

UNIVERSITE DE LIMOGES

ECOLE DOCTORALE Sciences – Technologie – Santé

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES de LIMOGES

Institut de recherche Xlim – Département Minacom

Thèse N° 56-2007

Thèse

pour obtenir le grade de

Docteur de l'Université de Limoges

Discipline : Electronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique

Spécialité : « Communications Optiques et Microondes »

Nicolas DELHOTE

le 18 Octobre 2007

**Composants céramiques 3D par procédé de stéréolithographie
Solutions de filtrage hyperfréquence innovantes**

Thèse dirigée par Dominique Baillargeat et Serge Verdeyme

JURY :

B. JECKO	Professeur à l'Université de Limoges – XLIM	Président
A. DE LUSTRAC	Professeur à l'Université de Paris Sud – IEF	Rapporteur
R. PLANA	Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse – LAAS	Rapporteur
C. CHAPUT	Directeur général du CTTC - Limoges	Examineur
T. CHARTIER	Directeur de recherche au SPCTS - Limoges	Examineur
J. PUECH	Ingénieur au CNES - Toulouse	Examineur
D. BAILLARGEAT	Professeur à l'Université de Limoges – XLIM	Examineur
D. CROS	Professeur à l'Université de Limoges – XLIM	Examineur
C. DREVON	Ingénieur à THALES ALENIA SPACE - Toulouse	Invité
S. VERDEYME	Professeur à l'Université de Limoges – XLIM	Invité

« Pour faire de la géométrie, ou n'importe quelle autre science, il faut quelque chose de plus que la pure logique. Nous n'avons à notre disposition aucun autre mot pour désigner cette chose hormis l'intuition. »

Henri Poincaré

REMERCIEMENTS

Ces travaux de thèse ont été effectués au sein de l'équipe Minacom de l'Institut de recherche XLIM de Limoges. Je tiens tout d'abord à exprimer à M. Serge Verdeyme, Professeur à l'Université de Limoges et responsable du département Minacom, l'expression de ma profonde gratitude pour m'avoir accueilli dans son équipe et co-encadré. Je le remercie de plus pour ses nombreux conseils avisés, son aide et sa sympathie au cours de ses années.

Je remercie M. Bernard Jecko, Professeur à l'Université de Limoges et responsable de l'équipe OSA d'XLIM d'avoir présidé ce jury.

J'adresse mes remerciements à M. André de Lustrac, Professeur à l'Université de Paris Sud et à M. Plana, Professeur à l'Université Paul Sabatier de Toulouse, pour avoir accepté de rapporter sur ce manuscrit.

Je remercie M. Christophe Chaput, directeur général du CTTC de Limoges, pour la grande et inestimable participation de son entreprise à la bonne conduite de cette thèse.

Je remercie également M. Thierry Chartier, Professeur à l'Université de Limoges et directeur de recherche au SPCTS de Limoges avec qui j'ai eu la chance de travailler et grâce à qui j'ai pu étendre mes connaissances au monde des céramiques.

J'adresse mes remerciements à M. Jérôme Puech, Ingénieur au CNES de Toulouse, et à M. Dominique Cros, Professeur à l'Université de Limoges et directeur d'XLIM, pour avoir accepté de participer à ce jury et pour leur très pertinent point de vue sur ce travail.

Je remercie M. Claude Drevon, ingénieur à Thalès Alénia Space de Toulouse, pour avoir accepté l'invitation à la soutenance et avoir contribué à élargir ma vision sur le travail effectué et à effectuer.

J'adresse tout particulièrement mes profonds remerciements à M. Dominique Baillargeat, Professeur à l'Université de Limoges, pour avoir encadré cette thèse et m'avoir fait confiance depuis maintenant près de 4 ans. Je le remercie pour les opportunités de travail et de rencontres qu'il m'a offertes et pour ce travail de recherche des plus passionnants qui a été effectué dans une ambiance des plus sympathiques.

Je tiens à remercier le personnel du CTTC et plus particulièrement M. Cyrille Delage, ingénieur et responsable du secteur Recherche et Développement du CTTC pour sa bonne humeur et son professionnalisme. Une bonne partie du mérite lui revient pleinement. Je lui souhaite beaucoup de bonheur pour sa nouvelle carrière de père.

Je remercie M. Charles Duterte, ingénieur exilé dans le plat pays, pour son amitié et sa bonne humeur et grâce à qui une bonne partie des mystères entourant la stéréolithographie ont pu être levés. Je lui souhaite beaucoup de réussite pour sa nouvelle vie.

Je remercie Mme. Frédérique Gadot, Maître de Conférence à l'Université de Paris Sud, et M. Benoît Béliet, ingénieur à l'IEF, pour avoir grandement facilité mon travail lors de mon séjour à l'IEF. Je remercie plus généralement le personnel de la CTU, les thésards y travaillant et plus particulièrement M. David Bouville, assistant ingénieur, pour leur accueil chaleureux lors de mon passage dans leur locaux.

Je remercie Michel Aubourg, Stéphane Bila, Olivier Tantot et Laurent Hagerman qui ont su par leur expérience m'aider à avancer dans ces travaux à divers moments.

J'adresse tout spécialement mes remerciements à Messieurs Bernard Casteignau et Hubert Jallageas, ingénieurs à XLIM, pour leur inestimable expérience et la très bonne humeur dans laquelle j'ai travaillé avec eux. Je leur souhaite respectivement une bonne retraite au bord de la mer et une très prochaine et bien méritée future retraite.

Plus généralement, je remercie tous les amis (Jojo, Mary, Bach, Aure, Manu, Claire, Thieu, Yoshi, Francky, Jeff, Marco, Sylvain, Amro, Serge, Luis, Momo, David, Seb, Benoît, Jean et tous les autres), les thésards, moniteurs (Micka, Cécilia, Raph, Laure, Claire, ...), personnels et secrétaires d'XLIM et de l'IUT qui ont fait que ces trois ans se sont passés dans la meilleure des ambiances.

Je remercie tout particulièrement ma famille pour m'avoir encouragé pendant ces nombreuses années et qui ont eu la patience de voir le bout de mes études. Je leur dédis tout naturellement ces travaux.

Je tiens enfin à donner une dédicace très spéciale à Emilie pour l'encourager à continuer dans sa voie et lui renouveler mon affection et mon soutien.

SOMMAIRE

Introduction générale.....	5
Chapitre 1. Structures Périodiques et techniques de fabrication associées.	11
Chapitre 2. Résonateurs diélectriques originaux.	73
Chapitre 3. Filtres passe bande étroite originaux a base de cristaux à bande interdite électromagnétique.....	147
Chapitre 4. Structures guidantes et résonantes basées sur des cristaux 3D.	201
Conclusion générale et perspectives	275
Annexe I – CAHIER COULEUR	285
Annexe II	295
Annexe III	305
Bibliographie personnelle.....	317

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE.

Que ce soit pour la réception satellite ou terrestre de chaînes de télévision, de la connexion sans fils à Internet des ordinateurs portables ou plus classiquement des téléphones portables utilisés par le grand public, tout le monde de près ou de loin est concerné par les télécommunications.

L'évolution des moyens de communication demande de lourds moyens scientifiques, humains et financiers et il aura fallu près de 200 ans pour passer de systèmes à base de tours de Chappe utilisant des sémaphores visuels à la convergence de services de nos téléphones portables actuels (radio, accès Internet, téléphonie, visio-téléphonie, ...).

Les demandes actuelles et futures des services et applications s'accompagnent d'une augmentation de la fréquence de fonctionnement des appareils et des besoins en bandes passantes. Cette montée en fréquence induit une nette diminution de la taille des composants, une augmentation de leur densité d'intégration et par conséquent des difficultés quant à leur fabrication et/ou assemblage. Face à cette tendance, des techniques de fabrication récentes et/ou des concepts originaux et innovants conduisent à la mise au point de nouvelles solutions technologiques. Nos travaux de recherche s'inscrivent dans ce double contexte : proposer de nouveaux concepts de composants innovants à l'aide d'une technologie alternative.

Le fil directeur de ces travaux est la mise au point de solutions de filtrage à fort facteur de qualité à vide dans le domaine millimétrique et sub-millimétrique. Nous cherchons à développer des concepts et/ou topologies de résonateurs originaux basés sur une technologie céramique 3D par stéréolithographie. Ce procédé breveté est à ce jour unique puisqu'il permet de réaliser en 3D des structures céramiques complexes dédiées à différents domaines tels que la médecine, la mécanique, ... et nous l'espérons bientôt les microondes.

Comme nous le verrons, un des composants originaux que nous présenterons est basé sur la théorie des structures périodiques. En conséquence, le **premier chapitre** de ce manuscrit propose, à partir d'une étude bibliographique, de faire un état de l'art des différentes structures périodiques existantes en une, deux et trois dimensions. Nous verrons notamment quelles propriétés particulières les structures 3D présentent et leurs applications

potentielles. Nous choisirons alors quelle structure se révèle la plus intéressante pour les applications que nous visons. Les technologies de fabrication 3D couramment associées à la réalisation de structures complexes sont décrites. Cette description nous permet de justifier notre choix quant à la technologie retenue pour la suite de l'étude.

Le **deuxième chapitre** décrit plus en détail la technologie céramique de fabrication retenue. Elle est dans un premier temps validée par la fabrication de structures innovantes basées sur le concept classique de résonateurs diélectriques blindés. L'originalité du travail réside dans la solution topologique monobloc céramique que nous proposons. Les dispositifs mis au point sont de type composants montés en surface (CMS) et satisfont à des contraintes de filtrage en bande Ku.

Le **troisième chapitre** propose un concept original de cavité résonante basée sur la théorie des structures périodiques 2D. Le dispositif céramique monobloc conçu, réalisé puis testé valide le concept dédié à une application de filtrage passe-bande dans la bande Ka (26 – 40 GHz). Cette structure résonante permettra aussi par le développement d'une céramique faibles pertes d'atteindre de forts facteurs de qualité à vide. Lors de cette étude, une analyse de faisabilité de matériaux céramiques très faibles pertes appliqués à la stéréolithographie est ainsi menée.

Le **quatrième chapitre** est dédié à l'application des propriétés particulières des cristaux périodiques 3D afin de créer des guides d'ondes et des cavités résonantes à fort facteur de qualité à vide. Ces structures sont conçues pour différents matériaux et différentes bandes de fréquence auxquels sont liées des contraintes techniques distinctes. A cette occasion nous ferons appel à la technologie céramique par stéréolithographie ainsi qu'à une technique de micro-usinage sur Silicium. Des réalisations et des mesures nous permettent de valider les concepts proposés et d'ouvrir des perspectives quant aux applications de ces structures. Les bandes de fonctionnement considérées lors de cette étude vont de la bande Ka (26 – 40 GHz) à la bande D (110 –170 GHz).

Introduction générale

Enfin ce manuscrit se terminera par une **conclusion générale** et un large éventail de **perspectives** allant du procédé technologique au développement de structures périodiques 3D spécifiques.

Chapitre I

Structures périodiques et techniques de fabrication associées

CHAPITRE 1. STRUCTURES PERIODIQUES ET TECHNIQUES DE FABRICATION ASSOCIEES.

I. Introduction.....	12
II. Structures périodiques	13
II.1. Introduction	13
II.2. Un peu d'histoire.....	14
II.3. Equations de Maxwell dans les milieux périodiques.....	16
II.4. Structures à bande interdite 2D.	24
II.5. Cristaux BIE 2.5D	28
II.6. Cristaux BIE 3D.	29
II.7. Applications reposant sur les cristaux BIE.....	38
II.8. Conclusion	48
III. Technologies appliquées à la fabrication de cristaux photoniques.....	49
III.1. Glancing Angle Deposition (GLAD)	49
III.2. Micromanipulation par des nanorobots.....	50
III.3. Ecriture directe.....	51
III.4. Lithographie holographique.....	52
III.5. Lithographie classique.....	53
III.6. Techniques de fabrication utilisant des céramiques.....	54
IV. Conclusion générale.....	64

I. Introduction

Développés à l'origine dans le domaine microonde, c'est finalement les applications optiques qui se voient les plus grands utilisateurs des systèmes à base de cristaux périodiques. C'est notamment grâce au grand nombre de technologies développées dans ce domaine que cet essor a pu avoir lieu. Présentant une grande précision de réalisation, certaines de ces techniques peuvent être transposables dans le domaine microonde où leurs caractéristiques soit en termes de choix de matériaux et de capacités à réaliser des structures tri-dimensionnelles complexes, s'avèrent des plus pertinentes. Nous pouvons ainsi aujourd'hui envisager de fabriquer des structures périodiques 3D qui, il y a peu d'années encore, étaient tout simplement inenvisageable tant les contraintes technologiques s'avéraient délicates à surmonter.

La montée actuelle en fréquence des systèmes hyperfréquences fait tendre les fréquences d'application au delà de 100 GHz et même vers le Terahertz. Ces domaines de fréquences nécessitent la réalisation de structures avec de très bonnes précisions de fabrication.

En parallèle à cette montée en fréquence, les demandes de secteurs spécifiques comme les communications spatiales ou terrestres restent essentiellement les mêmes : des performances électriques élevées, encombrement réduit et une facilité d'intégration dans un environnement planaire ou de guides d'ondes.

Ainsi ces contraintes de fonctionnement peuvent présenter des problèmes pour les filtres qui risquent de voir leurs dimensions et/ou leurs réglages modifiés et donc perdre le comportement qu'ils ont sur une bande de fréquence donnée.

A partir de ces constatations nous avons cherché des techniques alternatives qui, par l'utilisation d'éléments résonants ou guidant originaux combinés à des procédés de fabrication spécifiques et/ou adaptés, peuvent répondre à ces nouvelles contraintes.

Nous nous sommes pour cela tout particulièrement intéressés aux structures périodiques diélectriques pour la réalisation de résonateurs à forts facteurs de qualité à vide. Le début de ce chapitre se concentrera alors, à travers une recherche bibliographique, sur une étude permettant de montrer le potentiel des structures périodiques dans le domaine micro-ondes.

Cette approche sera complétée par une recherche sur les techniques de fabrication les plus utilisées pour la réalisation de ces structures. Elle mettra ainsi plus en avant deux grands types de matériaux, le Silicium ainsi que les céramiques, dont les propriétés et les techniques de fabrication associées s'avèrent des plus pertinentes pour atteindre l'objectif que nous nous sommes fixé.

II. Structures périodiques

II.1. Introduction

Les structures périodiques sont des structures présentant un arrangement périodique d'éléments diélectriques et/ou métalliques dans de multiples configurations 1D, 2D et bien sûr 3D (Figure I-1).

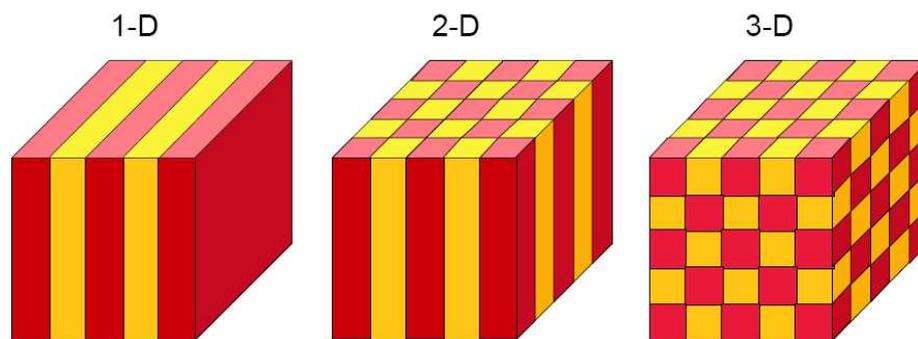


Figure I-1. Structures diélectriques périodiques 1D, 2D et 3D présentant une périodicité des deux matériaux les composant respectivement sur 1, 2 et 3 dimensions.

La principale propriété de ces structures est de présenter des bandes interdites de fréquences dans lesquelles les ondes électromagnétiques ne peuvent se propager sous certaines conditions d'excitation. L'étude de ce phénomène appliqué aux ondes électromagnétiques (EM) est assimilable à la théorie de la physique du solide pour des cristaux périodiques.

