de l'excitation sur notre résonateur. Cette idée a été écartée pour la suite du projet.

II.6 Excitation micro-ruban

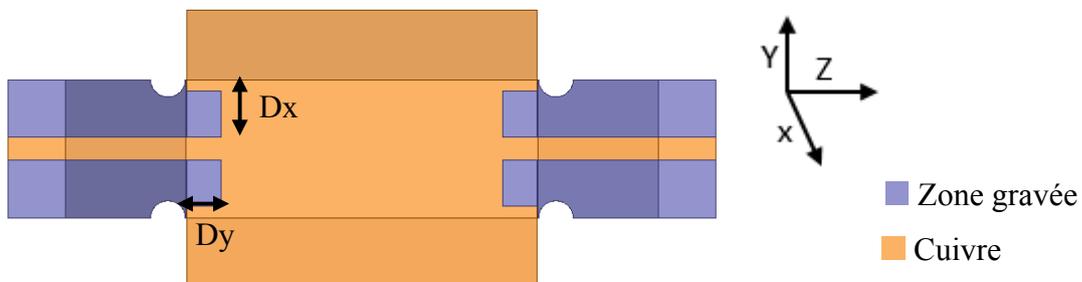
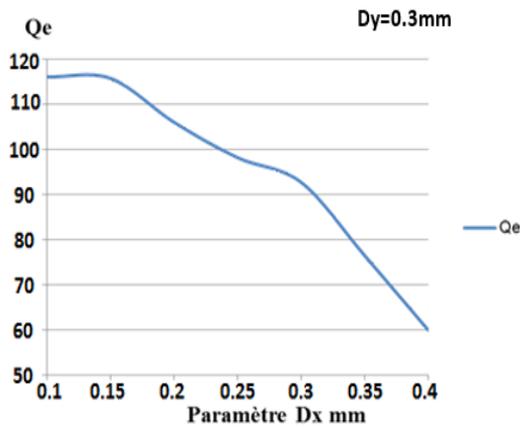
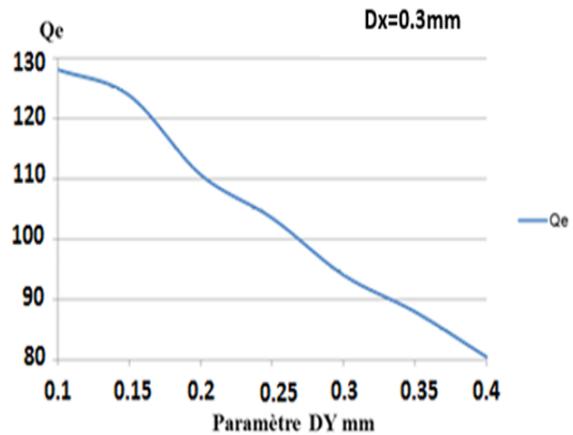


Figure III-15- Excitation micro-ruban



L'utilisation de l'excitation micro-ruban présente un grand intérêt dans notre application, cette dernière étant privilégiée par TAS pour la souplesse apportée dans la phase d'interconnexion du filtre hyperfréquence avec le reste du bloc RF en utilisant des fils de bonding. En d'autres termes, cette dernière utilise moins de fils de connexion qu'avec un accès coplanaire. Pour cette excitation, nous allons refaire la même étude que l'on a faite sur l'autre excitation afin de vérifier sa compatibilité avec notre application. Les Figure III-16 et Figure III-17 illustrent les variations du facteur de qualité extérieur Q_e en fonction des dimensions D_x et D_y .

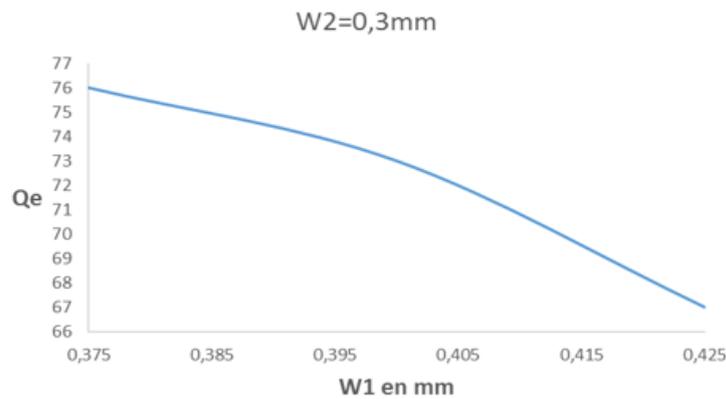
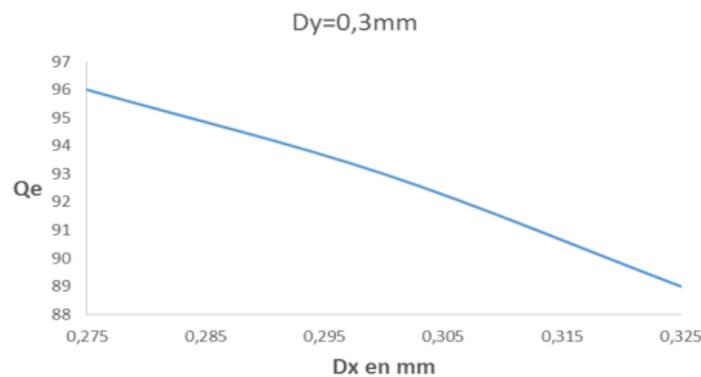
Figure III-16- Variation de Q_e en fonction de D_x Figure III-17- Variation de Q_e de D_y

A travers ces deux abaques nous voyons bien que la variation du facteur de qualité extérieur Q_e présente des valeurs de couplage suffisamment cohérentes avec les attentes du projet pour des variations dimensionnelles entre (0.1mm à 0.4mm). Pour la suite du projet, nous retiendrons ce type d'excitation.

II.7 Dispersion de Q_e face à la tolérance de gravure

Le niveau de variation du facteur de qualité extérieur face aux tolérances de gravure reste un point à examiner pour connaître les exigences à respecter dans la phase de fabrication de ces excitations. Les Figure III-18 et Figure III-19 présentent la variation de Q_e pour chaque excitation face à une tolérance de gravure de $\pm 25\mu\text{m}$, cette valeur étant le diamètre du laser qui servira à la gravure. Les valeurs de W_1 et D_x qui ont été choisies pour étudier la dispersion de la gravure ont été sélectionnées à partir de la plage des valeurs présentées dans les Figure III-14 et Figure III-16.



Figure III-18-Dispersion de Q_e face à la tolérance de gravure (excitation coplanaire)Figure III-19- Dispersion de Q_e face à la tolérance de gravure excitation micro-ruban

On remarque que dans les deux cas de figure, nous trouvons une dispersion de ± 6 sur le facteur de qualité extérieur Q_e , une faible variation qui ne s'avère pas critique dans notre application. Les deux excitations (coplanaire sur le dessus du résonateur et micro-ruban) présentent un intérêt pour la suite du projet. Nous avons fait le choix de travailler avec les deux excitations :

- Excitation coplanaire : pour les prototypes qui seront mesurés à Xlim pour des raisons de simplicité pour les caractérisations expérimentales
- Excitation micro-ruban : pour les essais de bonding prévus chez TAS

II.8 Filtre passe-bande deux pôles

Dans la partie I, nous avons choisi, afin de respecter les gabarits de filtrage, d'utiliser des filtres 4 pôles de type Tchebychev pour les deux bandes (Q et V). L'utilisation d'un filtre 2 pôles est privilégiée afin de valider plusieurs aspects technologiques avant de se lancer dans la conception du prototype final.



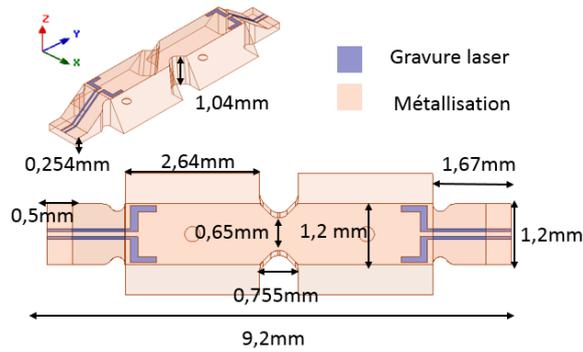


Figure III-20- Modèle 3D du filtre deux pôles

Le filtre 2 pôles proposé sera réalisé en Alumine ($\epsilon_r = 9.4$ $\tan\delta = 5 \cdot 10^{-4}$ à 40 GHz), les résonateurs et l'iris de couplage sont fabriqués dans un seul bloc céramique.

II.8.a Paramètres de couplage

Dans un filtre volumique, le nombre d'interconnexions entre les différents résonateurs définit le nombre de couplages dans la structure (sans considérer les couplages d'entrée-sortie). Dans le cas du filtre 2 pôles, il y a un seul couplage inter-résonateur K_{12} ce qui simplifie la tâche de la conception. Le facteur K_{12} varie en fonction de la largeur et la longueur de l'iris de couplage dans notre cas. Nous avons choisi de ne pas varier la hauteur de l'iris qui est égale à la hauteur des résonateurs afin de faciliter la phase de fabrication. Nous associons des conditions aux limites (CCE, CCM) au niveau du plan de symétrie de la structure qui passe par le centre de l'iris. Les variations des dimensions de l'iris entraînent des modifications de la configuration du champ EM quand nous avons un CCM au niveau du plan de symétrie. Cela veut dire que la fréquence de résonance du mode CCM varie pendant que celle du mode CCE est constante. Pour calculer le couplage K_{12} , nous utilisons l'équation suivante :

$$\text{Équation III - 3: } K_{12} = \frac{f_{CCE}^2 - f_{CCM}^2}{f_{CCE}^2 + f_{CCM}^2} \quad (3)$$

En utilisant cette équation, nous avons pu calculer les variations de K_{12} en fonction des variations dimensionnelles de l'iris de couplage. La Figure III-21 illustre ces variations.



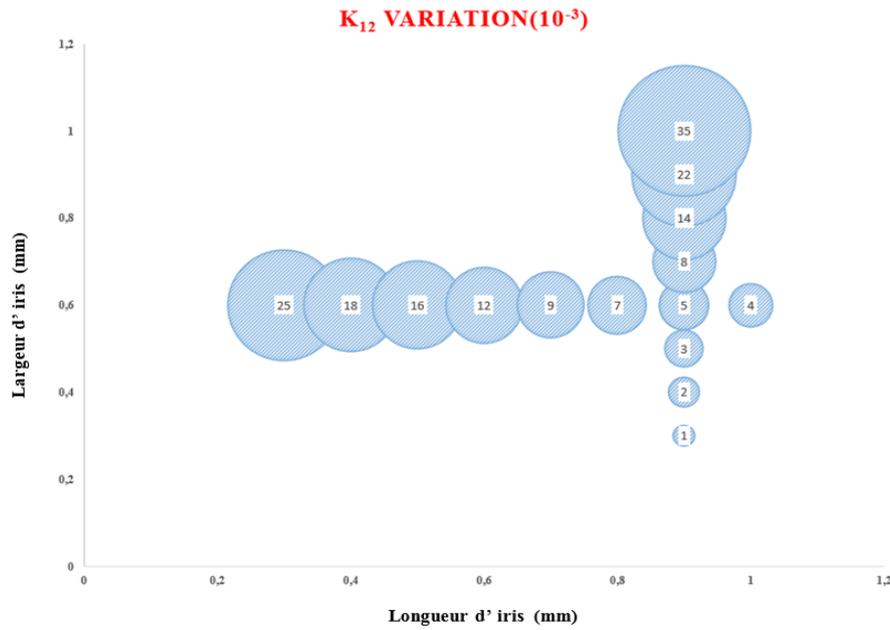


Figure III-21- Variations de K_{12} en fonction des variations dimensionnelles de l'iris de couplage

En augmentant la longueur de l'iris (suivant l'axe y), nous remarquons une diminution de la valeur du couplage K_{12} mais en augmentant la largeur de l'iris (suivant l'axe x) le couplage augmente. L'étude du couplage inter-résonateurs et le facteur de qualité extérieur ont servi pour l'optimisation dimensionnelle du filtre deux pôles.

II.8.b Simulations Electromagnétiques

Pour notre filtre 2 pôles nous avons fixé ces spécifications qui sont représentatives des besoins sur les filtres 4 pôles à venir :

$$F_0 = 42.1 \text{ GHz}$$

$$\text{Ondulation} = 0,5 \text{ dB}$$

$$\text{Bande passante équi-ondulation} = 1\%$$

$$\text{Réflexion dans la bande} > 20 \text{ dB}$$

Pour calculer le facteur de qualité extérieur Q_e ainsi que le couplage K_{12} , nous utilisons les équations I-1 et I-4.

$$\text{Équation III - 4 : } K_{12} = \frac{\Delta_f}{f_0} \frac{1}{\sqrt{g_1 g_2}} \quad \text{avec } (g_1 = 1,4029, g_2 = 0,7071); \Delta_f = 0,4$$

À partir des coefficients g_i d'un filtre Tchebychev normalisé en fonction du nombre de pôles et l'ondulation dans la bande passante nous extrayons les valeurs suivantes : ($g_0 = 1, g_1 = 1,4029, g_2 = 0,7071$). En appliquant les deux équations nous trouvons les valeurs de Q_e et K_{12}



qui sont respectivement 142 et $9,5 \cdot 10^{-3}$ que nous nous sommes imposés ici. Pour répondre aux spécifications choisies, une simulation globale de la pièce a été réalisée en oscillation forcée sur HFSS. Plusieurs itérations ont conduit à optimiser les dimensions du filtre et donc sa réponse fréquentielle. Comme nous l'avons indiqué précédemment l'Alumine utilisée présente une permittivité de 9,4 et une tangente de pertes $5 \cdot 10^{-4}$, tout le dispositif est blindé par du Cuivre avec une conductivité de $30 \text{ S}/\mu\text{m}$. La Figure III-22 présente les différentes dimensions du filtre qui a une épaisseur de 1mm.

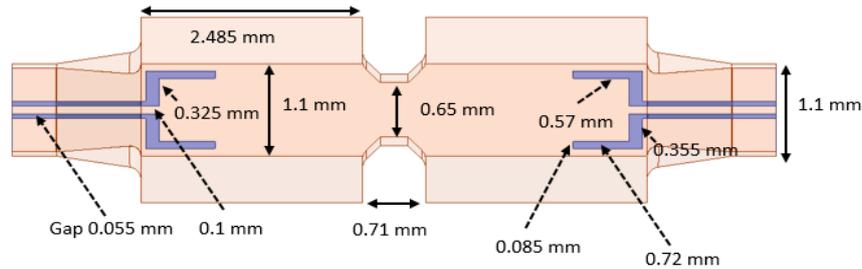


Figure III-22- Dimensions globales du filtre deux pôles et l'excitation coplanaire en mm

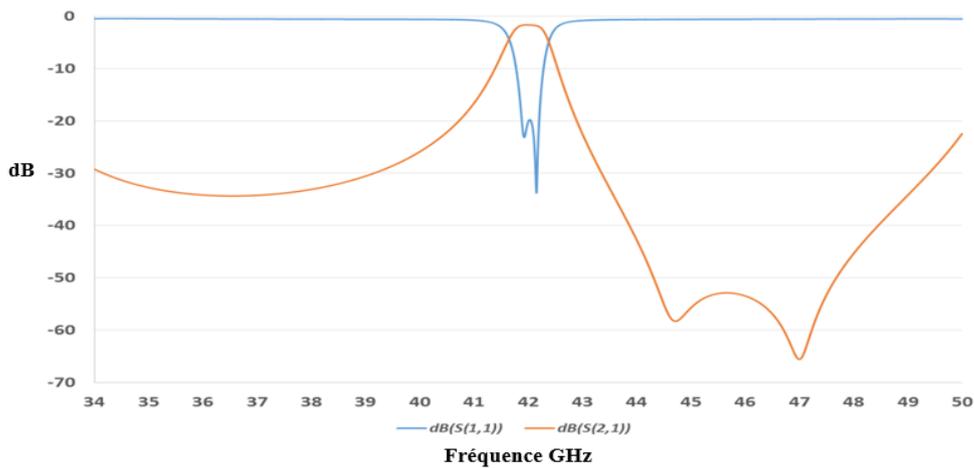


Figure III-23- Réponse fréquentielle avec pertes du filtre global deux pôles

La Figure III-23 présente la simulation EM globale de notre filtre entre 34 et 50 GHz. La fréquence de résonance est de 42 GHz, la bande passante à -3 dB est de 1% ce qui est équivalent à 0,42 GHz. Ce filtre présente des pertes d'insertion de 1,6 dB avec une ondulation dans la bande de 0,45 dB. Le niveau de réflexion dans la bande est toujours inférieur à 20 dB. Ce filtre répond au gabarit de filtrage et il sera utilisé pour valider la topologie et vérifier le facteur de qualité ainsi que le couplage K_{12} .



II.9 Filtre quatre pôles bandes Q et V

II.9.a Matrice de couplage

Notre objectif est ici la réalisation d'un filtre 4 pôles répondant aux spécifications de filtrage proposées par TAS. Les filtres qui seront conçus dans cette partie seront par la suite fabriqués en moulage basse pression par le CTTC. Des contraintes liées à cette technique de fabrication seront prise en compte dans l'optimisation de la forme de nos filtres. Travailler à très hautes fréquences rend le réglage du filtre complexe du fait que les dimensions du filtre sont petites et les variations dimensionnelles impactent rapidement la réponse fréquentielle du dispositif. Pour cela l'utilisation de méthode spécifique s'avère obligatoire pour régler finement le filtre tout en minimisant le nombre des simulations EM. En partant des spécifications de filtrage présentées dans la partie I et à l'aide du logiciel Felo, la synthèse de filtre est réalisée. À l'issue de cette étape une matrice de couplage objectif $[M_{obj}]$ normalisée est extraite. Elle est calculée en se basant sur la fréquence centrale, la bande passante et la réjection hors bande.

$$[M_{obj}] = \begin{bmatrix} 0 & M_{in} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ M_{in} & M_{11} & M_{12} & M_{13} & M_{14} & 0 \\ 0 & M_{21} & M_{22} & M_{23} & M_{in} & 0 \\ 0 & M_{31} & M_{32} & M_{33} & M_{34} & 0 \\ 0 & M_{41} & M_{42} & M_{43} & M_{44} & M_{out} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & M_{out} & 0 \end{bmatrix}$$

Figure III-24- Matrice de couplage pour un filtre quatre pôles

$M_{in} \& M_{out}$	Couplages d'entrée et sortie liés aux impédances d'entrée/sortie des excitations ainsi que le facteur de qualité extérieur Q_e
M_{ii}	Traduit le décalage fréquentiel de chaque résonateur par rapport à f_0
M_{ij}	Traduit les couplages inter-résonateurs

L'optimisation du filtre passe par trois étapes, tout d'abord nous modifions les dimensions des résonateurs pour régler la fréquence centrale, ensuite les dimensions des iris pour corriger le niveau des couplages inter-résonateurs et enfin les dimensions des excitations pour affiner les couplages d'entrée-sortie. Les équations suivantes présentent la dé-normalisation de la matrice de couplage.

Équation III – 5: $M_{in} = M_{out} = \sqrt{R}$ Avec R=impédance entrée-sortie



Équation III – 6: $R = \frac{f_0}{\Delta f Q_e}$

Équation III – 7: $K_{ij} = \frac{\Delta f}{f_0} M_{ij}$

Nous appliquons ces équations et à partir des spécifications de filtrage, nous obtenons la matrice de couplage objectif pour les deux filtres (bande Q centrée à 40 GHz, bande V centrée à 55 GHz).

$$[M_{obj}] = \begin{bmatrix} 0 & 1.035 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.035 & 0 & 0.911 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.911 & 0 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0.911 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.911 & 0 & 1.035 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.035 & 0 \end{bmatrix}$$

Figure III-25- Matrice dé-normalisée filtre bandes Q et V

II.9.b Optimisation des filtres

La réussite dans l’optimisation de notre filtre vient tout d’abord dans le respect de la matrice de couplage objectif présentée dans la Figure III-25. Donc il faut faire converger la matrice de couplage simulée vers celle théorique. La Figure III-26 présente la topologie du filtre 4 pôles qui est la continuation logique du filtre deux pôles présenté précédemment.

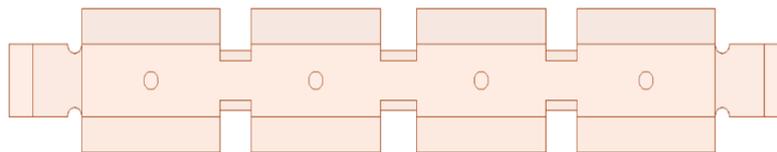


Figure III-26- Filtre 4 pôles

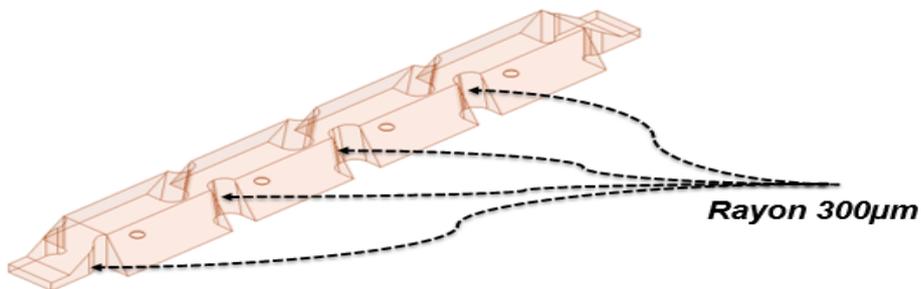


Figure III-27-Contrainte imposée par le moulage basse pression



Comme nous l'avons indiqué précédemment le moulage basse pression sera utilisé pour fabriquer un lot de pièces. Une étude sur les règles de design ayant été réalisée auparavant, nous avons appliqué un arrondi au niveau des angles droits comme préconisé par le sous-traitant. Le rayon de cet arrondi dépend du diamètre de l'outil de fraisage qui sera utilisé. Dans notre cas il est de $300\mu\text{m}$ (Figure III-27).

II.9.c Filtre bande Q 40 GHz (excitation coplanaire)

L'utilisation de l'excitation coplanaire nous donne la possibilité de mesurer les filtres à Xlim à l'aide des instruments de mesure locaux utilisant des pointes coplanaires. Après l'optimisation des dimensions du filtre présentées sur la Figure III-28, nous obtenons une réponse fréquentielle optimale répondant aux spécifications de filtrage imposée par TAS. L'obtention de cette réponse nécessite une trentaine d'itération sur HFSS. Sur la Figure III-29, nous visualisons la fonction de transfert ainsi que le gabarit du filtrage. Pour rappel le mode de résonance utilisé est le TE_{012} .

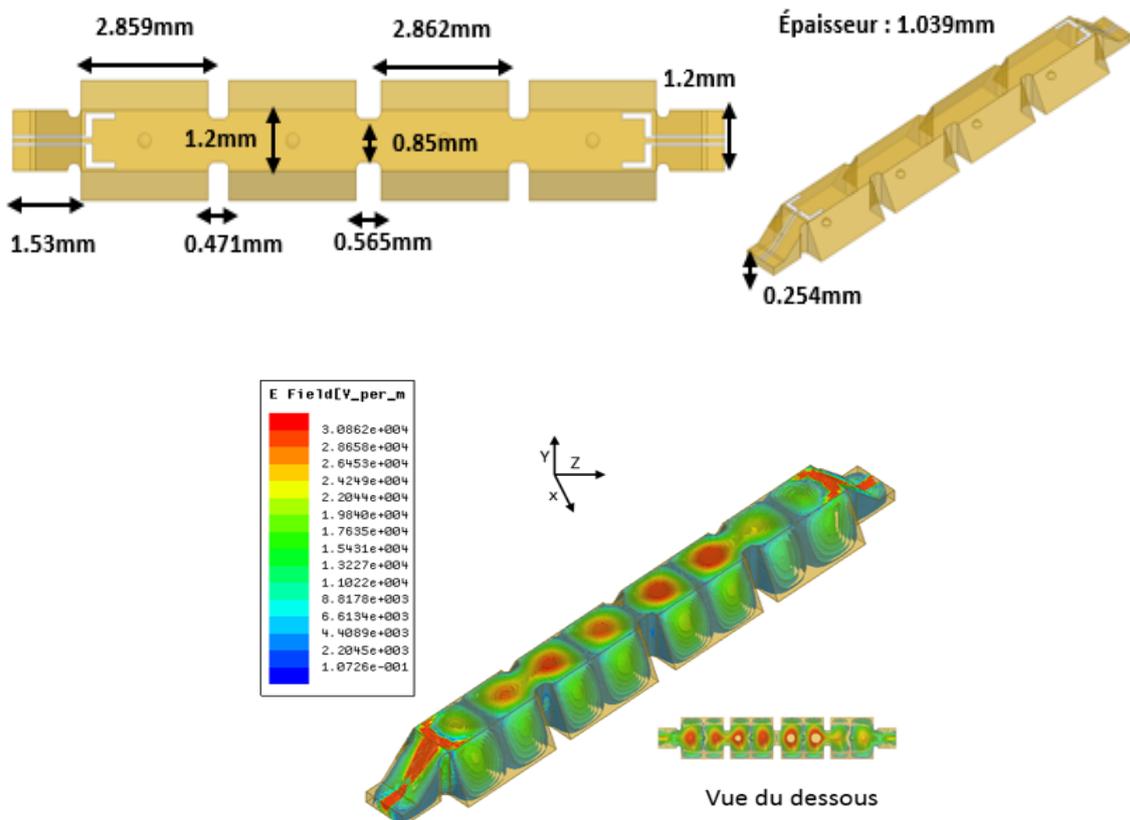


Figure III-28- Dimensions optimisées du filtre bande Q excitation coplanaire & champs E à 40 GHz



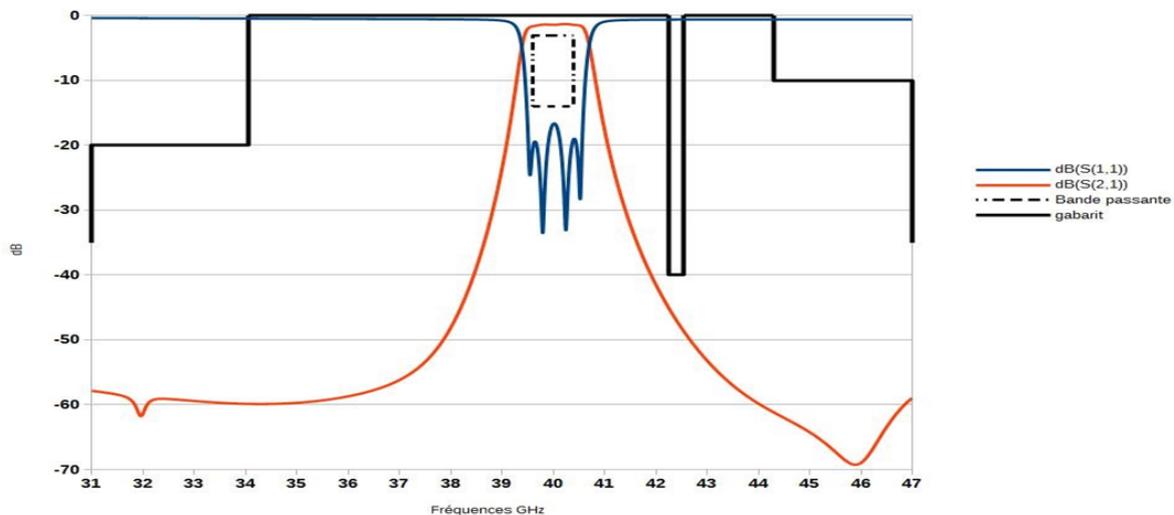


Figure III-29- Réponse fréquentielle du filtre bande Q excitation coplanaire

La réponse EM du filtre satisfait le gabarit de filtrage fixé. Elle est centrée à 40 GHz avec une bande passante de 950MHz, des pertes d’insertion de 1,36 dB et une ondulation dans la bande de 0,3 dB. La réflexion dans la bande est toujours supérieure à -18 dB et la réjection hors bande respecte les conditions attendues. Le Tableau III-3 illustre les résultats obtenus.

	Pertes d’insertion dB	Rj* à 31 GHz	Rj entre 31&34,05 GHz	Rj entre 42,25 &42,5 GHz	Rj entre 44,3 &47 GHz	Rj à 47 GHz
Filtre objectif	<3 dB	-35 dBc	-20 dBc	-40 dBc	-10 dBc	-35 dBc
Filtre optimisé	1.36 dB	-58 dB	-60 dB	-48 dB	-65 dB	-59 dB

Tableau III-3- Comparaison entre les spécifications théoriques et optimisées

II.9.d Filtre bande Q 40 GHz (excitation micro-ruban)

L’utilisation de l’excitation micro-ruban servira aux mesures qui seront réalisées chez TAS après le bonding du filtre avec des fils de longueur totale maximum de 450µm. La Figure III-30 montre la topologie du filtre qui est similaire à celle présentée précédemment avec quelques modifications des dimensions. Nous remarquons quelques variations au niveau des dimensions des résonateurs ainsi que des iris de couplage. Nous avons allongé les



plateformes d'accueil de quelques millimètres dans l'objectif de pouvoir mesurer ces filtres avec une cellule Wilton disponible à Xlim et pouvoir faire du bonding sur ces plateformes. Cette solution nous l'évaluons plus compliquée qu'avec des petits gaps vue la fragilité de la plateforme qui peut causer des difficultés à la fabrication, mais elle est, malgré cela, essayée. La cellule étant limitée en fréquence, elle ne pourra pas être utilisée sur le filtre en bande V. La Figure III-31 montre la réponse optimisée du filtre 4 pôles et son excitation par accès micro-ruban avec le gabarit de filtrage.

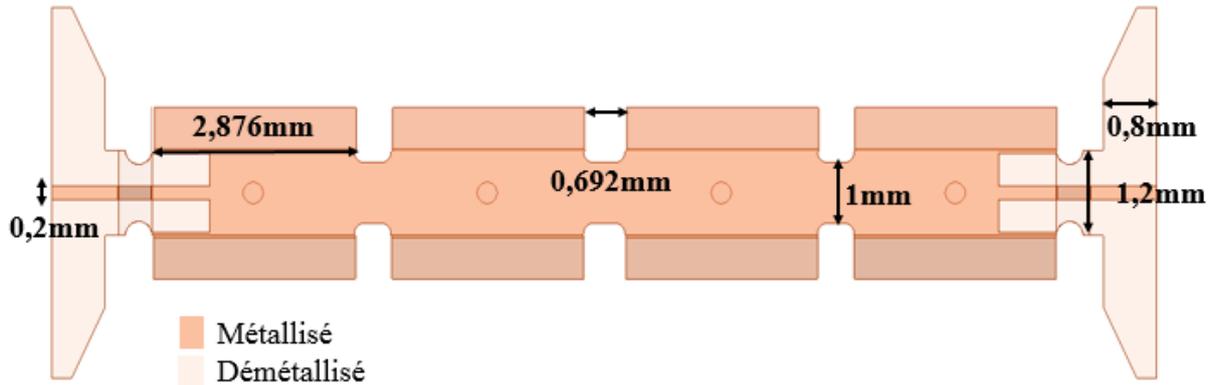


Figure III-30- Dimensions optimisées du filtre bande Q excitation micro-ruban

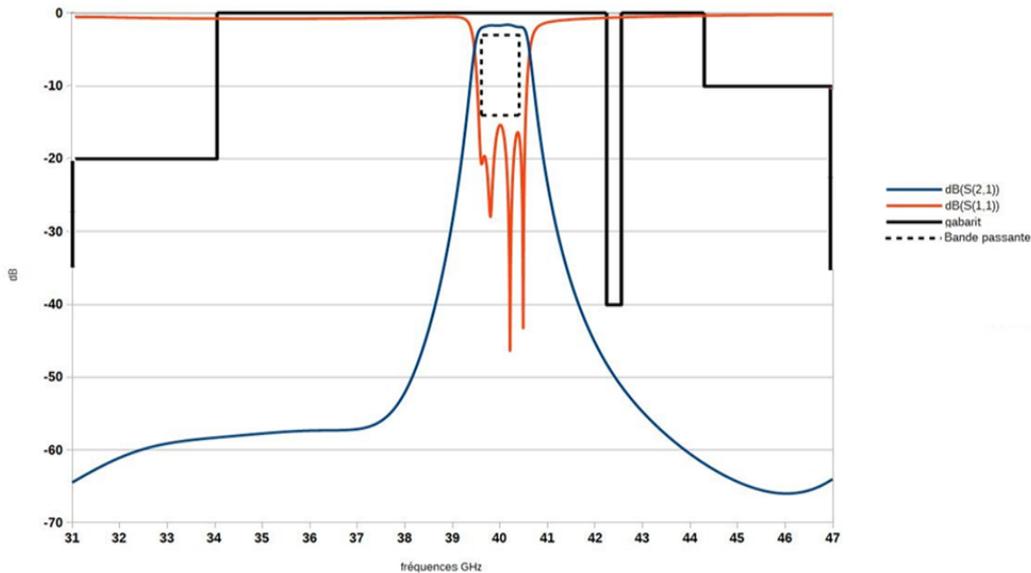


Figure III-31- Réponse fréquentielle du filtre bande Q excitation micro-ruban

La réponse EM du filtre satisfait le gabarit de filtrage fixé. Nous retrouvons quasiment la même réponse que celle de l'excitation coplanaire avec un peu plus de pertes dues à une



démétallisation plus importante. La fréquence centrale est de 40 GHz, 1 GHz de bande passante avec 1.7 dB de pertes d'insertion et une ondulation dans la bande de 0,4 dB. La réflexion dans la bande est toujours supérieure à -18 dB et la réjection hors bande satisfait les conditions attendues. Le Tableau III-4 illustre les résultats obtenus.

	Pertes d'insertion dB	Rj* à 31 GHz	Rj entre 31&34,05 GHz	Rj entre 42,25 &42,5 GHz	Rj entre 44,3 &47 GHz	Rj à 47 GHz
Filtre objectif	<3 dB	-35 dBc	-20 dBc	-40 dBc	-10 dBc	-35 dBc
Filtre optimisé	1.7 dB	-63 dB	-58 dB	-48 dB	-65 dB	-62 dB

Tableau III-4- Comparaison entre les spécifications théoriques et optimisées

II.9.e Filtre bande Q 40 GHz avec une forme en U

Dans le cadre de notre projet l'évaluation de la capacité de stéréolithographie à fabriquer des objets 3D complexes a été analysé. Pour profiter de la souplesse de cette technologie et valider sa pertinence dans les bandes Q et V, nous présentons un filtre en forme de U (Figure III-32) et un deuxième filtre en forme S (Figure III-34).