En effet, de la même façon que la périodicité des atomes dans un cristal impose les bandes d'énergies de valence et de conduction, la configuration spécifique des structures périodiques permet de contrôler le flux des ondes EM dans ceux-ci. La théorie portant sur ces structures s'est ainsi inspirée de la physique du solide ainsi que de la mécanique quantique en utilisant le fort lien de parenté existant entre les équations de Maxwell utilisées pour décrire le comportement des ondes électromagnétiques et l'équation de Schrödinger traitant les fonctions d'ondes électroniques.

Les applications immédiates découlant des propriétés de ces structures diélectriques périodiques apparaissent comme leur capacité à guider et confiner des ondes EM par la création de défauts linéiques en leur sein où l'énergie sera majoritairement concentrée et guidée. Par extension, des cavités faibles pertes peuvent de même exister par le positionnement de défauts ponctuels.

Du fait des dimensions requises pour une longueur d'onde de fonctionnement donnée et des technologies associées à celles-ci, c'est dans le domaine optique que le plus grand nombre d'applications a vu le jour. Mais depuis quelques temps, l'émergence de nouvelles technologies de fabrication dans le domaine microonde conduit au développement de nouvelles applications et de topologies innovantes. Avant d'aborder ces applications et ces technologies, voyons d'où proviennent les premières études sur les structures périodiques.

II.2. Un peu d'histoire.

Historiquement la propagation des ondes dans un milieu périodique fut étudiée en premier par Lord Rayleigh en 1887 grâce à son intérêt pour des cristaux minéraux [1]. Ces cristaux 1D possèdent la propriété d'empêcher la propagation de la lumière au travers de l'empilement de plans les constituant, et ce sur une faible bande de longueurs d'ondes.

Lord Rayleigh a observé que ce « trou » ou « gap » fréquentiel est dépendant de l'angle que fait la lumière blanche incidente sur le cristal. Ainsi, il observe que la couleur que prend la lumière réfléchie varie en fonction de cet angle, signe que certaines longueurs d'onde (couleurs) constituant la lumière blanche disparaissaient dans le rayon réfléchi. Ceci est en fait dû aux éléments périodiques dans le cristal que rencontre le rayon incident et qui sont différents en fonction de son inclinaison.

Un exemple connu de minéraux photoniques est l'opale dont la structure est constituée de microbilles de silices réparties plus ou moins régulièrement. Cet arrangement donne à ce

cristal la possibilité de réfléchir certaines couleurs du spectre visible, d'où les reflets visibles à sa surface (Figure I-2).

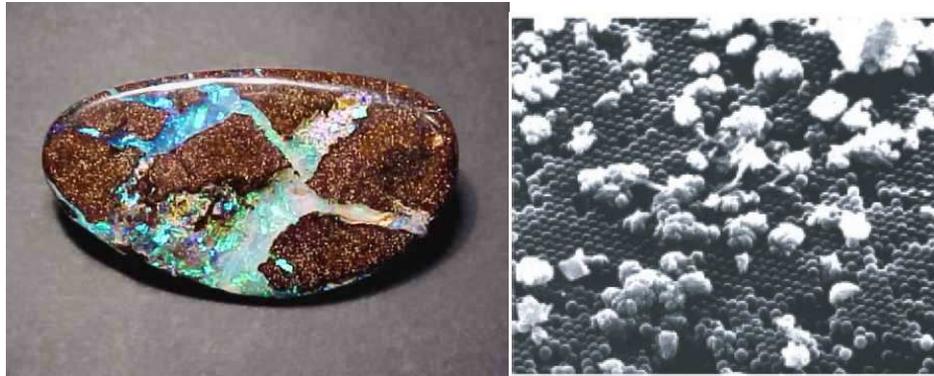


Figure I-2. Opale vue à l'échelle macro (gauche) et microscopique (droite). Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Plus classiquement c'est aussi le même principe qui assure à la pie (*Pica Pica*) les reflets bleu-verts sur son plumage (Figure I-3).



Figure I-3. Pie commune (*Pica Pica*). Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

En effet des chercheurs ont montré que ces reflets proviennent de canaux d'air disposés régulièrement selon un motif hexagonal 2D dans les tiges composant le plumage de l'oiseau [2].

Ce n'est finalement qu'un siècle plus tard grâce à Eli Yablonovitch [3] et Sajeev John [4], en joignant les outils de l'électromagnétisme classique et de la physique du solide, que le concept de bande interdite électromagnétique omnidirectionnel a été introduit pour les deuxième et troisième dimensions. Il est toutefois intéressant de noter qu'en 1979 Ohtaka [5]

établit théoriquement la structure de bande d'une onde électromagnétique dans un réseau de sphères, en remarquant la similitude entre les équations de Helmholtz et de Schrödinger.

II.3. Equations de Maxwell dans les milieux périodiques

L'étude de la propagation des ondes dans un milieu périodique 3D a tout d'abord été lancée par Félix Bloch en 1928 [6] sans savoir qu'il poussait plus loin le théorème sur les structures 1D de 1883 de Gaston Floquet [7]. Bloch prouva que le comportement des ondes dans un tel matériau est gouverné par une série de Fourier multipliée par une onde plane.

Pour comprendre cela, considérons les équations macroscopiques de Maxwell dans la base orthonormée $(0, x, y, z)$:

$$\nabla \wedge \vec{E} - j\omega\mu_0\vec{H} = 0 \quad \text{I.1}$$

$$\nabla \wedge \vec{H} + j\omega\varepsilon_0\varepsilon_r(x, y, z)\vec{E} = 0 \quad \text{I.2}$$

avec μ_0 la perméabilité du vide, ε_0 la permittivité du vide tel que $\varepsilon_0\mu_0 = \frac{1}{c^2}$ et $\varepsilon_r(x, y, z)$ la permittivité relative du milieu ambiant. c est la vitesse de la lumière dans le vide, soit $c = 3.10^8 \text{ m/s}$.

De même on considère que les champs \vec{E} et \vec{H} s'écrivent de la forme :

$$\vec{E} = E(x)e^{j\omega t}\vec{e}_x + E(y)e^{j\omega t}\vec{e}_y + E(z)e^{j\omega t}\vec{e}_z$$

$$\vec{H} = H(x)e^{j\omega t}\vec{e}_x + H(y)e^{j\omega t}\vec{e}_y + H(z)e^{j\omega t}\vec{e}_z$$

En combinant les équations I.1 et I.2, on obtient les équations de propagation en champ \vec{E} et \vec{H} suivantes :

$$\frac{1}{\varepsilon_r(x, y, z)}\nabla \wedge (\nabla \wedge \vec{E}) - \frac{\omega^2}{c^2}\vec{E} = 0 \quad \text{I.3}$$

$$\nabla \wedge \left(\frac{1}{\varepsilon_r(x, y, z)}\nabla \wedge \vec{H} \right) - \frac{\omega^2}{c^2}\vec{H} = 0 \quad \text{I.4}$$

II.3.a. Mode de Bloch et zone de Brillouin

Partons sur l'exemple d'un cristal 1D composé d'un assemblage de deux matériaux de permittivité différentes répartis périodiquement suivant la période a comme montré sur la Figure I-4.

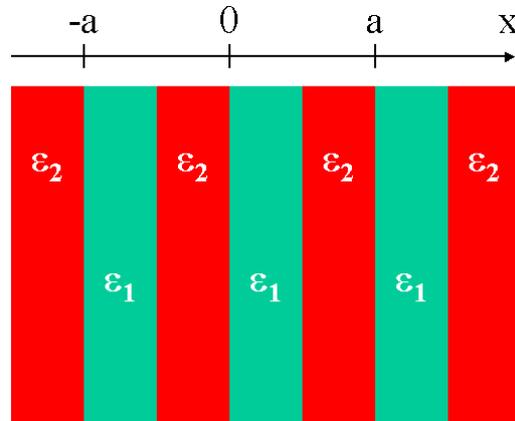


Figure I-4. Cristal 1D.

Sur cet exemple, le cristal est supposé de dimensions infinies sur ses deux autres axes (y et z). Ce cristal photonique correspond alors à une fonction diélectrique périodique : $\varepsilon_r(x) = \varepsilon_r(x+a)$

Dans ce cas, le théorème de Bloch-Floquet pour des problèmes aux valeurs propres de ce type montre que la solution de l'équation I.4 est de la forme

$$\vec{H}(x) = e^{j\vec{k}\vec{x}} \vec{H}_{n,\vec{k}}(x) \quad \text{I.5}$$

$$\vec{H}_{n,\vec{k}} \text{ satisfaisant : } \vec{\nabla} \wedge \frac{1}{\varepsilon_r(x,y,z)} \vec{\nabla} \wedge \vec{H}_{n,\vec{k}} = \left(\frac{w_n(\vec{k})}{c}\right) \vec{H}_{n,\vec{k}} \quad \text{I.4a}$$

\vec{k} étant le vecteur d'onde et $w_n(\vec{k})$ les pulsations propres de cette équation.

Nous arrivons alors à la résolution d'un problème aux valeurs propres sur une cellule primitive du cristal, pour chaque vecteur d'onde \vec{k} . Cette cellule élémentaire est un domaine fini dans lequel la résolution de l'équation d'onde I.4a fournira un nombre discret de solutions propres ou *modes de Bloch* repérés par $n=1, 2, \dots$. Plus particulièrement pour le cristal 1D, cette cellule élémentaire de calcul s'étend de $-a$ à $+a$. Ces pulsations propres forment des bandes discrètes lorsqu'on les place en ordonné sur un graphique dont l'abscisse est \vec{k} . Ce graphe particulier appelé diagramme de bande (ou diagramme de dispersion) permet de représenter toutes les interactions possibles (modes) existant dans le système cristallin. Une description plus détaillée est proposée dans le paragraphe I.3.b.

Ces pulsations sont des fonctions périodiques de \vec{k} : ainsi la solution pour une valeur de \vec{k} est la même que pour $\vec{k} + \vec{G}_j$, \vec{G}_j étant l'ensemble de vecteurs de bases définissant la cellule élémentaire du réseau cristallin réciproque, appelé communément espace réciproque, défini par $\vec{R}_i \cdot \vec{G}_j = 2\pi\delta_{i,j}$. $\delta_{i,j}$ est le symbole de Kronecker et \vec{R}_i l'ensemble de vecteurs définissant le réseau direct du cristal 1D.

Ainsi, pour l'exemple du cristal 1D, $\vec{R}_i = a\vec{e}(x)$ et $\vec{G}_j = \frac{2\pi}{a}\vec{e}(x)$, $\vec{e}(x)$ étant le vecteur unitaire définissant l'axe des x.

Grâce à la périodicité du réseau 1D suivant l'axe $0x$, seules les solutions de \vec{k} dans une cellule unitaire du réseau réciproque sont recherchées. Plus conventionnellement, on considère l'ensemble des vecteurs \vec{k} proches de l'origine ($x=0$ pour l'exemple du cristal 1D) dans une région de l'espace réciproque appelé la *première zone de Brillouin* [8], voir Figure I-5.

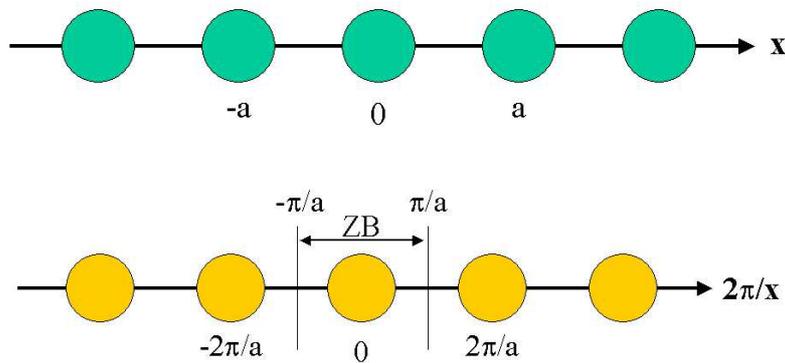


Figure I-5. Cristal direct 1D (haut) et réseau réciproque de ce cristal (bas). La zone de Brillouin (ZB) est visible sur le réseau réciproque.

Ainsi, pour le cristal 1D, la première zone de Brillouin correspond à la zone de l'espace réciproque où \vec{k} est compris entre $-\frac{\pi}{a}$ et $\frac{\pi}{a}$, tous les autres vecteurs du réseau étant équivalents puisqu'ils sont forcément issus de cette première zone modulant une translation périodique par un multiple de \vec{G}_j .

Cette première zone peut elle-même être redondante si le cristal possède des symétries additionnelles. On obtient alors la zone *irréductible* de Brillouin dans laquelle il suffit donc de calculer les modes de Bloch pour connaître les modes existant dans le réseau cristallin entier.

Dans le cas du cristal 1D de pas a , cette zone irréductible est définie de 0 à $\frac{\pi}{a}$.

II.3.b. Bande interdite électromagnétique (BIE).

Le terme de *bande interdite électromagnétique complète* représente la bande de fréquence dans laquelle il n'y a aucune solution réelle (mode propageant) de l'équation I.4a quelque soit le vecteur \vec{k} .

En considérant un système unidimensionnel ayant une permittivité uniforme égale à ϵ_r , donc non périodique, la résolution de l'équation I.4a nous donne $w(\vec{k}) = \frac{c.k}{\sqrt{\epsilon_r}}$ dont le tracé est reporté Figure I-6.

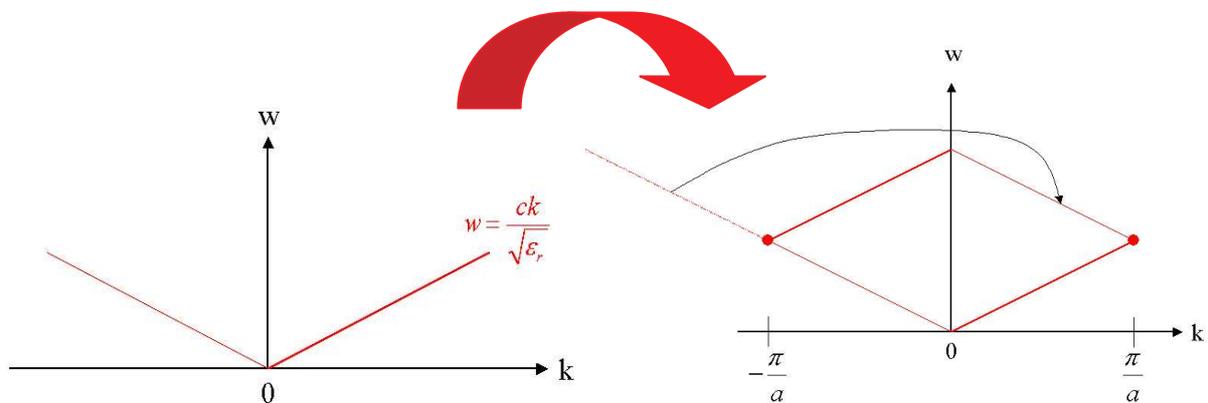


Figure I-6. Diagramme de bande 1D : création du schéma de zone réduite.

Le schéma de zone réduite est réalisé par la repliement de la relation de dispersion en bord de zone de Brillouin : on translate les bandes pour $|k| > \frac{\pi}{a}$ dans la première zone, comme montré sur la Figure I-6.

Ainsi, en bord de zone, le mode existant à $k = -\frac{\pi}{a}$ se retrouve cohabitant avec le mode à $k = \frac{\pi}{a}$ et ce à la même fréquence. Cette dégénérescence est due à la période artificielle amenée par le repliement du diagramme de bande.

En présence d'un milieu périodique 1D comme celui de la Figure I-4, on lève cette dégénérescence : les modes à $k = -\frac{\pi}{a}$ et $k = \frac{\pi}{a}$ n'existent plus à la même fréquence. Nous obtenons alors une ouverture du diagramme de dispersion, cette ouverture n'étant autre que la bande interdite électromagnétique ou *gap* (Figure I-7).

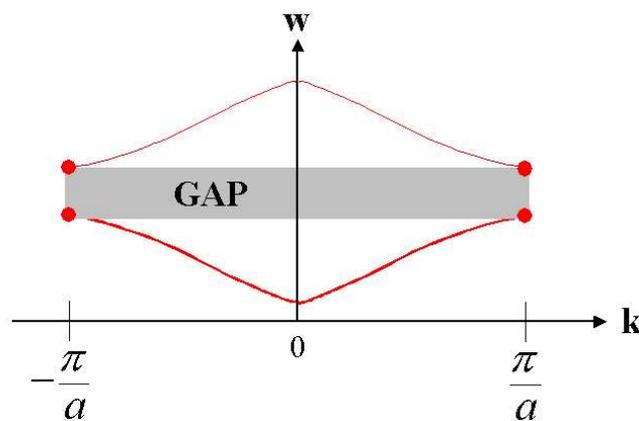


Figure I-7. Diagramme de bande d'un milieu périodique 1D.

Notons que :

- l'ouverture fréquentielle de ce gap sera d'autant plus grand que le rapport $\varepsilon_2 / \varepsilon_1$ est important.
- cette bande est caractérisée par l'absence d'états propagatifs.

Prenons le cas d'un cristal 1D composé de deux matériaux que sont l'air ($\varepsilon_1 = 1$) et un diélectrique ($\varepsilon_2 = 13$). Ce cristal est choisi périodique de période a suivant l'axe x avec une alternance d'une couche d'air d'épaisseur $(a-d)$ et d'une couche de diélectrique d'épaisseur $d=0.2a$. Le diagramme de bande de ce matériau sera obtenu en résolvant l'équation d'onde, choisie arbitrairement pour l'exemple en champ \vec{E} (I.3) :

$$\frac{\partial^2 E(x)}{\partial x^2} + \frac{\omega^2}{c^2} \varepsilon_r(x) E(x) = 0 \quad \text{I.6}$$

La solution est donnée par l'équation suivante :

$$\cos(ka) = \cos(k_0(a-d)) \cdot \cos(qd) - 0.5 \left(\frac{k_0}{q} + \frac{q}{k_0} \right) \sin(k_0(a-d)) \sin(qd) \quad \text{I.7} \quad \text{avec} \quad k_0 = \frac{\omega}{c}$$

et $q = \sqrt{\varepsilon_r k_0^2}$.

Le terme de gauche de cette équation transcendante est bien évidemment borné entre -1 et 1 alors que le terme de droite ne l'est pas. Le tracé de ce dernier terme en fonction de la fréquence normalisée nous donne alors les bandes interdites de fréquence comme montrées sur la Figure I-8 [9].

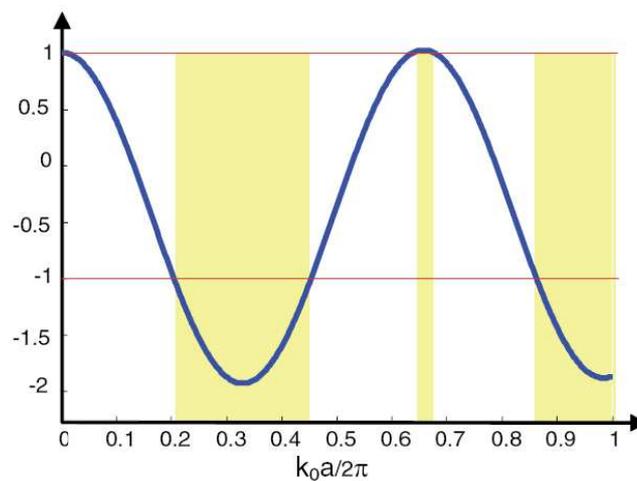


Figure I-8. Tracé du membre de droite de l'équation I.7. Trois bandes interdites apparaissent.

Les valeurs prises par ce second membre qui seront supérieures à $|1|$ donnent accès aux bandes de fréquences permises et interdites dans lesquelles des modes propageant respectivement peuvent et ne peuvent pas exister.

II.3.c. Cas d'un cristal 1D fini particulier : le miroir de Bragg.

La résolution de l'équation de propagation s'est jusqu'à maintenant faite théoriquement pour un cristal 1D en considérant que ce dernier était de dimensions infinies sur ses deux autres dimensions. Nous allons maintenant voir ce qu'il en est pour un cas réel de dimensions finies, et plus particulièrement pour le cristal 1D connu sous le nom de miroir de

Bragg. Ce dernier valu à son auteur, William Lawrence Bragg, le prix Nobel de Physique en 1915. Il se compose de deux matériaux répartis périodiquement de période a et dont leur épaisseur est égale à $\frac{\lambda_0}{4\sqrt{\epsilon_r}}$ (Figure I-9). Ce type de miroir, grâce à ses interférences constructives, permet d'obtenir une réflexion quasiment parfaite autour de la longueur d'onde choisie pour une onde incidente arrivant orthogonalement sur ce miroir, sa polarisation étant parallèle aux couches constituant le miroir. Cela se produit dans le cas précis où le nombre de couches est impair et où la première couche est de la permittivité la plus forte [10].

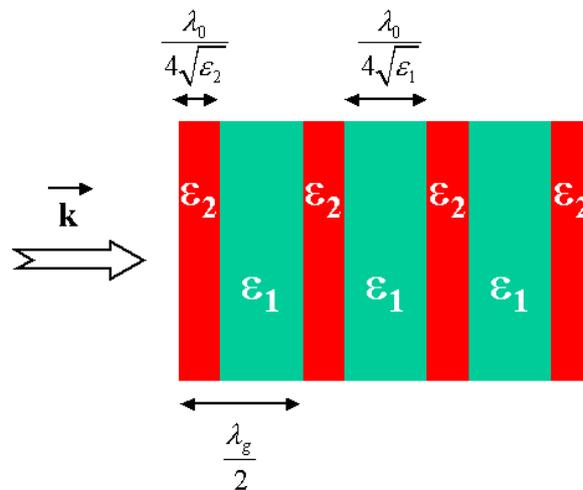


Figure I-9. Miroir de Bragg de période $a = \frac{\lambda_g}{2}$ ($\epsilon_2 > \epsilon_1$).

Ainsi ce cristal permet d'obtenir des bandes interdites de transmission autour de λ_0 et de ses harmoniques pour des ondes incidentes normales à celui-ci. Il est de même intéressant de noter que le nombre de périodes composant ce cristal influe directement sur le coefficient de réflexion amené par le miroir. Ainsi, sur un miroir composé de couches d'alumine, céramique qui présente une permittivité de 9, nous observons une nette amélioration du coefficient de réflexion lorsque le nombre de périodes croît. La Figure I-10 montre ainsi l'évolution de ce paramètre pour une onde polarisée parallèlement au miroir et d'incidence normal. Ce calcul a été effectué à l'aide du logiciel open source *Translight* développé par A. L. Reynolds sur la base des travaux de Pendry *et al.* [11]. Ainsi dans la bande interdite le cristal se comporte comme un miroir renvoyant quasiment toute l'énergie incidente. Par contre la structure est quasiment transparente aux ondes incidentes de fréquence située hors de la bande interdite.

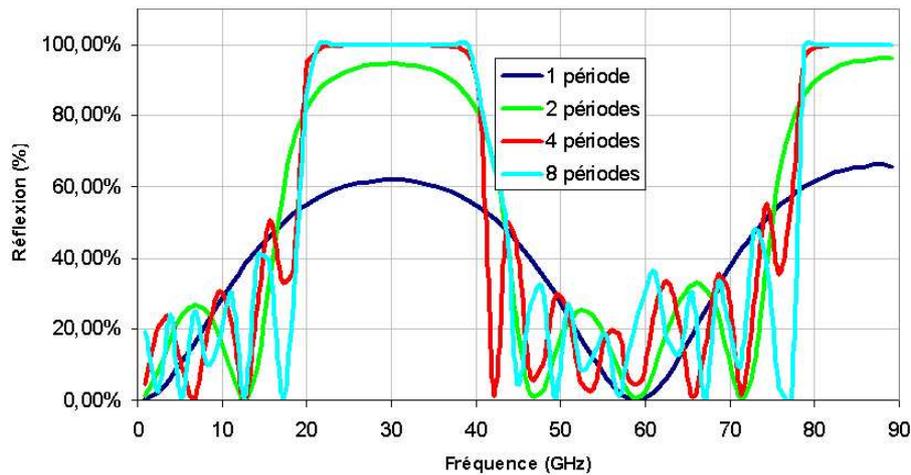


Figure I-10. Coefficient de réflexion pour un miroir de Bragg dimensionné pour donner une bande interdite autour de 30 GHz. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

De même, la largeur de bande interdite ainsi que le coefficient de réflexion sont liés au rapport de permittivité $\varepsilon_{fort} / \varepsilon_{faible}$ des deux matériaux constituant ce miroir. En effet, plus celui-ci est élevé et plus la bande interdite sera grande et le coefficient de réflexion élevé.

Mais cette bande interdite n'existe que pour un faible angle d'incidence autour de l'incidence normale. Elle ne peut donc pas être complète, c'est à dire existante pour n'importe quel angle d'incidence.

Il existe néanmoins un moyen original de contourner cela en jouant sur le phénomène de réflexion externe totale expliqué dans [12]. On peut alors faire coexister deux phénomènes :

- la bande interdite qui assure au cristal 1D une réflexion des ondes incidentes pour certains angles proche de la normale.
- le phénomène de réflexion totale externe qui provient de l'angle limite de réflexion obtenu à l'interface de la première couche du miroir. Cette propriété permet au cristal 1D de réfléchir les ondes incidentes au delà des angles éliminés par la bande interdite.

Il faut alors astucieusement faire en sorte que ces deux phénomènes soient complémentaires en choisissant les dimensions correctes pour que le cristal 1D crée une bande interdite et un contraste d'indice suffisant pour assurer la réflexion totale externe.

Toutefois il faut bien comprendre que nous ne sommes pas ici en présence de bande interdite totale, mais juste d'un miroir omnidirectionnel.

II.3.d. Comment obtenir une bande interdite complète ?

Pour créer une bande interdite complète, c'est à dire pour n'importe quel vecteur \vec{k} , il faudrait qu'une périodicité de type 1D comme vue précédemment se retrouve dans n'importe quelle direction. Mais la création d'une bande complète sous-entend que les multiples bandes apparaissant alors se trouvent et se recoupent sur des intervalles de fréquences identiques. Ce recouvrement sera d'autant plus facile si les gaps en fréquence sont larges, ce qui impose alors que le contraste de permittivité $\varepsilon_{fort} / \varepsilon_{faible}$ doit être suffisamment grand. Sachant que la fréquence centrale d'un gap est voisin de $\frac{c\pi}{a\sqrt{\varepsilon_r}}$ comme l'ont montré Joannopoulos *et al.* dans

leur livre « *Photonic crystals* » [10], il est souhaitable de retrouver une périodicité la plus identique possible dans les différentes directions du cristal. Les structures possédant les plus grands gaps sont respectivement les structures 2D disposées en hexagone et 3D disposées suivant le motif appelé cubique face centré (CFC). En effet ce sont ces structures qui présentent une zone de Brillouin respectivement la plus circulaire et la plus sphérique pour les cristaux 2D et 3D comme nous pouvons le voir dans le livre de J.-M. Lourtioz *et al.* [13].

II.4. Structures à bande interdite 2D.

La recherche d'une structure présentant une bande interdite omnidirectionnelle a naturellement conduit les chercheurs à rajouter une dimension supplémentaire à la structure périodique initiée par Bragg. C'est ainsi que dans le milieu des années 1990 des études virent le jour sur des assemblages périodiques de tiges ou de trous comme montrés sur la Figure I-11, ces éléments étant considérés de dimension infinie sur l'axe z.

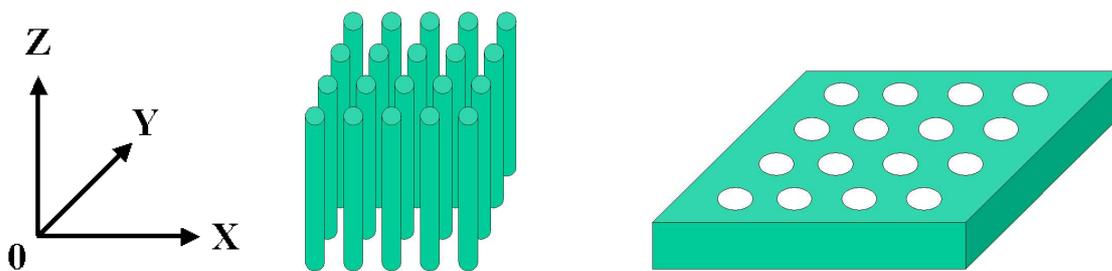


Figure I-11. Réseau 2D de tiges et trous.

Pour la suite de ce paragraphe, les cristaux 2D présentés seront considérés comme étant constitués d'un nombre infini de périodes sur les axes x et y .

La compréhension des cristaux photoniques bi-dimensionnels est basée sur une décomposition des champs suivant deux principales polarisations :

- la polarisation *TM* (*transverse magnétique*) dans laquelle le champ \vec{H} est dans le plan (xOy), le champ \vec{E} lui étant perpendiculaire.
- La polarisation *TE* (*transverse électrique*) dans laquelle le champ \vec{E} est dans le plan (xOy), le champ \vec{H} étant lui perpendiculaire à ce plan.

Ces polarisations sont aussi appelées respectivement polarisations p et s .

Deux types de structures 2D existent (Figure I-11):

- celles composées de tiges de forte permittivité dans un milieu de faible permittivité.
- celles composées de tiges de faible permittivité dans un milieu à forte permittivité.

Le deuxième cas est souvent obtenu par un bloc de diélectrique percé de trous d'air.

Ces tiges (ou trous) peuvent être configurées de plusieurs façons, les plus connues étant le réseau *carré* [14], *triangulaire* [15] et *hexagonal* [16]. La Figure I-12 présente les différents types de réseau et leur zone de Brillouin associée.

Les lettres (X, M, K, ...) permettent de repérer les points de hautes symétries de la première zone de Brillouin et ainsi de délimiter la zone irréductible.

Ces types de structures connectés et déconnectés présentent des propriétés différentes. Les tiges dans l'air présentent typiquement une bande interdite totale pour une polarisation TM mais pas pour la polarisation TE. La Figure I-13 issue de [17] montre le diagramme de bande pour un réseau 2D carré de tiges cylindriques de Silicium positionnées dans l'air. Ces dernières sont orientées selon l'axe z , la polarisation TM correspond alors au cas où le champ \vec{E} est parallèle aux tiges.

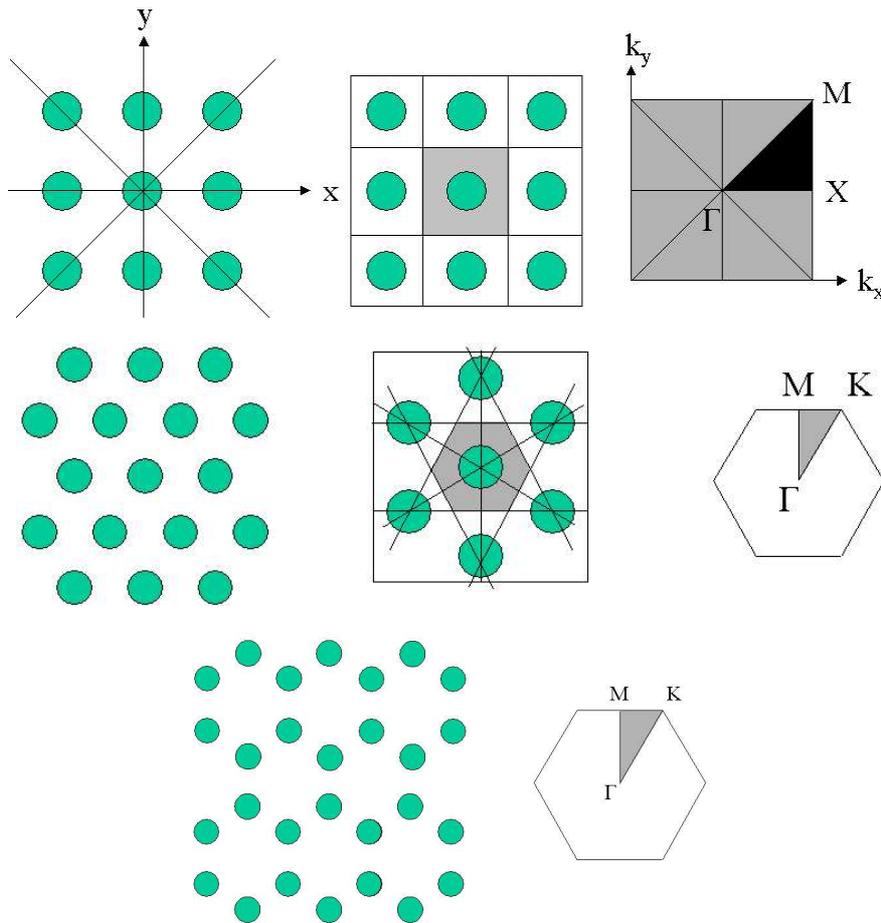


Figure I-12. [13] Les trois grands types de réseaux directs 2D (à gauche) : carré, triangulaire et hexagonal et leurs zones de Brillouin respectives (au milieu et à droite). La zone irréductible est de même montrée.