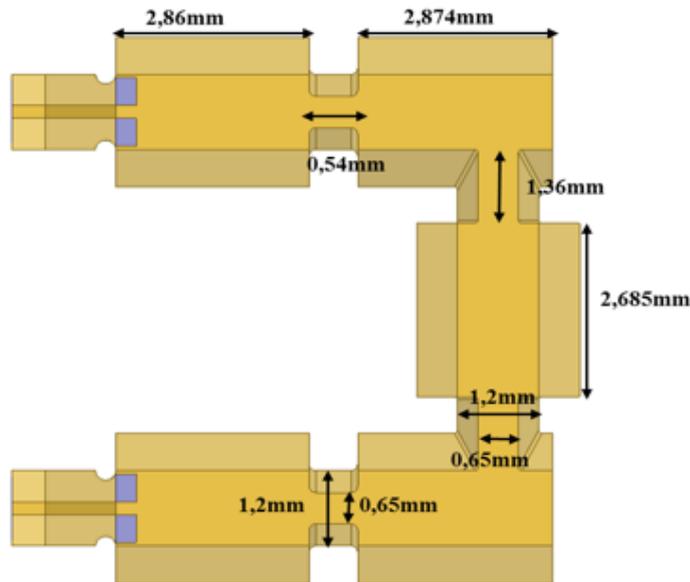


Figure III-32- Dimensions optimisées du filtre en U bande Q excitation micro-ruban



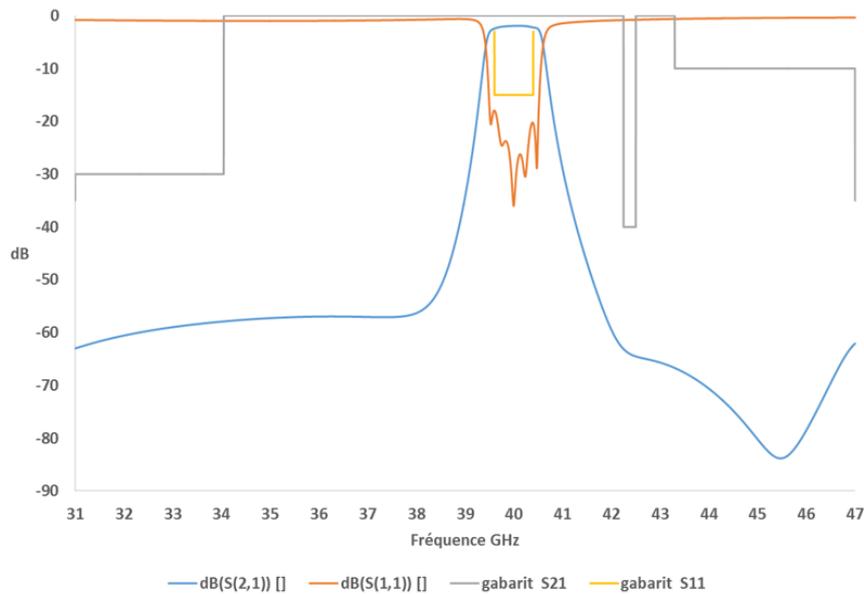


Figure III-33- Réponse fréquentielle du filtre en U bande Q excitation micro-ruban

Nous avons conçu cette topologie de filtre (Figure III-32) dans l’optique d’avoir plus de rejection entre 42,25 GHz et 42,5 GHz. Les topologies présentées précédemment seront fabriquées par moulage basse pression et stéréolithographie pour comparer ces deux techniques de fabrication. Le filtre en U sera, par contre, fabriqué seulement en stéréolithographie, vu sa forme qui rend le moulage très compliqué. La réponse EM du filtre satisfait le gabarit de filtrage fixé. La fréquence centrale est de 40 GHz, 1,2 GHz de bande passante avec 1,9 dB de pertes d’insertion et une ondulation dans la bande de 0,4 dB. La réflexion dans la bande est toujours supérieure à -20 dB et la réjection hors bande satisfait les conditions attendues. Le Tableau III-5 illustre les résultats obtenus.

	Pertes d’insertion dB	Rj* à 31 GHz	Rj entre 31&34,05 GHz	Rj entre 42,25 &42,5 GHz	Rj entre 44,3 &47 GHz	Rj à 47 GHz
Filtre objectif	<3 dB	-35 dBc	-20 dBc	-40 dBc	-10 dBc	-35 dBc
Filtre optimisé	1.9 dB	-65 dB	-60 dB	-65 dB	-65 dB	-62 dB

Tableau III-5- Comparaison entre les spécifications théoriques et optimisées



II.9.f Filtre bande Q forme en S

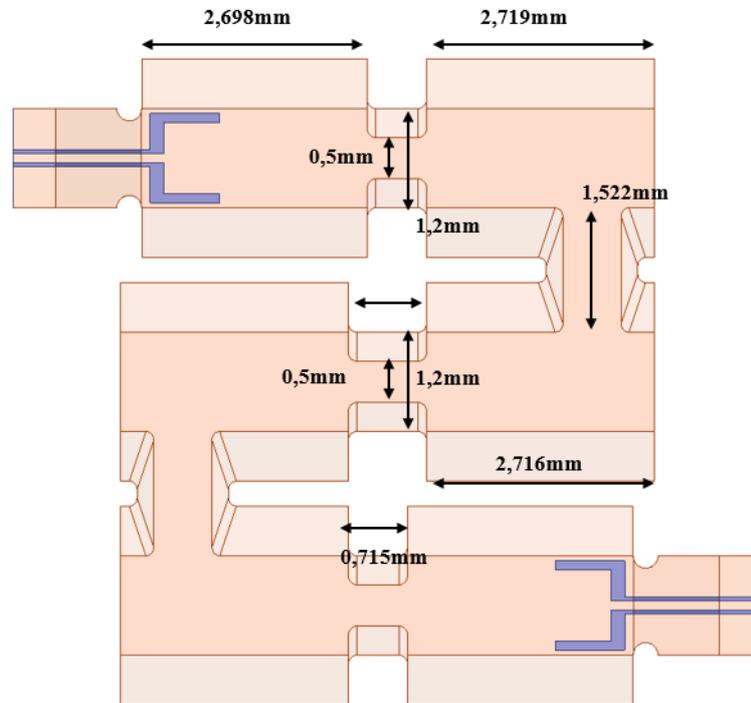


Figure III-34- Dimensions optimisées du filtre en S bande Q excitation coplanaire

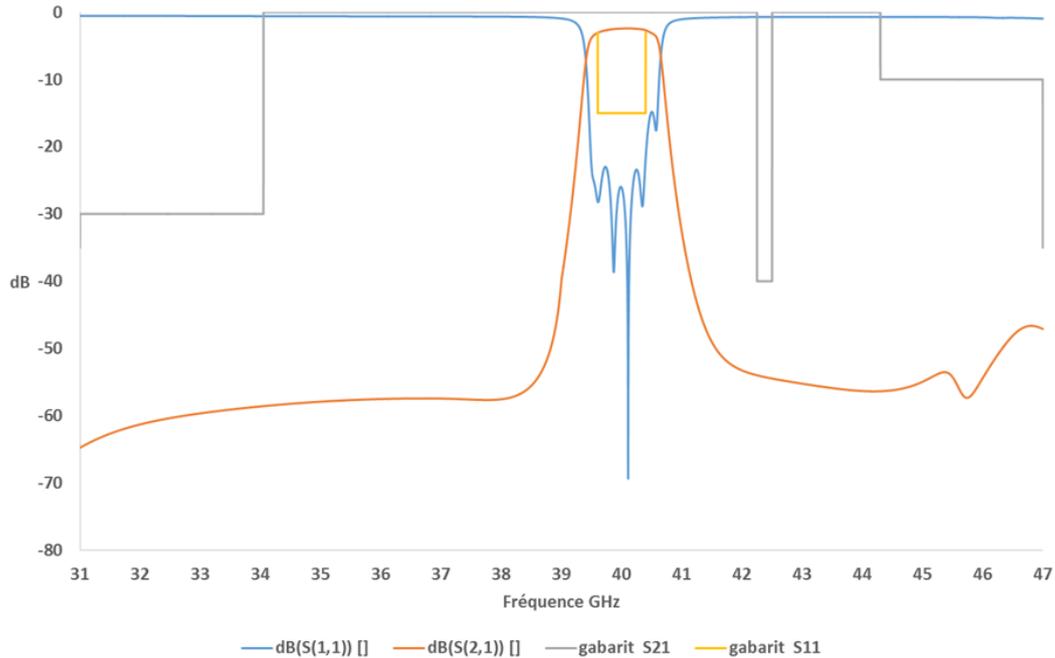


Figure III-35- Réponse fréquentielle du filtre en S bande Q excitation micro-ruban

Pour des contraintes de mesure à Xlim où les accès ont besoin d'être face à face, nous avons ajouté un sixième pôle pour pouvoir faire une forme repliée en S. Grâce à cette topologie,



nous pourrons valider le concept des filtres repliés avec nos moyens de mesure à Xlim. De même, ce filtre ne sera fabriqué que par stéréolithographie. Nous retrouvons une réponse fréquentielle similaire à celle du filtre en U avec un peu plus de pertes dues à l'ajout d'un pôle. La fréquence centrale est de 40 GHz, 1,3 GHz de bande passante avec 2,4 dB de pertes d'insertion dues au plus grand nombre de résonateurs. L'ondulation dans la bande est de 0,5 dB, la réflexion dans la bande est toujours supérieure à 17 dB avec une réjection hors bande qui satisfait les conditions attendues. Le Tableau III-6 illustre les résultats obtenus.

	Pertes d'insertion dB	Rj* à 31 GHz	Rj entre 31&34,05 GHz	Rj entre 42,25 &42,5 GHz	Rj entre 44,3 &47 GHz	Rj à 47 GHz
Filtre objectif	<3 dB	-35 dBc	-20 dBc	-40 dBc	-10 dBc	-35 dBc
Filtre optimisé	2.4 dB	-65 dB	-60 dB	-59 dB	-55 dB	-50 dB

Tableau III-6- Comparaison entre les spécifications théoriques et optimisées

II.9.g Filtre bande V 55 GHz

Ce filtre a été optimisé en utilisant une excitation micro-ruban, il représente encore plus de défis pour la phase de fabrication au vu des faibles dimensions. Nous avons gardé la même topologie du filtre dans cette phase, la Figure III-36 illustre les différentes dimensions après optimisation.

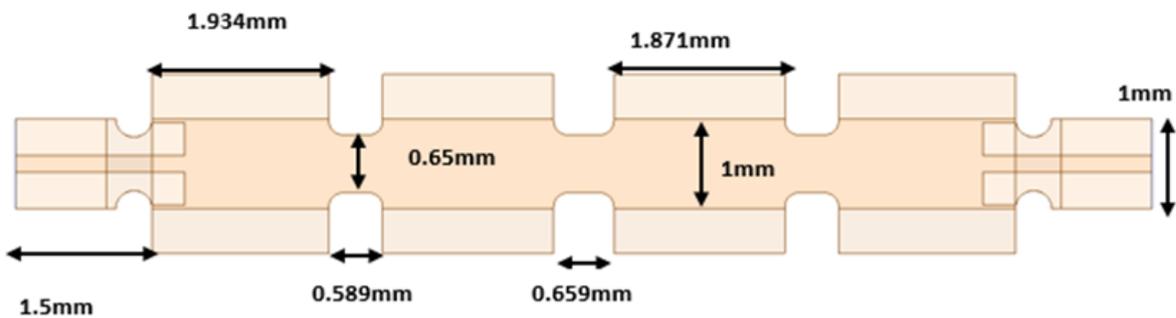


Figure III-36- Dimensions optimisées du filtre bande V excitation micro-ruban



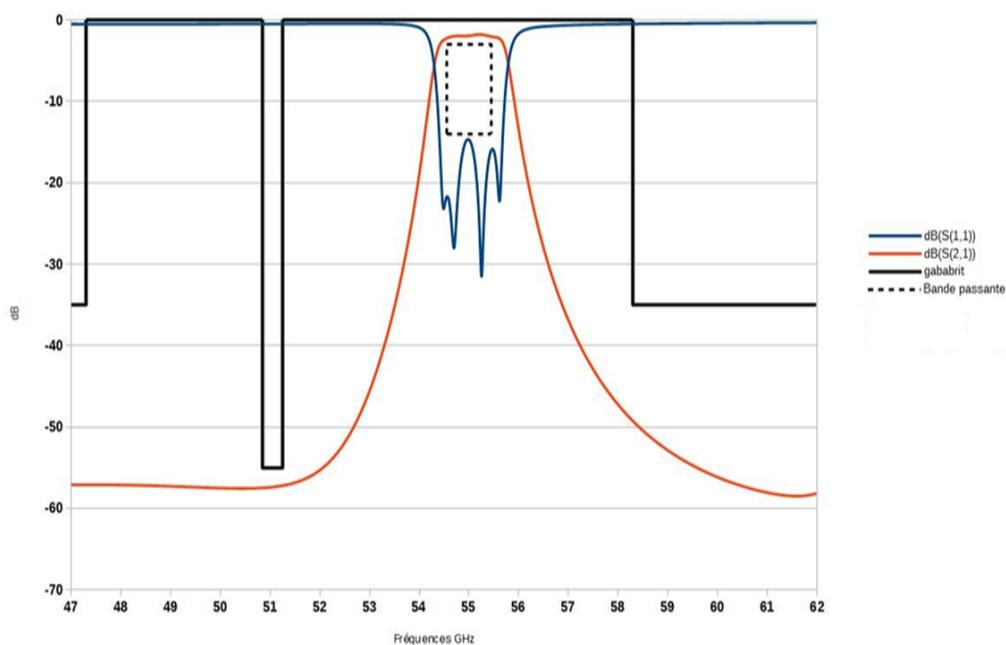


Figure III-37- Réponse du filtre quatre pôles bande V excitation micro-ruban

Les dimensions du filtre restent réalisables, sa réponse fréquentielle est présente dans la Figure III-37. La réponse EM du filtre satisfait le gabarit de filtrage fixé. Elle est centrée à 55 GHz avec une bande passante de 1,2 GHz, les pertes d'insertion sont de 1,8 dB et l'ondulation dans la bande est de 0,4 dB. La réflexion dans la bande est toujours supérieure à 15 dB et la réjection hors bande satisfait les conditions attendues. Le Tableau III-7 illustre les résultats obtenus.

	Pertes d'insertion dB	Rj à 47.7 GHz	Rj entre 51.85 & 52.25 GHz	Rj à 58.3 GHz
Filtre objectif	<3 dB	-35 dBc	-55 dBc	-35 dBc
Filtre optimisé	1.8 dB	-58 dB	-59 dB	-59 dB

Tableau III-7- Comparaison entre les spécifications théoriques et optimisées

Les trois topologies proposées respectent les spécifications de filtrage dans les deux bandes de fréquence (Q et V) et satisfont des conditions de fonctionnement nominal (température ambiante, permittivité de l'alumine maîtrisée, dimensions respectées). Dans un premier temps, il est choisi de fabriquer les filtres en bande Q (excitation coplanaire et micro-ruban) présentés précédemment afin de valider nos concepts et effectuer des tests de bonding. Un



filtre 2 pôles (excitation coplanaire) sera fabriqué pour vérifier plus particulièrement le facteur de qualité et le couplage K_{12} .

III. Étude de dispersion

Cette partie est dédiée à l'analyse de la tenue des spécifications de filtrage vis-à-vis de trois paramètres : tolérances de fabrication, dispersion de la permittivité, variation de la permittivité en fonction de la température qui sera traduit par le coefficient τ_f .

III.1 Tolérance de fabrication

Nous utiliserons le moulage basse pression et la stéréolithographie pour réaliser un jeu de pièces dont l'objectif est de déterminer la pertinence de ces deux technologies. Une partie critique de ces techniques consiste dans la phase de cuisson des pièces après leurs fabrications. Cette étape est souvent responsable de l'incertitude des dimensions. Nous avons voulu voir l'impact de la tolérance de fabrication sur la dispersion fréquentielle des trois filtres afin de savoir si nous respectons encore les gabarits de filtrage. Pour cela, nous appliquons une variation de $\pm 30\mu\text{m}$ sur certaines dimensions clés de la structure : longueurs et largeurs des iris de couplage et longueurs et largeurs des résonateurs. Les Figure III-38, Figure III-39, Figure III-40 et Figure III-41 présentent la dispersion fréquentielle due aux tolérances de fabrication.

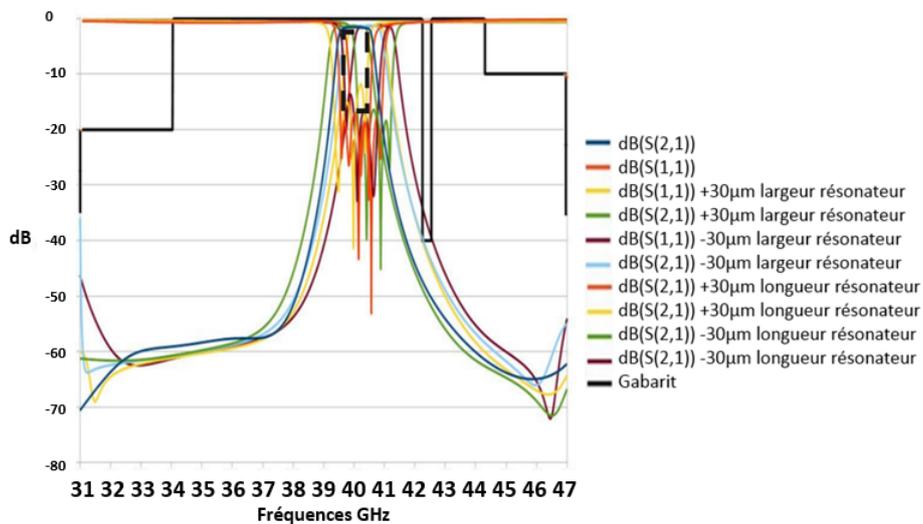


Figure III-38- Dispersion fréquentielle filtre bande Q excitation coplanaire



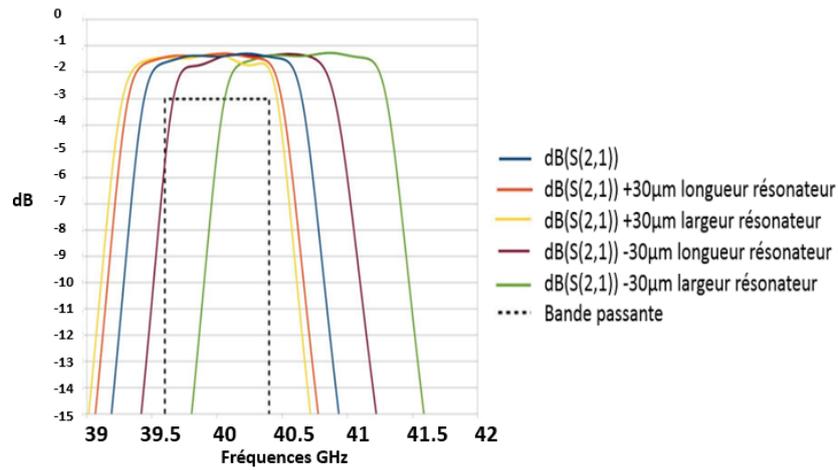


Figure III-39- Dispersion fréquentielle filtre bande Q excitation coplanaire zoom sur les longueurs et largeurs des résonateurs

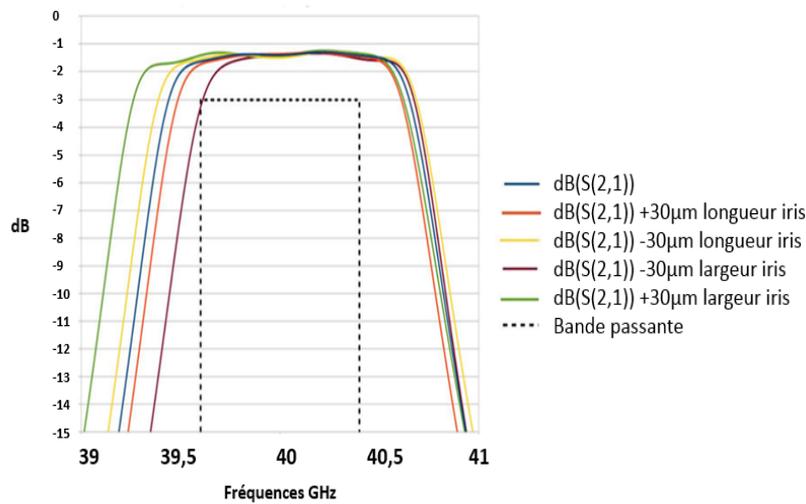


Figure III-40- Dispersion fréquentielle bande Q excitation coplanaire zoom sur les longueurs et largeurs des iris

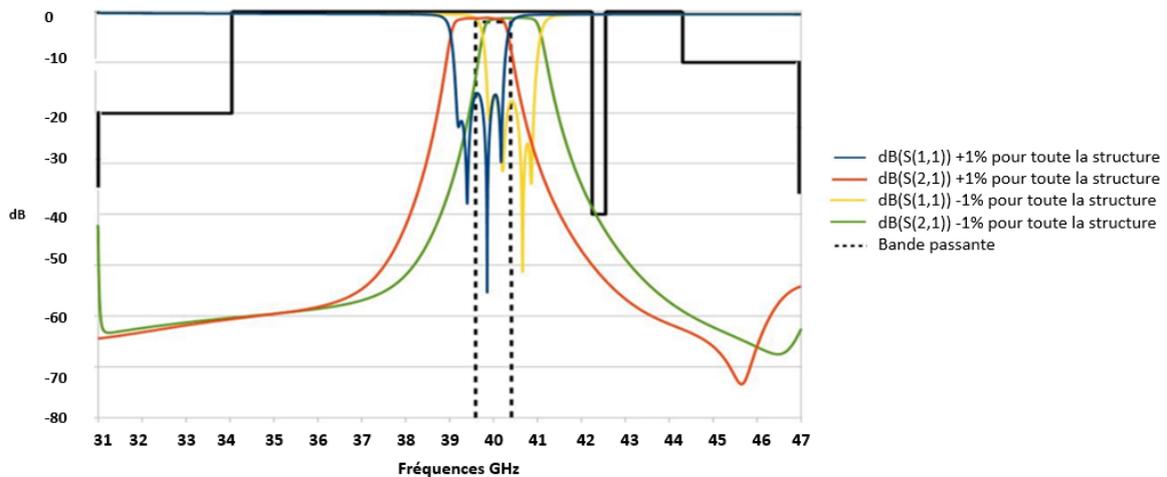


Figure III-41- Dispersion fréquentielle bande Q excitation coplanaire pour $\pm 1\%$ sur toute la structure



Nous voyons bien sur la Figure III-38 que la fonction de transfert du filtre ne respecte pas le gabarit du filtre dans certains cas. Le niveau de réflexion subit une légère variation mais il reste supérieur à -15 dB. Sur la Figure III-39, nous remarquons que le filtre est plus sensible aux variations sur les largeurs des résonateurs que sur les longueurs. Même remarque sur la Figure III-40, les variations des largeurs de l'iris impactent plus le couplage comme l'atteste la variation de la bande passante. Sur la Figure III-41, nous constatons que le gabarit de filtrage n'est pas respecté pour une variation de $\pm 1\%$ sur toutes les dimensions de la structure. En poussant plus loin cette étude, nous concluons alors qu'il faut avoir des variations inférieures à $\pm 25\mu\text{m}$ sur les longueurs des résonateurs et $\pm 20\mu\text{m}$ sur les largeurs pour respecter le gabarit. Pour le couplage, il ne faut pas dépasser $\pm 30\mu\text{m}$ sur les longueurs des iris et $\pm 25\mu\text{m}$ sur les largeurs et donc avoir une variation des dimensions globale de la structure de l'ordre de $\pm 0.5\%$ au maximum. Le même travail a été réalisé pour les autres filtres (voir annexe 2) et voici un résumé des tolérances de fabrication à respecter pour satisfaire le gabarit de filtrage.

	Résonateurs		Iris		Toute la structure
	longueur	largeur	longueur	largeur	
<i>Filtre bande Q excitation micro-ruban</i>	$< \pm 30 \mu\text{m}$	$< \pm 20 \mu\text{m}$	$< \pm 30 \mu\text{m}$	$< \pm 20 \mu\text{m}$	$< 0,5 \%$
<i>Filtre bande V excitation micro-ruban</i>	$< \pm 20 \mu\text{m}$	$< \pm 20 \mu\text{m}$	$< \pm 30 \mu\text{m}$	$< \pm 20 \mu\text{m}$	$< 0,5 \%$

Tableau III-8- Tolérances de fabrications à respecter

III.2 Dispersion de la permittivité

Nous nous intéressons au phénomène de la dispersion de la permittivité issue de la fabrication. Nous présentons sur la Figure III-42 le décalage fréquentiel pour une variation de la permittivité de $\pm 0,2$. Une telle dispersion de la permittivité engendre une variation de ± 250 MHz de la fréquence centrale du filtre 4 pôles avec une excitation coplanaire. Suite à ce décalage fréquentiel, les gabarits de filtrage ne sont plus respectés. La même étude a été réalisée pour les autres topologies. Les résultats de cette étude sont illustrés dans le Tableau III-9 ainsi que les recommandations sur le respect de ϵ_r à tenir en objectif.



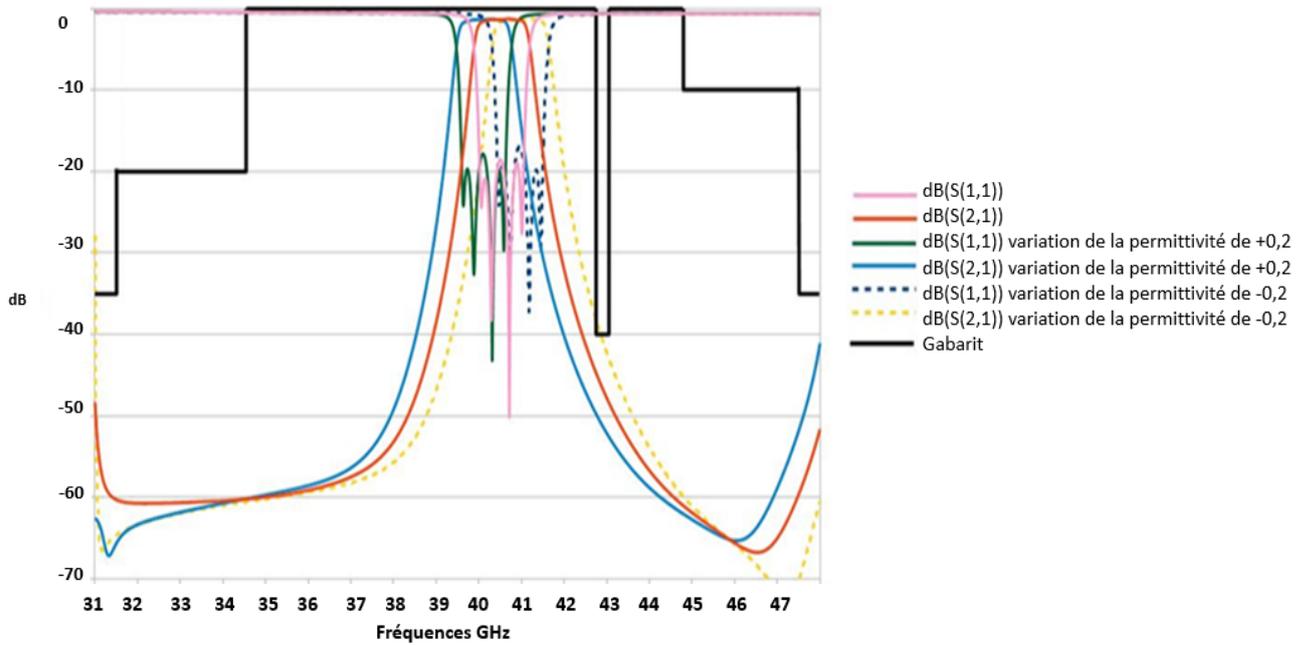


Figure III-42- Dispersion fréquentielle suite à une variation de ± 0.2 sur la valeur de permittivité filtre bande Q excitation coplanaire

	<i>Décalage fréquentiel dû à la dispersion de la permittivité de ± 0.2</i>	<i>Valeur de la dispersion de la permittivité à respecter</i>
<i>Filtre bande Q excitation coplanaire</i>	$\pm 250\text{MHz}$	$< 0,1$
<i>Filtre bande Q excitation micro-ruban</i>	$\pm 280\text{MHz}$	$< 0,1$
<i>Filtre bande V excitation micro-ruban</i>	$\pm 500\text{MHz}$	$< 0,1$

Tableau III-9- Dispersion de permittivité à respecter



III.3 Dispersion fréquentielle due au τ_f

Dans le cadre du projet ATOMIQ, une Alumine très pure et avec une taille de grain fine a été développée pour répondre aux besoins de notre application. Pour cela cette Alumine a été dopée dans un deuxième temps afin d'optimiser sa tangente de pertes et de la stabiliser en température. L'élément de dopage utilisé dans cette partie est le TiO_2 . Le Tableau III-10 présente un résumé des performances de l'Alumine avec des degrés de dopage qui nous intéressent. τ_f traduit la variation de la permittivité du matériau en fonction de la température.

$$\text{Équation III - 8: } \tau_f = \frac{f(T_1) - f(T_2)}{(T_1 - T_2)f(T_0)}$$

T_1 : température de mesure 1

$f(T_1)$ fréquence de mesure à T_1

T_2 : température de mesure 2

$f(T_2)$ fréquence de mesure à T_2

	ϵ_r à 55 GHz $\pm 3\%$	$\tan \delta$ à 55 GHz $\pm 20\%$	τ_f ± 2
<i>Alumine TM-DAR non dopée</i>	9,9	2.10^{-4}	-58 ppm.c ⁻¹
<i>Alumine TM-DAR 0.5% Ti Recuit</i>	10,08	$1,9.10^{-4}$	-56 ppm.c ⁻¹
<i>Alumine TM-DAR 12% Ti Recuit</i>	12,5	$2,9.10^{-4}$	0 ppm.c ⁻¹

Tableau III-10- Performances de l'Alumine

Dans l'objectif de voir l'impact du coefficient τ_f sur la dispersion fréquentielle, nous avons simulé notre filtre à trois températures différentes (-20°C, 23°C et 70°C). La Figure III-43 montre les variations de la réponse fréquentielle du filtre avec l'alumine TM DAR pure qui sera utilisée pour la fabrication par stéréolithographie.



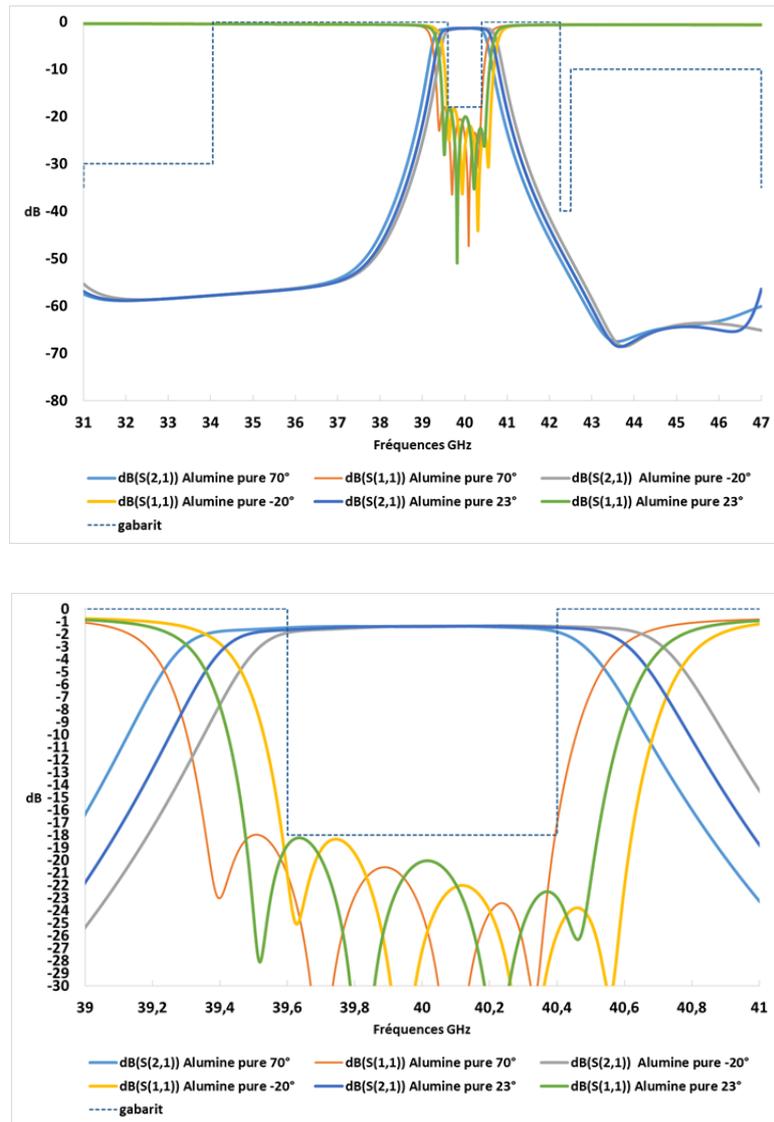


Figure III-43- Paramètres S simulés pour trois température (-20°C, +23°C, +70°C)

La variation de la température entre -20°C et +70°C induit une variation de la fréquence centrale du filtre. Vous trouvez ci-dessous les variations des fréquences en fonction de la température :

$$+23^{\circ}\text{C} \rightarrow f = 40,18 \text{ GHz}$$

$$-20^{\circ}\text{C} \rightarrow f = 40,27 \text{ GHz}$$

$$+70^{\circ}\text{C} \rightarrow f = 40,05 \text{ GHz}$$

Nous pouvons voir que l'utilisation de l'Alumine non dopée répond aux besoins du filtre mais reste malgré tout très juste au niveau des spécifications de filtrage puisque les courbes font l'hypothèse d'une fabrication parfaite (ϵ_r maîtrisée et dimensions respectées). Si nous cumulons les différentes sources d'erreur dans notre application que nous avons présentée



précédemment, nous remarquons l'importance d'utiliser à terme de l'Alumine dopée à 12% de TiO_2 qui rend le filtre insensible aux effets de la température.

IV. Conclusion chapitre III

Au cours de ce chapitre, nous avons proposé des topologies de filtrage qui ont répondu aux spécifications proposées par TAS dans les bandes Q et V. Une étude de sensibilité face aux tolérances de fabrication a été présentée, cette dernière donnant des objectifs pour la phase de fabrication. Des études sur la dispersion de permittivité ainsi que le comportement en température du filtre ont été aussi discutées dans cette partie et nous avons remarqué l'importance de l'utilisation à terme de l'Alumine dopée à 12% de Ti, cette dernière permettant un respect des spécifications de filtrage plus aisé. Nous avons évoqué dans le chapitre II les deux alumines TM-DAR retenues :

→ TM-DAR Pure : $\epsilon_r=9,9$ $\tan\delta= 1,5 \cdot 10^{-4}$ à 55 GHz, $\tau_f=-55\text{ppm}^\circ\text{C}^{-1}$ (± 2)

→ TM-DAR dopé 12%Ti : $\epsilon_r=12,4$ $\tan\delta= 2,1 \cdot 10^{-4}$ à 55 GHz, $\tau_f=0 \text{ ppm}^\circ\text{C}^{-1}$ (± 2)

La fabrication des pièces à venir dans le prochain chapitre a été partagée en grande partie entre le moulage basse pression et la stéréolithographie. La poudre TM-DAR sera utilisée seulement par 3DCERAM, partenaire dans le projet ATOMIQ. Le CTTC (sous-traitant pour la fabrication par moulage basse pression) a utilisé l'alumine MR32 ($\epsilon_r=9,4$ $\tan\delta= 5 \cdot 10^{-4}$). 3DCERAM est passé par une étape d'adaptation de la TM-DAR avec leur procédé de stéréolithographie. Cette adaptation a été réussie pour l'alumine TM-DAR pure, et, en raison du coût du dopage de l'alumine par le TiO_2 , la fabrication de pièces dopées par stéréolithographie a été mise en attente. L'usinage en cru a été présenté par le SPCTS peut être vu comme une autre alternative pour fabriquer quelques pièces avec les deux alumines dopées et non dopées.