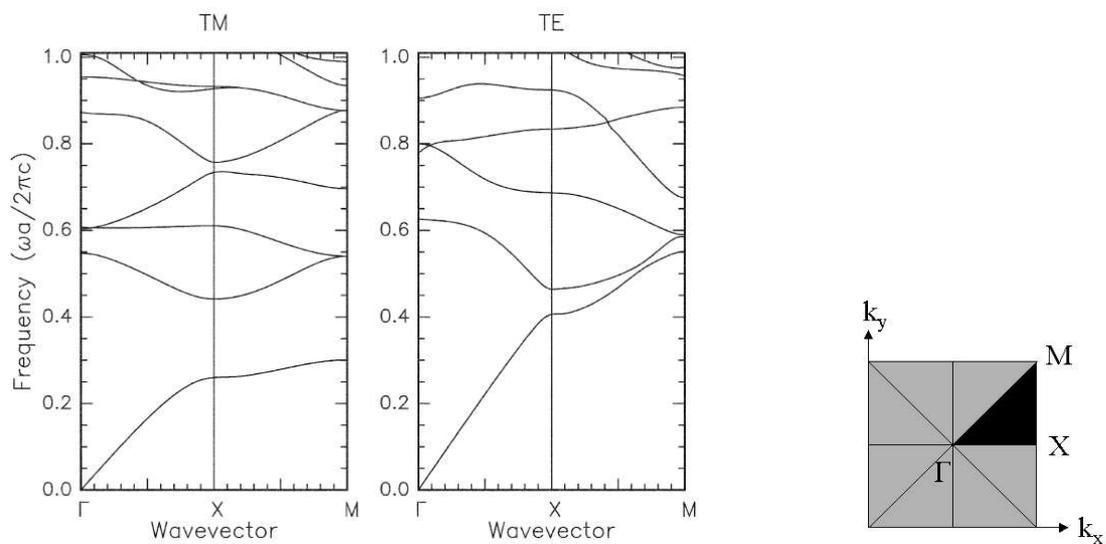


Figure I-13. [17] Diagramme de bande pour un réseau carré 2D de tiges de Silicium ($\epsilon_r = 11.8$) dans de l'air.

Habituellement l'ordonnée du diagramme de bande présente les pulsations ω ayant pour unité $\frac{2\pi c}{a}$ ou $\frac{a}{\lambda}$. Ainsi, les solutions des équations de Maxwell s'appliquent à n'importe quelle fréquence en choisissant convenablement le pas a du réseau. De même le rayon des tiges, dans le cas de tiges cylindriques, est exprimé en fonction de a pour cette même raison. Il est de plus habituel de référencer sur l'axe des abscisses les points de haute symétries de la zone irréductible de Brillouin marquant les valeurs successives que le vecteur d'onde a prises. Ces points représentent donc le parcours suivi par le vecteur d'onde \vec{k} , parcours au cours duquel des modes propres seront trouvés. Ces points de haute symétrie possèdent des appellations bien spécifiques, Γ étant toujours l'origine $\vec{k}=0$. Finalement et conventionnellement, on trace les bandes seulement le long de ces points pour identifier les bandes interdites. La bande interdite n'est ici pas complète puisque n'existant que pour une des deux polarisations.

Le réseau inverse permet lui d'obtenir une bande interdite sur les deux polarisations. De plus, pour un contraste d'indice suffisant et une taille de tiges appropriée, un recouvrement des deux bandes est possible pour un réseau carré et triangulaire [18, 19]. On peut alors avoir une vraie bande interdite complète. La Figure I-14 montre le cas de trous d'air cylindriques dans un bloc de Silicium. Ces tiges ont en rayon de $0.45 a$ et sont disposées suivant un réseau triangulaire.

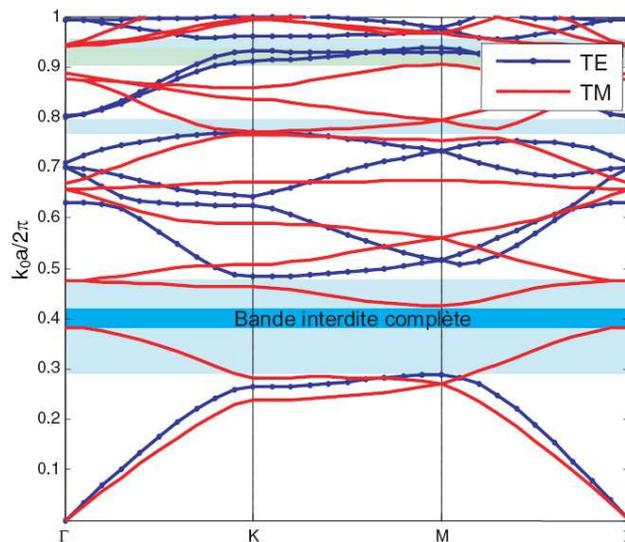


Figure I-14. Diagramme de bande d'un réseau de tiges cylindriques d'air (rayon normalisé $0.45 a$) dans un bloc de diélectrique de permittivité 13.

Remarque : dans tous les cas, les réseaux directs (tiges de diélectrique fort dans un milieu de permittivité plus faible) possèdent des bandes interdites plus importantes pour la polarisation TM. Les réseaux inversés présentent une BIE plus importante pour la polarisation TE.

Il est aussi intéressant de remarquer que des tiges de section carrée plutôt que cylindrique ont tendance à diminuer la bande interdite à cause de la diminution des symétries géométriques [20]. La dernière structure 2D remarquable est celle de type graphite ou hexagonale qui permet d'obtenir un bande interdite complète pour un réseau de tiges diélectriques entourées d'air, comme nous pouvons le voir dans les travaux de Gadot *et al.* [21]. Toutefois, cette bande interdite n'est valable que lorsque nous considérons le cas idéal où les tiges ont notamment une hauteur infinie.

II.5. Cristaux BIE 2.5D .

La transposition des phénomènes observés en 2D dans la troisième dimension peut être obtenue en donnant une hauteur finie aux cas idéaux précédemment observés. Ces réseaux 2D particuliers peuvent confiner la lumière verticalement grâce au phénomène de guidage interne total classiquement observé dans les fibres optiques dont le cœur présente un indice plus fort que la gaine l'entourant. Prenons le cas d'un réseau inversé triangulaire 2D comme montré Figure I-15. Ici le cristal possède une hauteur finie de $0.5 a$, le matériau possède une permittivité de 13 et les trous un rayon de $0.3 a$.

Le cône de lumière visible sur ce graphe représente la zone au delà de la ligne de lumière. Cette ligne représente la séparation existante entre les états guidés et non guidés dans le cristal.

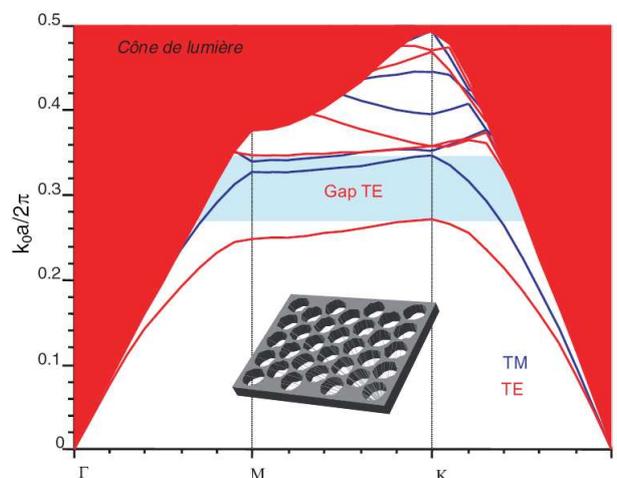


Figure I-15. Cristal 2D de hauteur finie. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Au dessus de cette ligne de lumière, il y a un *continuum* d'états radiatifs qui ne sont que faiblement perturbés par la présence du cristal. En dessous, des modes guidés par réflexion interne totale existent grâce à la différence d'indice entre l'intérieur et l'extérieur du cristal.

Pour le cristal de hauteur finie présenté ici, il existe une bande interdite totale en dessous de la ligne de lumière pour les ondes possédant une polarisation de type TE. La polarisation TM ne possède pas ici de bande interdite totale.

Les propriétés de ces cristaux particuliers sont de plus dépendantes de deux paramètres cruciaux :

- la présence de gaps en fréquence dans un tel cristal est fortement liée à la présence de une ou plusieurs symétries dans celui-ci.
- la hauteur de ces cristaux doit être optimisée aux environs de $0.5 a$ sans quoi les modes existants dans le cristal seront peu confinés (cas d'une hauteur insuffisante) ou des modes supplémentaires viendront se positionner dans les gaps (cas d'une hauteur trop importante) [10].

Comme pour les cristaux 2D de dimensions infinies, des gaps complets, c'est à dire pour les deux polarisation peuvent exister, mais ceux-ci ne pourront pas entièrement couvrir tous les angles d'incidence. Des travaux ont montré que l'on peut obtenir un gap complet pour les deux polarisations TM et TE pour des angles d'incidences allant jusqu'à 85° [22], mais une bande interdite couvrant totalement l'ensemble des angles d'incidence possibles ne sera obtenue que par le passage à une vraie périodicité tridimensionnelle.

II.6. Cristaux BIE 3D.

II.6.a. Introduction

Depuis les premières études sur les cristaux à bandes interdites électromagnétique 3D (BIE) par Eli Yablonovitch [23], plusieurs structures ont été développées en vue d'obtenir une bande interdite complète, c'est à dire pour n'importe quel position du vecteur d'onde. Malgré certains doutes sur son existence par l'éditeur de *Nature* [24] en 1990, l'existence d'une bande interdite 3D complète fut effectivement démontrée la même année par Ho, Chan et Soukoulis [25]. Des bandes, dont le rapport largeur de bande interdite sur sa fréquence centrale vaut 15 et 29% respectivement pour des sphères de diélectrique dans de l'air et des

sphères d'air dans un milieu diélectrique y ont été décrites. Ces valeurs ont été obtenues pour un rapport d'indice de 3.6 en positionnant ces sphères sur les nœuds d'un réseau 3D de type diamant, structure à la base dérivant du réseau cubique face centrée (CFC).

Ce dernier réseau fait parti d'une famille de cristaux qui ont historiquement été classés en 14 grands types par Auguste Bravais au cours du 19^{ème} siècle. Ces différents réseaux, portant le nom de leur auteur, permettent de représenter la périodicité de la distribution atomique d'un cristal. Ils sont notamment définis par des mailles primitives, représentant le motif d'atomes le plus simple d'un cristal, répétées infiniment dans toutes les directions. Ces classifications de réseaux ont été reprises par la communauté électromagnétique (et photonique) à cause de la similarité évidente entre un cristal présentant une répartition périodique de ces atomes et un cristal BIE.

A ce jour, la plus grande bande interdite 3D jamais étudiée est la structure constituée de tiges cylindriques dont les points de connexions se trouvent sur les nœuds du motif en diamant [26]. Pour des tiges de permittivité 12.96, le rapport largeur de bande sur fréquence centrale atteint la valeur record de 30% pour ce rapport d'indice (Figure I-16).

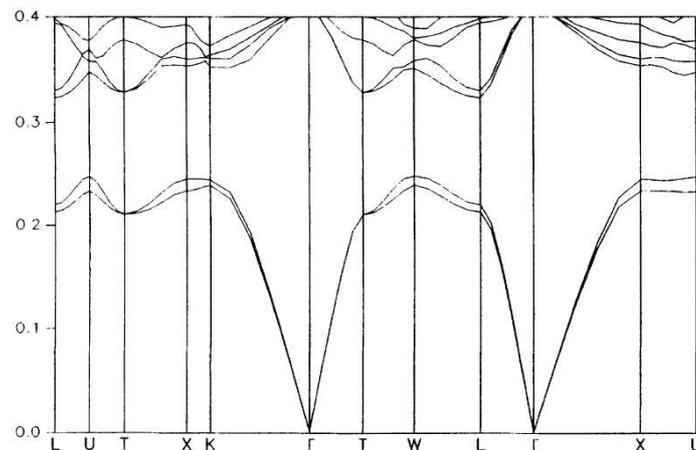


Figure I-16. [26] Diagramme de bande de la structure *A7* dont une représentation schématique est donnée.

Cependant cette structure est très délicate à réaliser et une plus grande attention s'est portée sur son inverse, à savoir une structure composée de tiges d'air dans un milieu de permittivité plus forte, mais montrant tout de même une bande de 28%. La fabrication d'un cristal se rapprochant de la configuration diamant a été proposée grâce au perçage d'un bloc de plexiglas selon trois angles différents de $35,26^\circ$ par rapport à la verticale. Ce cristal basé

sur la configuration CFC fut réalisé par Eli Yablonovitch [27]. Ce premier cristal 3D jamais réalisé est connu aujourd'hui sous le nom de *Yablonovite* (Figure I-17).

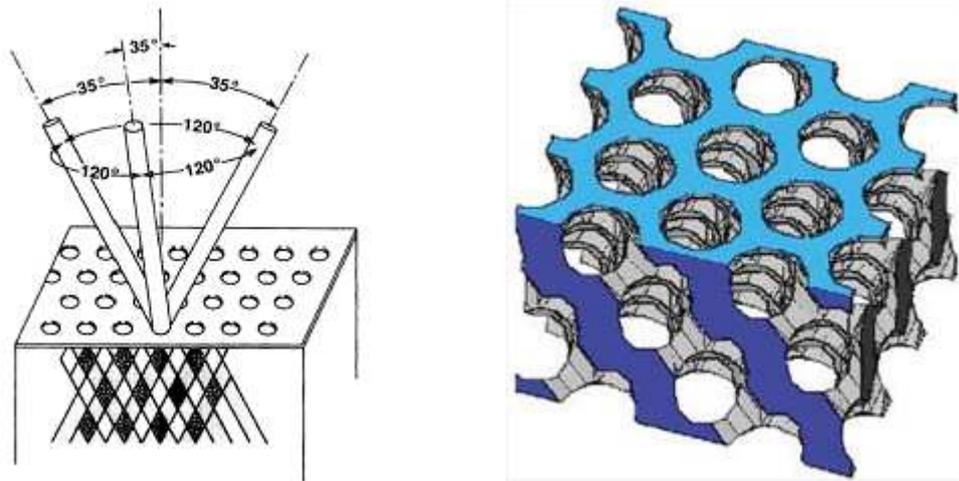


Figure I-17. [27] Principe de réalisation de la *Yablonovite* et structure 3D résultante.

Ce fut le premier cristal électromagnétique possédant une bande interdite complète. Parce qu'il ne partage que certaines caractéristiques structurales avec le réseau de type diamant, il présente une bande de « seulement » 19% pour un rapport d'indice de 3.6.

Dans ses travaux, Eli Yablonovitch souligna qu'une telle structure déviant légèrement de la configuration fixe du diamant garde tout de même une bande interdite très large. Il peut alors être intéressant de modifier ce motif fixe pour obtenir de nouveaux cristaux électromagnétiques.

A partir de cette observation cruciale, de très nombreuses structures issues du réseau de type diamant ont été proposés [28-32] qui permettent d'obtenir des bandes interdites complètes supérieures à 20% pour un rapport d'indice de l'ordre de 3.6.

La Figure I-18 présente le cristal 3D basé sur le réseau de type diamant $\langle 110 \rangle$ par l'équipe du Pr. Joannopolous [28]. Ce cristal a été particulièrement étudié pour être facilement réalisable par des techniques de lithographie.

Il est composé de trous d'airs placés dans un bloc de Silicium. Pour un contraste d'indice de 3.48, ce cristal présente une bande interdite complète de 23%

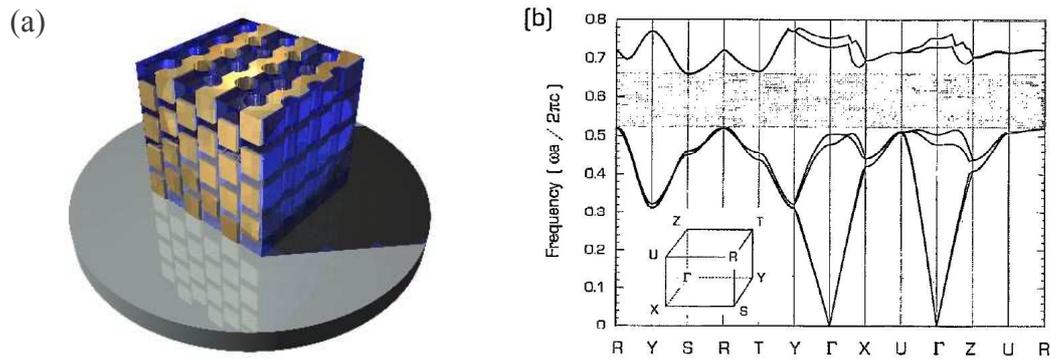


Figure I-18. (a) Cristal 3D présenté dans [28] basé sur le réseau de type diamant $\langle 110 \rangle$. (b) Diagramme de bande.

La Figure I-19 présente une autre structure imitant le réseau cristallin du diamant [29]. Le principe de ce cristal consiste à imiter le placement des atomes dans un tel réseau par des séquences alternatives de tiges rectangulaires de diélectrique, le tout baignant dans l'air. Pour un rapport d'indice de 3.6, ce cristal produit une bande interdite de 26%.

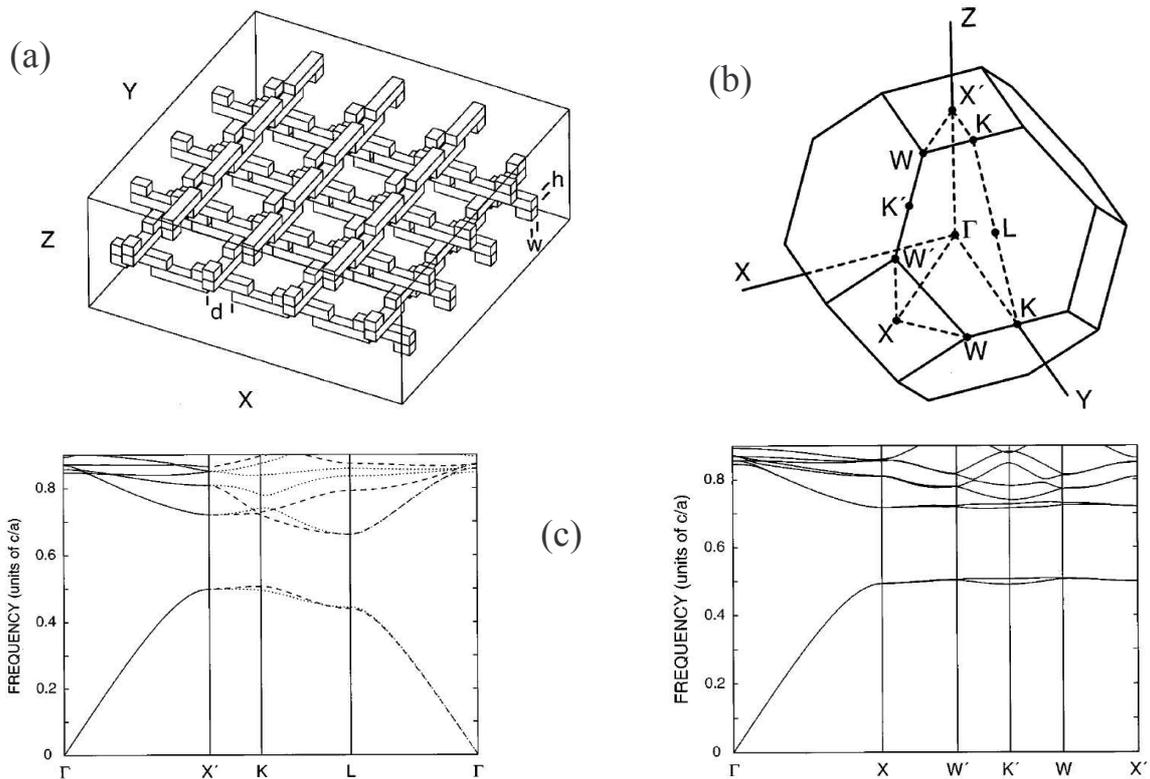


Figure I-19. (a) Cristal 3D présenté dans [29] et sa première zone de Brillouin (b). (c) Diagramme de bande.

Chutinan et Noda ont montré que des structures de type spirale apparaissent dans la configuration cristalline d'un diamant. Ainsi, en positionnant des éléments ayant la forme de ces spirales selon un réseau cubique, cubique centré ou cubique face centrée, on peut réussir à recréer un motif de type diamant [30] : Figure I-20(a). Ils proposèrent sur cette base un tel assemblage suivant le motif cubique centré (Figure I-20 (b)) qui a permis d'obtenir une bande interdite de 28% pour un rapport d'indice de 3.5.

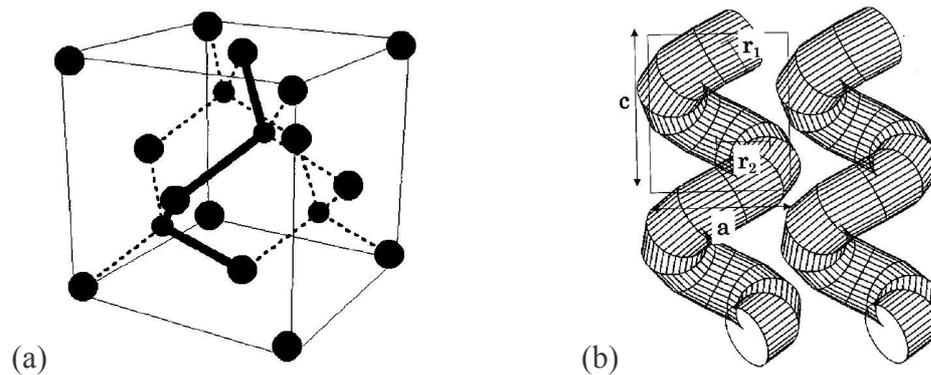


Figure I-20. [30] (a) Un élément de type spirale apparaît lorsque qu'on regarde une maille cristalline élémentaire d'un diamant. (b) Eléments unitaires en forme de spirale qui, associés suivant un motif précis, donne un cristal à bande interdite.

Une autre structure 3D originale a été proposée par Johnson et Joannopoulos en 2000 [31]. Celle-ci présente la particularité d'être une superposition de deux structures 2.5 D, l'une direct (tiges de Silicium dans de l'air) et l'autre indirecte (trous d'air dans un bloc de Silicium) . Assemblées comme sur la Figure I-21, la structure présente une bande interdite de 21% pour un rapport d'indice de 3.46.

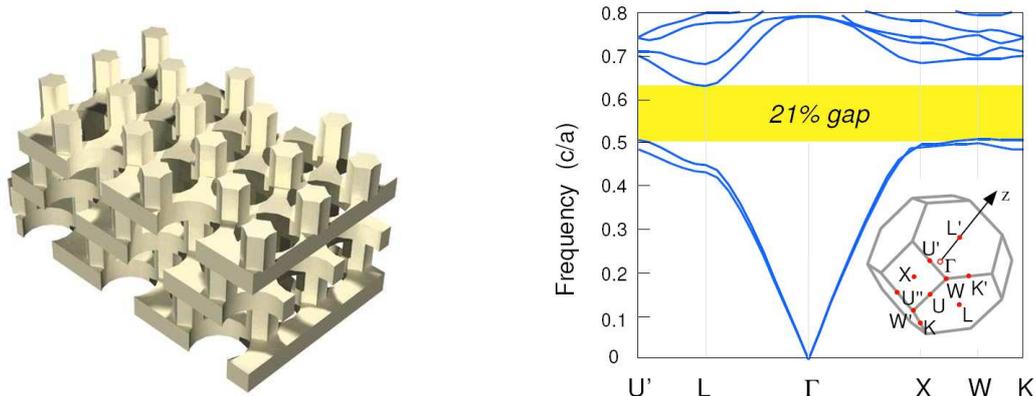


Figure I-21. [31] Cristal 3D et son diagramme de bande. La première zone de Brillouin est aussi visible.

Cette dernière fut réalisée quatre ans plus tard par lithographie [32]. La bande interdite expérimentale observée était en accord avec celle prédite par le calcul autour de la longueur d'onde de $1.3 \mu\text{m}$. La Figure I-22 montre une vue rapprochée de la structure et sa réponse en fréquence pour différents angles de l'onde incidente.

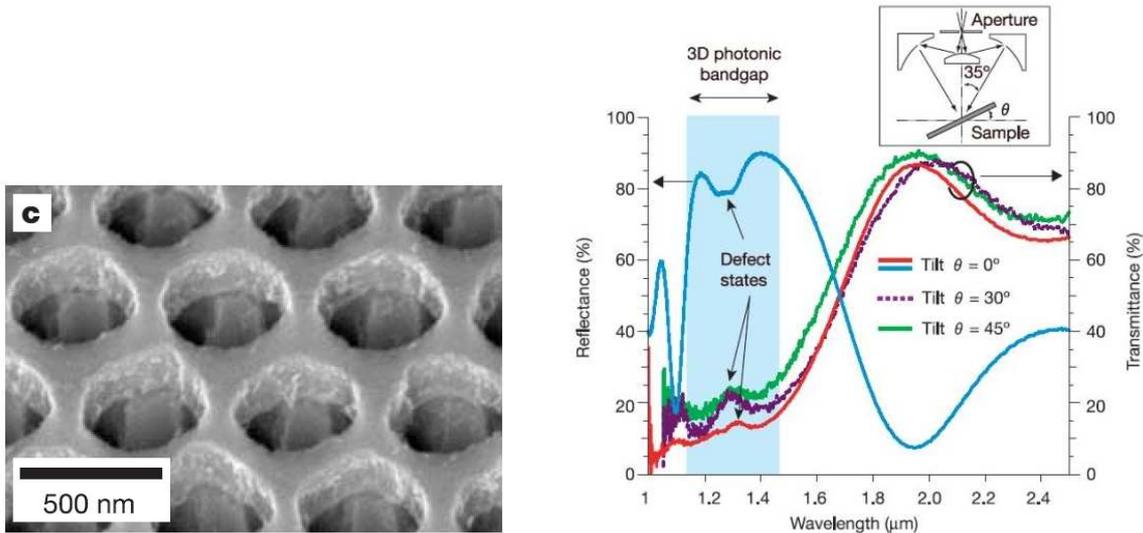


Figure I-22. [32] Vue au microscope électronique à balayage de la structure 3D issue de [31] et réponse en fréquence suivant différents angles d'incidence.

Une dernière structure pertinente attire beaucoup d'attention, celle connue sous le nom d'opale inversée [33]. Elle se compose, à l'inverse de l'opale naturelle, d'un assemblage 3D de trous d'air entourés de veines de diélectrique (Figure I-23).

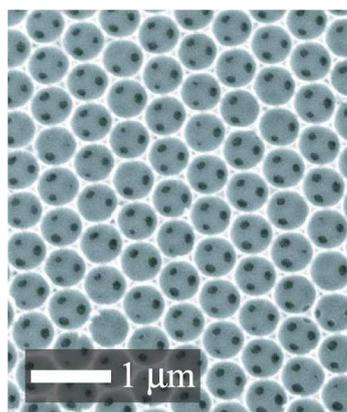


Figure I-23. Structure 3D dites en opale inversée.

Cette structure a été largement étudiée pour les nombreuses méthodes fabrication qui peuvent être mises en place pour sa réalisation. On peut noter classiquement la fabrication par

empilement de sphères de tailles micrométriques qui servent d’empreinte inverse à la structure finale. En effet l’empilement de ces sphères, tendant naturellement vers une organisation en réseau cubique face centrée, est englobée dans un diélectrique et une fois celles-ci éliminées, on récupère la structure d’opale inversée [34, 35, 36]. Pour un contraste d’indice de 3.75 (Silicium), une bande interdite de l’ordre de 4.25% est créée [33].

La plupart des structures 3D sont très délicates à réaliser par des technologies de fabrication classiques. Cependant, parmi ces structures, une a retenue plus particulièrement notre attention. Celle-ci appelée « couches-par couches » (layer-by-layer) [37] ou encore « tas de bois » (woodpile) [38] (Figure I-24). Apparue en 1994, elle se compose d’un empilement régulier de tiges de sections circulaires ou rectangulaires disposées selon un réseau cubique face centrée.

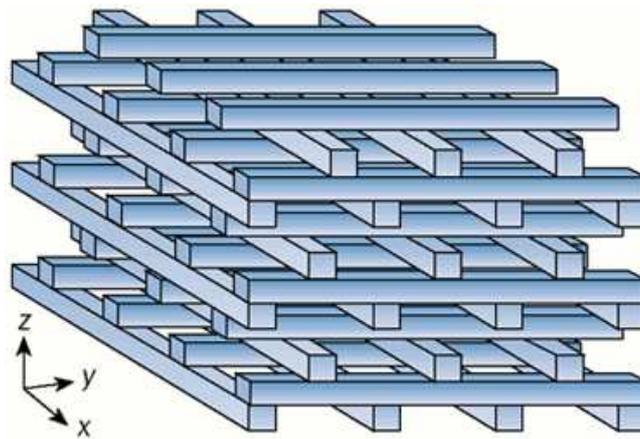


Figure I-24. Le cristal 3D en tas de bois.

Comme nous le verrons dans le paragraphe suivant, elle possède notamment le double avantage de présenter des performances électromagnétiques intéressantes et d’être réalisable par des techniques abordables.

II.6.b. Etudes expérimentales menées sur le tas de bois.

La structure en tas de bois ne correspond pas tout à fait à la structure cristalline du diamant mais l’imite suffisamment pour présenter une large bande interdite totale.

Les premiers tests expérimentaux parus en 1994 ont été effectués par assemblage manuel de tiges d'alumine (permittivité égale à 9) de 3.18 mm de diamètre. Le tas de bois ainsi construit présentait une bande interdite de 12% autour de 13 GHz [39] (Figure I-25).

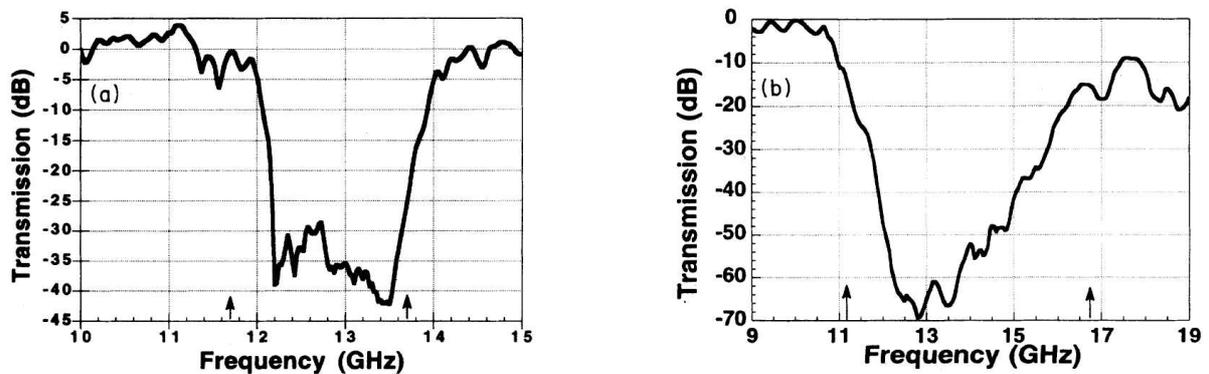


Figure I-25. [39] (a) Transmission au travers du cristal photonique le long de son axe x, (b) et de son axe z d'empilement. Les axes sont les mêmes que sur la Figure I-24.

Cette première méthode d'assemblage présente évidemment des limites concernant la montée en fréquence d'une telle structure au delà de 20GHz là où les tiges commencent à devenir délicates à manipuler. Une autre méthode d'assemblage fut présentée deux ans plus tard en recourant à l'empilement de plaques d'alumine de $400 \mu m$ d'épaisseur [40] visibles sur la Figure I-26. Celles-ci étaient préalablement micro-usinées par laser et permettait d'obtenir une bande interdite de 11% bien plus haut en fréquence autour de 95 GHz.