Dans le chapitre suivant, nous présentons les différents filtres fabriqués dans le cadre du projet ATOMIQ ainsi que les méthodes de métallisation et l'étude sur la correction post-fabrication par ablation laser. A la vue de l'étude de sensibilité présentée dans ce chapitre, il s'avère plus que nécessaire d'utiliser un outil de réglage post-fabrication sur les objets prévus en bandes Q et V.





Chapitre IV

Fabrication Filtres 3D et correction post-fabrication



I. Introduction Chapitre IV

Nous avons vu dans le chapitre III les différents filtres que nous avons conçus pour répondre aux besoins de filtrage du projet ATOMIQ dans les bandes de fréquences Q et V. Ce chapitre sera dédié tout d'abord à la présentation de la technique de fabrication par usinage en cru. Cette technique a été utilisée par le SPCTS dans le cadre du projet pour fabriquer des filtres à base de l'Alumine TM-DAR pure et dopée. Les différents filtres fabriqués dans le cadre du projet seront présentés ainsi que les problèmes rencontrés pendant la phase de fabrication. Une présentation des techniques de métallisation disponibles au sein du laboratoire Xlim sera donnée et nous indiquerons les solutions qui ont été retenues afin de répondre à notre besoin. D'autres réalisations de filtres par moulage basse pression et stéréolithographie seront ensuite présentées. La dernière partie de ce chapitre sera enfin dédiée à la correction post-fabrication par ablation laser. ATOMIQ est un projet interdisciplinaire qui comporte le développement de céramiques, le design des pièces et leur fabrication. Comme nous pouvons le remarquer, une bonne partie de ces étapes se déroule sur Limoges, ce qui constitue la particularité de ce projet. Cela nous donne la possibilité de suivre de près les différentes étapes d'avancement du projet et de pouvoir interagir rapidement pour la réussite de notre tâche.

II. Technique de fabrication par usinage en Cru

Les essais d'usinage en cru ont été réalisés au sien du SPCTS pour évaluer ce procédé de mise en forme. Du fait que l'adaptation de l'Alumine dopée au TiO_2 avec le procédé de fabrication par stéréolithographie s'annonce compliquée, nous avons eu recours à une approche d'usinage 5 axes pour fabriquer des filtres avec la TM-DAR 12%Ti. Ces derniers devront avoir une réponse fréquentielle stable en température selon nos prédictions. Nous avons aussi fabriqué des filtres à base d'Alumine TM-DAR pure. La fabrication des filtres par usinage en cru particulièrement retenue ici passe par les cinq étapes suivantes qui seront détaillées par la suite (photos des étapes de fabrication en annexe 3 et 4) :

- | | |
|--------------------------|------------------|
| ➤ Pressage des pastilles | ➤ Usinage en cru |
| ➤ Frittage | ➤ Rectification |
| ➤ Calcination/recuit | |



II.1 Pressage des pastilles

Nous avons commencé par préparer les pastilles à partir desquelles les filtres seront usinés. Afin de minimiser les défauts liés au pressage, la poudre doit être atomisée avec l'ajout d'un liant et d'un plastifiant. Nous avons utilisé les mêmes contraintes de pressage que celles utilisées dans le chapitre II pour la fabrication des pastilles qui sont 100MPa pour la TM-DAR pure et 80MPa pour TM-DAR 12%Ti. Grâce à ces contraintes de pressage, nous avons obtenu une densité en cru entre 50% et 55%. À l'issue de cette étape, deux pastilles TM-DAR pure et deux pastilles TM-DAR 12%Ti ont été fabriquées.

II.2 Usinage en cru

Dans les locaux du SPCTS et avec un poste d'usinage 5 axes séquentiels de la marque DM6, nous avons commencé par surfacer le sommet de la pastille. Ensuite, nous avons usiné toutes les faces colorées en bleu de la Figure IV-1 à l'aide d'une fraise en carbure de diamètre 6mm.

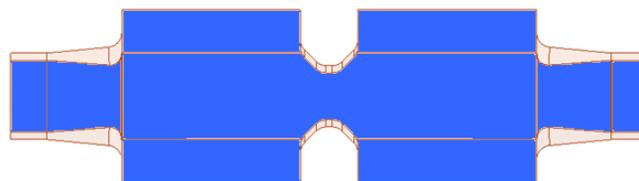


Figure IV-1- Surfaces usinées avec la fraise de 6mm

L'usinage de toutes ces faces a été réalisé avec un seul passage de fraise grâce à l'inclinaison de la pièce. Dans un deuxième temps, l'affinement de l'iris de couplage ainsi que les congés des pentes ont été réalisés par une fraise de diamètre 0,4mm (Figure IV-2). Dans ce cas de figure, la fraise bouge seulement avec un pas de déplacement inférieur ou égal à 10 μ m.

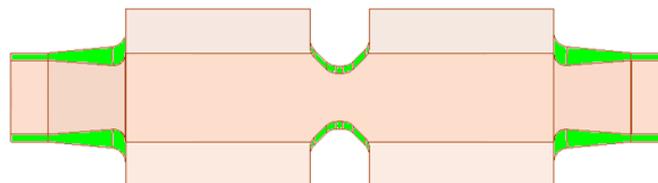


Figure IV-2- Surfaces usinées avec la fraise de 0,4mm



Seul, le dessus du filtre a été usiné à l'issue de cette étape mais il reste lié à la pastille comme nous pouvons le voir sur la Figure IV-3.

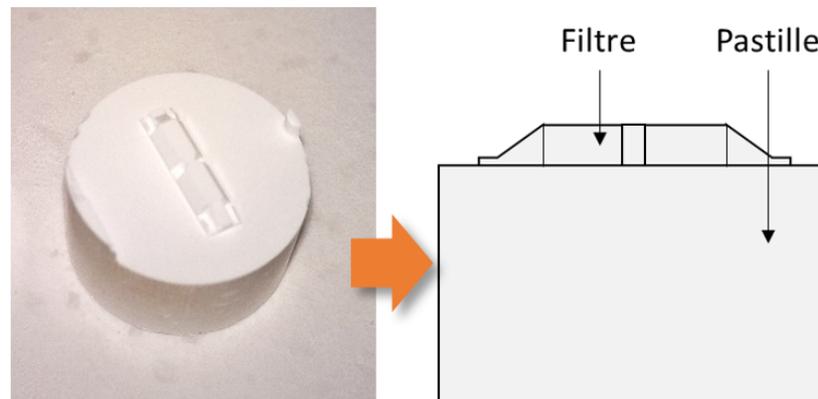


Figure IV-3- Pastille après usinage en cru

II.3 Frittage

Les mêmes conditions de frittage développées dans le chapitre II ont été respectées. Les températures mesurées au cours du frittage ont été de 1400°C pour TM-DAR pure et de 1650°C pour la TM-DAR 12%Ti.

II.4 Rectification

Cette étape consiste à séparer le filtre du reste de la pastille tout en gardant une bonne planéité et un parallélisme élevé. Elle sera réalisée en deux parties : nous allons commencer par tronçonner radialement la pastille pour enlever une grande partie de la matière. À partir d'une épaisseur entre 2mm et 3 mm, nous procédons à la rectification de la pièce. Pour la réussite de cette tâche, nous avons collé le cylindre sur un support de découpe à l'aide de la résine. Il faut éviter de mettre de la résine sur le filtre sinon nous serons obligés de calciner la pièce à 900°C avant de la rectifier. Après le tronçonnage de la partie basse de la pastille, nous décollons la pièce et ensuite, le dessus du filtre est, de nouveau, collé sur le support d'usinage comme nous pouvons le voir sur la Figure IV-4.



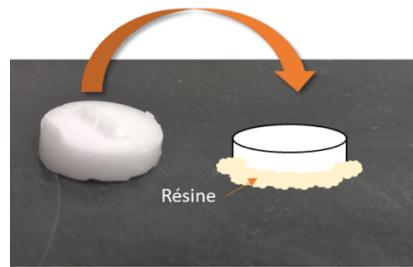


Figure IV-4- Mise en place et collage du filtre pour l'étape de rectification

Pour limiter les erreurs de planéité, il est recommandé d'utiliser une résine liquide et de bien appuyer sur la pièce au moment du collage pour s'assurer que l'épaisseur de colle au-dessous du filtre est minimale et homogène. L'usinage final a été assuré par une rectifieuse plane avec une passe de $8\mu\text{m}$ pour éliminer la partie cylindrique, ensuite nous diminuons la passe à $2\mu\text{m}$ pour une meilleure précision. La rectification est achevée lorsque tous les détails du filtre sont visibles comme nous pouvons le voir sur la Figure IV-5.



Figure IV-5- Etat du filtre après rectification

A l'issue de cette étape, il faut décoller le filtre pour le nettoyer en utilisant de l'acétone couplé à un bain ultrason. Le filtre est ensuite calciné pour éliminer les dernières traces de résine. La Figure IV-6 illustre dans la globalité les différentes étapes de rectification.

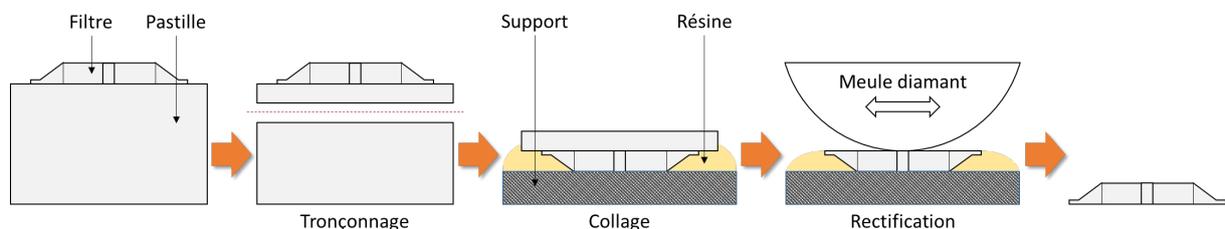


Figure IV-6- Schéma récapitulatif des étapes de rectification



II.5 Calcination/recuit

L'étape d'usinage apporte de nombreuses pollutions à notre pièce ce qui rend la calcination un point important de ce procédé afin de bien nettoyer les pièces. Cette étape joue le rôle du recuit pour l'Alumine dopé au TiO_2 afin d'apporter une correction de son facteur de température. La Figure IV-7 présente les filtres issus de ces deux séries d'essais, ils ne présentent pas de défaut majeur.



Figure IV-7- Filtres 2 pôles après calcination/ recuit

II.6 Constatation

Au cours de cette fabrication, nous n'avons pas eu de casse au niveau des pièces que ce soit à l'usinage ou à la rectification même pour des petites épaisseurs de $\approx 250\mu\text{m}$. Cette fabrication a été satisfaisante sachant que c'était notre premier essai avec cette technique. Par contre, nous avons remarqué, à l'aide d'un microscope numérique de la marque Keyence, des éclats au niveau des angles supérieurs de la plateforme d'accueil qui sont liés à l'usinage en cru (Figure IV-8).

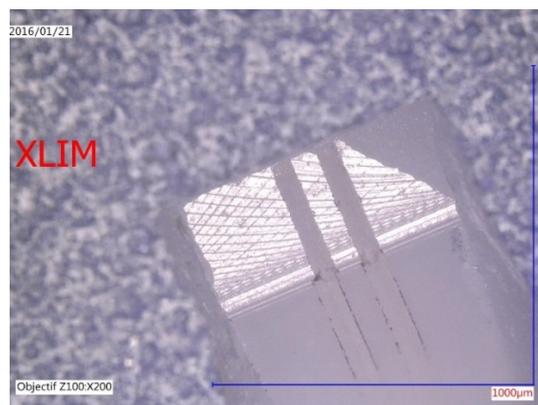


Figure IV-8- Eclat de l'angle supérieur de la plateforme d'accueil du filtre 2 pôles avec excitation coplanaire



Après cette première expérience avec l'usinage en cru, nous avons dégagé plusieurs recommandations pour mieux réussir les prochains tests. Il faut tout d'abord augmenter le taux de liant et de plastifiant pour corriger les éclats apparus au niveau des plateformes d'accueil. Il faut aussi bien travailler le retrait dans le fichier d'usinage, ce retrait étant celui pris par la pièce lors de son frittage. Avec ce procédé une erreur dimensionnelle de $\pm 50\mu\text{m}$ semble réalisable si nous optimisons bien la prise en compte du retrait. Nous pouvons aussi diminuer l'erreur de positionnement à la rectification si nous augmentons le nombre de pièces par pastille ce qui donne plus de points d'appui au moment du collage sur la plaque de rectification. Cette technique de fabrication semble bien adaptée à la réalisation de pièces pour notre projet, il reste à vérifier l'état de santé de la matière à l'issue de ce procédé.

II.7 Etat de santé des filtres TM-DAR usinés

Ceci c'est notre premier essai avec la technique de mise en forme par usinage en cru, ainsi nous avons voulu contrôler la "santé matière" des pièces à la sortie de cette fabrication. Pour cela, nous avons effectué une étude par tomographie à rayon X sur les différents filtres. Cette étude a pour objectif de vérifier la densité des pièces et leur pureté. Pour pouvoir réaliser cette tâche nous avons travaillé avec l'entreprise ELMECA située à Toulouse. Une reconstituions virtuelle de la pièce est assurée par des radiographies successives prises à 360° de l'objet. Cela permet de contrôler précisément l'intérieur de la pièce grâce à des coupes virtuelles de notre volume. Grâce à des systèmes de post-traitement, l'enveloppe extérieure du volume virtuelle peut être extraite, et, elle peut être utilisée pour différents besoins : retro-simulation, comparaison au fichier CAO de départ, calcul du taux de remplissage de la pièce.

II.7.a Résultats tomographiques

Les Figure IV-9 et Figure IV-10 montrent une "santé matière" globalement bonne avec un taux de remplissage très correct. Nous avons aussi remarqué une anomalie géométrique aux niveaux d'une des deux extrémités des pièces avec un taux de remplissage de matière un peu moins bon (Figure IV-11, Figure IV-12). Le même défaut retrouvé sur les deux pièces confirme qu'il est causé par l'usinage en cru. Nous avons aussi relevé sur les Figure IV-13 et Figure IV-14 certaines fissures qui peuvent s'étendre sur plus de $450\mu\text{m}$.



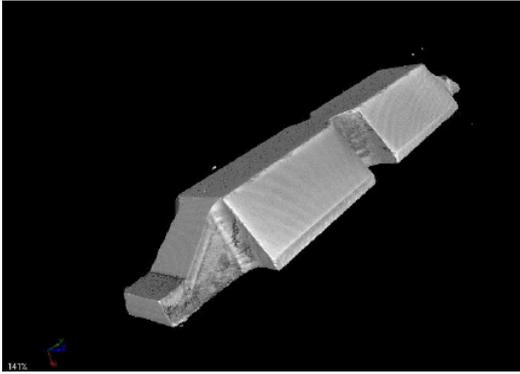


Figure IV-9- Aperçu de résultat de scan
TM-DAR 12%Ti

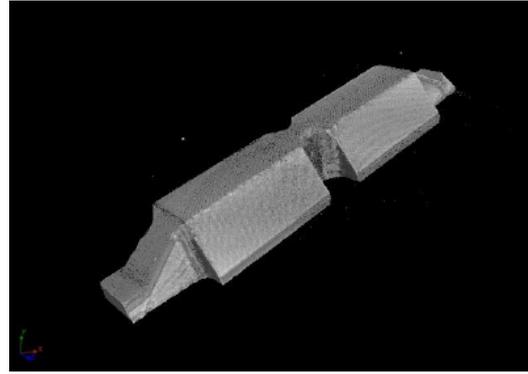


Figure IV-10- Aperçu de résultat de scan
TM-DAR pure

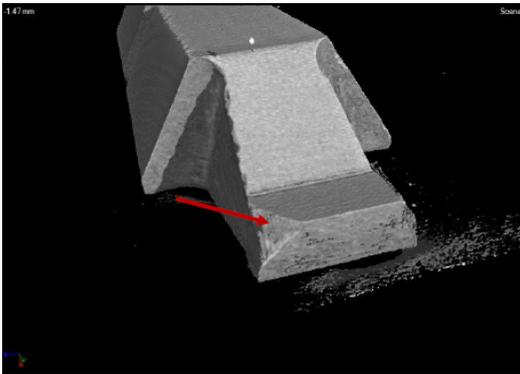


Figure IV-11- Identification d'un défaut
de géométrie pour la TM-DAR 12%Ti

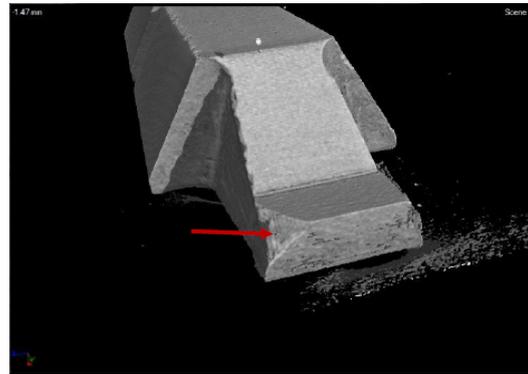


Figure IV-12- Identification d'un défaut
de géométrie pour la TM-DAR pure

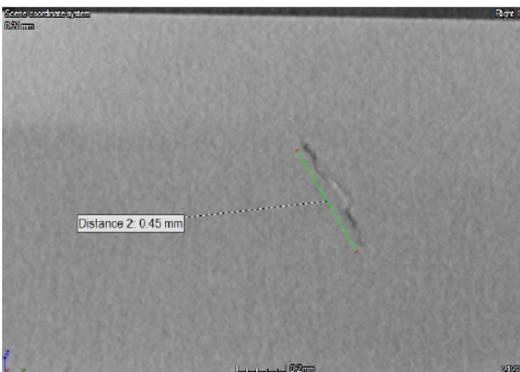


Figure IV-13- Fissure sur la pièce TM-
DAR 12%Ti

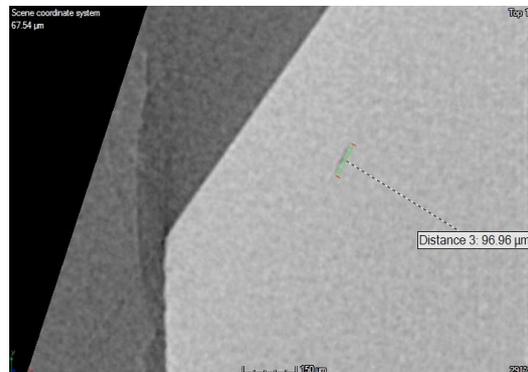


Figure IV-14- Fissure sur la pièce TM-
DAR pure

Cette étude a montré une faible présence de défauts dans les pièces ce qui rend inutile le post-traitement "santé matière". Le volume maximal d'un défaut est estimé à 0.0003 mm^3 , et le taux de remplissage de matière est supérieur à 99.99 %.



II.7.b Comparaison CAO

La comparaison entre le fichier de CAO initial (géométrie théorique) et fichier extrait à partir de la tomographie (géométrie réelle) passe par plusieurs étapes :

- | | |
|---|---|
| 1) Préparation de la géométrie théorique | 2) Préparation de la géométrie réelle |
| 3) Superposition des deux géométries pour préparer le calcul de distance | 4) Application de l'algorithme de calcul de distance entre les deux surfaces obtenues |
| 5) Représentation graphique à l'aide d'une échelle de couleur, comprise entre 0 et 0.1 mm | |

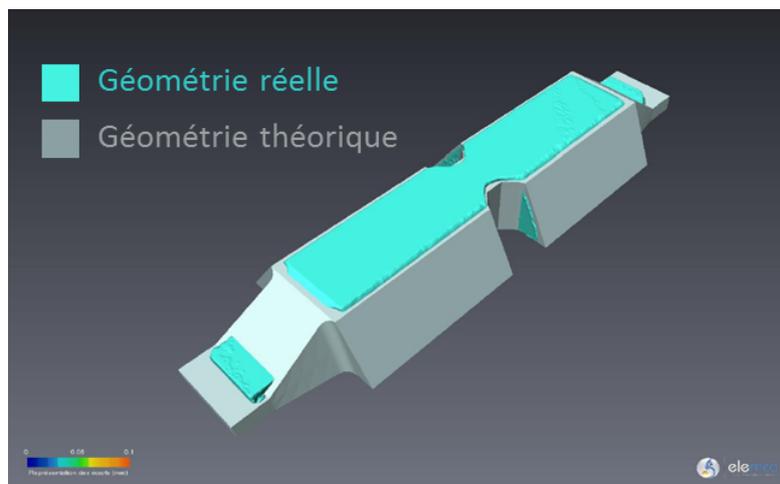
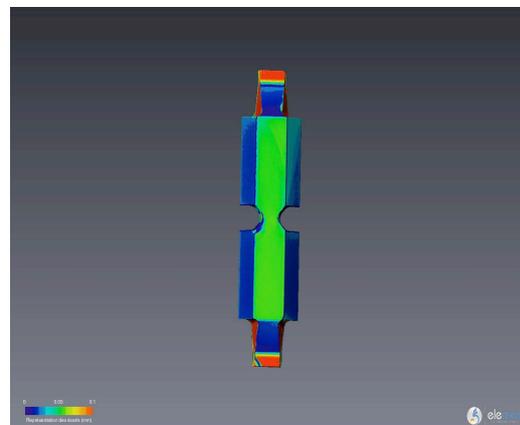
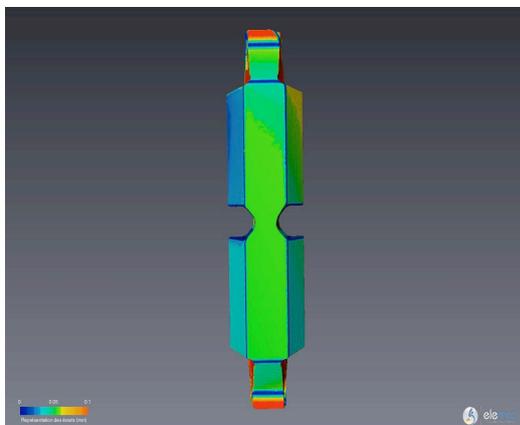


Figure IV-15- Alignement de surface

Nous pouvons voir sur la Figure IV-15 un écart important par rapport à la CAO surtout au niveau des extrémités. Les zones de couleur rouge présentent un écart de 100 μm . Elles sont principalement situées au niveau des congés et à chacune des deux extrémités de la pièce.



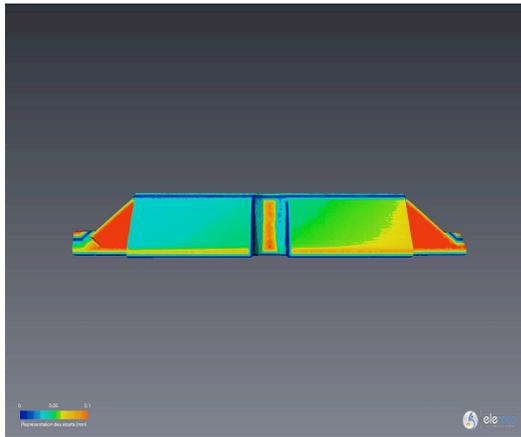


Figure IV-16- Comparaison CAO & TM-DAR 12%Ti

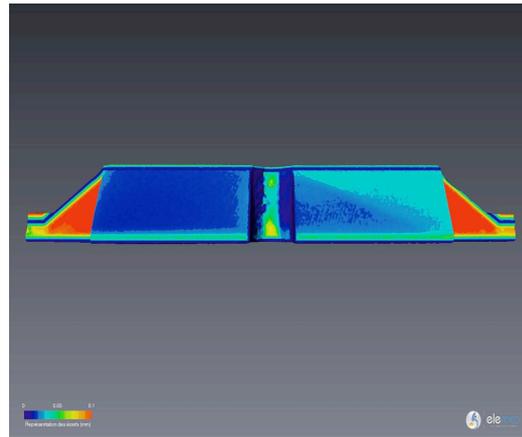


Figure IV-17- Comparaison CAO & TM-DAR pure

Nous avons aussi comparé les deux fichiers de tomographie par rayon X des deux pièces pour avoir une idée sur la reproductibilité de cette technique de mise en forme. Les Figure IV-18 et Figure IV-19 illustrent la comparaison des deux pièces.

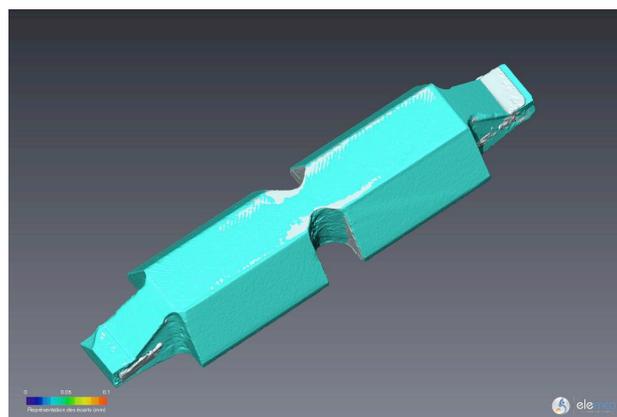


Figure IV-18- Alignement des surfaces de chaque objet



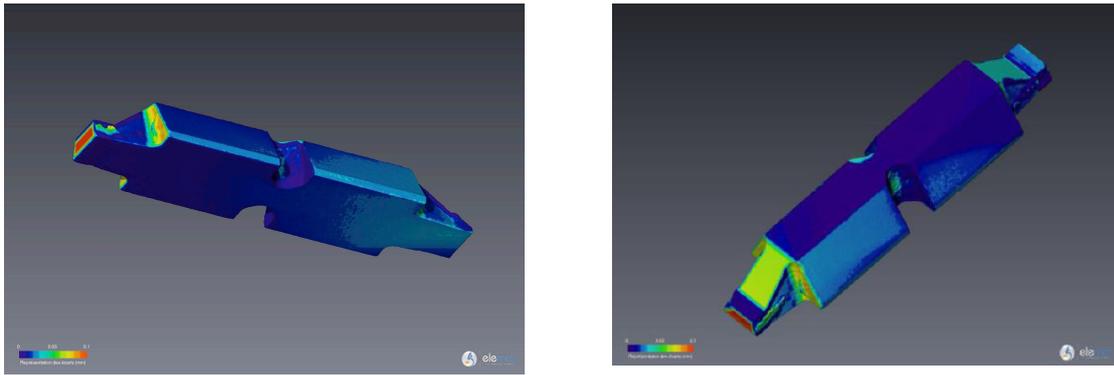


Figure IV-19- Comparaison des deux pièces

Nous remarquons qu'une large majorité des écarts est inférieure à 20-30 μm , et vraiment très peu dépasse les 100 μm et donc les deux géométries sont relativement similaires. En conclusion sur la géométrie des pièces, les deux sont globalement conformes à la CAO avec des écarts en majorité inférieurs à 50 μm pour les zones où la géométrie est simple (longues surfaces planes). Nous avons remarqué des écarts plus importants ($\approx 100\mu\text{m}$) dès que la géométrie devient plus complexe (congés...). La comparaison des deux pièces montre qu'elles ont globalement les mêmes tendances ce qui rend cette technique de mise en forme reproductible.

II.8 Métallisation

La métallisation représente un point primordial dans notre dispositif RF car elle joue le rôle d'un blindage métallique qui vient confiner le champ EM à l'intérieur des résonateurs et éviter les rayonnements parasites. Nous disposons de plusieurs techniques de métallisation dans notre laboratoire. Elles sont toutes installées à l'intérieur d'une salle blanche de 180 m^2 réparties en deux salles classées ISO : salle ISO5 (classe 1000) et salle ISO7 (classe 10000).

II.8.a Electroless :

Cette technique repose sur l'immersion de la pièce 3D dans des différents bains chimiques. Tout d'abord la pièce est plongée dans un bain de conditionneur qui élimine les impuretés et prépare la surface de l'objet à la métallisation. Après un rinçage à l'eau distillée la pièce est de nouveau plongée dans un bain de catalyse. Ce bain favorise l'adhésion de la métallisation sur l'objet. Enfin la pièce passe par le bain d'Electroless Copper afin de recevoir



son blindage métallique. La durée d'immersion de la pièce dans ce dernier bain détermine l'épaisseur de la métallisation. La Figure IV-20 montre en détail les différentes étapes de cette métallisation.

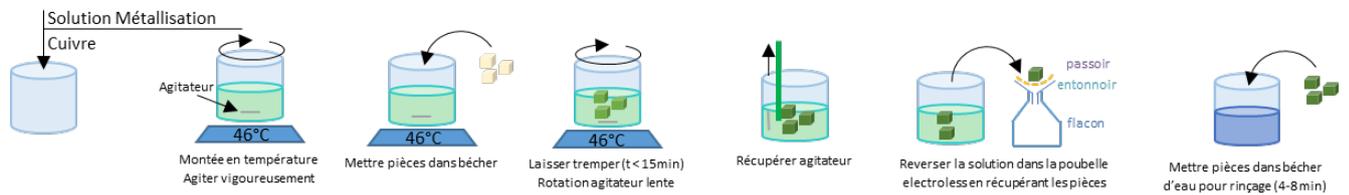


Figure IV-20- Protocole d'Electroless cuivre

Nous avons effectué plusieurs essais de métallisation avec cette technique et nous avons remarqué qu'elle n'est pas pertinente pour des pièces qui présente un état de surface lisse avec une rugosité inférieure à $1\mu\text{m}$ du fait d'un décollement de la métallisation fréquemment constaté. Cette technique n'est pas bien adaptée à nos pièces qui présentent un état de surface très lisse avec une rugosité inférieure à $1\mu\text{m}$. Une alternative est proposée par la suite.

II.8.b Métallisation par dépôt métallique

Nous disposons de plusieurs bûts de dépôt de matériaux qui utilisent différentes techniques (pulvérisation, évaporation et canon à électron).



Figure IV-21- Bûti de pulvérisation cathodique assistée DC MP 300



Figure IV-22- Evaporateur à effet joule Méca 2000



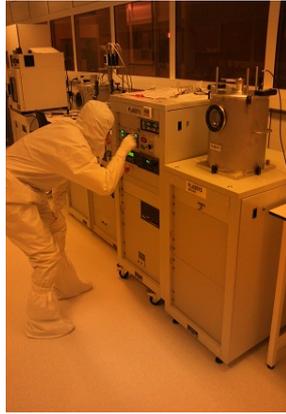


Figure IV-23- Evaporateur thermique/pulvérisation cathodique DC MEPS 300



Figure IV-24- Bâti d'ablation laser Méca 2000 (PLD : Pulsed Laser Deposition) et panache d'ablation d'une cible de nickel



Figure IV-25- Canon à électrons PLASSYS MEB 300



Figure IV-26- Canons à électrons PLASSYS MEB 500

Nous avons travaillé avec le bâti canon à électrons (PLASSYS MEB 300) dédié aux dépôts métalliques (Cr, Au, Ti, Al, Cu). Dans un premier temps, nous déposons une fine couche de Ti ($\approx 20\text{nm}$). Ensuite, nous déposons une couche de 150nm de Cuivre. Toutes ces étapes s'opèrent sous basses et très basses pressions afin d'obtenir des dépôts de qualité. Ces dépôts sont réalisés pour le dessus et le dessous des pièces afin de pouvoir métalliser toutes les surfaces de notre filtre. Chaque dépôt nécessite la réalisation d'un vide primaire qui dure environ trois heures. À l'issue du dépôt, nous avons une épaisseur totale de métallisation de 170nm, ce qui est insuffisant pour la fréquence de travail de notre projet. Afin de remédier à cela, nous utilisons une électrolyse d'Or pour assurer la croissance de la métallisation et avoir l'épaisseur nécessaire ($5\mu\text{m}$ pour notre application).



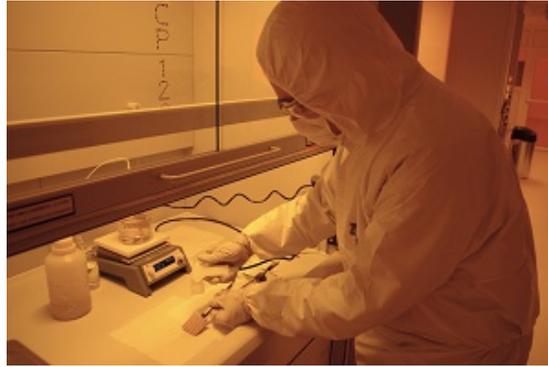


Figure IV-27- Banc d'électrolyse

II.8.c Gravure et analyse de la métallisation

Après avoir métallisé les filtres, nous procédons à la gravure des excitations coplanaires sur le dessus de notre pièce (Figure IV-28).



Figure IV-28- Filtre 2 pôles TM-DAR après métallisation et gravure des accès coplanaires
Grâce au microscope électronique Keyence, nous avons pu remarquer plusieurs problèmes. Un manque et parfois une absence totale de métallisation a été repérée aux niveaux des congés et des iris car ils représentent des angles droits ce qui rend la PVD impossible dans ces zones (Figure IV-29). À cause de ces défauts de métallisation, nous n'avons pas pu mesurer ces filtres. Nous avons utilisé une laque d'Argent afin de couvrir les zones qui présentent un manque de métallisation comme nous pouvons le remarquer sur la Figure IV-30. Cependant un décollement de la ligne centrale est illustré sur la Figure IV-31, ce qui a rendu les mesures impossibles des filtres. Le décollement de la métallisation est dû à la faible épaisseur de la couche d'accroche (20nm de Titane), un paramètre que nous devons optimiser afin d'améliorer l'adhésion du Cuivre.



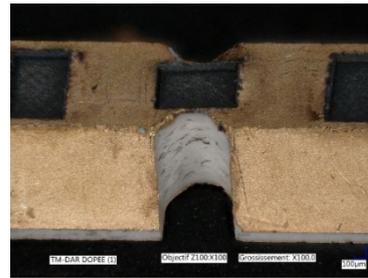
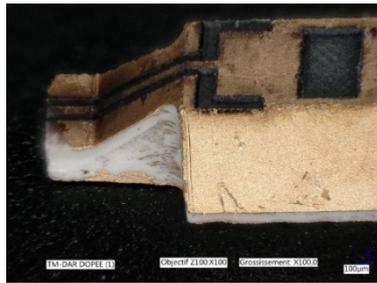


Figure IV-29- Manque de métallisation au niveau des congés et des iris



Figure IV-30- Utilisation de la laque d'argent pour couvrir les zones non métallisées



Figure IV-31- Décollement de la métallisation

II.8.d Métallisation Argent des filtres usinés

Nous avons cherché une alternative à la métallisation par PVD et nous avons trouvé une solution à base de sérigraphie de pâte d'argent avec une métallisation d'épaisseur de $15\mu\text{m}$. La particularité de cette solution est qu'elle propose une combinaison de sérigraphie et finitions manuelles avec une tolérance de $30\mu\text{m}$ pour les zones où nous avons eu des difficultés avec la PVD. Pour nous cette solution présente un fort potentiel et elle répond à nos besoins. Dans un premier temps, nous avons procédé à la démétallisation des pièces, une étape qui nous a permis de découvrir un problème de sur-gravure des accès (Figure IV-32). En fait l'empreinte de l'excitation coplanaire a été gravée sur l'alumine. Sachant que nous avons deux pièces fabriquées à base de la TM-DAR pure et les deux autres fabriquées à base de la TM-DAR 12%Ti, nous n'avons pas trouvé la même valeur de sur-grave. Les mêmes paramètres laser ayant été appliqués sur ces pièces, cela montre que la sur-



gravure dépend aussi de la nature du matériau car le réglage laser a été le même pour les 4 pièces.