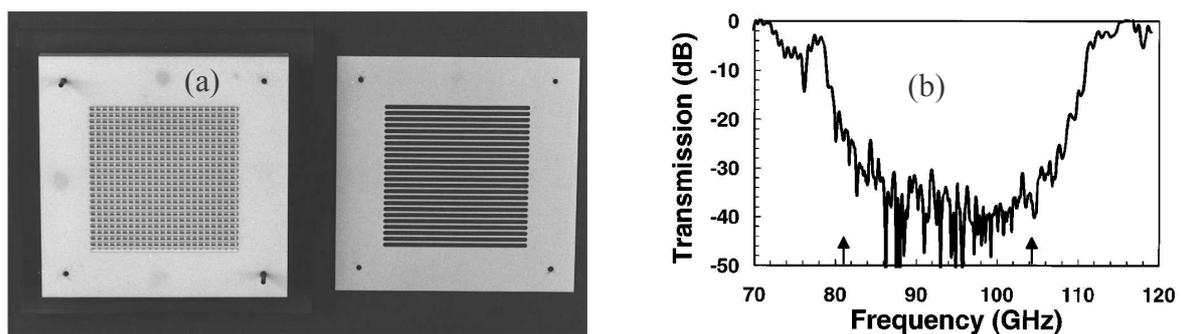


Figure I-26. [40] (a) Plaques d'alumine micro-usinées (b) Paramètre de transmission le long de l'axe d'empilement du tas de bois (Oz).

Néanmoins l'utilisation de wafers de Silicium micro-usinés a été préférée pour pouvoir atteindre des bandes interdites au delà de 100 GHz grâce aux précisions d'usinage amenées par les technologies liées au Silicium [40]. La technique utilisée ici a été la gravure

humide au KOH et l'empilement de ces différents wafers pour reconstituer entièrement le cristal comme montré sur la Figure I-27 (a). Ainsi une large bande interdite a été mesurée autour de 450 GHz comme visible sur la Figure I- 27 (b).

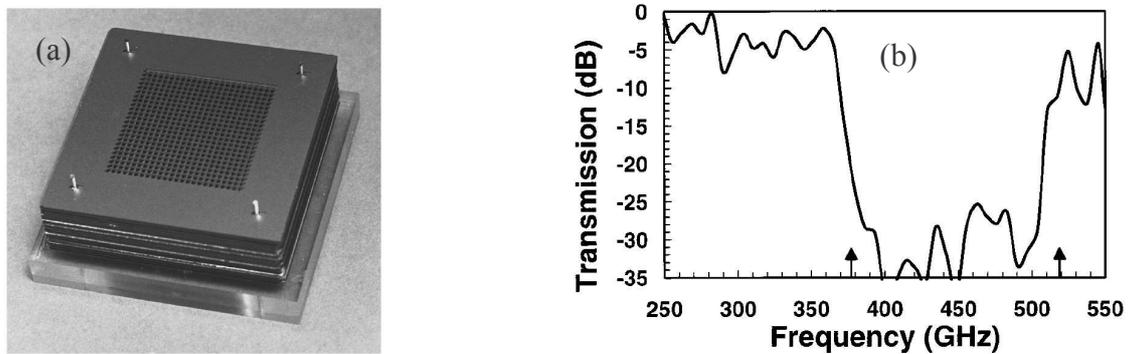


Figure I-27. [40] (a) Empilement des wafers de Silicium micro-usinés. (b) Transmission le long de l'axe d'empilement du tas de bois.

La précision d'empilement sera ici un facteur déterminant quant au respect de la configuration du cristal 3D, tout désalignement risquant de modifier cette dernière et ainsi de dégrader ses performances.

Une autre méthode de fabrication sur Silicium a plus tard été présentée dans [41]. Faisant appel à la technique de gravure sèche DRIE (Deep Reactive Ion Etching) et à une automatisation de la découpe des éléments présents par wafers et de leur assemblage, une bande interdite complète a été obtenue autour de 450 GHz comme montré Figure 28.

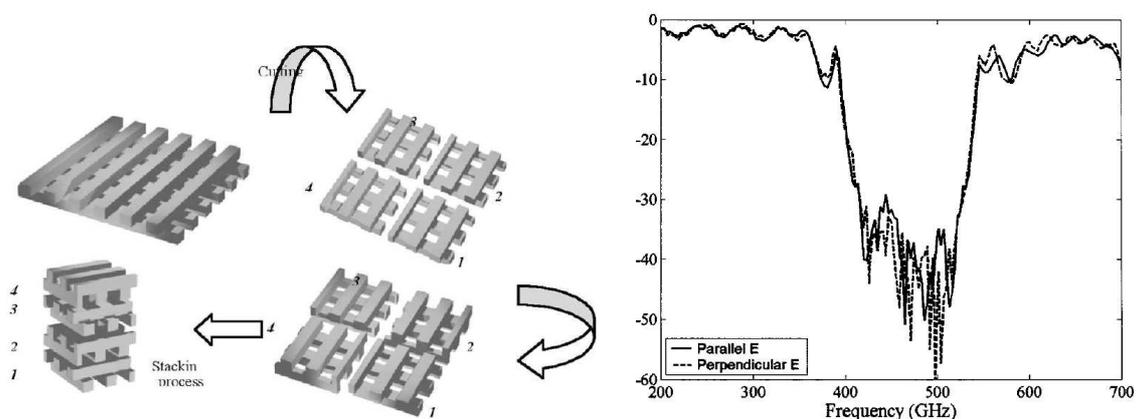


Figure I-28. [41] Description de la procédure d'assemblage du tas de bois et paramètre de transmission suivant l'axe d'empilement du tas de tas pour deux polarisations de champ E.

La découpe faisant appel à des disques diamantés très fins se fait à des précisions de $\pm 5 \mu m$ et produit une rugosité de l'ordre de $2 \mu m$.

D'autres technologies comme celle appelée Solid Freeform Fabrication ont été utilisées pour réaliser un tas de bois présentant une bande interdite à haute fréquence [42]. Cette technique utilise la stéréolithographie 3D afin de réaliser un moule en résine. Ce moule est ensuite rempli de pâte d'alumine. Pendant la cuisson, le moule est pyrolysé et la structure 3D céramique est récupérée (Figure 29 (a)) avec de bonnes précisions de fabrication de l'ordre de $20 \mu m$. Une bande interdite autour de 100 GHz a ainsi été mesurée (Figure I-29 (b)).

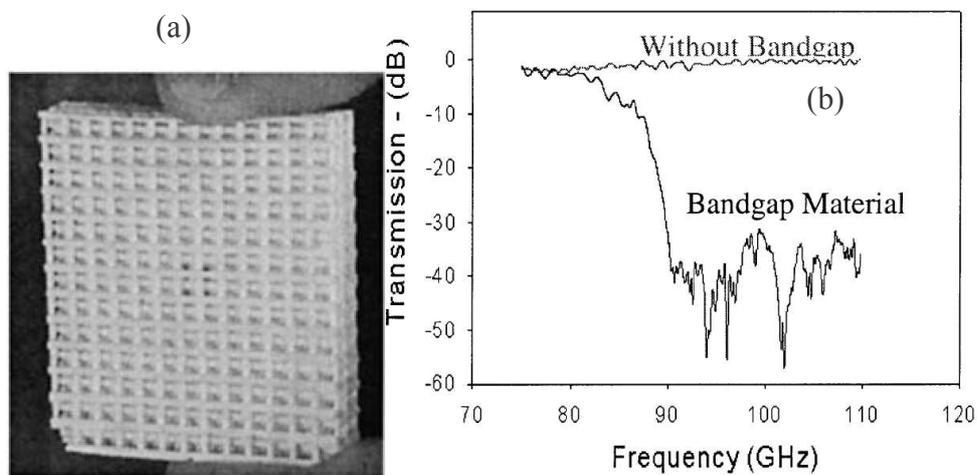


Figure I-29. [42] (a) Tas de bois 3D en alumine. (b) Paramètre de transmission suivant l'axe d'empilement.

Après avoir décrit décrits les structures 3D BIE existantes et plus en particulier celles réalisées dans le domaine des ondes millimétriques, nous allons nous intéresser aux applications actuellement basées sur ce type de structures périodiques. Nous verrons que dans de nombreuses études expérimentales, le cristal 3D en tas de bois a été prépondérant.

II.7. Applications reposant sur les cristaux BIE.

II.7.a. Cavité résonante.

Les premières applications de ces cristaux 3D ont concerné la création de cavités résonantes. En effet en rompant ponctuellement la périodicité du cristal, un défaut est créé et

devient le siège d'une résonance de cavité qui, si elle est bien dimensionnée, fait apparaître un pic de transmission dans la réponse en fréquence [43] (Figure I-31). Ce pic apparaissant dans la bande interdite du matériau, il peut être relativement bien isolé en terme de fréquence si la bande interdite est suffisamment large.

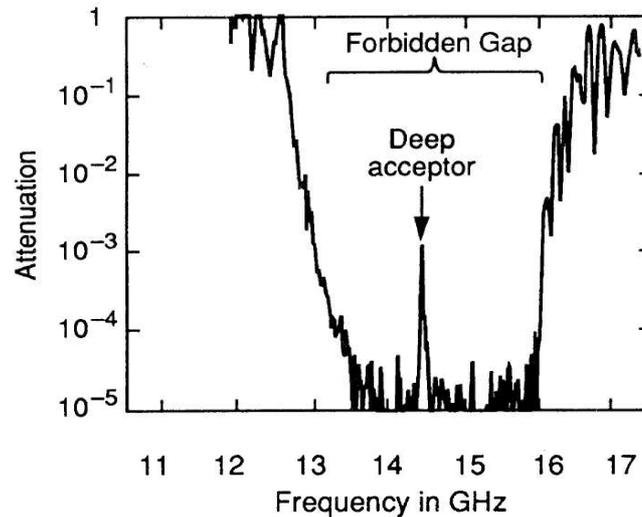


Figure I-30. [43] Pic de transmission d'un défaut ponctuel placé au sein de la Yablonovite.

Cette propriété a d'ailleurs été largement observée dans différents cristaux photoniques et plus expérimentalement dans les cristaux de type tas de bois [40]. Pour cela, dans un empilement de 16 wafers présentant chacun un étage d'un tas de bois, un défaut localisé a été introduit dans le huitième wafer. Ce défaut consiste simplement en une diminution de la longueur d'une des tiges présentes sur ce huitième wafer, créant ainsi une cavité d'air localisée en plein centre du cristal. La Figure I-31 présente la réponse en transmission donnée par une telle structure.

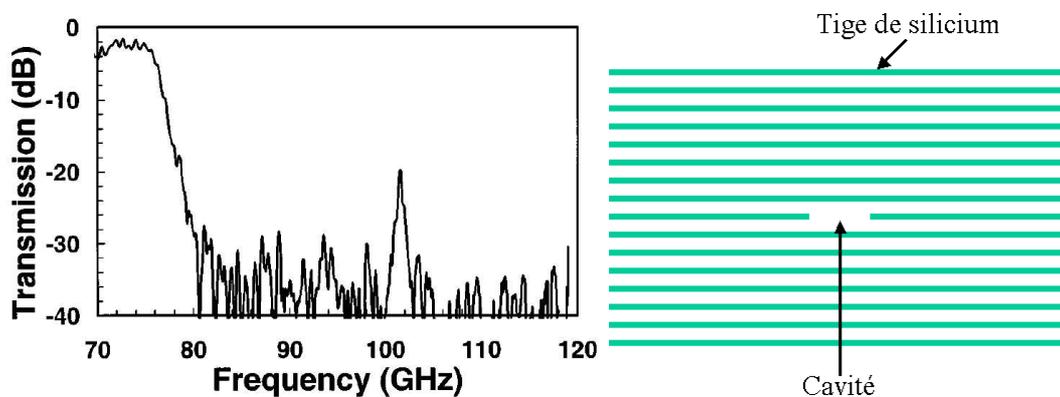


Figure I-31. [40] Réponse en transmission d'un tas de bois, composé d'un empilement de 16 wafers micro-usinés, présentant un défaut en son centre.

Le facteur de qualité à vide mesuré est de l'ordre de 250. Cette valeur relativement faible est due en grande partie à la tangente de perte du Silicium qui est assez forte (~ 0.002). Les dimensions de la cavité résultante ne sont pas données dans [40], mais celles-ci ont été ajustée pour donner une fréquence de résonance dans la bande interdite du cristal 3D.

Ozbay a de plus avancé dans [44] que le facteur de qualité à vide d'une telle cavité était directement dépendant du nombre d'étages de tas de bois placés en dessus et en dessous de la cavité. Ses calculs donnent des valeurs supérieures à 10^6 pour un tas de bois composé de 32 wafers et dont la cavité est située sur le seizième. Néanmoins de telles valeurs n'ont pas été atteintes.

Il est à noter que le même principe peut être appliqué à des structures bidimensionnelles. Par exemple en créant un défaut dans un réseau 2D comme celui réalisé dans [42], une cavité résonante fonctionnant dans la bande interdite du matériau BIE (Figure I-32) est obtenue.

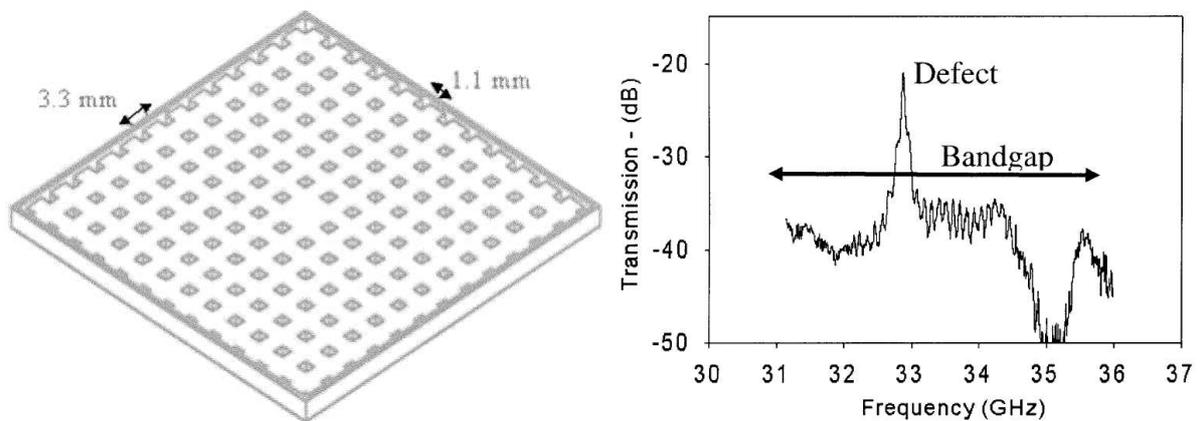


Figure I-32. [42] Cristal 2D composé de trous d'air dans un substrat d'alumine et sa réponse en transmission.

Ce cristal 2D se compose d'un réseau de trous d'air dans un substrat d'alumine. Au centre de la structure, le défaut donne naissance à une résonance de cavité située dans la bande interdite. Le facteur de qualité à vide de cette cavité a été mesuré aux alentours de 920. La cavité présente une taille de 5.5 mm par 5.5 mm par 1 mm et est disposée au milieu de la structure 2D de dimensions 40 mm par 40 mm par 1 mm de hauteur.

II.7.b. Guide d'onde.

La création d'un défaut linéique, applicable de la même manière avec des cristaux 2D et 3D, permet de confiner les ondes électromagnétiques au sein du défaut. Sous certaines conditions de dimensions et d'excitations, il est alors possible de guider une onde EM sur toute la longueur du cristal. Ce guidage n'a lieu que sur des bandes de fréquence à l'intérieur de la bande interdite du matériau.

La capacité d'une structure tas de bois à guider des ondes électromagnétiques a été démontrée expérimentalement en 1999 [45].

La façon la plus simple et courante de créer un guide dans un tas de bois consiste à enlever une de ses tiges et à injecter de l'énergie dans ce défaut linéique traversant le cristal de part en part [46, 47, 48].

La Figure I-33 présente un guide droit simple qui revient à enlever une des tiges de l'empilement.

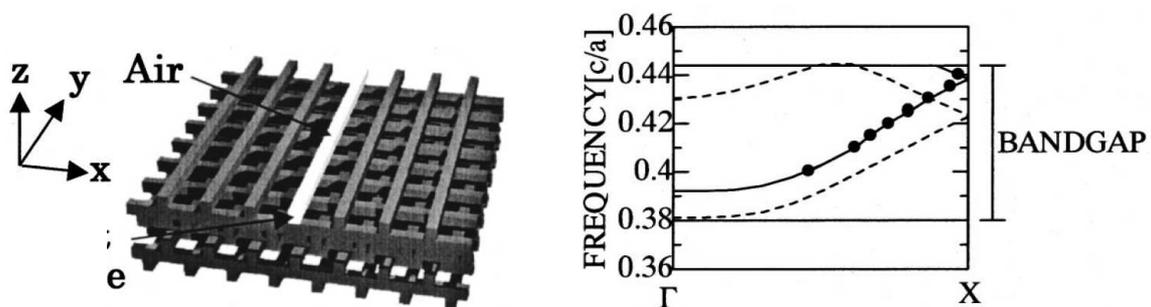


Figure I-33. [46] Structure guidante dans un tas de bois et diagramme de bande associé. La ligne épaisse correspond à l'évolution fréquentielle du mode guidé suivant les différentes positions du vecteur d'onde.

Le diagramme de bande montre qu'un mode de guide apparaît et existe dans toute la bande interdite de fréquence.

La structure tas de bois se prête également à la réalisation de coudes [46], ce concept ayant été validé expérimentalement dans [47], ainsi que la possibilité de créer sur le même principe des diviseurs de puissance.

La Figure I-34 montre le résultat obtenu pour un tas de bois d'alumine dans lequel deux tiges orthogonales ont été enlevées afin de réaliser un guide coudé.

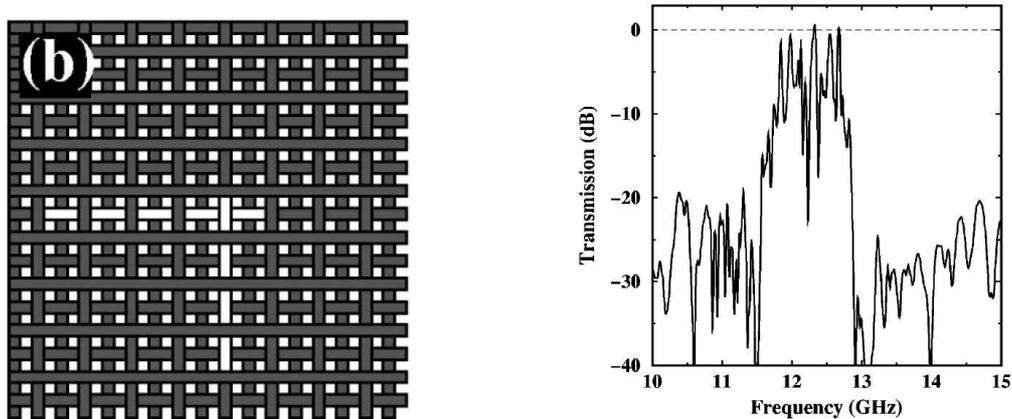


Figure I-34. [47] Guide à angle droit réalisé dans un tas de bois et son paramètre de transmission associé.

Dans la référence [48], il apparaît clairement que les configurations de guides amenées par certaines tiges manquantes sont moins efficaces que d'autres. Il devient alors évident qu'une grande attention doit être donnée à la forme, à la taille et au positionnement d'un tel guide dans un tas de bois afin de maximiser son efficacité en vue d'obtenir les meilleurs coefficients de transmission possible.

De même l'adaptation entre les sources d'excitation incidentes, généralement des guides d'ondes rectangulaires, et le guide dans le tas de bois peut se révéler extrêmement dégradée et nécessite des solutions spécifiques comme montrées sur la Figure I-35 [49].

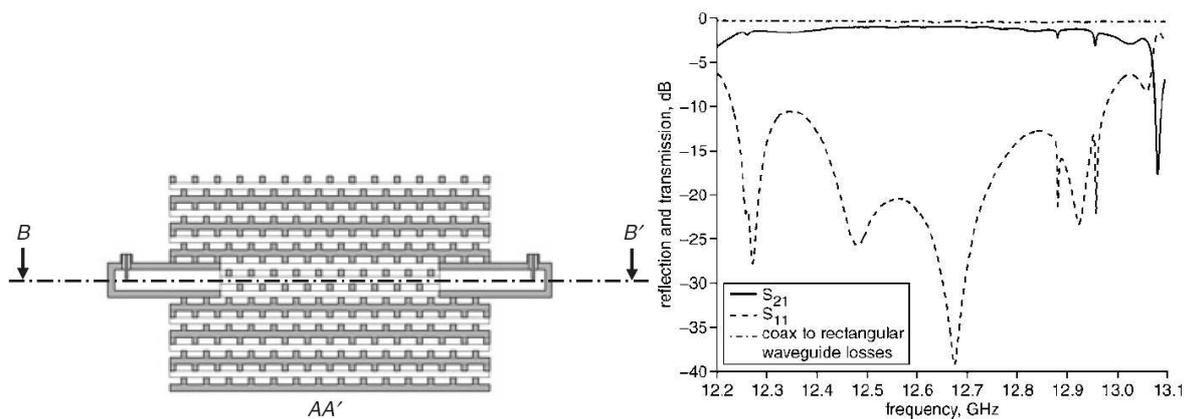


Figure I-35. [49] Guide droit dans un tas de bois d'alumine et ses paramètres S.

Ici des portions de guide rectangulaires ont été insérées directement dans le cristal 3D afin de limiter les pertes par désadaptation. Un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB est

assuré sur une bande de 760 MHz (6%) autour de 12.6 GHz, le cristal 3D présentant une bande interdite de 14.4% autour de cette même fréquence.

Les propriétés particulières de ces cristaux BIE 3D ont permis la conception et la réalisation de structures guidantes originales, tirant notamment partie de la présence d'une bande interdite omnidirectionnelle.

II.7.c. Autres structures guidantes.

En se basant sur les précédents types de guides présentés, certaines études ont fait évoluer ce concept de guidage initial.

Une de ces études a par exemple tiré partie de la troisième dimension en ne se contentant plus de guides restant dans un plan horizontal, orthogonal à l'axe z d'empilement des étages du tas de bois. Dans la référence [50], le recours à des guides verticaux, voire à des antennes cornets directement intégrés dans le cristal 3D a été étudié. Le schéma de principe de cette antenne de forme pyramidale est présentée sur la Figure I-36. Le tas de bois utilisé est réalisée par l'assemblage manuel de tiges d'alumine présentant une section carrée de 3 mm de côté, le cristal occupant une taille globale de 61 cm par 15.2 cm par 6.4 cm.

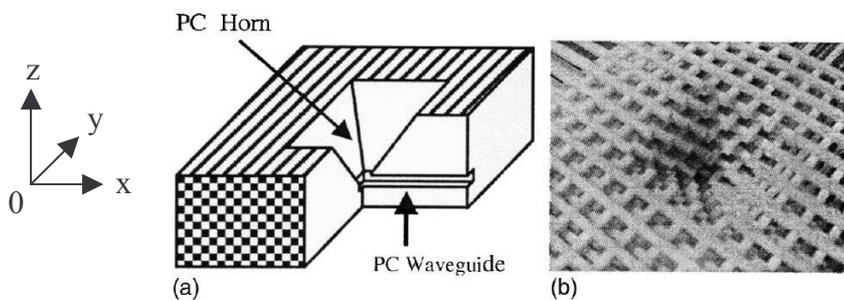


Figure I-36. [50] (a) Schéma de principe du tas de bois à cornet intégré. (b) Photographie du tas de bois réalisé.

Le cornet est simplement réalisé un modifiant l'empilement des tiges d'alumine comme nous pouvons le voir sur la Figure I-36 (b). Trois réseaux de guides particuliers, montrés sur la Figure I-37, ont été étudiés.

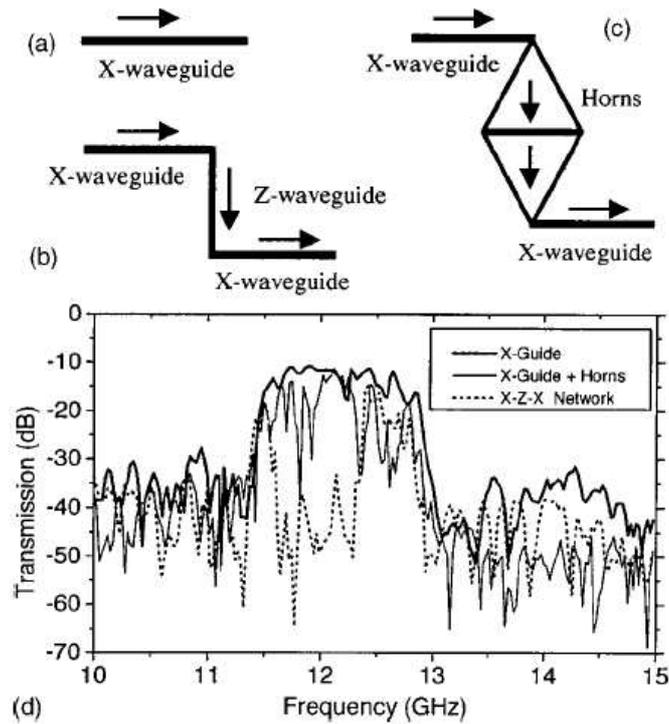


Figure I-37. [50] Paramètre de transmission pour les trois configurations de guide testées.

Le guide de la Figure I-37 (a) est un guide droit classique (noté X-waveguide) traversant horizontalement le cristal 3D. Ce guide est créé par le retrait d'une tige traversant toute la longueur du tas de bois. La Figure I-37 (b) est constitué d'un réseau de guide horizontaux et d'un guide vertical (noté Z-waveguide). Le troisième réseau considéré présent sur la Figure I-37 (d) relie deux guides de type X par l'association de deux antennes cornets.

Il apparaît que la configuration utilisant les antennes cornets se révèle aussi bonne, voire meilleure en ce qui concerne la largeur de bande passante, qu'un guide droit. Cette étude permet alors d'ouvrir des perspectives de réseaux de guides d'ondes très complexes utilisant totalement les propriétés et les trois dimensions d'un cristal BIE 3D.

Une autre étude [51] s'est focalisée sur la cohabitation de cristaux périodiques bi et tri-dimensionnels comme montré sur la Figure I-38. Ici, un cristal 2D constitué d'un réseau périodique carré de tiges est inséré entre deux cristaux BIE de type tas de bois. Un guide d'ondes est créé dans le cristal 2D en retirant toute une rangée de tiges sur toute la longueur du cristal.

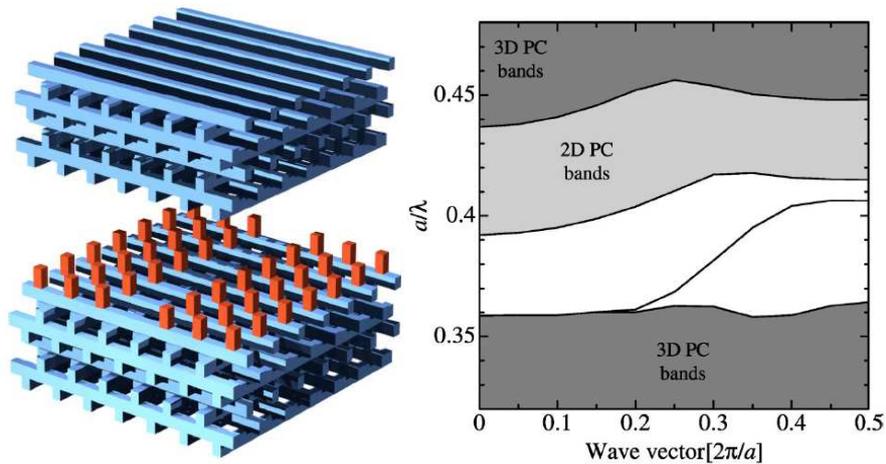


Figure I-38. [51] Guide d'onde dans un cristal 2D constitué d'un réseau périodique de tiges inséré dans un tas de bois. Le diagramme de bande de droite montre la superposition des bandes interdites présentées par ces deux cristaux.

Le pré-requis pour qu'une tel guide fonctionne est que les bandes interdites du cristal 2D et celles du tas de bois se recouvrent. Le diagramme de bande présent sur la Figure I-38 montre que, dans un tel cas, une bande interdite commune peut alors exister (zone en blanc sur le diagramme de bande). Si les dimensions du défaut permettent l'existence d'un mode guidé dans cette bande de fréquence commune, alors un tel mode sera effectivement guidé.

Comparée aux autres cristaux 3D envisagés dans [51], le tas de bois se révèle aussi bon voire meilleur en terme de bande passante. En effet, un guide basé sur un cristal 2D placé entre deux tas de bois donnerait théoriquement une bande passante de 10.5% tout en gardant un coefficient de transmission supérieur à 99%.

Le recours à ce type de guide peut être intéressant car la création de réseaux de guides dans un cristal 2D se révèle plus souple que dans un cristal purement 3D. Dans un tas de bois par exemple, il ne pourra exister que des guides droits ou à angle droit. Dans un cristal 2D à réseau carré, voire mieux à réseau triangulaire, les angles que des guides en forme de coude pourront présenter seront beaucoup plus nombreux. La création de réseaux de guides se trouvera alors beaucoup moins contraignante.

Cette structure de par sa complexité n'a pas encore été fabriquée. En effet, le cristal 2D présent au milieu du tas de bois rompt très fortement l'unité de ce cristal 3D. Or beaucoup des techniques de fabrication utilisées pour la réalisation de tas de bois réguliers ne permettent actuellement pas d'incorporer un tel défaut au centre du cristal.

Un grand secteur de recherche travaillant dans les bandes de fréquences microondes a depuis un certain nombre d'années tiré partie des propriétés de ces cristaux BIE. Ce domaine que nous allons maintenant aborder est celui des dispositifs rayonnants.

II.7.d. Applications dans le domaine des antennes.

Les premières applications à base d'antennes s'intéressant aux cristaux BIE se sont servies de ceux-ci comme substrat pour des antennes dipolaires [52]. Comme le montre la Figure I-39, le fait de remplacer le substrat d'accueil, habituellement un bloc de diélectrique homogène, par un cristal 3D comme la Yablonovite permet d'éliminer les rayonnements EM dans ce substrat, bien évidemment si la fréquence de rayonnement de l'antenne se situe dans la bande interdite du cristal.

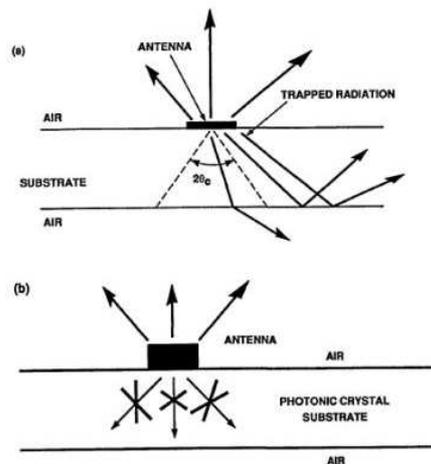


Figure I-39. [52] Le passage du substrat d'accueil d'une antenne dipolaire d'un bloc de diélectrique homogène (a) à un cristal BIE (b) permet d'éliminer les rayonnements au travers de ce substrat.

Les modes de surface, problèmes aussi rencontrés lors de l'utilisation de substrats standards, sont une source de pertes pour l'antenne et amènent la présence de lobes secondaires sur son diagramme de rayonnement. Or comme l'ont suggéré les études dans [10], un substrat en cristal BIE permet là aussi d'éliminer ce phénomène, permettant ainsi une optimisation du rayonnement de l'antenne posée à son sommet [53]. Un cristal 3D en tas de bois a récemment été utilisé pour cette propriété qui a permis de diminuer les couplages

parasites entre deux antennes dipolaires situées sur ce même substrat périodique 3D comme montré sur la Figure I-40 issue de [54].