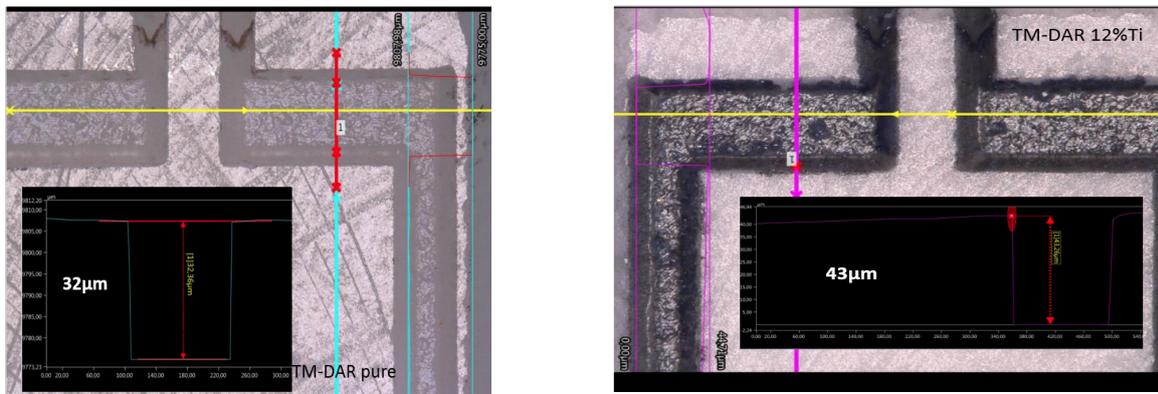


Figure IV-32- Sur-gravure des excitations sur les filtres

Pour diminuer l'impact de la sur-gravure il faut travailler avec de faibles épaisseurs de métallisation. Notre sous-traitant nous propose de passer de 15µm à 10µm d'épaisseur afin de mieux maîtriser la sur-gravure. L'épaisseur proposée est suffisante pour notre application. Donc après la démétallisation, nous avons métallisé les pièces en Argent (Figure IV-33) via cette technique.

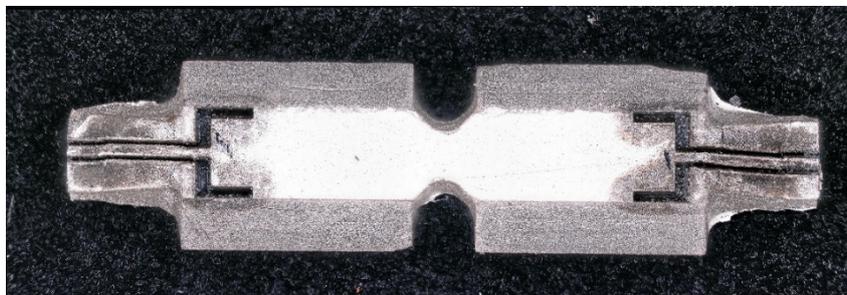


Figure IV-33- Métallisation argent et gravure des accès

Quelques défauts ont été repérés sur les pièces, comme la discontinuité de la ligne de transmission sur la pente d'un filtre. Il faut savoir que la meilleure approche pour graver les lignes consiste à le faire en trois fois (partie basse, partie inclinée, partie haute). La gravure sur la pente du filtre est effectuée en particulier par inclinaison de la pièce, une erreur d'alignement a causé la rupture de la ligne centrale comme nous pouvons le voir sur la Figure IV-34.





Figure IV-34- Rupture de la ligne centrale du filtre

II.9 Mesures RF des filtres usinés

Seul le filtre TM-DAR 12%Ti a été bien mesuré, la Figure IV-35 illustrant la mesure entre 35 GHz et 43 GHz. Le filtre est centré à 40 GHz avec des pertes d'insertion de 6,2 dB. Selon les caractérisations effectuées sur cette Alumine en bande Q, le filtre présente une permittivité de 12,4 et une tangente de $2,1 \cdot 10^{-4}$ (caractérisation de l'Alumine). La sur-gravure latérale des lignes sur ce filtre a été estimée à $50\mu\text{m}$ ce qui rend l'adaptation d'entrée-sortie proche de 60Ω . Ce filtre nous a cependant permis de faire des mesures en température afin de vérifier la stabilité en température de la TM-DAR 12%Ti. Pour des raisons de disponibilité du banc de mesure en température, les mesures ont été effectuées un mois après celles présentées sur la Figure IV-35. Suite à la dégradation naturelle du filtre pendant cette période, nous avons remarqué des problèmes d'oxydation de la métallisation Argent, un point que nous devons prendre en considération pour les prochaines pièces avec notamment une recommandation de plaquage en Or.

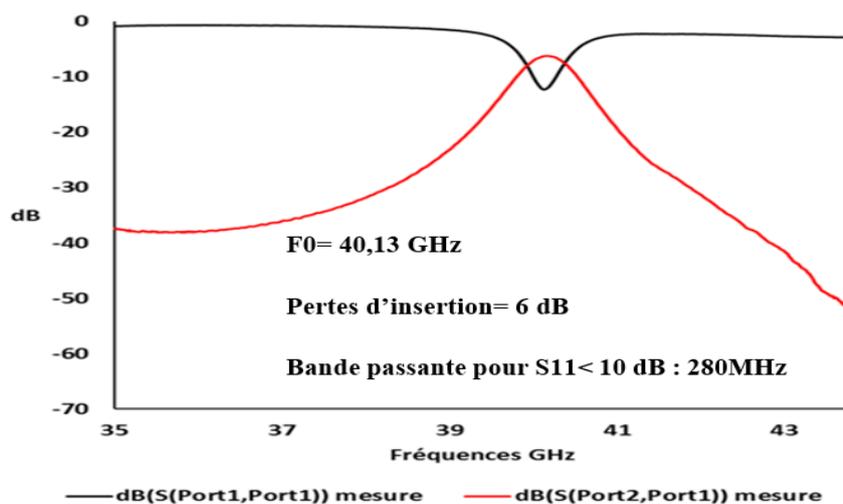


Figure IV-35- Réponse fréquentielle du filtre deux pôles TM-DAR 12%Ti.



Pour tester le comportement en température de l'Alumine TM-DAR dopée à 12% TiO₂, nous avons réalisé des mesures en température sur le filtre fabriqué par usinage en cru à base de la TM-DAR 12% Ti. Le banc de mesure en température n'étant pas bien adapté pour de petits objets, nous avons rencontré un problème de masse commune entre les pointes de mesure et le filtre. Nous avons collé le filtre sur un substrat métallisé à l'aide de colle à base d'Argent afin de limiter ce problème. Nous sommes arrivés à mesurer le filtre de nouveau, mais nous n'avons pas pu retrouver la réponse obtenue lors de la première mesure. La Figure IV-36 présente les résultats en température du filtre deux pôles TM-DAR 12%Ti entre 22°C et 70°C.

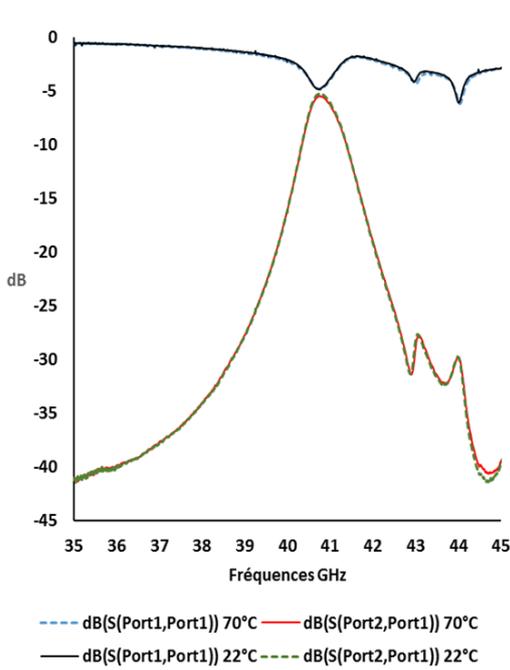


Figure IV-36- Mesure en température du filtre deux pôles TM-DAR 12%Ti entre 22°C et 70°C

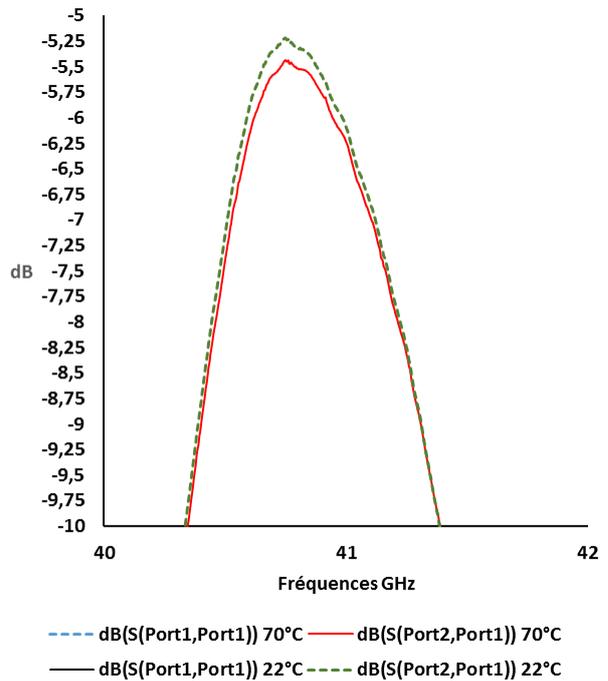


Figure IV-37- Zoom sur la mesure en température du filtre deux pôles TM-DAR 12%Ti

Nous pouvons voir sur la Figure IV-37 qu'il n'y a pas de décalage fréquentiel avec la variation de la température ce qui confirme que l'Alumine TM-DAR 12%Ti est bel et bien stable en température. Nous relevons une augmentation de 0,4 dB au niveau des pertes d'insertion induites par la dégradation de la conductivité lorsque nous montons en température.



II.10 Conclusion partie usinage en cru

La technique de fabrication par usinage en cru a répondu à plusieurs interrogations et fourni plusieurs recommandations. Grâce à cette fabrication, nous avons pu mesurer notre premier démonstrateur en bande Q. Avec ces filtres, nous avons anticipé les problèmes de métallisation et nous avons opté pour une métallisation Argent dont les qualités d'adhésion sont satisfaisantes. Ces tolérances de fabrication sont élevées mais peuvent être améliorées. Nous avons aussi pu relever une bonne répétabilité du procédé d'usinage en cru. La gravure laser sur des objets de petite taille a été validée sur ces pièces ainsi que la stabilité en température des filtres réalisés avec l'Alumine dopée. Les pièces fabriquées par usinage en cru ont permis de lever un verrou technique sur plusieurs points et ont été bénéfiques pour la suite du projet.

III. Filtres fabriqués par moulage et stéréolithographie

Au cours de cette partie nous allons présenter les filtres fabriqués par moulage basse pression et stéréolithographie. Une présentation des résultats de mesures sera aussi donnée.

III.1 Filtres fabriqués par moulage basse pression

Pour la partie moulage basse pression, le centre de transfert de technologie céramique (CTTC) est sous-traitant pour la réalisation de ces filtres céramique. Pour valider les concepts des filtres conçus dans le cadre du projet, nous avons fait le choix de lancer la fabrication de quelques démonstrateurs en bande Q. Le prix du moule ainsi que les petites tailles d'objets en bande V nous ont conduit à faire ce choix. La fabrication des moules a nécessité plusieurs petites modifications des structures des filtres pour pouvoir répondre aux contraintes d'usinage de ces derniers. La Figure IV-38 présente le moule qui a été fabriqué pour la réalisation de nos filtres.



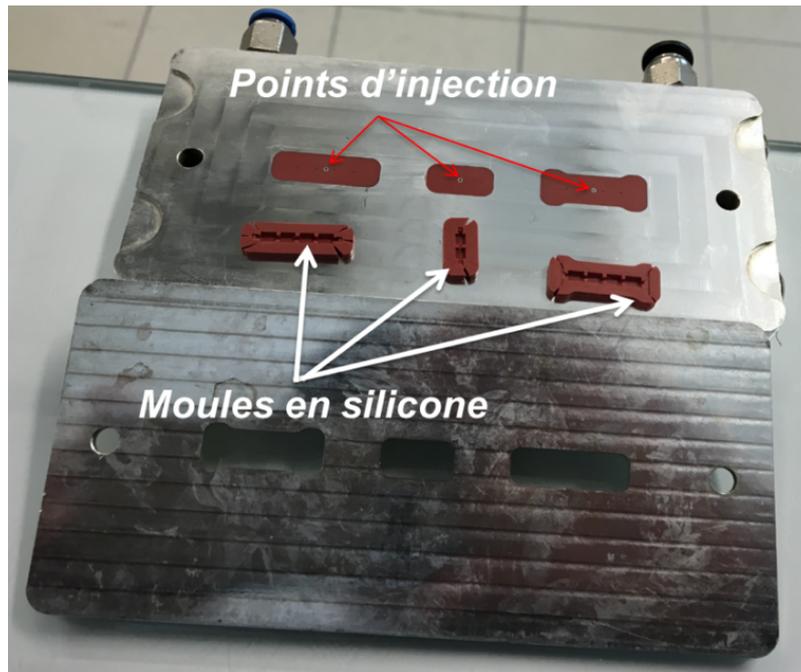


Figure IV-38- Moule pour fabrication de filtres céramiques

Trois filtres ont été proposés à la fabrication : un filtre deux pôles à 40 GHz à excitation coplanaire, un filtre quatre pôles à 40 GHz à excitation coplanaire et un filtre quatre pôles excitation micro ruban. Les deux premiers filtres ont été prévus pour effectuer des mesures sous pointes à Xlim et le dernier pour faire les tests de bonding à TAS.

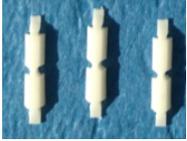
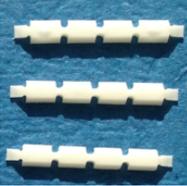
Filtres proposés à la fabrication	Prototypes fabriqués
Filtre deux pôles à excitation coplanaire	
filtre quatre pôles à excitation coplanaire	
Filtre quatre pôles à excitation micro ruban	

Tableau IV-1 Listes des prototypes fabriqués par moulage basse pression



Les filtres, après la phase d'injection dans le moule en silicone que nous pouvons voir sur la Figure IV-38, doivent ensuite être démoulés ; cette étape s'avère critique pour nos filtres qui sont de petites tailles. Comme nous pouvons le voir sur le Tableau IV-1, seuls les filtres deux pôles ainsi que les filtres quatre pôles à excitation coplanaire ont été démoulés sans être cassés, mais ils ont été légèrement déformés. Le filtre quatre pôles à excitation micro ruban n'a pas pu être livré à cause de ses longues extrémités qui se cassent à chaque essai de démoulage. Une analyse des filtres livrés par le microscope numérique Keyence a révélé plusieurs anomalies. Toutes les pièces livrées par le CTTC souffrent de fissures dans différents endroits du filtre et souvent au niveau des points d'injection (

Figure IV-39).

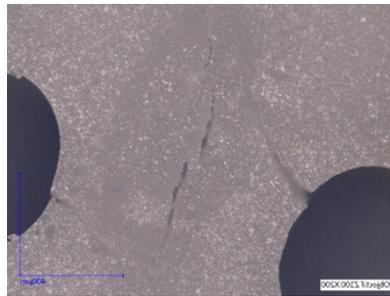


Figure IV-39- Exemple de fissures relevées au niveau du point d'injection du filtre par le microscope numérique Keyence

Un deuxième point que nous avons remarqué grâce au microscope numérique concerne les tolérances de fabrication. Les tolérances relevées se révèlent supérieures à nos attentes ($\pm 30\mu\text{m}$), principalement à cause des déformations observées sur les pièces. Ces dernières subissent des contraintes lors de la phase de démoulage, ces dernières générant in fine des déformations à l'issue du filtrage. Nous avons aussi remarqué une bonne reproductibilité dimensionnelle mais les déformations des pièces sont aléatoires et directement liées à la manière de démoulage du filtre.

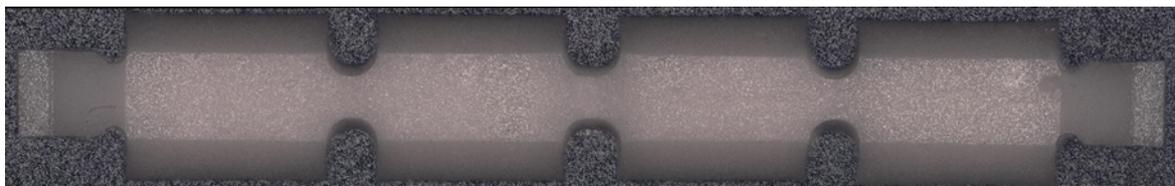


Figure IV-40- Filtre quatre pôles à excitation coplanaire après frittage (photo prise par le microscope numérique)



	Valeur théorique mm	Valeur mesurée mm	Différence μm
Longueur R1	2,92	2,826	94
Longueur R2	2,752	2,644	108
Longueur R3	2,752	2,621	131
Longueur R4	2,92	2,825	95
Longueur iris 1	0,65	0,737	-87
Longueur iris 2	0,755	0,808	-53
Longueur iris 3	0,65	0,724	-74
Longueur totale	16,47	16,166	304

Tableau IV-2- Comparaison des dimensions simulées et mesurées sur un filtre quatre pôles

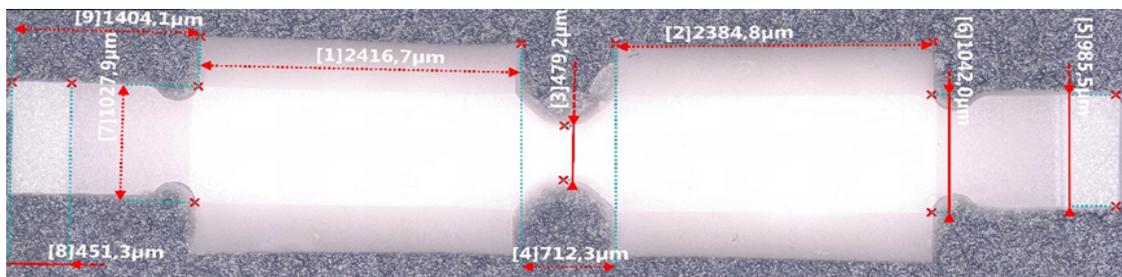


Figure IV-41- Filtre deux pôles à excitation coplanaire après frittage

	Valeur théorique mm	Valeur mesurée mm	Différence μm
Longueur R1	2,798	2,416	382
Longueur R2	2,798	2,384	414
Longueur iris	0,783	0,712	71
Largeur iris	0,65	0,479	171
Largeur résonateur	1,2	1,042	158
Largeur plateforme	0,55	0,451	99
Longueur plateforme	1,2	0,985	215

Tableau IV-3- Comparaison des dimensions simulées et mesurées sur un filtre deux pôles

Après la métallisation Argent de ces filtres et gravure des accès, nous avons essayé de les mesurer en fréquence avec un système sous pointes. Suite au problème des fissures et les grandes valeurs d'erreurs de fabrication relevées, les réponses fréquentielles des filtres ont été dégradées. Cette dégradation a rendu les filtres inexploitable.



Pour la prochaine génération de filtres céramique en moulage basse pression il faut en priorité retravailler la position des points d'injection. Il faut aussi réfléchir à des méthodes de démoulage qui déforment moins les pièces. Ces points doivent être optimisés afin d'améliorer les tolérances de fabrication pour la prochaine génération de filtres par moulage basse pression et ainsi réussir à répondre aux besoins de filtrage demandés.

III.2 Filtres fabriqués par stéréolithographie 3D

Dans le cadre du projet ATOMIQ, 3DCERAM, une PME locale ayant l'expertise dans la fabrication additive céramique, sera chargée de la fabrication des filtres par stéréolithographie. Une étape d'optimisation de l'Alumine TM-DAR pure développée par le SPCTS, partenaire dans le projet ATOMIQ, a eu lieu. Un premier lot de filtres deux pôles a été fabriqué pour valider la compatibilité de cette formulation avec leur technique de fabrication (Figure IV-42).

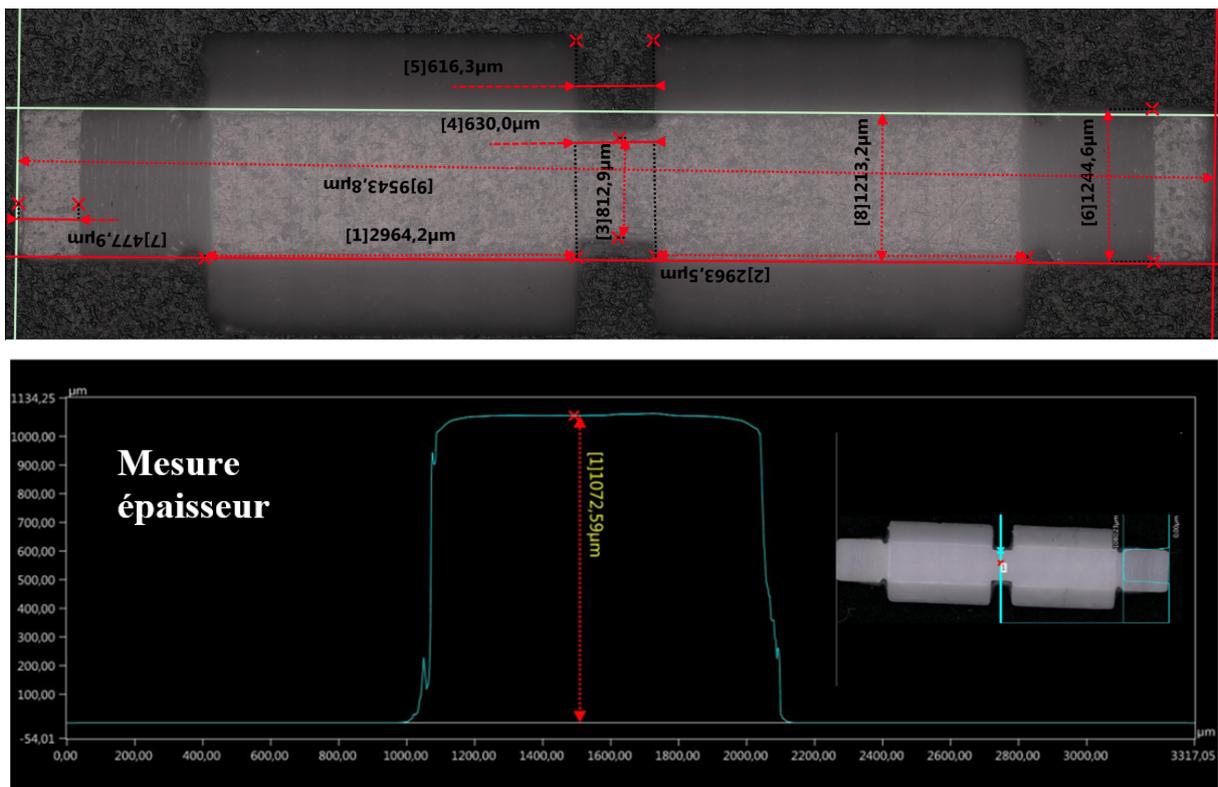


Figure IV-42- Filtre deux pôles par stéréolithographie et mesures dimensionnelles de ce dernier



	Valeur théorique mm	Valeur mesurée mm	Différence μm
Longueur R1	2,915	2,963	48
Longueur R2	2,915	2,964	49
Longueur iris	0,685	0,616	69
Largeur iris	0,85	0,812	38
Largeur résonateur	1,2	1,242	42
Largeur plateforme	0,5	0,477	23
Longueur plateforme	1,2	1,244	44

Tableau IV-4- Comparaison entre dimensions simulées et mesurées pour un filtre deux pôles (fabrication par stéréolithographie)

Le Tableau IV-4 montre un bon accord entre les tolérances de fabrications annoncées par 3DCERAM et les tolérances de fabrications mesurées sur le filtre. Ces filtres sont métallisés en Argent et leurs accès coplanaires gravés par laser comme les autres prototypes présentés précédemment. Ensuite nous avons procédé à leur mesure en fréquence (Figure IV-43).

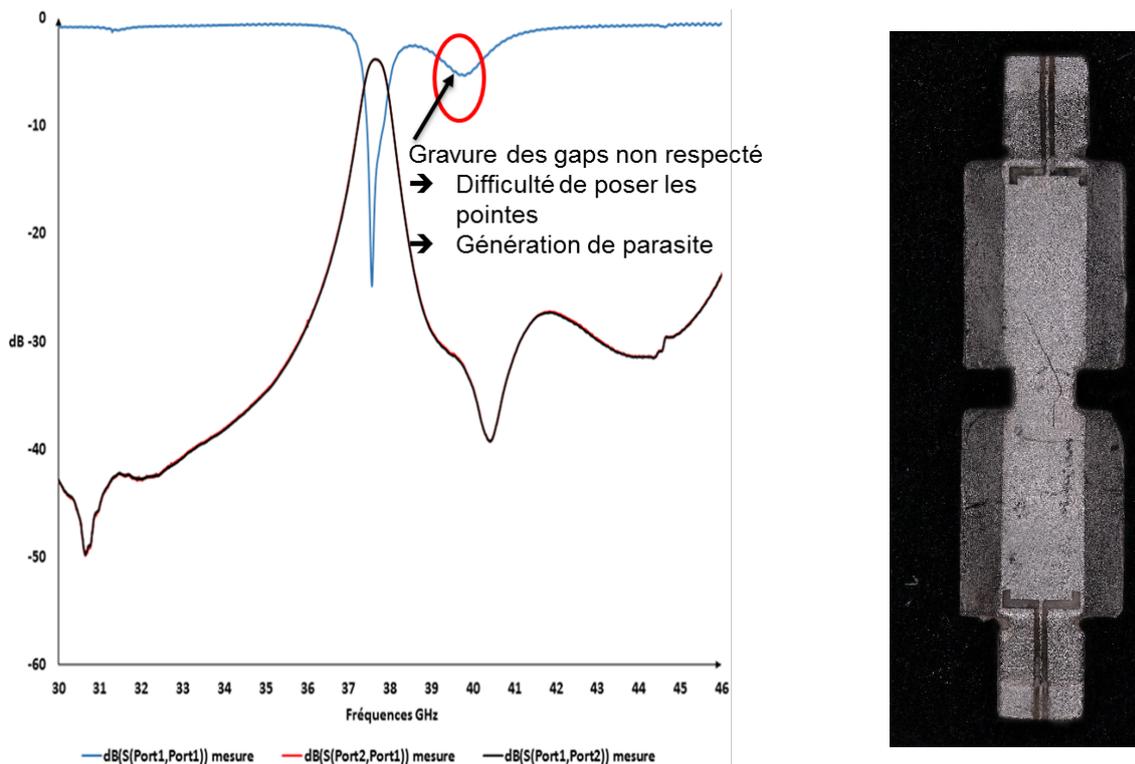


Figure IV-43- Mesure du filtre deux pôles en stéréolithographie (excitation coplanaire)



Le filtre est centré à 37,66 GHz avec une bande passante est de 320 MHz pour un niveau de S_{11} supérieur à -10 dB. Les pertes d'insertion sont de 3,8 dB avec un niveau de réjection inférieur à -25 dB sur 15 GHz autour de la bande utile. La gravure des accès n'a pas été conforme à nos attentes. Nous avons mesuré une tolérance de gravure de $\pm 30 \mu\text{m}$. Cette dernière a causé des difficultés de pose de pointes ce qui explique le pique de parasite relevé sur le S_{11} .

En tenant compte des caractérisations effectuées sur des plaques de TM-DAR fabriquées par 3DCeram, nous nous attendions à ce que cette Alumine présente une permittivité de 9,65 et une $\tan\delta$ de $4 \cdot 10^{-4}$. Cependant le décalage fréquentiel semble indiquer une permittivité plus élevée (Figure IV-44). En tenant compte des dimensions relevées au microscope numérique, les résultats expérimentaux montrent que l'Alumine TM-DAR utilisée pour la fabrication de ces filtres possède une permittivité de 9,94 et une conductivité autour de $3 \text{ S}/\mu\text{m}$ (Figure IV-45). La tangente de pertes est autour de $6 \cdot 10^{-4}$, soit au-dessus de ce que nous avons mesuré au cours du chapitre II. Cela pourrait être dû à la densité des pièces fabriquées par 3DCERAM. L'extraction du facteur de qualité du filtre révèle une valeur autour de 200 qui reste en-dessous de la valeur recherchée dans le projet. Néanmoins ces résultats valident le concept du filtre deux pôles présenté dans le troisième chapitre.

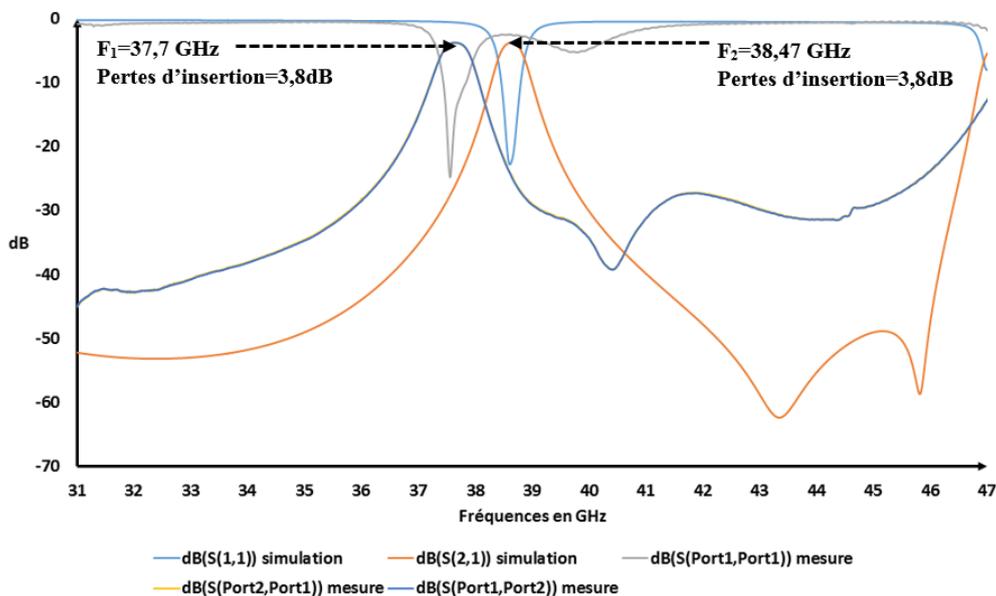


Figure IV-44- Comparaison simulation/ mesure filtre deux pôles bande Q



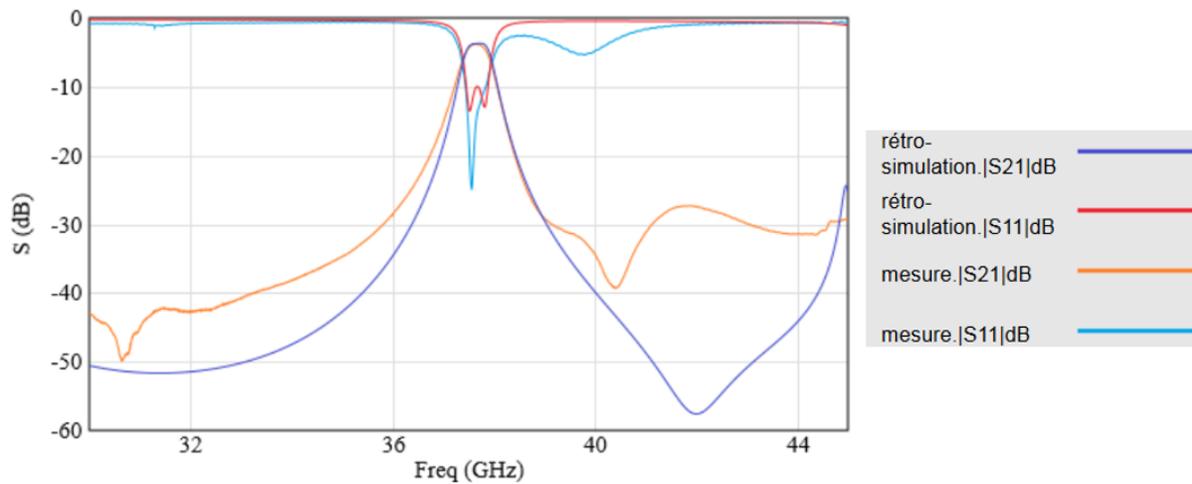


Figure IV-45- Rétro-simulation filtre deux pôles bande Q

La stéréolithographie 3D céramique a montré son potentiel à fabriquer des objets 3D pour des applications spatiales autour de la bande K_u dans le cadre du projet ANR FILIPX dans lequel la société Thales Alenia Space France a été impliquée. Aujourd'hui cette technologie vient de montrer de nouveau sa pertinence aux fréquences plus élevées. Le respect des tolérances de fabrication et la maîtrise de la fabrication des objets de petites tailles ont conduit à la fabrication de démonstrateurs en bande Q qui répondent aux besoins de notre application.



IV. Correction post-fabrication

IV.1 Introduction

Au cours du chapitre III, une analyse de sensibilité a été effectuée afin de vérifier la robustesse des structures conçues dans le cadre du projet ATOMIQ face aux tolérances de fabrication annoncées par les fabricants (± 30 moulage basse pression, $\pm 50\mu\text{m}$ stéréolithographie). Cette analyse a montré que pour garantir les spécifications de filtrage proposées par TAS et le CNES, il ne faut pas dépasser $25\mu\text{m}$ de tolérance de fabrication. Une contrainte qui s'annonce difficile pour les partenaires, nous a conduit vers la recherche d'un moyen de correction post-fabrication avec lequel les spécifications seront maintenues.

Stanis Courrèges [70] a utilisé précédemment la correction post-fabrication par tir laser pour régler ses filtres planaires. Le principe consiste à démétalliser des zones spécifiques afin de varier la fréquence centrale du filtre vers les hautes fréquences ou vers les basses fréquences.

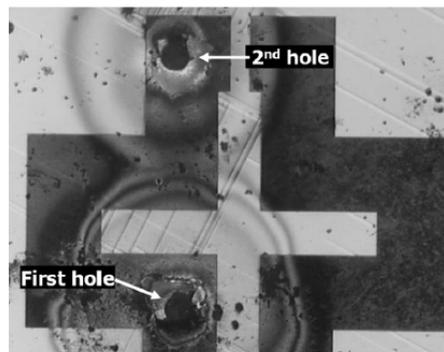


Figure IV-46- Trou dans la partie supérieure d'un résonateur planaire (diamètre $350\mu\text{m}$) [70]

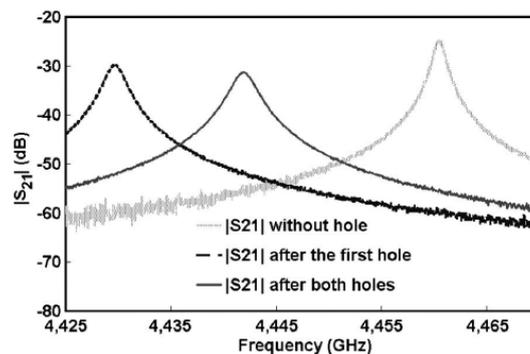


Figure IV-47- S_{21} du résonateur planaire sans trou, avec un trou et avec deux trous [70]



La Figure IV-47 montre que la fréquence de résonance du résonateur se décale vers les basses fréquences en fonction du nombre de tirs laser. Cette étude a aussi montré que le facteur de qualité du résonateur est directement lié aux dimensions du trou réalisé par le laser. Une dégradation du facteur de qualité en fonction de la taille du motif est observée sur la Figure IV-48. Cette dégradation reste faible mais il faut bien la quantifier pour pouvoir imposer des contraintes qui garantissent le respect des spécifications de filtrage de l'application.

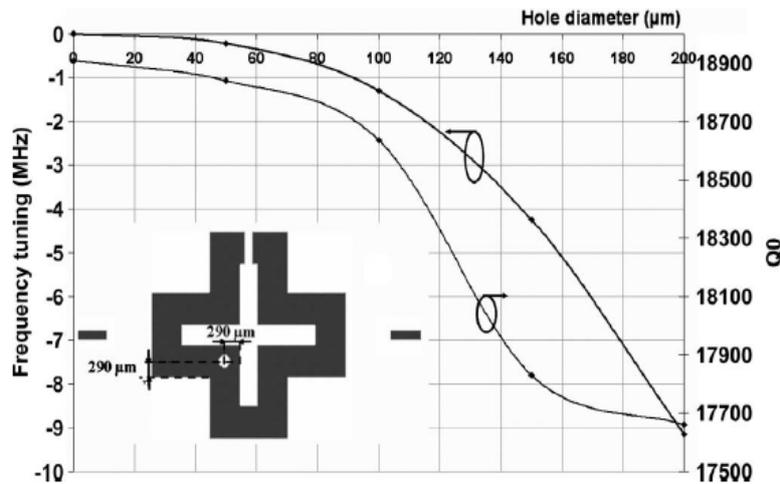


Figure IV-48- Variation du facteur de qualité en fonction du diamètre de l'ouverture [70]

Cette étude a été en partie un point de départ pour notre recherche d'outil de correction post fabrication. Cette technique a été démontrée pour des filtres planaires travaillant à des faibles fréquences (≈ 4 GHz). Le premier travail a consisté à vérifier la validité de cette méthode pour des objets 3D et ensuite essayer de l'adapter à des fréquences plus hautes pour être compatible avec les gammes de fréquences du projet ATOMIQ (autour de 40 GHz).

IV.2 Motifs de compensation compatibles avec les bandes Q et V

Nous avons choisi de travailler sur la face supérieure du filtre pour répondre aux contraintes de collage des filtres sur une plateforme d'accueil. Plusieurs formes ont été testées dans la phase de recherche de motifs compatibles avec nos filtres. La Figure IV-49 montre quelques motifs que nous avons testés, la zone bleue désignant la partie gravée et la zone verte désignant la métallisation (zone non gravée). Des variations dimensionnelles de ces motifs ont été effectuées afin de voir l'impact de leurs tailles sur le décalage fréquentiel ainsi que la dégradation du facteur de qualité.



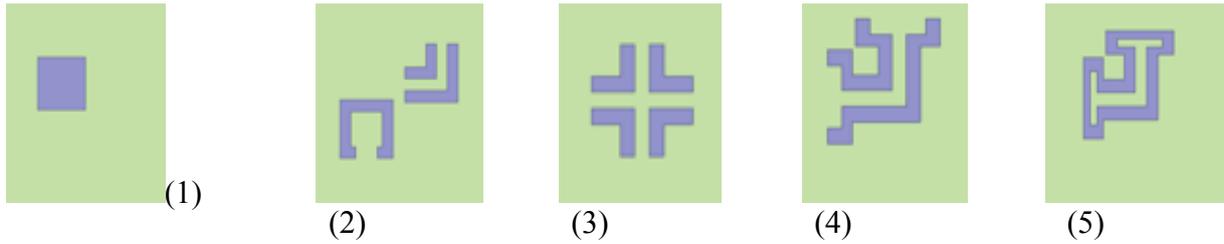


Figure IV-49- Motifs de gravures testés

Seulement le motif numéro 1 répond à nos attentes en termes de variation fréquentielle. En fonction de sa position nous avons la possibilité de réagir en haute fréquence ou en basse fréquence. Une étude détaillée de ce motif sera présentée par la suite.

IV.3 Etude du motif rectangulaire

Nous avons choisi de commencer à analyser l'impact d'un motif en forme de croix pour ensuite l'agrandir progressivement pour arriver à notre rectangle. L'étude a été réalisée sur un filtre deux pôles et nous avons cherché à faire varier la fréquence dans les deux sens dans un premier temps. Ensuite nous nous sommes intéressés à l'impact de ce motif sur la variation du couplage inter-résonateur.

IV.3.a Variation hautes fréquences

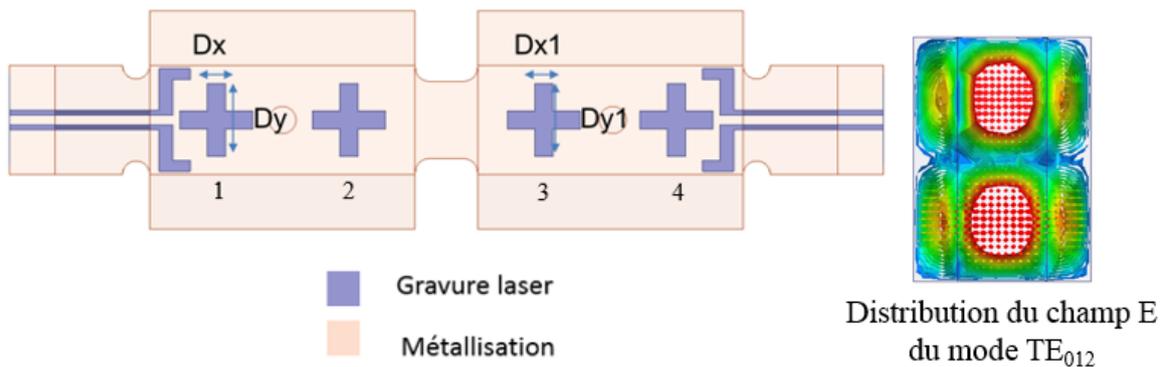


Figure IV-50- Paramètres géométriques à varier sur le motif de réglage positif en fréquence

- Dx et $Dx1$ variation suivant l'axe X (motif 1 = motif 4)
- Dy et $Dy1$ variation suivant l'axe Y (motif 2 = motif 3)

Le choix de la position des motifs a été fixé sur la base de la répartition du champ E du mode de résonance TE_{012} utilisé. Un seul motif sur chaque résonateur suffit pour faire décaler



la fréquence vers les hautes fréquences mais nous en avons utilisé deux pour augmenter ce décalage.

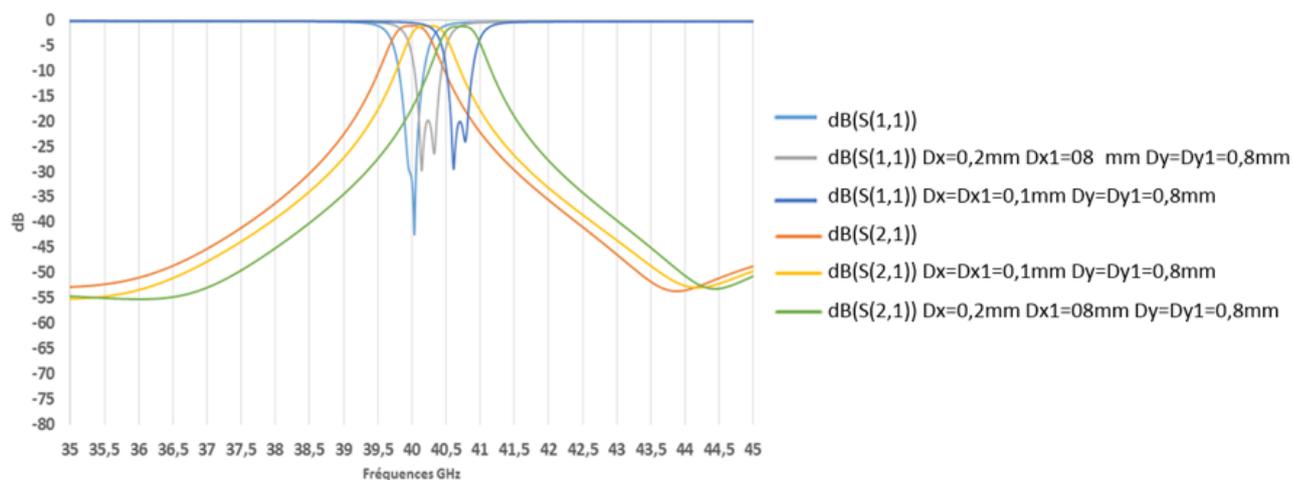


Figure IV-51- Variation haute fréquence en fonction des dimensions de l'ouverture (simulation)

Grâce à ce motif nous avons pu faire varier la fréquence centrale initiale de 40 GHz jusqu'à + 1,75% (700 MHz) dans le sens des hautes fréquences. La Figure IV-51 montre que l'adaptation reste correcte avec un niveau meilleur que -20 dB. Les pertes d'insertion augmentent faiblement de l'ordre de 0,1 dB.

IV.3.b Variation basses fréquences

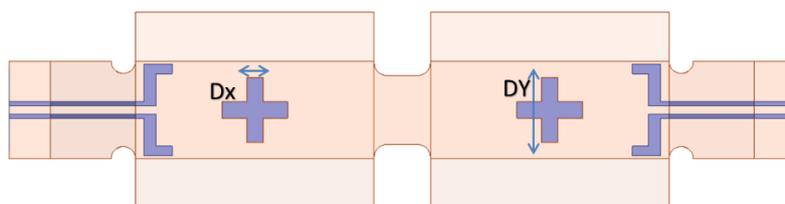


Figure IV-52- Motif de compensation pour la variation en basse fréquence du filtre deux pôles en bande Q (autour de 40 GHz)

Pour créer un décalage fréquentiel vers les basses fréquences, le motif de compensation a été réalisé au milieu du résonateur et la variation de ce dernier augmente la valeur du décalage fréquentiel. La Figure IV-53 montre qu'avec une ouverture de dimension 0.8mmx0.8mm selon les axes X et Y, nous avons une variation fréquentielle de l'ordre de 1,35% de la fréquence de travail (40 GHz). Nous observons un même comportement de l'adaptation par rapport au cas



précédent avec un niveau d'adaptation maximal de -25 dB. De même pour les pertes d'insertion avec une augmentation de 0,1 dB.

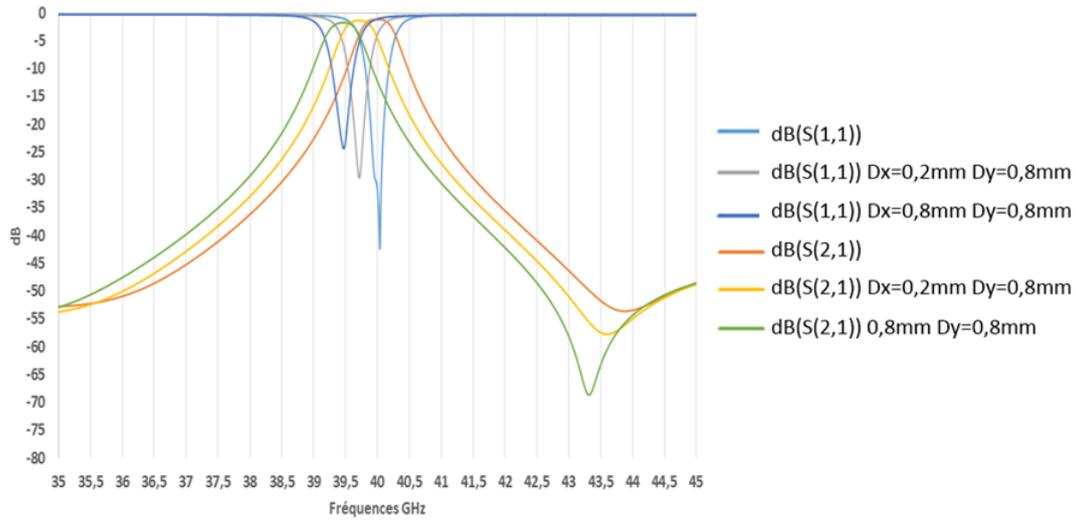


Figure IV-53- Variation basse fréquence en fonction des dimensions de l'ouverture (simulation)

IV.3.c Variation du couplage inter-résonateur

Dans cette partie nous avons essayé de faire varier le niveau de couplage entre les deux résonateurs du filtre deux pôles avec le même principe illustré précédemment. Deux configurations ont été analysées, la première consistant à graver deux fentes à l'extrémité de l'iris de couplage afin d'augmenter la valeur du couplage. La deuxième configuration consiste à graver la fente au milieu de l'iris pour baisser la valeur du couplage.

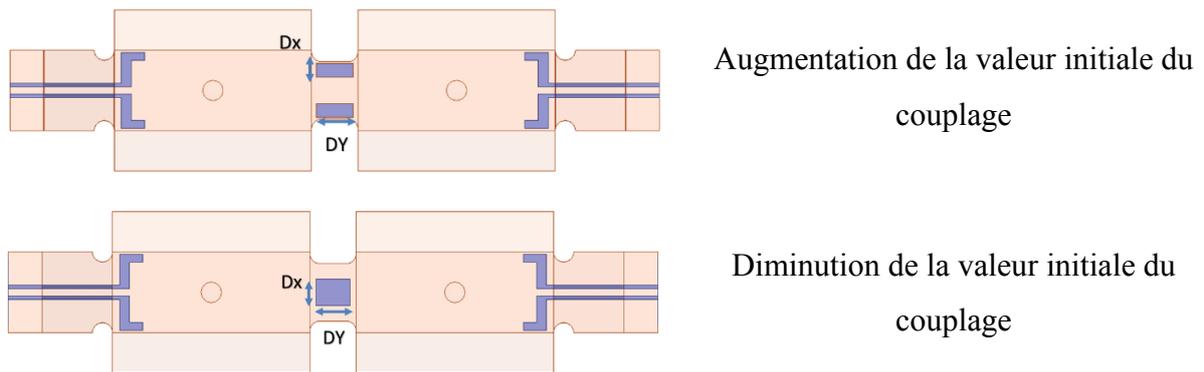


Figure IV-54- Positionnement des motifs de compensation du couplage

En raison des petites tailles des iris de couplage qui sont de l'ordre de 850µm de largeur et 600µm de longueur, nous ne pouvons pas apporter de fortes corrections au niveau du



couplage inter-résonateur. Seules des variations de +26% à -10% sont atteignables avec respectivement $D_x=0,15\text{mm}$, $D_y=0,5\text{mm}$ et $D_x=0,3\text{mm}$, $D_y=0,4\text{mm}$.

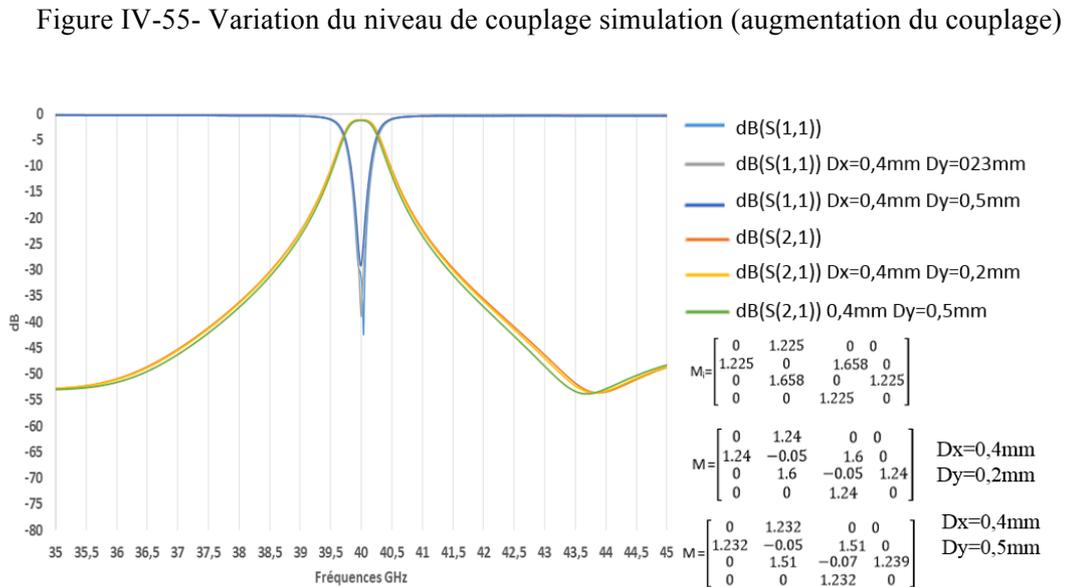
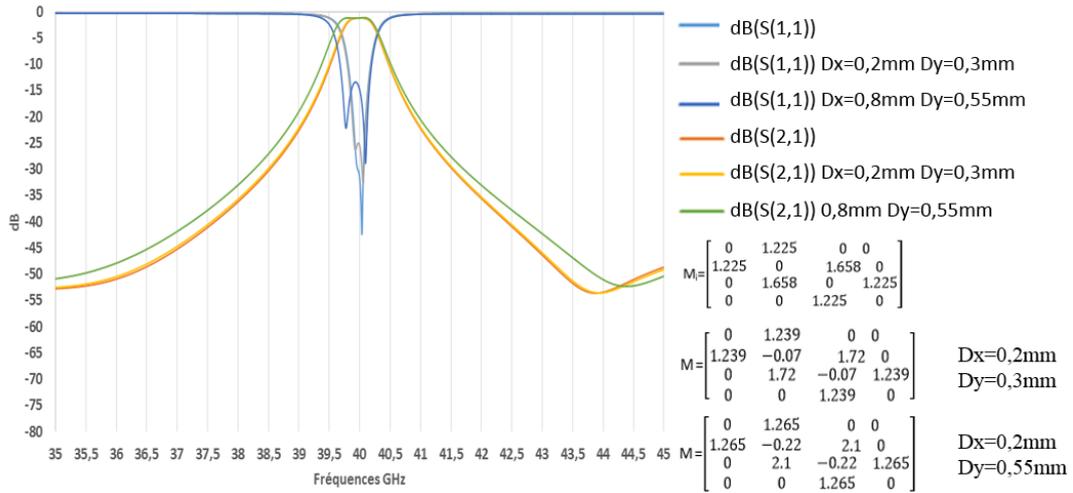


Figure IV-56- Variation du niveau de couplage simulation (diminution du couplage)

Les Figure IV-55 et Figure IV-56 montrent ainsi que les motifs de compensation apportent une rectification de la valeur du couplage inter-résonateur dans les deux sens. Nous pouvons noter que les pertes d'insertion restent constantes lorsque nous varions le couplage inter-résonateur. Les couplages entrée-sortie varient très faiblement et n'apportent pas de modification sur la réponse fréquentielle du filtre deux pôles. Les motifs de compensation présentés dans cette partie répondent à nos besoins de correction post-fabrication pour les filtres qui seront fabriqués par stéréolithographie et moulage basse pression dans le cadre du



projet ATOMIQ. Une vérification de l'impact de ces motifs sur le facteur de qualité est cependant nécessaire pour quantifier plus précisément la limitation de cette technique.

IV.3.d Impact des motifs de compensation sur le facteur de qualité

Pour étudier l'impact des motifs de correction post-fabrication sur le facteur de qualité, nous avons utilisé le logiciel HFSS en mode de simulation Eigenmode (oscillations libres). L'étude a été réalisée sur un résonateur en Alumine TM-DAR pure. Toutes les faces du résonateur sont métallisées (conductivité $30S/\mu m$), seul le motif de compensation a été laissé non métallisé. Une boîte d'air a été installée sur la fente et nous lui avons attribué l'impédance du vide ($Z_0=367,7 \Omega$) sur les parois de cette dernière pour pouvoir simuler correctement le motif et éviter qu'il soit vu comme un CCE (court-circuit électrique) par HFSS.

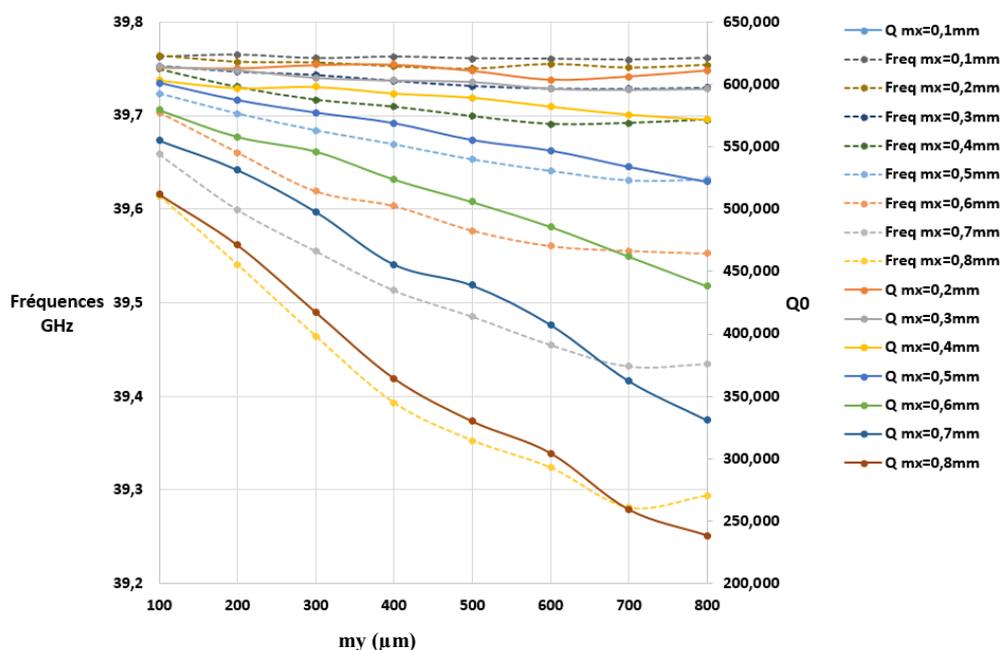


Figure IV-57- Variation du facteur de qualité et la fréquence (vers les basses fréquences) en fonction de la taille du motif

La Figure IV-57 montre que pour des dimensions faibles (entre de 0,2 et 0,3mm) du motif le facteur qualité est quasiment stable, la fréquence subissant une légère variation. Pour une ouverture de 0,8mm x 0,8mm le facteur de qualité chute de 50%. Selon cette figure nous pouvons garder un facteur de qualité supérieur à 600 pour un décalage de l'ordre de 200MHz avec un motif de 0,6mm x 0,5mm, ce qui semble intéressant pour notre application.

Sur la Figure IV-58 nous remarquons que lorsque nous posons le motif de compensation sur l'extrémité du résonateur, la dégradation du facteur de qualité est inférieure à celle rencontrée



dans le cas précédent. Pour une ouverture de 0,8mm x 0,8mm, nous avons un décalage fréquentiel de 460 MHz avec une dégradation de 7% pour le facteur de qualité.

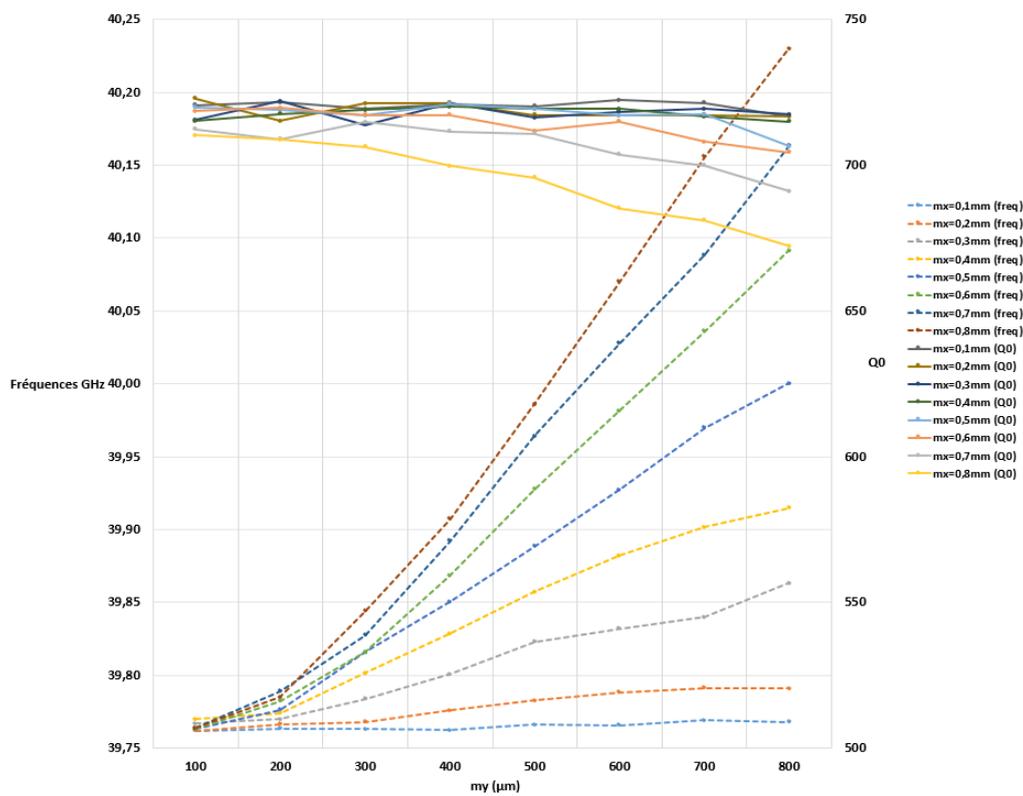


Figure IV-58- Variation du facteur de qualité et la fréquence (vers les hautes fréquences) en fonction de la taille du motif

La correction en haute fréquence s'annonce plus avantageuse que la correction en basse fréquence en termes de décalage fréquentiel et dégradation du facteur de qualité. Mais nous serons limités en dimensions du motif sur le premier et le dernier résonateur vu qu'il y aura la position très proche de l'excitation coplanaire (ou microruban) à prendre en considération.

IV.3.e Application du protocole de correction post-fabrication

Afin de mettre en évidence la pertinence de la méthode, nous avons choisi de travailler sur un exemple de filtre qui nécessite de la correction post-fabrication. Les tolérances de fabrication ont été considérées de l'ordre de 80μm. une variation aléatoire de ±80μm a été appliquée sur toutes les dimensions du filtre.



$$[M_{obj}] \begin{bmatrix} 0 & 1.035 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1.035 & 0 & 0.911 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0.911 & 0 & 0.7 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0.7 & 0 & 0.911 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0.911 & 0 & 1.035 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1.035 & 0 \end{bmatrix} \left| \right. [M_{d\acute{e}cal\acute{e}e}] \begin{bmatrix} 0 & 0.81 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.81 & -1.311 & 1.048 & 0.02 & 0.007 & 0 \\ 0 & 1.048 & -2.75 & 0.736 & 0.024 & 0 \\ 0 & 0.024 & 0.732 & -2.781 & 1.06 & 0 \\ 0 & 0.007 & 0.02 & 1.06 & -1.33 & 0.81 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.81 & 0 \end{bmatrix}$$

Figure IV-59- Matrices de couplage filtre idéale/ filtre décalé

Plusieurs décalages fréquentiels ont été détectés sur la matrice de couplage du filtre dérèglé. Ce filtre nécessite le réglage des fréquences de résonance des différents résonateurs du filtre quatre pôles ainsi que les couplages inter-résonateurs.

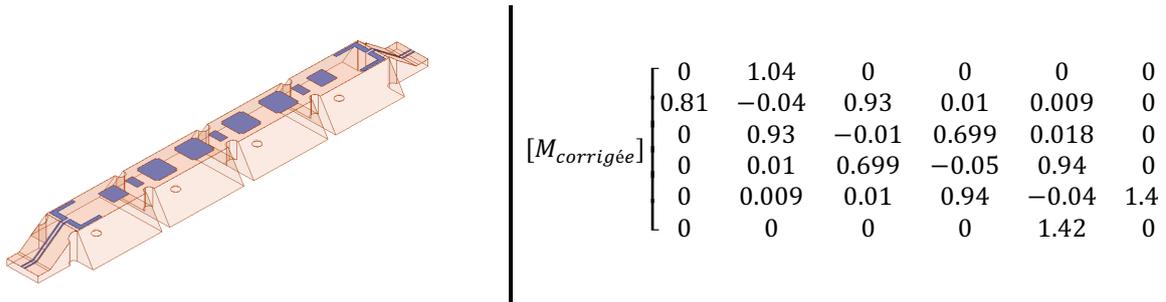


Figure IV-60- Correction de la matrice de couplage par le protocole de compensation

Après identification du type correction nécessaire, une application du protocole de compensation est faite. Après l'étape d'optimisation des tailles des motifs, la matrice de couplage du filtre quatre pôles a été corrigée. Grâce aux motifs de correction une rectification de +2,5% de la valeur de la fréquence centrale (40 GHz) et -15% sur la valeur du couplage ont été apportées. Grâce à ce protocole de rectification nous avons pu corriger le décalage induit par ces tolérances de fabrication ($\pm 80\mu\text{m}$), et donc garantir le maintien des spécifications de filtrage. Cette technique nous a permis de décaler le filtre de 1 GHz ce qui représente à peu près la bande passante du filtre (Figure IV-61). Nous avons effectué une correction sur un filtre deux pôles fabriqué par 3DCeram afin d'évaluer la pertinence de cette technique. Le motif a été choisi pour réaliser de la correction vers les hautes fréquences. Après la métallisation et la gravure du filtre, une partie de la métallisation a été arrachée lors du protocole de nettoyage ultrasonique qui est appliqué suite à la gravure laser. Une reprise manuelle de cette zone a été effectuée, créant malheureusement un court-circuit sur le port 2. Seule la mesure du S_{11} a ainsi pu être effectuée.



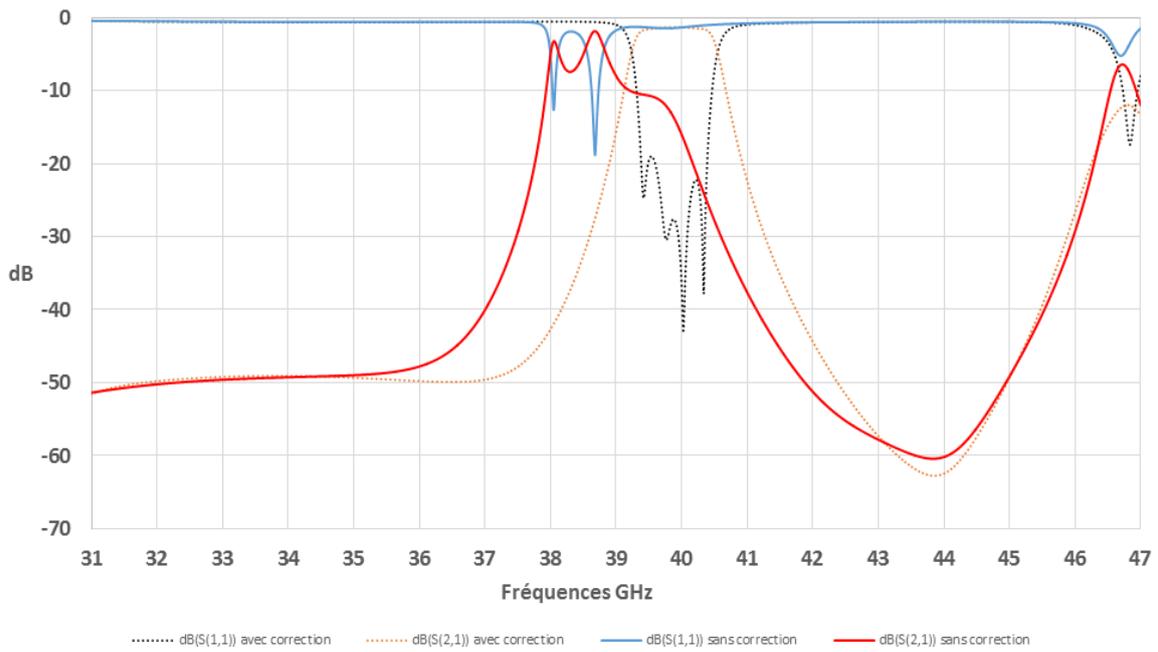


Figure IV-61- Correction de réponse fréquentielle par le protocole de rectification post-fabrication simulation

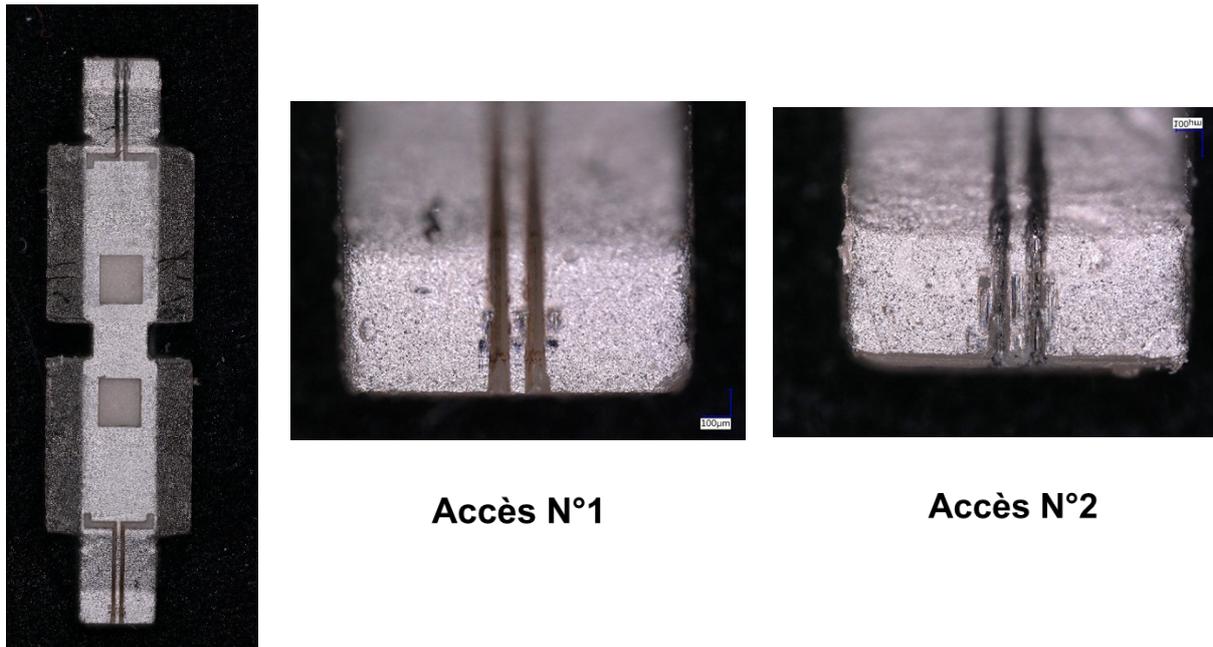


Figure IV-62- Motifs de correction sur un filtre deux pôles (fabriqué par 3DCeram)

Nous pouvons voir sur la Figure IV-62 le problème de l'accès numéro 2 évoqué précédemment. La mesure de ce filtre montre la variation fréquentielle apportée par la correction post-fabrication. La correction est autour de 600MHz, cela prouve



expérimentalement la pertinence de cette technique dans les hautes fréquences. Une deuxième gravure de l'accès numéro 2 est prévue pour pouvoir effectuer une mesure complète du filtre.

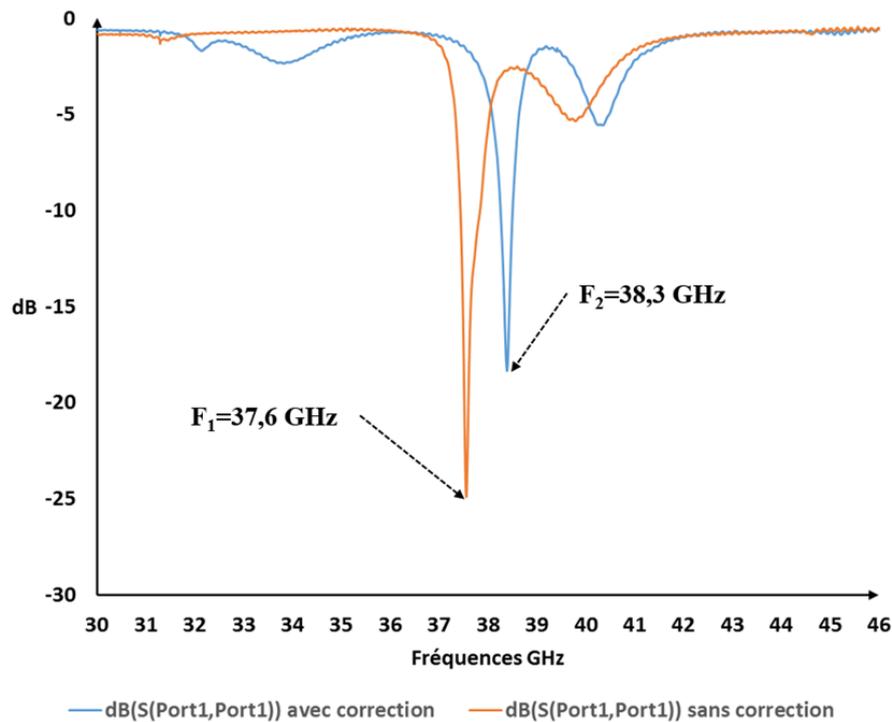


Figure IV-63- Comparaison entre filtre deux pôles sans et avec correction post-fabrication

IV.3.f Conclusion partie correction post-fabrication

Tenir les spécifications de filtrage dans les bandes Q et V présente un point critique dans notre application en raison des tolérances de fabrication annoncées par les fabricants ($\pm 30 \mu\text{m}$ pour le moulage basse pression et $\pm 50 \mu\text{m}$ pour la stéréolithographie). Ces contraintes nous ont mené à chercher des solutions de correction post-fabrication afin d'assurer le respect des spécifications de filtrage proposées. La rectification par tir laser sur le dessus de nos filtres propose une alternative intéressante qui donne la possibilité de réaliser un décalage fréquentiel vers les basses et les hautes fréquences. À travers l'étude présentée dans cette partie, nous avons montré la capacité de cette technique à répondre à nos exigences. Cette technique a cependant montré qu'elle peut réaliser plus de décalages vers les hautes que vers les basses fréquences. La dégradation du facteur de qualité est proportionnelle à la taille du motif. Elle est faible pour des petites ouvertures mais dès que nous dépassons une ouverture qui fait $0,6\text{mm} \times 0,6 \text{mm}$ nous perdons la moitié du facteur de qualité dans le cas du décalage vers les basses fréquences. Cet effet est moins marqué pour le décalage vers les hautes fréquences. La technique de correction post-fabrication par tir laser est indispensable dans les



bandes Q et V pour les filtres qui sont fabriqués par des technologies qui ont une tolérance de fabrication supérieure à $30\mu\text{m}$. La méthode ne peut cependant pas corriger de grands écarts de décalage fréquentiel et elle est limitée à environ 1 GHz autour de 40 GHz dans notre cas pour garantir un facteur de qualité suffisant pour l'application.



V. Conclusion chapitre IV

Au cours de ce chapitre nous avons présenté la technique de fabrication par usinage en cru qui a été proposée par le SPCTS pour réaliser des démonstrateurs à base de l'Alumine TM-DAR pure et dopée au TiO_2 . Grâce à ces démonstrateurs nous avons pu valider le concept des filtres deux pôles proposés dans le chapitre III. La fabrication d'un filtre deux pôles à base de la TM-DAR 12% Ti a confirmé la stabilité de cette formulation d'Alumine dopée que nous avons présenté dans le chapitre II. Les filtres réalisés à l'aide de cette technique ont été notre première expérience avec l'usinage en cru, ce qui explique la non maîtrise parfaite des tolérances de fabrication même si elles sont pour la plupart tenue à 50 μm près. Cette première fabrication nous a apporté plusieurs réponses à des points que nous ne maîtrisons pas au début du projet. La métallisation a été un point critique dans notre application. Les méthodes traditionnellement utilisées dans notre laboratoire non pas pu répondre à nos besoins. Une métallisation à base d'Argent déposée par sérigraphie avec reprise manuelle des zones complexes a résolu le problème de métallisation et nous a permis de faire nos premières mesures hyperfréquences. Avec une meilleure maîtrise des tolérances de fabrication, cette technique présente un fort intérêt pour les applications spatiales dans les bandes Q et V.

Nous avons aussi présenté les démonstrateurs de la première génération des filtres par moulage basse pression fabriqués par le CTTC. Les problèmes de fissures et le non-respect des tolérances que nous avons signalé ont conduit à la dégradation des performances hyperfréquences de ces filtres et les a rendus inutilisables. Il faut donc retravailler la position des points d'injection pour la prochaine génération pour éviter les fissures qui sont très critiques dans les bandes Q et V.

Les filtres deux pôles en stéréolithographie 3D céramique réalisés par 3DCERAM ont montré la pertinence de cette technique à fabriquer des objets 3D pour des applications spatiales en bandes Q et V. Le respect des tolérances de fabrication annoncées par 3DCERAM a conduit à la réussite de ces démonstrateurs et les performances obtenues satisfont tout à fait aux besoins demandés. Ces démonstrateurs ont validé l'utilisation de la stéréolithographie dans les bandes Q et V.

L'étude de sensibilité réalisée au cours du chapitre III, a montré l'importance d'une solution de réglage post-fabrication pour pouvoir satisfaire les gabarits de filtrage si les tolérances de fabrications sont supérieures à 30 μm . Une technique de correction par tir laser a été présentée



au cours de ce chapitre, et nous avons montré sa capacité à créer un décalage fréquentiel vers les basses et les hautes fréquences ainsi que la rectification de la valeur du couplage inter-résonateur sur nos filtres. Pour garder un facteur de qualité suffisant pour l'application visée, il ne faut pas chercher à créer de grands décalages fréquentiels. Cette technique est pertinente si on ne dépasse pas les 80 μ m de tolérance de fabrication. Au-delà elle ne sera pas capable de rattraper les spécifications de filtrage demandées pour nos structures dans les bandes Q et V.





Conclusion générale



Les systèmes de communication par satellites nécessitent des filtres avec de très bonnes performances électriques dans plusieurs endroits de la chaîne de télécommunication pour pouvoir rejeter les signaux indésirables. Dans le cadre de cette thèse, des nouveaux filtres en bandes Q (autour de 40 GHz) et V (autour de 55 GHz) ont été conçus afin de répondre aux besoins de filtrage des convertisseurs de fréquences. Ces travaux se sont déroulés en collaboration avec Thales Alenia Space France (TAS-F), le Centre Nationale d'Etudes Spatiales (CNES), et le laboratoire Science des Procédés Céramiques et Traitements de Surface (SPCTS) et PME 3DCeram. La stéréolithographie ainsi que le moulage basse pression, deux techniques de fabrication céramique 3D, ont été utilisées pour fabriquer les filtres.

Au cours du **premier chapitre**, nous avons montré l'évolution de l'industrie des satellites et leurs besoins d'aller encore plus haut en fréquence afin de répondre aux exigences des utilisateurs. Pour cela il est nécessaire de développer de nouvelles techniques de filtrage dans les bandes Q et V pour les charges utiles. Nous avons aussi présenté un état de l'art sur les filtres en bandes Q et V, et nous avons montré que ces filtres ne répondent pas à nos besoins de filtrage. Nous avons aussi présenté plusieurs techniques de fabrication additive et nous nous sommes focalisés sur la stéréolithographie et le moulage basse pression. Le choix de ces deux techniques de fabrication a été fait en cohérence avec le consortium d'ATOMIQ.

Le **deuxième chapitre** a été dédié à l'étude de l'Alumine, un matériau céramique qui sera utilisé pour la fabrication des filtres en bande Q/V. Trois facteurs microstructuraux ont été étudiés au cours de ce projet afin d'identifier leur impact sur les performances diélectriques. La taille des grains, avec un impact quasi-nul sur la permittivité et la tangente de pertes, a été découplée des effets des impuretés et de la densité. Pour des fréquences inférieures à 25 GHz, seule la densité impacte la tangente de pertes de l'alumine. L'impact des impuretés rejoint celui de la densité à haute fréquence. La référence d'Alumine SMA 6 possède seulement 20ppm d'impuretés de plus par rapport à la référence TM-DAR, mais ces impuretés supplémentaires ont dégradé significativement la tangente de pertes à partir de 40 GHz. Cette constatation rend l'impact des impuretés comme facteur primordial dans les propriétés diélectriques de l'alumine à haute fréquence. Les conditions de manipulation des poudres et la pureté des solvants utilisés lors des étapes de préparation et de mise en forme jouent donc un rôle primordial dans les propriétés finales du matériau.

Au-delà de ces constatations, ce sont les performances des alumines caractérisées qui donnent satisfaction. Avec une tangente de pertes moyenne mesurée à $2,06 \cdot 10^{-5}$ pour la TM-



DAR, les performances obtenues sont à l'état de l'art. La base de travail constituée par l'alumine TM-DAR est donc un excellent point de départ tant pour la réalisation de pièces industrielles que pour la poursuite des travaux avec l'optimisation des propriétés diélectriques par dopage.

L'optimisation des propriétés diélectriques de l'alumine TM-DAR par dopage au dioxyde de titane a conduit à des résultats particulièrement intéressants. Deux points remarquables présentent tout particulièrement un intérêt dans le cadre du projet. D'un côté, le dopage de l'alumine avec 0,5%*m.* de TiO₂ entraîne une diminution de la tangente de pertes de 25% à 13 GHz, avec une tangente mesurée à $1,5 \cdot 10^{-5}$, mais sans stabilisation en température. De l'autre côté, le dopage de l'alumine avec 12%*m.* de TiO₂ permet de redresser la tangente de pertes du matériau autour de 0 ppm.°C⁻¹ après recuit mais au prix d'une dégradation de la tangente de pertes. Ces résultats, qui répondent aux objectifs initiaux du projet, ont aussi mis en exergue la complexité de la maîtrise du dopage des alumines pour les applications diélectriques.

En perspective à ces travaux, trois pistes d'amélioration ont été identifiées. Un travail visant à optimiser la densité et à réduire la taille des grains semble indispensable. L'ajout d'oxyde de manganèse documenté dans la littérature semble une piste intéressante d'autant que ce dopant bloque la formation du titanate d'aluminium. D'autre part, un rapide travail d'optimisation de la durée du recuit devrait permettre de réduire la dégradation du facteur de qualité observée au cours de l'étude.

La conception des filtres hyperfréquences en bandes Q et V a fait l'objet du **chapitre 3**. Des topologies de filtrage qui répondent aux spécifications proposées par TAS dans les bandes Q et V ont été proposées. Afin de vérifier la robustesse de ces structures, une étude de sensibilité face aux tolérances technologiques a été réalisée. Cette étude a révélé que pour des tolérances de fabrication supérieures à $\pm 30 \mu\text{m}$, le respect du gabarit de filtrage en bandes Q et V ne sera pas assuré. La dispersion de permittivité ainsi que le comportement en température du filtre ont aussi été discutés dans cette partie et ils ont marqué l'importance de l'utilisation à terme de l'Alumine TM-DAR stable en température, cette dernière permettant un respect des spécifications de filtrage plus aisé. Le cumul de ces tolérances technologiques montre l'importance d'utiliser un outil de réglage post-fabrication sur les objets prévus en bandes Q et V.



En perspective à ces travaux, nous pourrions envisager l'adaptation des structures à une métallisation par PVD en éliminant tous les zones difficiles à métalliser par dépôt de matériaux. La Figure a présente une perspective à ce travail et offre la possibilité de réaliser la phase de métallisation dans les locaux de XLIM. Cette dernière avec des faces latérales inclinées à 60° peut être aussi métallisée par jet d'aérosol, une nouvelle technique de métallisation 3D en cours d'étude au CTTC.

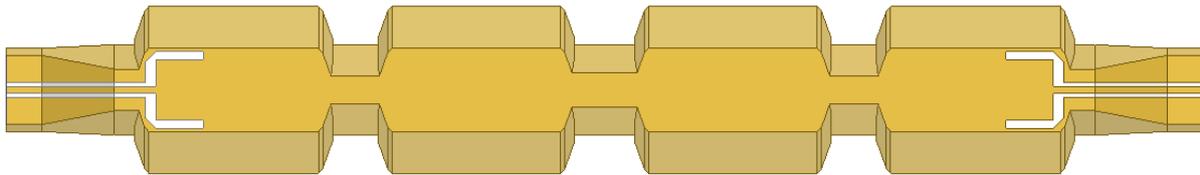


Figure a- Filtre quatre pôles sans congés

Le **chapitre 4** a été consacré à la présentation de techniques de fabrication par usinage en cru. Cette technique a été proposée par le SPCTS pour fabriquer des démonstrateurs à base de l'Alumine TM-DAR 12%Ti. Cette technique a montré sa capacité à fabriquer des pièces 3D de petites tailles tout en gardant un niveau de densité d'Alumine très élevé (supérieur à 99,9%). Les filtres réalisés à l'aide de cette technique ont été notre première expérience avec l'usinage en cru. Grâce à ces filtres nous avons remarqué la difficulté de les métalliser en PVD à cause des angles droits au niveau des iris de couplage et de la plateforme d'accueil. Cette problématique nous a conduit à chercher une alternative à la PVD. La métallisation en Argent avec retouche manuelle des zones inaccessibles par PVD a été alors utilisée avec succès. Cette technique a répondu aux besoins du projet et elle a servi à la validation expérimentale des filtres deux pôles fabriqués par usinage en cru et stéréolithographie.

Nous avons aussi présenté les problèmes rencontrés lors de la fabrication des pièces 3D par moulage basse pression. Nous avons vu l'importance de retravailler les positions des points d'injection afin d'éviter toutes fissures qui peuvent nuire au fonctionnement hyperfréquence des filtres. Une étude sur la correction post-fabrication par tir laser a été détaillée au cours de ce chapitre. L'importance de cette technique a été identifiée au cours du chapitre III pour assurer le respect des gabarits de filtrage. Des motifs de correction ont été identifiés, et, nous avons montré leur pertinence à réaliser la correction de la fréquence et du couplage aussi bien positivement que négativement. Cette technique peut réaliser un décalage fréquentiel d'environ 1 GHz vers les basses et hautes fréquences pour nos filtres. Au-delà la dégradation



du facteur de qualité devient forte et le respect des spécifications de filtrage ne sera plus maintenu.

En perspective, il sera intéressant de regarder une technique de fabrication collective des pièces qui minimise les manipulations des pièces au moment du nettoyage. La Figure b présente un exemple d'idée qui peut être réalisé pour éviter toute intervention manuelle directe sur les pièces avant le frittage. La fabrication collective peut être aussi utilisée pour faciliter la métallisation des pièces, leur gravure au laser et leur mesure hyperfréquence.



Figure b- Idée d'assemblage de pièces

La correction post-fabrication par tir laser peut aussi servir à la réalisation des filtres génériques qui couvriront la totalité des bandes Q et V. Si nous prenons l'exemple d'un filtre qui présente 800MHz de bande passante, nous pouvons réaliser un décalage fréquentiel égal à sa bande passante vers la haute fréquence et vers la basse fréquence. Ce qui nous conduit à utiliser 8 filtres génériques pour couvrir toute la bande Q comme nous pouvons voir sur la Figure c.

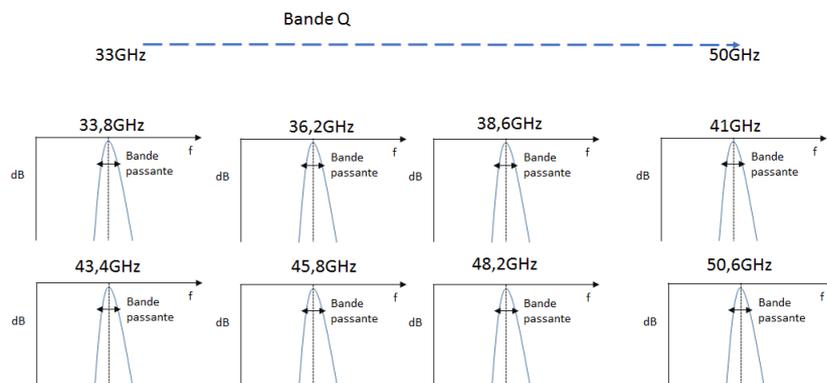


Figure c- Exemple de filtre générique



Références

- [1] Agence spatiale européenne
www.esa.int
- [2] Rapport sur l'industrie du satellite, 2016, <http://www.sia.org/wp-content/uploads/2016/06/SSIR16-Pdf-Copy-for-Website-Compressed.pdf>
- [3] Rapport sur l'industrie du satellite, 2014, "http://www.sia.org/wp-content/uploads/2014/05/SIA_2014_SSIR.pdf", accès en ligne le 08/07/2015
- [4] N. Jolly, « Filtres accordables volumiques à forts facteurs de qualité pour des applications spatiales », Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges Novembre 2015
- [5] Article de Spaceflight Now du 29/12/2014, « O3B Networks plans satellite fleet expansion », <http://spaceflightnow.com/2014/12/29/o3b-networks-plans-satellite-fleet-expansion/>, accès en ligne le 08/07/2015
- [6] J. Sombrin, cours ENSEEIHT, « Missions télécoms », novembre 2014
- [7] Article du CNET du 27/03/2015, « Facebook wants solar drone to bring Internet far and wild » <http://www.cnet.com/news/facebooks-solar-powered-drones-to-take-flight-this-summer/>, accès en ligne le 08/07/2015
- [8] Article de The Telegraph du 27/03/2015, « Facebook completes first drone flight above UK, Mark Zuckerberg confirms », <http://www.telegraph.co.uk/news/media/11499142/Facebook-completes-first-drone-flight-above-UK-Mark-Zuckerbergconfirms.html>, accès en ligne le 08/07/2015
- [9] <http://spacenews.com/facebook-eutelsat-to-pay-spacecom-95m-for-ka-band-lease/>
- [10] Article du MIT Technology Review, « Loon project », <http://www.technologyreview.com/featuredstory/534986/project-loon/>, accès en ligne le 08/07/2015
- [11] Article du Magazine interne du CNES, CQSP n°147 d'Avril 2015, p7, « Le CNES et Google, moteurs de la recherche »
- [12] Article de l'usine digitale du 19/01/2015, « Internet mondial par satellites : Elon Musk et Google font la course contre Richard Branson et Greg Wyler », <http://www.usine-digitale.fr/article/internet-mondial-par-satellites-elon-musk-et-google-font-lacourse-contre-richard-branson-et-greg-wyler.N308165> accès en ligne le 08/07/2015
- [13] H. Fenech, A. Tomatis, S. Amos, J.L. Serrano Merino, V. Soumpholphakdy, "the capacity of hts systems", 20th Ka and broadband communications, navigation and earth observation conference, 1-3 Octobre, 2014, Italy
- [14] <http://www.eutelsat.com/en/home.html>
- [15] M.C. Comparini, "A Retrospective of the impact of Ka Band on satellite communications 20th Ka and broadband communications, navigation and earth observation conference - Impact on System Manufactures from Service and Applications perspective", 20th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference, 1-3 Octobre, 2014, Italy
- [16] S. Dimitrov, S. Erl, S. Jaeckel, J. M. Rodriguez Bejarano, A. Yun Garcia, A. Kyrgiazos, B. G. Evans, O. Vidal, P. Inigo Martinez, "Radio Resource Management For Forward And Return Links In High Throughput Satellite Systems", 20th Ka and Broadband Communications, Navigation and Earth Observation Conference, 1-3 Octobre, 2014, Italy
- [17] P. Moroni et al., « Comparative Study of Different Microstrip Planar Bandpass Filters Topologies in an Industrial Context » Microwave European Conference, 2007 pp.60 – 62
- [18] C. Guendo et al : « Narrow Bandpass Filters Using Dual Behavior Resonators », Vol.51, N°3, March 2003, pp.734-743
- [19] A. del Olmo-Olmeda, M. Baquero-Escudero, V. E. Boria-Esbert, A. Valero-Nogueira and A. J. Berenguer-Verdú, "A novel band-pass filter topology for millimeter-wave applications based on the



- groove gap waveguide" Microwave Symposium Digest (IMS), 2013 IEEE MTT-S International, Seattle, WA, 2013, pp. 1-4.
- [20] J. H. Lee, N. Kidera, S. Pinel, J. Laskar and M. M. Tentzeris, "Fully Integrated Passive Front-End Solutions for a V-band LTCC Wireless System," in IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, vol. 6, no. , pp. 285-288, 2007.
- [21] T. M. Shen, C. F. Chen, T. Y. Huang and R. B. Wu, "Design of Vertically Stacked Waveguide Filters in LTCC," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 55, no. 8, pp. 1771-1779, Aug. 2007.
- [22] L. Rigaudeau et al., "LTCC 3-D resonators applied to the design of very compact filters for Q-band applications," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 6, pp. 2620-2627, June 2006.
- [23] P. Ferrand, D. Baillargeat, S. Verdeyme, J. Puech, M. Lahti and T. Jaakola, "LTCC reduced-size bandpass filters based on capacitively loaded cavities for Q band application," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2005., 2005
- [24] Y. H. Cho et al., "A Fully Embedded LTCC Multilayer BPF for 3-D Integration of 40-GHz Radio," in IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol. 30, no. 3, pp. 521-525, Aug. 2007.
- [25] R. Valois, D. Baillargeat, S. Verdeyme, M. Lahti and Tuomo Jaakola, "LTCC technology for 40GHz bandpass waveguide filter," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest., 2005, pp. 4
- [26] Paola Farinelli, Luca Pelliccia, Benno Margesin , Roberto Sorrentino, " Ka-band Surface-Mountable Pseudo-elliptic Filter in Multilayer Micromachined Technology for On-board Communication Systems", IMS Mai 2016, San Francisco
- [27] Zhaosheng He, Zhenhai Shao, Xiang Li and Mengkui Shen "A Dual-Band Bandpass Filter Based on Hybrid Structure of Substrate Integrated Waveguide and Substrate Integrated Coaxial Line" IMS Mai 2016,
- [28] J. Y. Jin, X. Q. Lin, Y. Jiang and Q. Xue, "A Novel Compact E -Plane Waveguide Filter With Multiple Transmission Zeroes," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 63, no. 10, pp. 3374-3380, Oct. 2015.
- [29] B. Ahmadi and A. Banai, "Direct Coupled Resonator Filters Realized by Gap Waveguide Technology," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 63, no. 10, pp. 3445-3452, Oct. 2015.
- [30] C. S. Yoo, Jongchul Park, Young-Chul Rhee and K. S. Seo, "A v-band compact bandpass filter in Si-BCB technology using the coupled-line resonators," 2015 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Phoenix, AZ, 2015, pp. 1-4
- [31] <https://www.additively.com/en/learn-about/>
- [32] J.C. André, A. Le Méhauté & O. De Witte, "Dispositif pour réaliser un modèle de pièce industrielle", Brevet français, 84.11.241, 1984
- [33] C.W. Hull, "Apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography", US patent, 4.475.330, 1986
- [34] M. Furman, "Conception et fabrication par stéréolithographie d'un catalyseur monolithique en vue de l'intensification du procédé photocatalytique pour la dépollution de l'air", Thèse de doctorat de l'Institut national polytechnique de Lorraine E.N.S.I.C. - NANCY, Décembre 2006
- [35] O. Dufaud & S. Corbel, "Oxygen diffusion in ceramic suspension for stereolithography" Chemical Engineering Journal, vol. 92, n°1-3, p. 55-62, Avril 2003
- [36] S. Monneret, "La microstéréolithographie et ses applications", Mécanique et Industries, vol. 6, p. 457-462, Mai 2005
- [37] M. Farsari, F. Claret-Tournier, S. Huang, C. Chatwin, D. Budgett, P. Birch, R. Young & J. Richardson, "A novel highaccuracy micro-stereolithography method employing an adaptive electro-optic mask", Journal of Materials Processing Technology, vol. 107, n°1-3, p. 167-172, 2000



- [38] Centre de Transfert de Technologies Céramiques www.cttc.fr
- [39] J.F. Boussie, S. Boussie, S. Sharrock And D. Duran, "Stereolithographic models derived from x-ray computed tomography – Reproduction accuracy", *Journal of Surgical and Radiologic Anatomy*, vol. 19, n°3, p. 193-199, 1997.
- [40] N. Delhote, « Composants céramiques 3D par procédé de stéréolithographie. Solutions de filtrage hyperfréquence innovantes », Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, Octobre 2007.
- [41] C. Duterte, N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, Y. Abouliatim & T. Chartier, "3D ceramic microstereolithography applied to sub-millimeter devices manufacturing", *Proceedings of the 37th European Microwave Conference*, p. 814-817, 8 -12 Octobre 2007, Munich, Germany.
- [42] A. Khalil, « Technologies LTCC et stéréolithographie céramique 3D appliquées à la conception de dispositifs millimétriques et sub-millimétriques », Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, Octobre 2012.
- [43] N. T. Nguyen, N. Delhote, M. Ettoirre, D. Baillargeat, L. Le Coq, & R. Sauleau, "Design and Characterization of 60-GHz Integrated Lens Antennas Fabricated Through Ceramic Stereolithography", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Mai 2010.
- [44] F. Kouki, « Conception et intégration d'un sous-système filtre-antenne en céramique pour les communications haut-débit sans fils à 60 GHz », Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, Janvier 2015
- [45] 3DCERAM <http://3dceram.com/>
- [46] A. Basti « Développement de méthodes de synthèse pour la conception de filtres hyperfréquences compacts et optimisés en pertes », Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, Septembre 2014
- [47] C. Thibon « Intégrations et applications de résonateurs fort Q cryogéniques » Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges, Janvier 2009
- [48] Alford, N.M. and S.J. Penn, Sintered alumina with low dielectric loss. *Journal of Applied Physics*, 1996. 80(10): p. 5895-5898.
- [49] Penn, S.J., et al., Effect of porosity and grain size on the microwave dielectric properties of sintered alumina. *Journal of the American Ceramic Society*, 1997. 80(7): p. 1885-1888.
- [50] Mackrodt, W.C., et al., The morphology of α Al₂O₃ and α Fe₂O₃: The importance of surface relaxation. *Journal of Crystal Growth*, 1987. 80(2): p. 441-446.
- [51] Huang, C.-L., J.-J. Wang, and C.-Y. Huang, Sintering behavior and microwave dielectric properties of nano alpha-alumina. *Materials Letters*, 2005. 59(28): p. 3746-3749.
- [52] Huang, C.-L., et al., Microwave dielectric properties and sintering behavior of nano-scaled (α + θ)-Al₂O₃ ceramics. *Materials Research Bulletin*, 2008. 43(6): p. 1463-1471.
- [53] Huang, C.L., J.J. Wang, and C.Y. Huang, Microwave dielectric properties of sintered alumina using nano-scaled powders of α alumina and TiO₂. *Journal of the American Ceramic Society*, 2007. 90(5): p. 1487-1493.
- [54] Ohishi, Y., et al., Controlled Temperature Coefficient of Resonant Frequency of Al₂O₃-TiO₂ Ceramics by Annealing Treatment. *Japanese Journal of Applied Physics*, 2004. 43(6A): p. L749.
- [55] Miyauchi, Y., et al., Improvement of the dielectric properties of rutile-doped Al₂O₃ ceramics by annealing treatment. *Journal of the European Ceramic Society*, 2006. 26(10-11): p. 2093-2096.
- [56] Zhang, Q.L., et al., Sintering and dielectric properties of Al₂O₃ ceramics doped by TiO₂ and CuO. *Journal of Electroceramics*, 2007. 18(3-4): p. 225-229.
- [57] Song, K.X., S.Y. Wu, and X.M. Chen, Effects of Y₂O₃ addition on microwave dielectric characteristics of Al₂O₃ ceramics. *Materials Letters*, 2007. 61(16): p. 3357-3360.
- [58] Wang, H., et al., Effect of Mg doping on microwave dielectric properties of translucent polycrystalline alumina ceramic. *Ceramics International*, 2013. 39(2): p. 1583-1586.
- [59] Wang, H., et al., Effect of La doping on microwave dielectric properties of translucent polycrystalline



- alumina ceramic. *Ceramics International*, 2013. 39(5): p. 4907-4911.
- [60] Yuan, L., et al., Effect of MgO/La₂O₃ co-doping on the microstructure, transmittance and microwave dielectric properties of translucent polycrystalline alumina. *Ceramics International*, 2014. 40(1, Part B): p. 2109-2113.
- [61] Chen, J.-m., et al., Effects of CaSiO₃ addition on sintering behavior and microwave dielectric properties of Al₂O₃ ceramics. *Ceramics International*, 2011. 37(3): p. 989-993.
- [62] Zhang, D.M., et al., Electrical properties of La₂Mo₂O₉/Al₂O₃ nanocomposites fabricated by microwave sintering method. *Journal of the European Ceramic Society*, 2012. 32(12): p. 3239-3247.
- [63] Kume, S., et al., Dielectric properties of sintered aluminum nitride. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 2005. 23(4-6): p. 382-385.
- [64] M. Kono, H. Takagi, T. Tatekawa, and H. Tamura, "High Q dielectric resonator material with low dielectric constant for millimeter-wave applications," Pap. Present. Third Int. Conf. Microw. Mater. Their Appl. - MMA2004 Inuyama Jpn. Third Int. Conf. Microw. Mater. Their Appl. - MMA2004, vol. 26, no. 10-11, pp. 1909-1912, 2006.
- [65] J.M. Le Floch et al., "Low-Loss Dielectric Material Characterization and High-Q Resonator Design from Microwave to Millimetre Waves Frequencies", *Journal of Physical Science and Application 1* (2011) 15-28.
- [66] P. Guillon and Y. Garault, "Complex permittivity of MIC substrate", *AEU*, pp. 102-104, (1981). J.M. Le Floch et al., "Low-Loss Dielectric Material Characterization and High-Q Resonator Design from Microwave to Millimetre Waves Frequencies", *Journal of Physical Science and Application 1* (2011) 15-28.
- [67] J. Ramal, O. Tantot, D. Passerieux, N. Delhote, S. Verdeyme, "Monitoring of Electromagnetic Characteristics of Split Cylinder Resonator and Dielectric Material for Temperature Characterization", *European Microwave Conference*, October 2014, Rome.
- [68] A. Julien, P.Y. Guillon, "Méthode des éléments finis et technique de résonance appliquées à la caractérisation de matériaux à faibles et fortes pertes", *Journées SEE de Limoges*, février 1991, pp. 219-232.
- [69] Fabien Seyfert, J-Paul Marmorat, Laurent Baratchart, Stéphane Bila, Jacques Sombrin,
Extraction of coupling parameters for microwave filters: determination of a stable rational model from scattering data *IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS 2003)*, Philadelphie, Pennsylvanie, USA, juin 2003
- [70] S. Courreges, C. Thibon, F. A. Houndonougbo, A. Crunteanu, V. Madrangeas and M. Maignan, "Tuning of Superconducting Filters With Laser Ablation Technique," in *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, vol. 19, no. 5, pp. 3715-3721, Oct. 2009



ANNEXES





Annexe 1 : Règles de conception pour le moulage

<p>Foret de perçage</p> 	<p>-Il y a un grand nombre de forets de perçage disponible pour l'usinage des moules réalisés dans la plupart des cas en Aluminium. Le plus petit foret utilisable à un diamètre de 300μm. Dans notre application nous utiliserons cette mèche. Ces forets seront utilisés pour usiner les moules en premier temps mais aussi faire de la rectification des pièces.</p>
<p>Via</p> 	<p>-Le diamètre minimale d'un via est 300μm.</p>
<p>Distance entre via</p> 	<p>- La distance minimale entre deux vias est de 500μm bord à bord.</p>
<p>Angles et Arrondis</p> 	<p>-Il ne faut pas prendre des angles droits dans la conception mais un arrondi de 150μm de rayon sur les bords, arrondi lié au diamètre de l'outillage.</p>
<p>Forme et Volume</p>	<p>-Il ne faut pas faire des volumes fermés cela est simplement impossible.</p>
<p>Tolérance de fabrication</p>	<p>-La tolérance de fabrication avec la technologie moulage basse pression est de $\pm 50\mu$m typiquement, descendre à 40 voire 30μm semble envisageable.</p>
<p>Anamorphose 20%</p>	<p>-L'anamorphose consiste à compenser les retraits volumiques anisotropes des pièces issues du traitement thermique. Cette compensation est effectuée à la phase initiale de préparation des données et consiste donc à agrandir la pièce pour son injection, l'étape de frittage lui donne ses cotes définitives.</p>



Annexe 2 : Règles de conception moulage et étude de sensibilité

Mèche de perçage	300µm de diamètre Utilisée pour usiner le moule
Via	Diamètre minimum 300µm Distance entre deux vias (bord à bord) 500µm
Angles et Arrondis	Pas d'angle à 90° Un arrondi de 150µm sur les bords
Forme et Volume	Pas de volumes fermés
Tolérance de Fabrication	±50µm (40 et 30µm semble envisageable)
Anamorphose	20%
Forme	Petite taille <1mm → Démoulage difficile
Etat de Surface	Correspond à l'état de surface du moule et granulométrie de la céramique utilisée
Mise en œuvre	Facile si bonne conception du moule
Process	Conception d'un moule (métallique ou silicone)
Matériau	Alumine compatible
Coût	Réduit
Quantité	Cadence 10 pièces/h

Tableau V-1-Règles de conception pour le moulage basse pression



Variation de $\pm 0,2$ sur la valeur de la permittivité

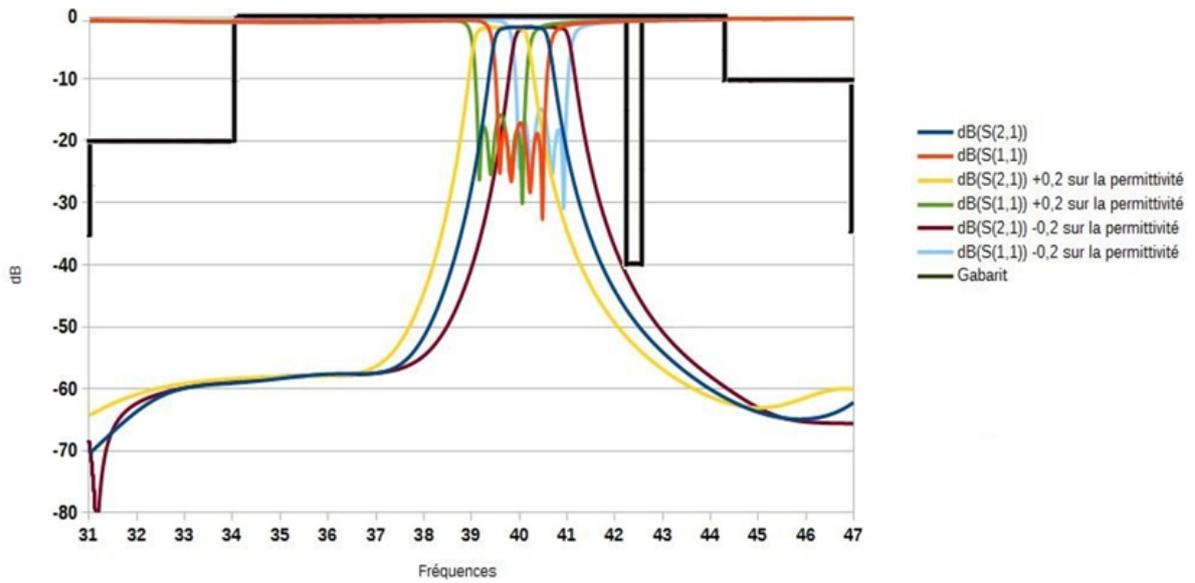


fig d- Impact de la dispersion de la permittivité sur la réponse fréquentielle pour un filtre bande Q excitation micro ruban

Variation de $\pm 0,2$ sur la valeur de la permittivité

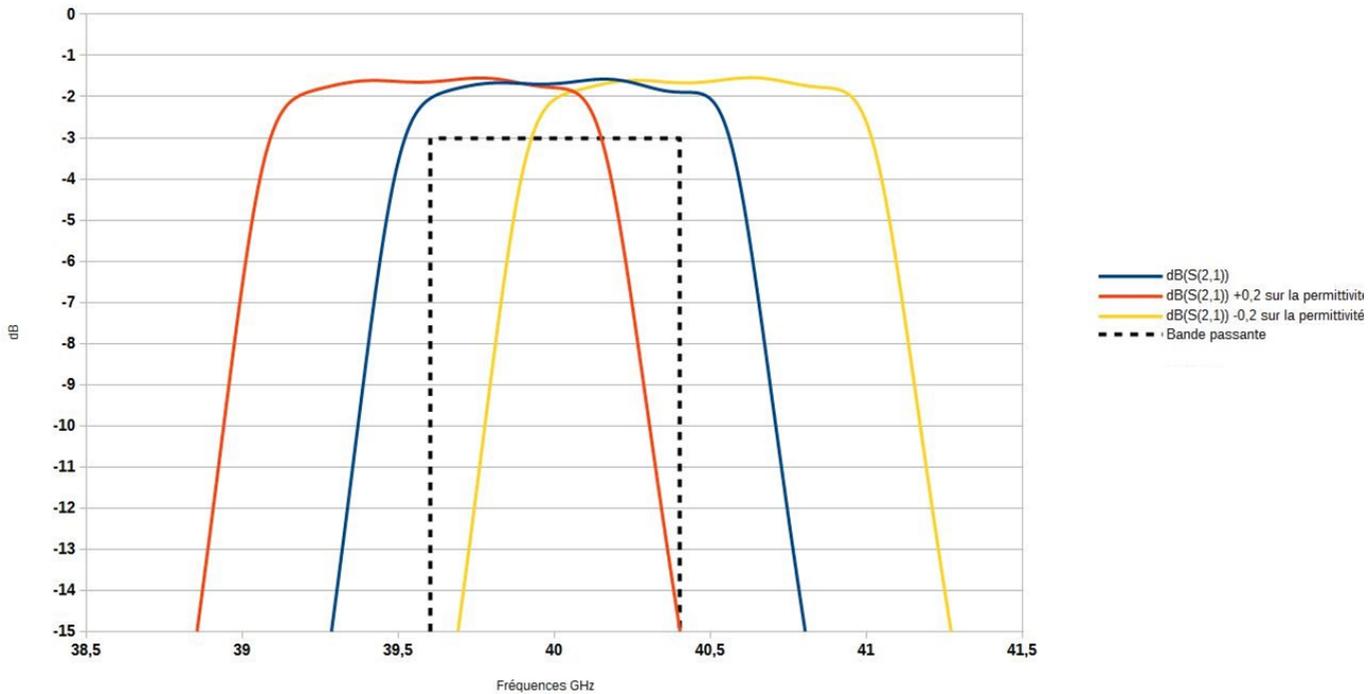


fig e- Zoom sur S21 du filtre bande Q excitation micro ruban avec une dispersion de permittivité de ± 0.2



Variation de $\pm 30\mu\text{m}$ de la longueur et largeur des résonateurs

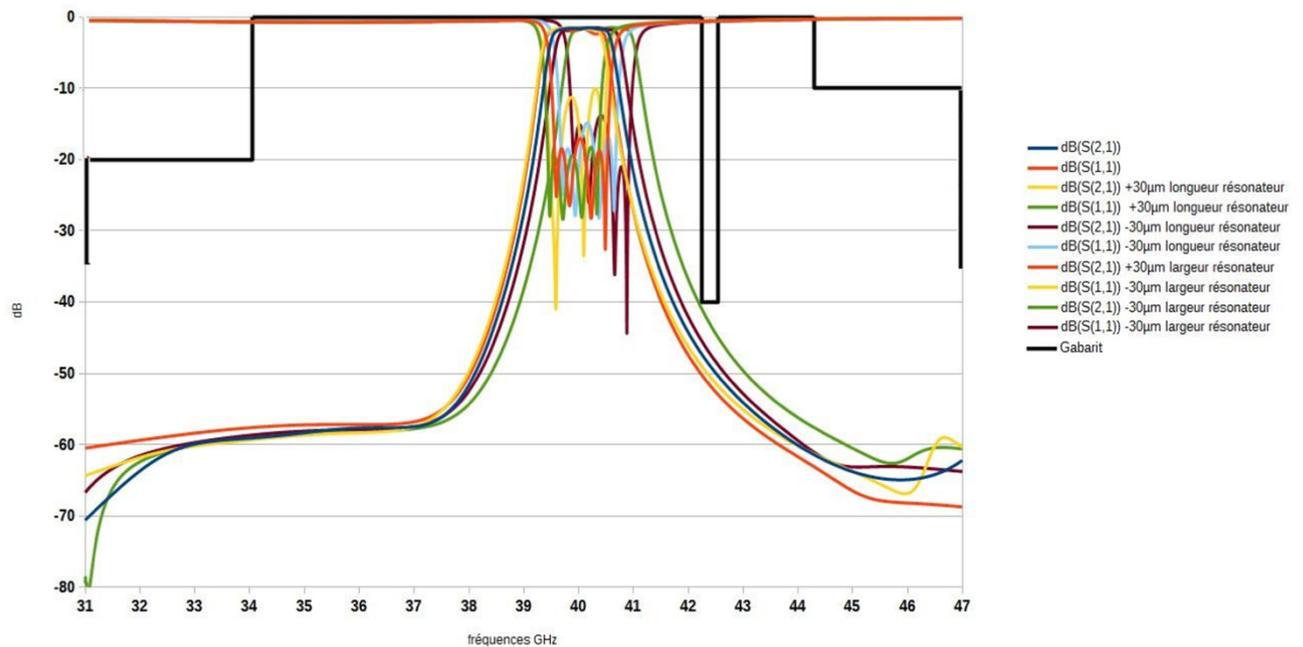


fig f- Dispersion dimensionnelle (Longueur-largeur des résonateurs) filtre bande Q excitation micro ruban

Variation de $\pm 30\mu\text{m}$ de la longueur et largeur des résonateurs

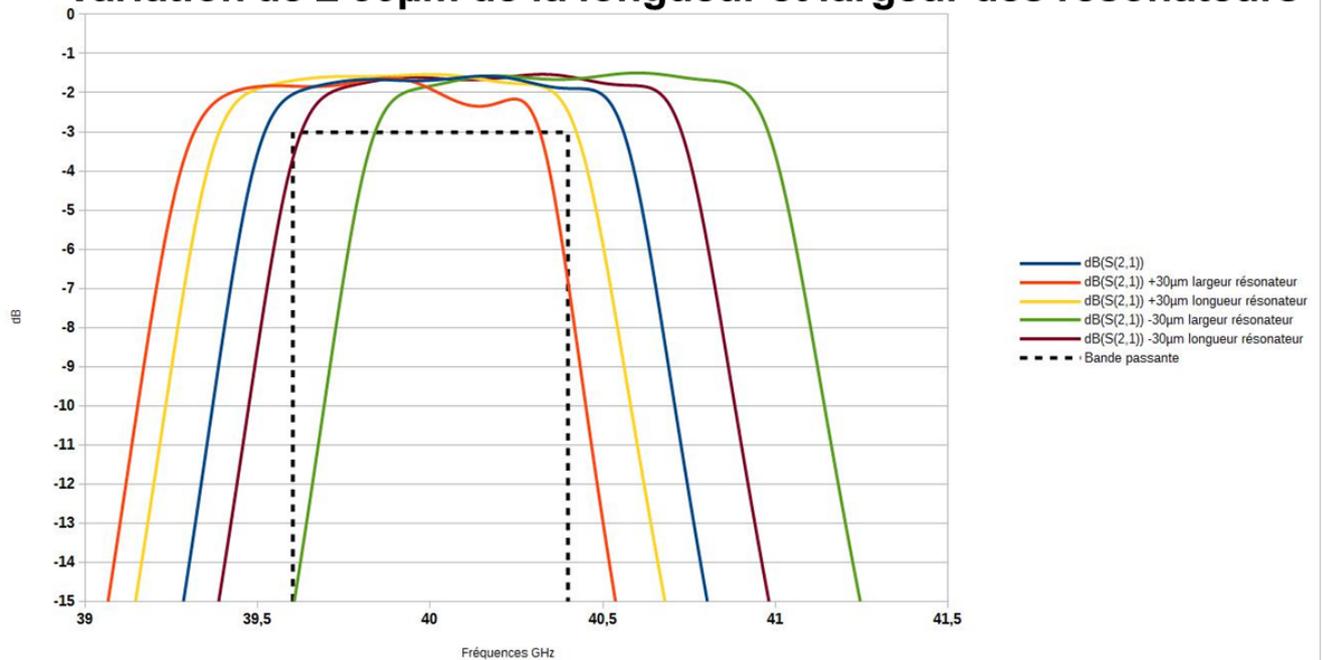


fig g- Zoom sur la dispersion dimensionnelle (Longueur-largeur des résonateurs) filtre bande Q excitation micro ruban



Variation de $\pm 30\mu\text{m}$ sur la longueur et largeur des iris de couplages

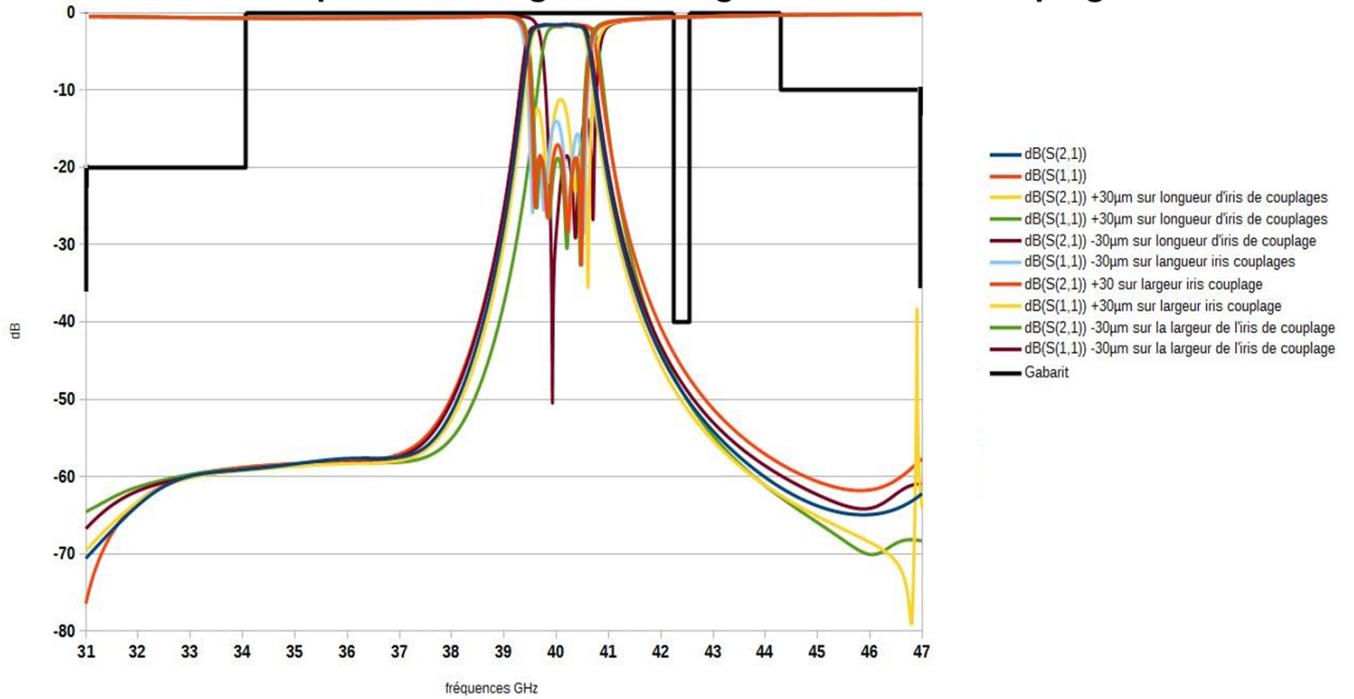


fig h- Dispersion dimensionnelle (Longueur-largeur des iris) filtre bande Q excitation micro ruban

Variation de $\pm 30\mu\text{m}$ sur la longueur et largeur des iris de couplages

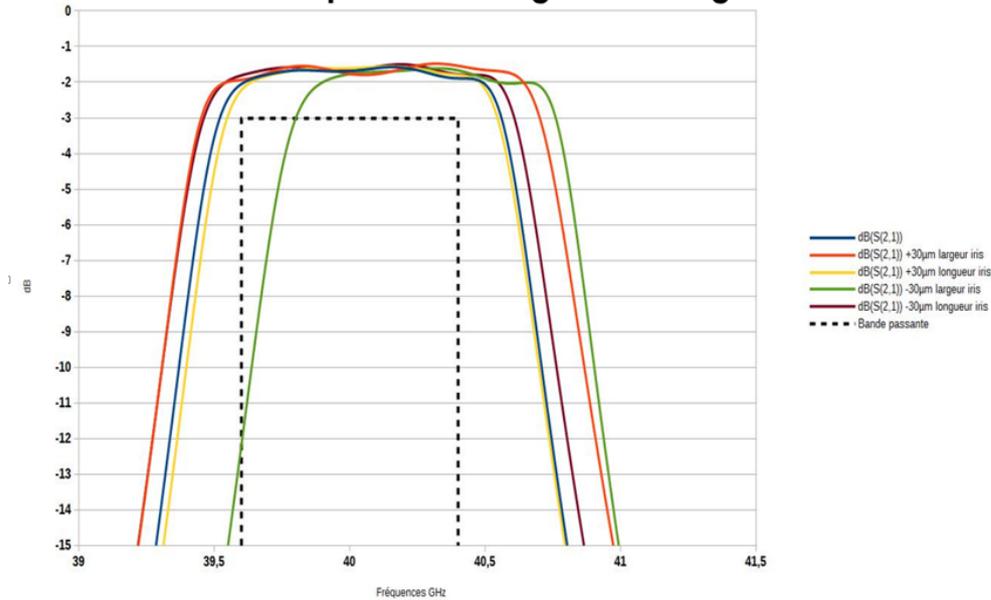


fig i- Zoom sur la dispersion dimensionnelle (Longueur-largeur des iris) filtre bande Q excitation micro ruban



Variation de $\pm 1\%$ sur toute la structure

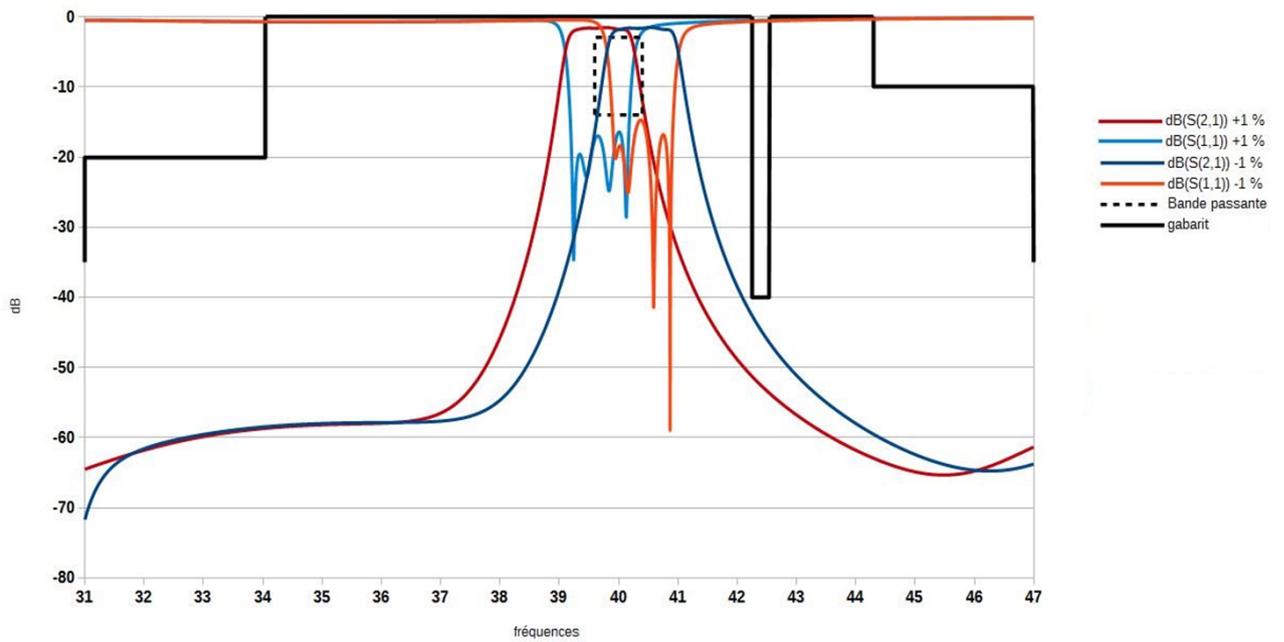


fig j- Variation dimensionnelle de $\pm 1\%$ sur toute la structure filtre bande Q excitation micro ruban

Variation de $\pm 1\%$ sur toute la structure

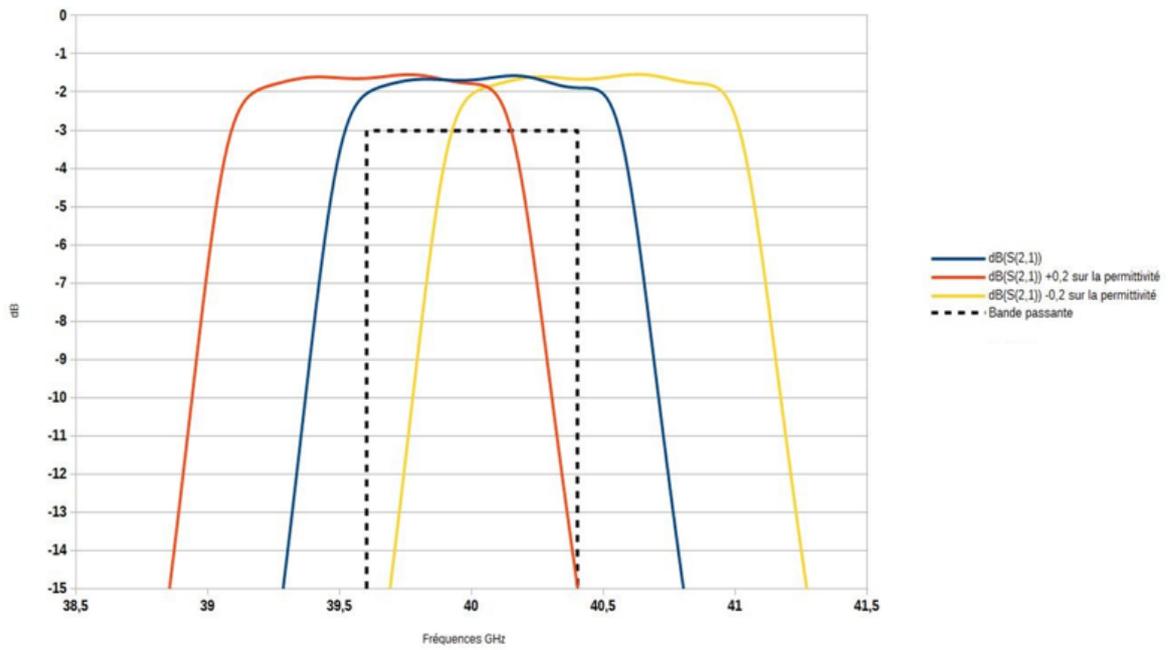


fig k- Zoom sur la variation dimensionnelle de $\pm 1\%$ sur toute la structure filtre bande Q excitation micro ruban



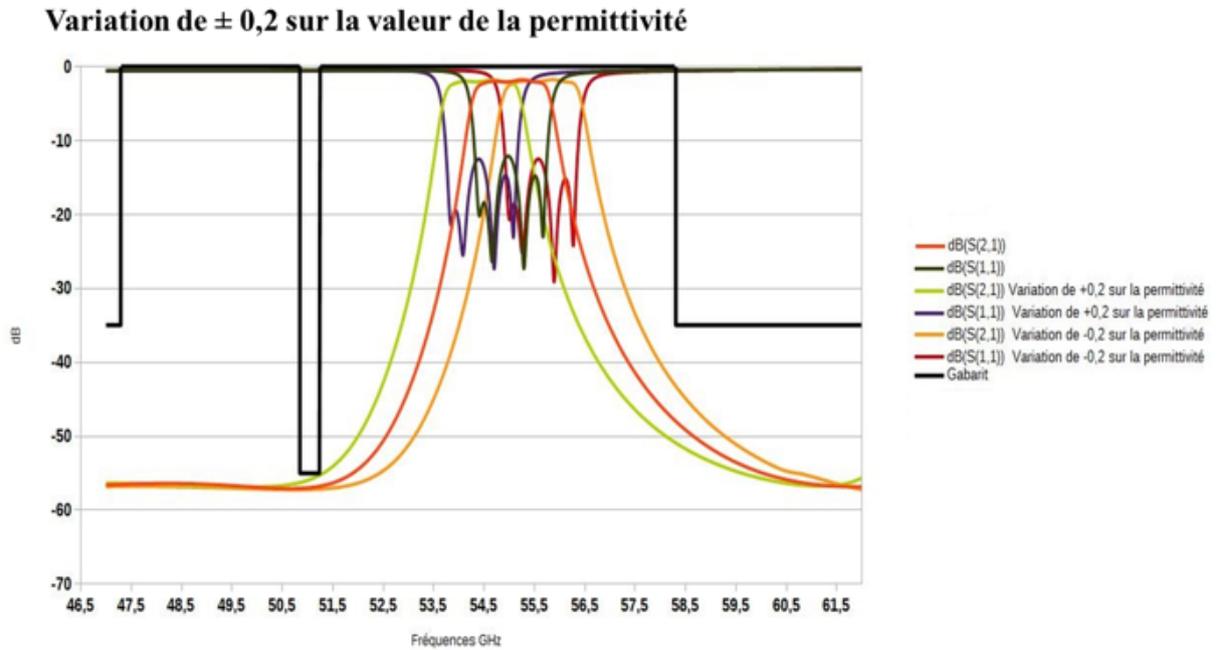


fig l- Impact de la dispersion de la permittivité sur la réponse fréquentielle pour un filtre bande V excitation micro ruban

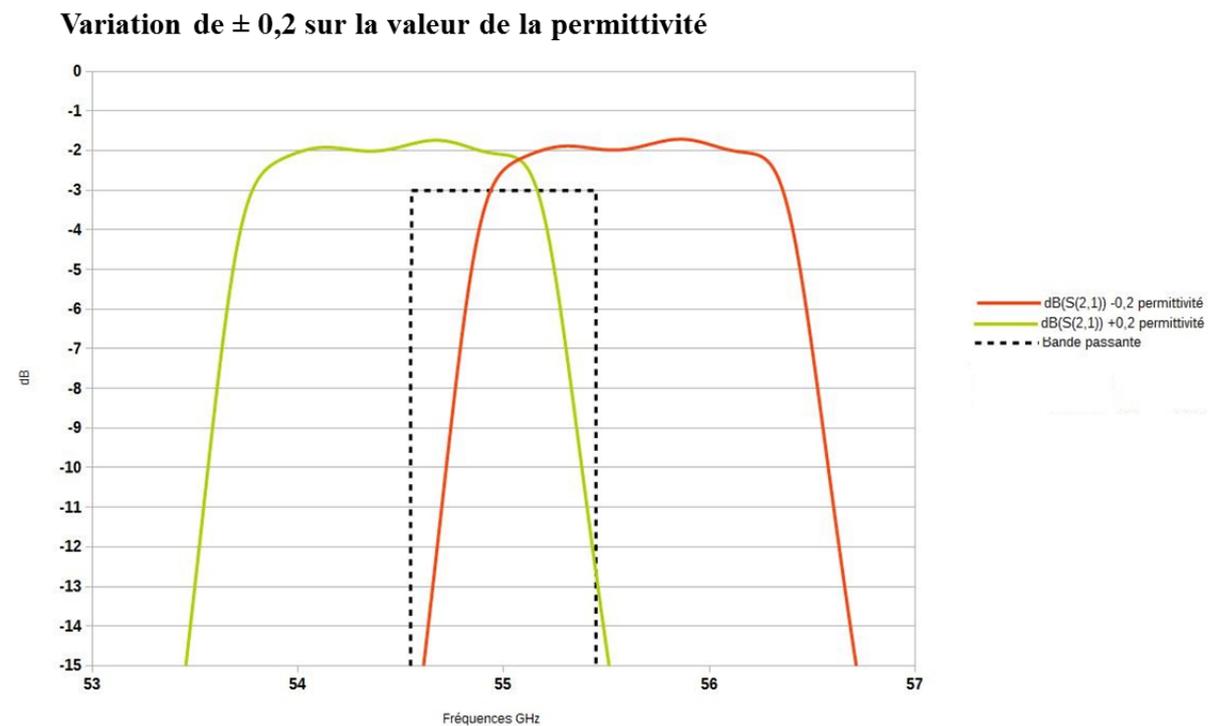


fig m- Zoom sur S21 du filtre bande V excitation micro ruban avec une dispersion de permittivité de ± 0.2



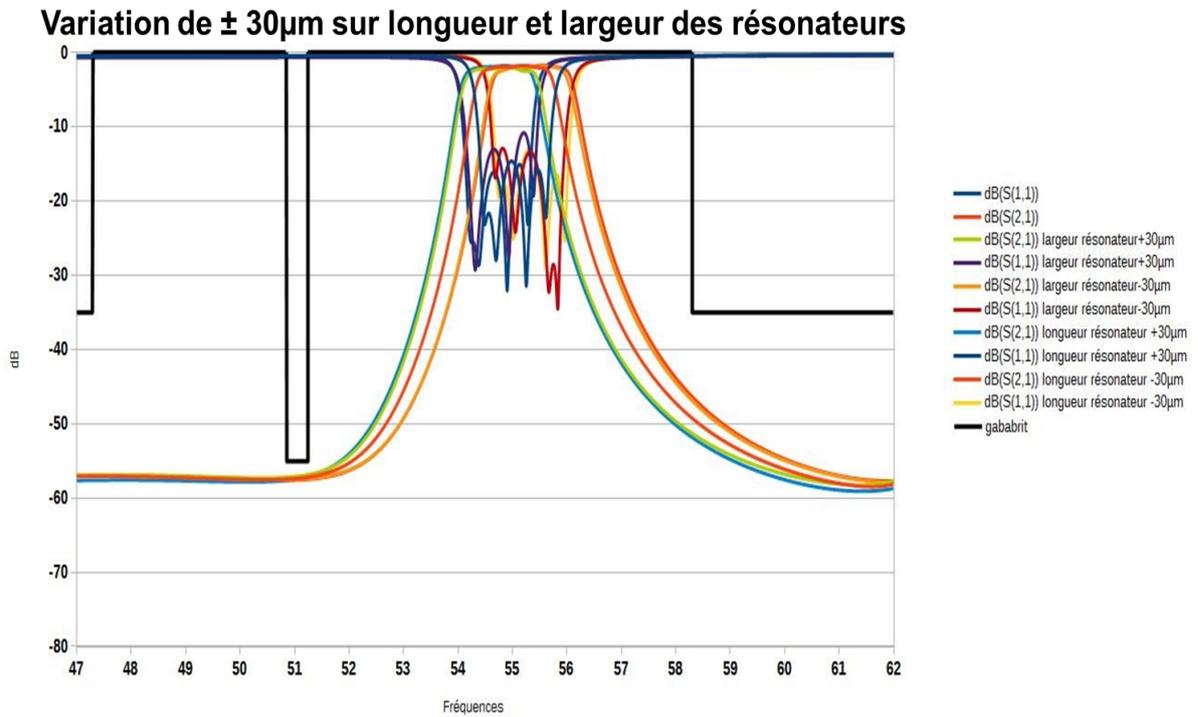


fig n- Dispersion dimensionnelle (Longueur-largeur des résonateurs) filtre bande V excitation micro ruban

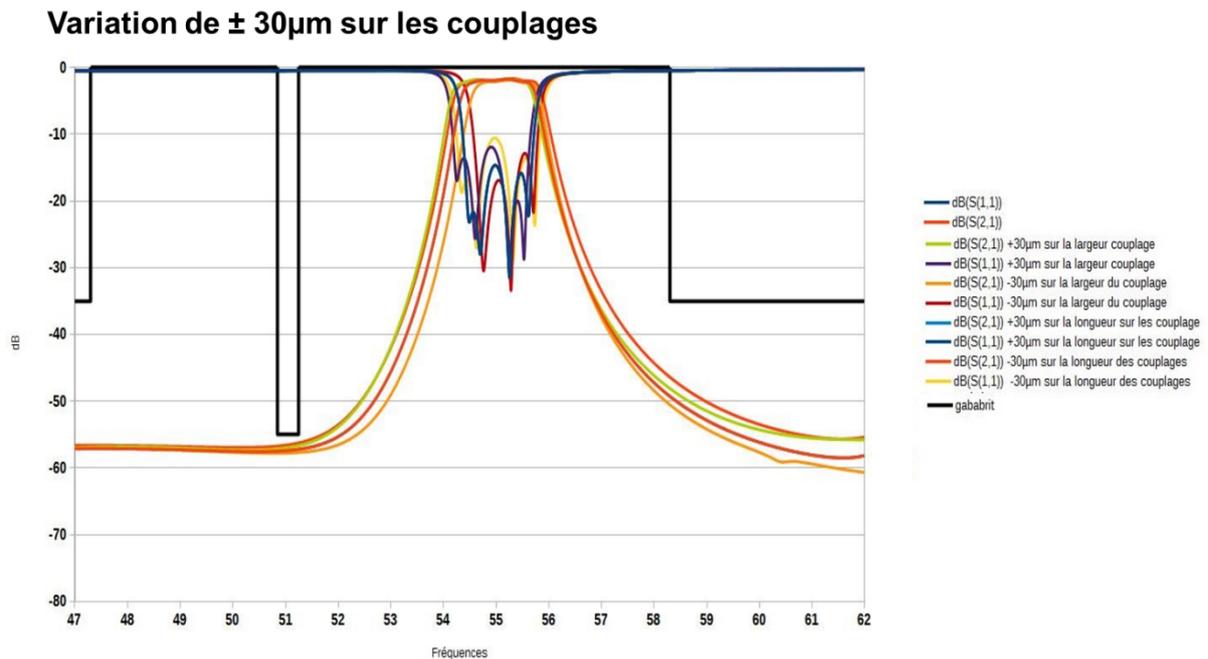


fig o- Dispersion dimensionnelle (Longueur-largeur des iris) filtre bande V excitation micro ruban



Variation de $\pm 30\mu\text{m}$ sur les couplages

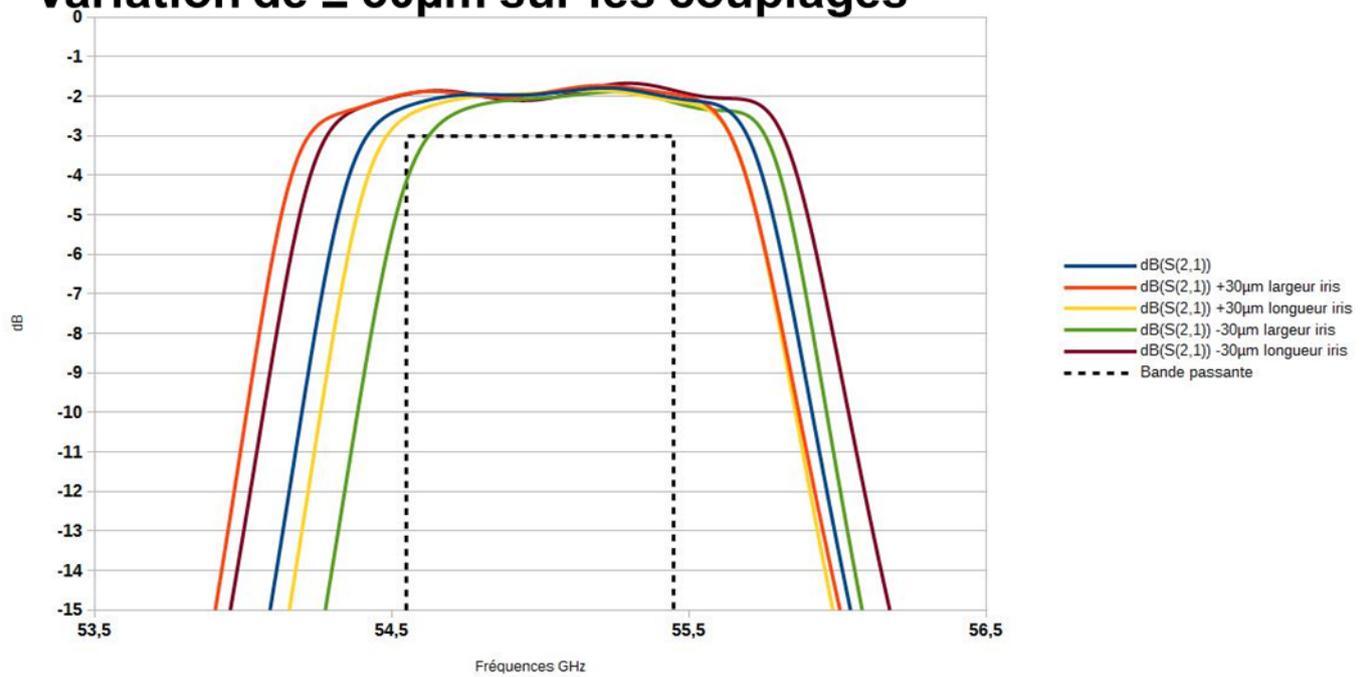


fig p- Zoom sur la dispersion dimensionnelle (Longueur-largeur des iris) filtre bande V excitation micro ruban

Variation de $\pm 1\%$ sur toute la structure

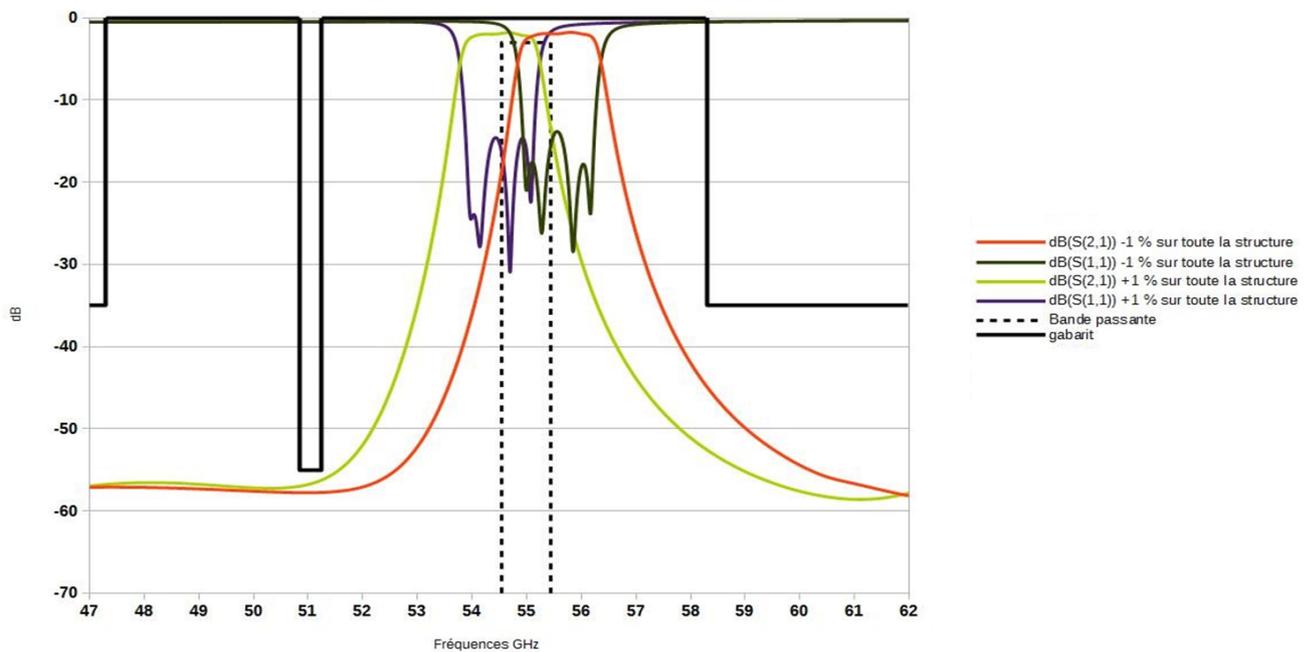


fig q- Variation dimensionnelle de $\pm 1\%$ sur toute la structure filtre bande V excitation micro ruban



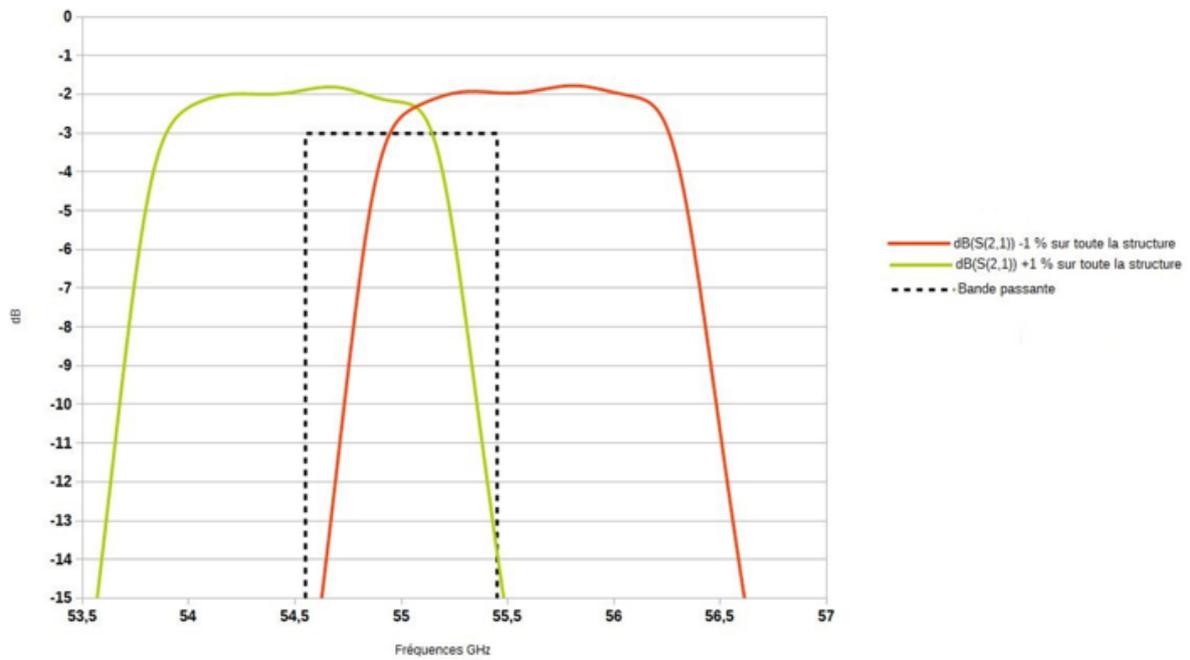
Variation de $\pm 1\%$ sur toute la structure

fig r- Zoom sur la variation dimensionnelle de $\pm 1\%$ sur toute la structure filtre bande V excitation micro ruban



Annexe 3 : Photos de l'usinage en cru



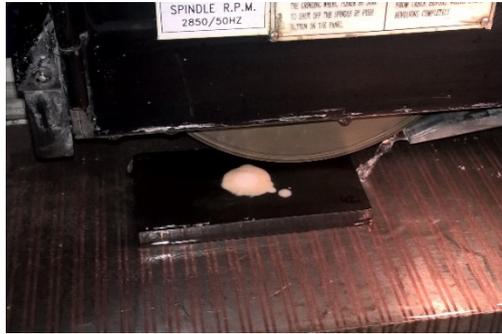
Ebauche de filtre après la première étape d'usinage.



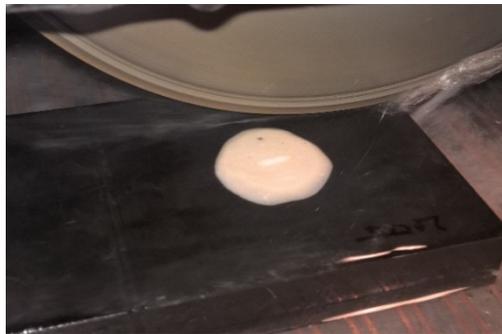
Système de bridage et poste d'usinage.



Annexe 4 : Photos de la rectification



Elimination du reste du cylindre (vitesse de descente 8 μ m)



Dégagement des iris et des plateformes de bonding (vitesse de descente 2 μ m)



Etat du filtre à l'issue de la rectification



Filtre après décollage et nettoyage



Table des illustrations

Figure I-1- Bandes de fréquences pour les satellites de télécommunication [1]	9
Figure I-2- Revenu de l'industrie satellitaire de 2010 à 2015 [2].....	10
Figure I-3- Drone Aquila de Facebook.....	12
Figure I-4- Ballons stratosphériques de Google	12
Figure I-5- Chaîne RF du convertisseur de fréquence	13
Figure I-6- Filtre à lignes couplées [46]	15
Figure I-7- Topologie et réponse fréquentielle d'un filtre conventionnel « hairpin ».....	15
Figure I-8- Dispersion de la permittivité d'un filtre pseudo-elliptique en bande Ka.....	16
Figure I-9- Filtres interdigités [46]	17
Figure I-10- Filtre SIW en bande C [46]	17
Figure I-11- Filtre BAW [47]	18
Figure I-12- Filtre quatre pôles en technologie GGP [19].....	19
Figure I-13- Vue de dessus du filtre 4 pôles quasi-elliptique [20]	20
Figure I-14- Comparaison simulations et mesures du filtre quasi-elliptique [20].....	20
Figure I-15- Vue 3D du filtre - simulations et mesures de la réponse fréquentielle [21].....	21
Figure I-16- Cavité résonante basée sur un résonateur en U [22].....	21
Figure I-17- Réponse fréquentielle du résonateur (comparaison mesure et théorie) [22]	22
Figure I-18- Résonateur court-circuit (vue 3D) – réponse fréquentielle théorique/mesurée [22]	22
Figure I-19- Vue de dessus du filtre deux pôles – réponse fréquentielle théorie/mesure [22]	23
Figure I-20 – Types de couplage entre résonateurs – réponse fréquentielle théorie/mesure [22]	23
Figure I-21 – Vue de dessus du filtre – réponse fréquentielle théorie/mesure [23].....	23
Figure I-22 – Comparaison des réponses fréquentielles simulée et mesurée – étude de dispersion technologique [24].....	24
Figure I-23 – Comparaison de la réponse fréquentielle simulée et mesurée [25]	24
Figure I-24 – (a) Topologie filtre 4 pôles avec zéro de transmission. (b) Coupe transversale [26]	25



Figure I-25 – (a) Wafer après métallisation or (b) Filtre 4 pôles après découpe (c) Réponse fréquentielle théorie/mesure [26]	25
Figure I-26 – Mesures des performances des huit performances échantillons/ analyse de MonteCarlo [26]	25
Figure I-27- (a) Layout du filtre hybride – (b) Vue 3D de la coupe transversale de la structure – (c) Vue du dessus [27]	26
Figure I-28 – Réponse fréquentielle (théorie/mesure) du filtre Bi-bande [27]	26
Figure I-29- Génération de deux zéros de transmission dans un guide d’onde à la fréquence basse [28]	27
Figure I-30- Génération de deux zéros de transmission dans un guide d’onde à la fréquence haute [28]	28
Figure I-31- Filtre fabriqué et ses réponses fréquentielles théoriques et mesurées [28]	28
Figure I-32- Structure du filtre à base de résonateurs empilés [29].....	29
Figure I-33- Paramètres S théoriques/mesures [29].....	29
Figure I-34 – Les structures de couplage entre résonateurs : (a) Couplage positif (parallèle) (b) Couplage négatif (antiparallèle) [30]	30
Figure I-35- Réponse fréquentielle du filtre théorie/mesure [30].....	30
Figure I-36- Binder Jetting [31].....	34
Figure I-37 - Laser sintering [31].....	36
Figure I-38- Fused Deposition Modeling [31].....	37
Figure I-39- Photopolymer Jetting [31]	38
Figure I-40 - Presse à injection basse pression et système de thermorégulation	40
Figure I-41 - Etapes de procédé d'injection basse pression	41
Figure I-42 - Moule pour injection basse pression	41
Figure I-43 - Stéréolithographie [31].....	42
Figure I-44- Les étapes principales de la stéréolithographie [36].....	42
Figure I-45 - Fabrication SLA 3D avec systèmes d’illuminations vectoriels	43
Figure I-46 - Principe de fabrication d'objets 3D céramiques par SLA 3D [38]	44
Figure I-47- Résonateur monobloc (a), Comparaison simulation/mesure (b) [40]	45
Figure I-48 - (a) Vue 3D du cristal ; (b) Photographie SEM de quatre cylindres ; (c) Réponses simulées et mesurées correspondantes [41]	45



Figure I-49 - a) Photographie du filtre fabriqué par stéréolithographie céramique et métallisé. b) Comparaison entre les réponses mesurée et retro-simulée du filtre [42].....	46
Figure I-50- (a) Vue 3D de l'antenne ; (b) Photographie du prototype ; (c) Diagramme de rayonnement à 60,5 GHz [43]	46
Figure I-51- Antenne cornet fabriquée par stéréolithographie céramique.....	47
Figure I-52- Pièces fabriquées par SLA dans le cadre du projet FILIP.....	49
Figure II-1- Comparaison des fréquences de caractérisation utilisées pour les alumines [48].....	52
Figure II-2- Impact de la porosité sur la constante diélectrique et la tangente de pertes [51].....	54
Figure II-3- Impact de la température de frittage sur la densité, la constante diélectrique et le facteur de qualité [51].....	54
Figure II-4- Impact de la température de frittage sur la densité et le facteur de température [51].....	55
Figure II-5- Impact de la taille de grains d'alumines sur $\tan\delta$ (densité = $98,1 \pm 0,5\%$) [49]	55
Figure II-6- Impact de la taille de grains sur les facteurs de qualité et température [51-52].....	56
Figure II-7- Dopants mentionnés dans la littérature	57
Figure II-8- Evolution du facteur de qualité et de la densité en fonction du taux de TiO_2 après frittage à $1400^\circ C$ [53].....	58
Figure II-9- Impact de la température de frittage et de la teneur en TiO_2 sur le facteur de température [53].....	58
Figure II-10- Impact du temps de recuit à $1100^\circ C$ sur τ_f , ϵ_r et $(Q*f)$ d'une céramique 90% Al_2O_3 –10% TiO_2 frittée à $1350^\circ C$ [56]	59
Figure II-11- Impact de la teneur en Y_2O_3 sur le facteur de qualité et la constante diélectrique [57]	60
Figure II-12- Evolution du facteur de qualité en fonction de la teneur en MgO et La_2O_3 [60].....	61
Figure II-13- Evolution de la $\tan\delta$ du nitrate d'aluminium en fonction de la teneur en Y_2O_3 et Mg_3N_2 [63].....	61
Figure II-14- Caractérisation d'un RD placé dans une cavité cylindrique	63
Figure II-15- Intérêt du centrage du RD à l'intérieur de la cavité cylindrique.....	64
Figure II-16- Système de centrage du résonateur diélectrique (RD).....	65
Figure II-17- Variation de la fréquence et ϵ_r en fonction du décentrage	65
Figure II-18- Variation du facteur de qualité et de la tangente de pertes en fonction du décentrage.....	66
Figure II-19- Cavité (SCR) 60 GHz.....	67
Figure II-20- Schéma du mouflage utilisé pour le frittage des échantillons.....	72



Figure II-21- Evolution de la température de frittage de la TM-DAR et de la SMA6 en fonction de la rampe de montée en température	72
Figure II-22- Microstructure de la TM-DAR après frittage à 1525°C (5°C.min-1)	73
Figure II-23- Microstructure de la SMA6 après frittage à 1700°C (20°C.min-1)	73
Figure II-24- Schéma des étapes d'usinage des cylindres	75
Figure II-25- Schéma représentant les étapes d'usinage des plaques	75
Figure II-26- Impact des impuretés sur la permittivité	76
Figure II-27- Impact des impuretés sur la tangente de pertes	77
Figure II-28- Impact de la densité sur la permittivité	78
Figure II-29- Impact de la densité sur la tangente de pertes	78
Figure II-30- Impact de la taille des grains sur la permittivité	79
Figure II-31- Impact de la taille des grains sur la tangente de pertes	80
Figure II-32- Impact de la taille des grains sur le facteur de température	80
Figure II-33- Comparaison des résultats du projet ATOMIQ avec la littérature [49]	81
Figure II-34- Evolution de la température de frittage des alumines dopées en fonction de la vitesse de montée en température	83
Figure II-35- Impact de la teneur en TiO ₂ sur la température de frittage et la microstructure	84
Figure II-36- Microstructures d'alumines dopées 0,5 %m. TiO ₂ obtenues par dopage avec un isopropoxyde de titane (a) et par dopage avec un oxyde [53] (b)	85
Figure II-37- Suivi RX de la décomposition de la phase Al ₂ TiO ₅ en fonction de la température	85
Figure II-38- Evolution de la densité du matériau, avec et sans recuit, en fonction de la teneur en TiO ₂	86
Figure II-39- Comparaison avec la littérature des valeurs de densité sans recuit en fonction de la teneur en TiO ₂ [53]	87
Figure II-40- Evolution de la permittivité des alumines dopées en fonction de la teneur en TiO ₂	87
Figure II-41- Evolution de la tangente de pertes des alumines dopées en fonction de la teneur en TiO ₂	88
Figure II-42- Evolution du facteur de température des alumines dopées en fonction de la teneur en TiO ₂	89
Figure II-43- Evaluation des performances diélectriques des alumines dopées TiO ₂ à 55 GHz et à 73 GHz	90
Figure II-44- Comparaison des permittivités des alumines dopées sans recuit à la littérature [53]	91
Figure II-45- Comparaison des tangentes de pertes des alumines dopées sans recuit à la littérature [48] [53]	92



Figure II-46- Comparaison des facteurs de température des alumines dopées sans recuit à la littérature [53].....	93
Figure II-47- Impact du temps de recuit à 1100°C sur τ_f , ϵ_r et $Q \cdot f$ d'une céramique $0,9 \text{ Al}_2\text{O}_3 - 0,1 \text{ TiO}_2$ [55] ..	93
Figure III-1- Exemple d'allocation des fréquences entre les terminaux utilisateurs et les stations au sol	98
Figure III-2- Gabarit de filtrage Bande Q/V	99
Figure III-3- Fonction de transfert du filtre 4 pôles en bande Q à 40 GHz	102
Figure III-4- Fonction de transfert du filtre 4 pôles en bande V à 55 GHz	102
Figure III-5- Géométries des résonateurs étudiés	103
Figure III-6- Impact des tolérances de fabrication.....	104
Figure III-7- Bonding du filtre avec substrat (cable de bonding de longueur totale $<450\mu\text{m}$).....	104
Figure III-8- Modifications du résonateur toujours recouvert de Cuivre	105
Figure III-9- Calcul de Q_e à partir $\phi(S_{11})$	106
Figure III-10- Excitation coplanaire sur le dessus du résonateur	106
Figure III-11- Variation du facteur de qualité extérieur Q_e en fonction du paramètre W_1	107
Figure III-12- Variation du facteur de qualité extérieur Q_e en fonction du paramètre W_2	107
Figure III-13- Excitation coplanaire sur la pente	108
Figure III-14- Variation du facteur de qualité extérieur Q_e en fonction des paramètres W et W_2	108
Figure III-15- Excitation micro-ruban	108
Figure III-16- Variation de Q_e en fonction de D_x	109
Figure III-17- Variation de Q_e de D_y	109
Figure III-18-Dispersion de Q_e face à la tolérance de gravure (excitation coplanaire).....	110
Figure III-19- Dispersion de Q_e face à la tolérance de gravure excitation micro-ruban.....	110
Figure III-20- Modèle 3D du filtre deux pôles	111
Figure III-21- Variations de K_{12} en fonction des variations dimensionnelles de l'iris de couplage.....	112
Figure III-22- Dimensions globales du filtre deux pôles et l'excitation coplanaire en mm	113
Figure III-23- Réponse fréquentielle avec pertes du filtre global deux pôles.....	113
Figure III-24- Matrice de couplage pour un filtre quatre pôles	114
Figure III-25- Matrice dé-normalisée filtre bandes Q et V.....	115



Figure III-26- Filtre 4 pôles	115
Figure III-27-Contrainte imposée par le moulage basse pression	115
Figure III-28- Dimensions optimisées du filtre bande Q excitation coplanaire & champs E à 40 GHz	116
Figure III-29- Réponse fréquentielle du filtre bande Q excitation coplanaire.....	117
Figure III-30- Dimensions optimisées du filtre bande Q excitation micro-ruban	118
Figure III-31- Réponse fréquentielle du filtre bande Q excitation micro-ruban.....	118
Figure III-32- Dimensions optimisées du filtre en U bande Q excitation micro-ruban.....	119
Figure III-33- Réponse fréquentielle du filtre en U bande Q excitation micro-ruban.....	120
Figure III-34- Dimensions optimisées du filtre en S bande Q excitation coplanaire.....	121
Figure III-35- Réponse fréquentielle du filtre en S bande Q excitation micro-ruban.....	121
Figure III-36- Dimensions optimisées du filtre bande V excitation micro-ruban	122
Figure III-37- Réponse du filtre quatre pôles bande V excitation micro-ruban	123
Figure III-38- Dispersion fréquentielle filtre bande Q excitation coplanaire	124
Figure III-39- Dispersion fréquentielle filtre bande Q excitation coplanaire zoom sur les longueurs et largeurs des résonateurs	125
Figure III-40- Dispersion fréquentielle bande Q excitation coplanaire zoom sur les longueurs et largeurs des iris	125
Figure III-41- Dispersion fréquentielle bande Q excitation coplanaire pour $\pm 1\%$ sur toute la structure	125
Figure III-42- Dispersion fréquentielle suite à une variation de ± 0.2 sur la valeur de permittivité filtre bande Q excitation coplanaire	127
Figure III-43- Paramètres S simulés pour trois température (-20°C, +23°C, +70°C)	129
Figure IV-1- Surfaces usinées avec la fraise de 6mm.....	135
Figure IV-2- Surfaces usinées avec la fraise de 0,4mm.....	135
Figure IV-3- Pastille après usinage en cru.....	136
Figure IV-4- Mise en place et collage du filtre pour l'étape de rectification	137
Figure IV-5- Etat du filtre après rectification	137
Figure IV-6- Schéma récapitulatif des étapes de rectification.....	137
Figure IV-7- Filtres 2 pôles après calcination/ recuit	138



Figure IV-8- Eclat de l'angle supérieur de la plateforme d'accueil du filtre 2 pôles avec excitation coplanaire.	138
Figure IV-9- Aperçu de résultat de scan TM-DAR 12%Ti	140
Figure IV-10- Aperçu de résultat de scan TM-DAR pure	140
Figure IV-11- Identification d'un défaut de géométrie pour la TM-DAR 12%Ti.....	140
Figure IV-12- Identification d'un défaut de géométrie pour la TM-DAR pure	140
Figure IV-13- Fissure sur la pièce TM-DAR 12%Ti.....	140
Figure IV-14- Fissure sur la pièce TM-DAR pure.....	140
Figure IV-15- Alignement de surface	141
Figure IV-16- Comparaison CAO & TM-DAR 12%Ti.....	142
Figure IV-17- Comparaison CAO & TM-DAR pure	142
Figure IV-18- Alignement des surfaces de chaque objet.....	142
Figure IV-19- Comparaison des deux pièces.....	143
Figure IV-20- Protocole d'Electroless cuivre	144
Figure IV-21- Bâti de pulvérisation cathodique assistée DC MP 300.....	144
Figure IV-22- Evaporateur à effet joule Méca 2000.....	144
Figure IV-23- Evaporateur thermique/pulvérisation cathodique DC MEPS 300.....	145
Figure IV-24- Bâti d'ablation laser Méca 2000 (PLD : Pulsed Laser Deposition) et panache d'ablation d'une cible de nickel	145
Figure IV-25- Canon à électrons PLASSYS MEB 300.....	145
Figure IV-26- Canons à électrons PLASSYS MEB 500	145
Figure IV-27- Banc d'électrolyse	146
Figure IV-28- Filtre 2 pôles TM-DAR après métallisation et gravure des accès coplanaires.....	146
Figure IV-29- Manque de métallisation au niveau des congés et des iris	147
Figure IV-30- Utilisation de la laque d'argent pour couvrir les zones non métallisées	147
Figure IV-31- Décollement de la métallisation	147
Figure IV-32- Sur-gravure des excitations sur les filtres.....	148
Figure IV-33- Métallisation argent et gravure des accès	148



Figure IV-34- Rupture de la ligne centrale du filtre	149
Figure IV-35- Réponse fréquentielle du filtre deux pôles TM-DAR 12%Ti.....	149
Figure IV-36- Mesure en température du filtre deux pôles TM-DAR 12%Ti entre 22°C et 70°C	150
Figure IV-37- Zoom sur la mesure en température du filtre deux pôles TM-DAR 12%Ti.....	150
Figure IV-38- Moule pour fabrication de filtres céramiques.....	152
Figure IV-39- Exemple de fissures relevées au niveau du point d'injection du filtre par le microscope numérique Keyence.....	153
Figure IV-40- Filtre quatre pôles à excitation coplanaire après frittage (photo prise par le microscope numérique)	153
Figure IV-41- Filtre deux pôles à excitation coplanaire après frittage	154
Figure IV-42- Filtre deux pôles par stéréolithographie et mesures dimensionnelles de ce dernier.....	155
Figure IV-43- Mesure du filtre deux pôles en stéréolithographie (excitation coplanaire)	156
Figure IV-44- Comparaison simulation/ mesure filtre deux pôles bande Q.....	157
Figure IV-45- Rétro-simulation filtre deux pôles bande Q.....	158
Figure IV-46- Trou dans la partie supérieure d'un résonateur planaire (diamètre 350µm) [70].....	159
Figure IV-47- S_{21} du résonateur planaire sans trou, avec un trou et avec deux trous [70]	159
Figure IV-48- Variation du facteur de qualité en fonction du diamètre de l'ouverture [70].....	160
Figure IV-49- Motifs de gravures testés	161
Figure IV-50- Paramètres géométriques à varier sur le motif de réglage positif en fréquence.....	161
Figure IV-51- Variation haute fréquence en fonction des dimensions de l'ouverture (simulation).....	162
Figure IV-52- Motif de compensation pour la variation en basse fréquence du filtre deux pôles en bande Q (autour de 40 GHz)	162
Figure IV-53- Variation basse fréquence en fonction des dimensions de l'ouverture (simulation).....	163
Figure IV-54- Positionnement des motifs de compensation du couplage	163
Figure IV-55- Variation du niveau de couplage simulation (augmentation du couplage)	164
Figure IV-56- Variation du niveau de couplage simulation (diminution du couplage).....	164
Figure IV-57- Variation du facteur de qualité et la fréquence (vers les basses fréquences) en fonction de la taille du motif.....	165



Figure IV-58- Variation du facteur de qualité et la fréquence (vers les hautes fréquences) en fonction de la taille du motif.....	166
Figure IV-59- Matrices de couplage filtre idéale/ filtre décalé.....	167
Figure IV-60- Correction de la matrice de couplage par le protocole de compensation	167
Figure IV-61- Correction de réponse fréquentielle par le protocole de rectification post-fabrication simulation	168
Figure IV-62- Motifs de correction sur un filtre deux pôles (fabriqué par 3DCeram).....	168
Figure IV-63- Comparaison entre filtre deux pôles sans et avec correction post-fabrication	169



Table des tableaux

Tableau I-1 – Comparaison des filtres en bandes Q et V	31
Tableau I-2- tableau comparatif des différentes techniques de fabrication	48
Tableau II-1- Principales caractéristiques des alumines retenues dans le cadre du projet ATOMIQ	69
Tableau II-2- Dimensions des échantillons en fonction de la fréquence de caractérisation	70
Tableau II-3- Cycles thermiques retenus pour l'alumine TM-DAR.....	74
Tableau II-4- Cycles thermiques retenus pour l'alumine SMA6.....	74
Tableau III-1- Les variations des pertes d'insertion et des réjections hors bande filtre bande Q	101
Tableau III-2- Les variations des pertes d'insertions et des réjection hors bande filtre bande V	101
Tableau III-3- Comparaison entre les spécifications théoriques et optimisé.....	117
Tableau III-4- Comparaison entre les spécifications théoriques et optimisées.....	119
Tableau III-5- Comparaison entre les spécifications théoriques et optimisée	120
Tableau III-6- Comparaison entre les spécifications théoriques et optimisées.....	122
Tableau III-7- Comparaison entre les spécifications théoriques et optimisées.....	123
Tableau III-8- Tolérances de fabrications à respecter.....	126
Tableau III-9- Dispersion de permittivité à respecter	127
Tableau III-10- Performances de l'Alumine	128
Tableau IV-1 Listes des prototypes fabriqués par moulage basse pression.....	152
Tableau IV-2- Comparaison des dimensions simulées et mesurées sur un filtre quatre pôles	154
Tableau IV-3- Comparaison des dimensions simulées et mesurées sur un filtre deux pôles	154
Tableau IV-4- Comparaison entre dimensions simulées et mesurées pour un filtre deux pôles (fabrication par stéréolithographie)	156
Tableau II-1-Règles de conception pour le moulage basse pression	187



Publications et communications relatives à ce travail

- **Mohamed Khalil Drissi, Olivier Tantot, Nicolas Delhote, Serge Verdeyme, Damien Di-Marco, Pierre-Marie Geffroy, Thierry Chartier** “*Microwave characterization of very low loss and temperature stable ceramics up to 73 GHz*” Electroceramics xv conference, Jun 2016, Limoges, France
- **Mohamed Khalil Drissi, Damien Di-Marco, Nicolas Delhote, Olivier Tantot, Serge Verdeyme** “*Caractérisation de céramiques hautes performances*” Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux, Mar 2016, Calais, France
- **Mohamed Khalil Drissi, Nicolas Delhote, Olivier Tantot, Serge Verdeyme, Damien Di-Marco, Pierre-Marie Geffroy, Thierry Chartier** “*Q-band millimeter stereolithography filter* ” International Workshop on Microwave Filters, Mar 2015, Toulouse, France
- **Mohamed Khalil Drissi, Damien Di-Marco, Nicolas Delhote, Olivier Tantot, Serge Verdeyme, Pierre-Marie Geffroy, Thierry Chartier** “*Caractérisation de céramiques hautes performances par cavité métallique*” Colloque francophone PLUMEE 2015, Jun 2015, Limoges
- **Mohamed Khalil Drissi, Damien Di-Marco, Nicolas Delhote, Olivier Tantot, Serge Verdeyme, Pierre-Marie Geffroy, Thierry Chartier** “*Filtre millimétrique bande Q pour des applications satellites*” Journées Nationales Microondes, Jun 2015, Bordeaux, France
- **Mohamed Khalil Drissi, Damien Di-Marco, Nicolas Delhote, Olivier Tantot, Serge Verdeyme, Pierre-Marie Geffroy, Thierry Chartier** “*Filtre deux pôles en technologie de fabrication additive*” Journées Nationales du Réseau Doctoral en Micro-nanoélectronique, May 2015, Bordeaux, France
- **Mohamed Khalil Drissi, Damien Di-Marco, Nicolas Delhote, Olivier Tantot, Serge Verdeyme, Pierre-Marie Geffroy, Thierry Chartier** “*Optimisation de la technique de caractérisation par cavité métallique*” Journées Nationales Microondes, Jun 2015, Bordeaux, France
- **Damien Di-Marco, Mohamed Khalil Drissi, Pierre-Marie Geffroy, Nicolas Delhote, Olivier Tantot, Serge Verdeyme, Thierry Chartier**, “*Dielectric properties of alumina doped with TiO₂ from 13 to 73 GHz*” Journal of European Ceramic Society, 2016
- **Damien Di-Marco, Mohamed Khalil Drissi, Nicolas Delhote, Olivier Tantot, Serge Verdeyme, Pierre-Marie Geffroy, Thierry Chartier**. “*Dielectric properties of pure alumina from 8 GHz to 73 GHz*” Journal of the European Ceramic Society, Elsevier, 2016, 36 (14), pp.3355-3361
- **Damien Di-Marco, Mohamed Khalil Drissi, Nicolas Delhote, Olivier Tantot, Serge Verdeyme, Pierre-Marie Geffroy, Thierry Chartier** “*Optimization of the dielectric properties of pure Alumina up to V band for telecommunication*” International Workshop on Advanced Ceramics 07, Sep 2016, Limoges, France





Composants céramiques 3D innovants pour des applications spatiales de télécommunications millimétriques en bandes Q et V

Ce mémoire est consacré au développement de technologies de filtrage novatrices qui apportent un gain en performance permettant de répondre aux besoins de filtrage pour télécommunications spatiales à moyen et long terme. Il s'inscrit dans le projet ANR ATOMIQ coordonné par Thales Alenia Space ayant comme partenaires le laboratoire SPCTS, CNES, et la société 3D CERAM. Le premier chapitre est constitué d'une étude bibliographique sur les filtres en bande Q et V ainsi que les technologies de fabrication 3D. Le deuxième chapitre est consacré à l'élaboration d'une nouvelle formulation d'alumine très pure à faible pertes et stable en température. Le troisième chapitre présente une conception de filtres hyperfréquences en bande Q et V à base de cavités résonantes diélectriques. Le quatrième chapitre concerne la fabrication des filtres par usinage en cru ainsi que la présentation des différents démonstrateurs fabriqués par stéréolithographie et moulage basse pression. Il présente aussi des solutions de correction post-fabrication par tir laser. Ce travail est original par l'utilisation de la stéréolithographie céramique 3D ainsi que du moulage basse pression pour fabriquer des filtres hyperfréquences de petites tailles en bande Q et V.

Mots clés : Stéréolithographie céramique 3D, moulage basse pression, usinage en cru, Analyse électromagnétique 3D, Cavités résonantes, Alumine très faibles pertes et stable en température, Filtre passe-bande

Innovative 3D ceramic components for millimeter-scale telecommunications space applications in Q and V bands

This thesis focus on the development of innovative filtering technologies that enhance the performance to meet the filtering requirements for spacial communications. It is part of the ANR project ATOMIQ coordinated by Thales Alenia Space with partners (SPCTS 3D CERAM). The first chapter consists of a literature review on the Q and V band filters as well as 3D manufacturing technologies. The second chapter is devoted to the development of a new formulation of highly pure, low losses and temperature stable alumina. The third chapter presents a microwave filter design in Q and V band based on a dielectric resonant cavity. The fourth chapter is about the manufacturing of filters and presentation of various demonstrators manufactured by stereolithography and low pressure molding. It also provides a post-production correction solutions based on laser shoots. This work is original because, to the best of our knowledge, 3D ceramic stereolithography and the low pressure molding have not been used to produce small sizes Q and V band microwave filters.

Keywords: 3D ceramic Stereolithography, low pressure molding, 3D electromagnetic analysis, resonant cavities, very low loss and temperature stable alumina, bandpass filter