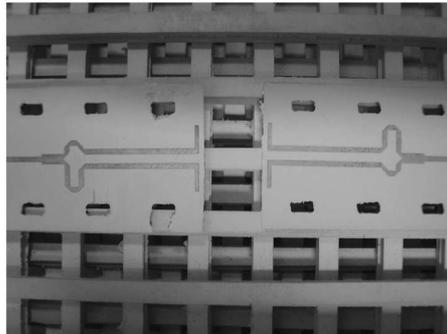


Figure I-40. [54] Le tas de bois est utilisé comme substrat d'accueil pour des antennes dipolaires.

Lorsque cette fois le cristal BIE est placé au dessus de l'élément rayonnant, une amélioration sensible du gain et de la directivité de cette antenne peut être atteinte. C'est ce qu'a démontré Thévenot *et al.* dans la référence [55] en positionnant un cristal BIE 1D au dessus d'une antenne de type patch.

La même étude a été réalisée en 2005 dans [56] en positionnant un tas de bois au dessus de ce même type d'antenne comme le montre la Figure I-41. Le gain obtenu par cette configuration est de 19 dB et la largeur de bande en puissance de 11.7° dans le plan E (11° dans le plan H).

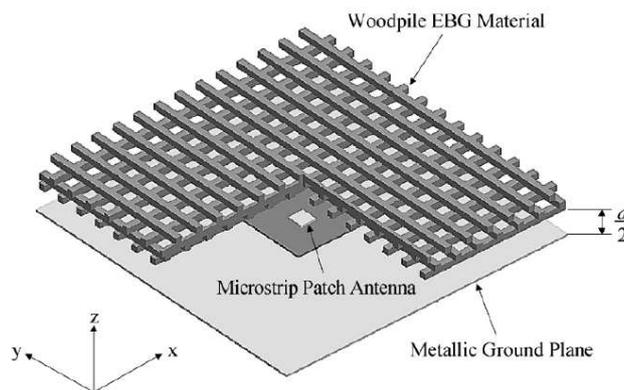


Figure I-41. [56] Antenne patch surmontée d'un tas de bois en alumine.

Enfin des antennes de type cornet directement formées par le tas de bois, peuvent être créées avec des formes pyramidales (voir Figure I-36) ou bidimensionnelles [57] comme sur

la Figure I-42. Ces dernières peuvent être associées en parallèle en une seule structure BIE 3D en les empilant les unes au dessus des autres.

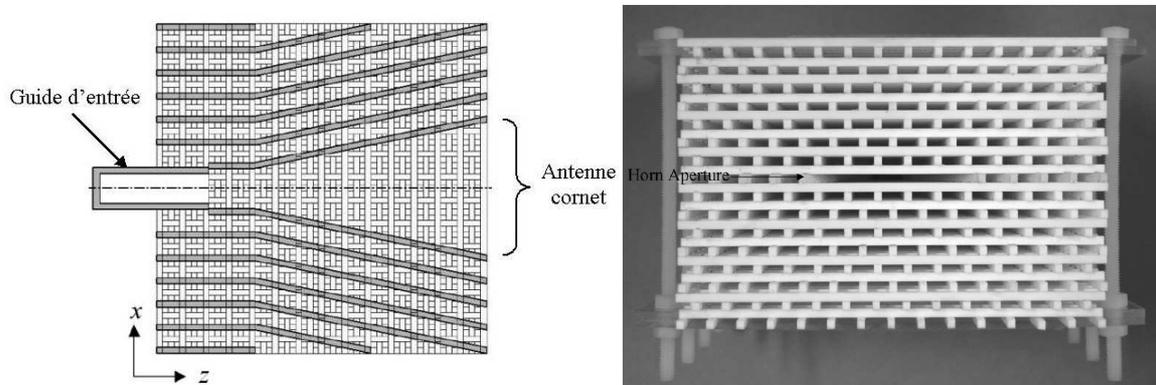


Figure I-42. [57] Antenne cornet directement formée dans un cristal de type tas de bois : (droite) vue en coupe, (gauche) après réalisation.

Ces réseaux d'antennes présentent l'avantage de réduire fortement le couplage mutuel entre elles par rapport à un empilement similaire d'antennes cornets de même dimensions mais métalliques [57].

Les applications de telles antennes réalisées en un seul cristal BIE diélectrique se destinent tout particulièrement à l'imagerie Terahertz où un de ces cornets pyramidaux peut servir de pixel de base à des détecteurs sensibles à ces longueurs d'ondes [58].

II.8. Conclusion

Les structures périodiques sont très étudiées théoriquement et expérimentalement depuis maintenant de nombreuses années. Présentant de fascinantes propriétés, certaines d'entre elles restent encore à approfondir. Un des objectifs de notre travail est d'utiliser ce type de structure en trois dimensions pour réaliser des fonctions de filtrage et de guidage aux fréquences millimétriques et dans l'avenir sub-millimétriques.

Comme nous le verrons par la suite, nous avons retenu la structure en tas de bois qui apparaît comme étant la structure présentant le meilleur compromis entre facilité de réalisation et performances électriques, compromis qui a d'ailleurs justifié son utilisation dans nombre d'études expérimentales comme nous l'avons vu.

Nous nous sommes jusque là attachés à ses performances électromagnétiques, performances sur lesquelles nous reviendrons par la suite. Dans le paragraphe suivant, nous allons maintenant nous intéresser aux différentes techniques applicables à sa réalisation.

III. Technologies appliquées à la fabrication de cristaux photoniques.

Ce paragraphe va permettre de faire un bilan des technologies les plus pertinentes pour la réalisation de cristaux à bandes interdites tridimensionnels.

III.1. Glancing Angle Deposition (GLAD)

Cette technique permet de faire croître sur un substrat des piliers de différents matériaux comme le Si ou le SiO₂. Pour cela, un wafer est exposé à un flux de vapeur de matière (Si, SiO₂, ...) collimaté [59]. Comme indiqué sur la Figure I-43, il serait alors possible, en imposant une rotation au wafer lors de la phase dépôt, de construire tout un réseau de spirales permettant de constituer des cristaux périodiques 3D comme proposé dans la référence [60].

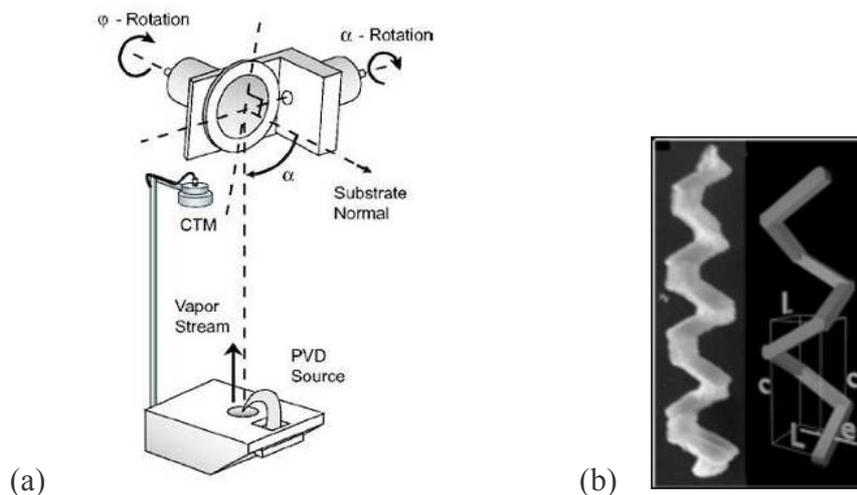


Figure I-43. (a) Principe de la technique de fabrication GLAD [59] (b) Spirales réalisables par cette technique [60].

Cette technique toujours en développement présente une précision de fabrication d'ors et déjà sub-micrométrique.

III.2. Micromanipulation par des nanorobots.

Cette technique repose sur l'utilisation de nanorobots capables par exemple d'assembler des microspheres de polystyrène et de silice selon un schéma cubique centré comme montré sur la Figure I-44 [61].

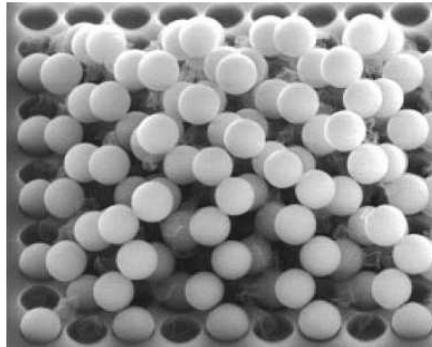


Figure I-44. [61] Assemblage de billes de silice par nanorobots. Chaque bille a un diamètre de $1.18 \mu\text{m}$.

Une sonde en verre nanométrique permet le placement des deux types de microspheres. Une fois celles-ci mises en place, les billes de polystyrène sont sacrifiées, laissant alors un arrangement de micro-billes de silice suivant un schéma de type diamant.

Le même type de nanorobots a été utilisé pour la réalisation de tas de bois [62]. Ici vingt plaques d'InP, chacune comportant un étage de tas de bois, ont été réalisées par des processus conventionnels de micro-usinage puis assemblées et alignées robotiquement pour former le cristal 3D montré sur la Figure I-45.

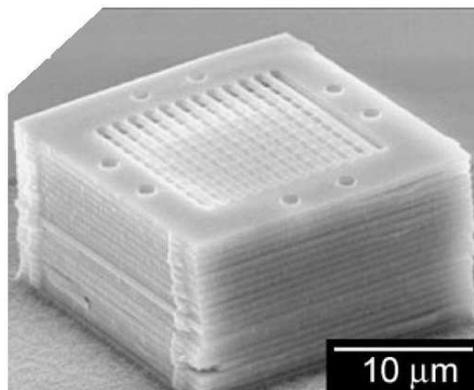


Figure I-45. [62] Tas de bois en InP assemblé par des nanorobots.

Bien que capable de précision d'assemblage sub-micrométrique, cette technique semble limitée à des échantillons de faible taille destinés avant tout à des recherches scientifiques.

III.3. Écriture directe.

Une autre technique prometteuse est celle permettant la réalisation en direct de structures 3D par « écriture » avec une encre constituée de polymères. Lors de la fabrication [63], des filaments de polymères conservant une forme cylindrique peuvent être déposés les uns sur les autres afin de réaliser un cristal en tas de bois par exemple comme montré sur la Figure I-46.

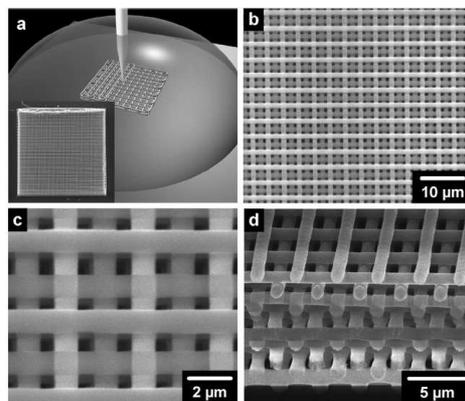


Figure I-46. [63] (a) Vue schématique du principe d'écriture directe. (b, c,d) Vue à différentes échelles du tas de bois en polymère.

Actuellement, la diamètre minimale de ces tiges est de $1 \mu m$. Comme pour tous les cristaux périodiques en polymères, l'indice de ces matériaux, généralement inférieur à 2, se révèle insuffisant pour l'ouverture de bandes interdites totales [63].

L'écriture directe par polymérisation de résines photosensibles par focalisation de deux faisceaux laser UV. Le monomère liquide présent dans la résine se durcit lorsque le laser vient l'exciter, lui donnant une consistance plus solide. Une fois le parcours du laser décrivant la structure 3D à réaliser terminé, le surplus de monomère liquide restant est enlevé [64]. Le résultat est visible sur la Figure I-47.

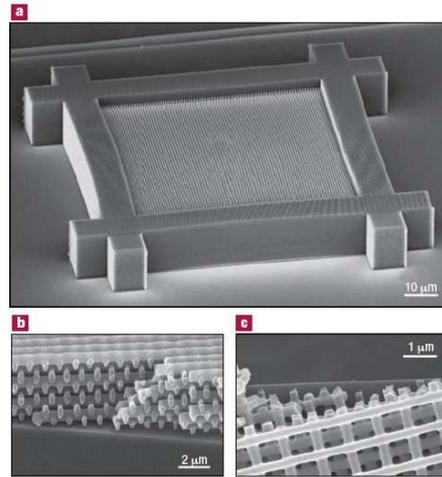


Figure I-47. [64] (a) Vue d'un tas de bois réalisé par écriture laser basée sur la technique de polymérisation à deux photons. (b) et (c) Vue rapprochée d'échantillons cassés.

La précision de cette technique est évaluée à 5 nm, mais la zone de travail ne peut faire plus de quelques centaines de micromètres de côté.

III.4. Lithographie holographique.

Le concept de cette technique proposée en 1997 par Berger *et al.* [65] consiste à écrire sur une résine photosensible, généralement de la Su-8, l'hologramme créé par les interférences de multiples sources de lumière. La Figure I-48 montre une structure périodique 3D basée sur le réseau cubique face centrée réalisée par cette technique dans [66]. La précision de fabrication atteinte est de quelques dizaines de nanomètres.

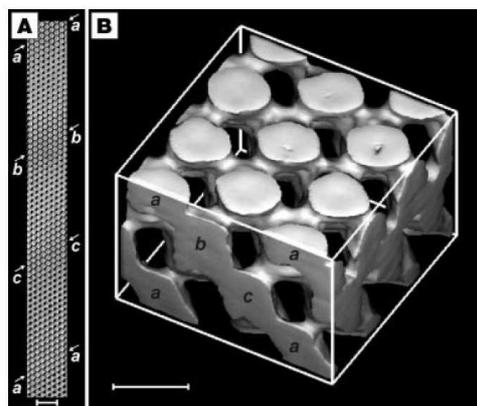


Figure I-48. [66] (a) Vue MEB de la face arrière du cristal fabriqué. L'échelle est de 2 μm .
(b) Reconstitution 3D du cristal ; l'échelle est de 500 nm.

De nombreuses études se penchent actuellement sur cette technique afin d'utiliser notamment des résines à plus fort indice de réfraction pour pouvoir obtenir des bandes interdites complètes.

III.5. Lithographie classique.

Utilisée depuis de nombreuses années par l'industrie micro-électronique, cette technologie peut créer des structures de grande complexité. Elle s'est ainsi révélée tout à fait adaptée pour la création de cristaux à bande interdite 3D comme dans la référence [32] ou encore dans [67].

Le processus utilisé par ces deux études repose sur une succession de cycles de lithographie, de gravure sèche et humide, d'aplanissement par attaque chimique et de croissance séquentielle de films de Si, SiN et SiO₂.

Le résultat obtenu dans [67] quant à la réalisation d'un tas de bois est présenté dans la Figure I-49.

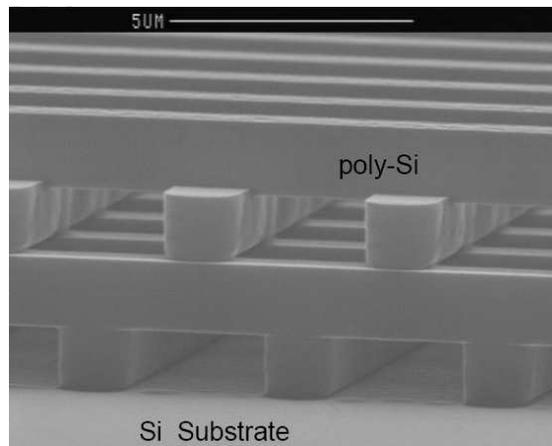


Figure I-49. [67] Vue MEB rapprochée d'un tas de bois réalisée par lithographie. Chaque tige fait $1.2 \mu\text{m}$ sur $1.6 \mu\text{m}$ et sont séparées de $4.2 \mu\text{m}$.

Les précisions de fabrication peuvent être inférieures à la centaine de nanomètres et la structure réalisable peut aisément faire quelques centimètres de côté.

Associé au fait que des matériaux comme le Silicium ou l'AsGa qui présentent des indices de réfraction supérieurs à 3.5 sont utilisés, cette technique aujourd'hui très bien maîtrisée se révèle être une des meilleures solutions pour la fabrication de cristaux BIE 3D pouvant fonctionner des les longueurs d'onde millimétriques.

Notons tout de même que l'assemblage de structures composées d'un grand nombre de couches différentes peut être problématique aux vues des dimensions mises en jeu. Il peut alors être nécessaire d'utiliser des technologies très précises d'alignement et de placement automatisés comme celle utilisée par Gonzalo *et al.* dans [41].

A ce point de cette recherche bibliographique sur les techniques de fabrication, il apparaît que la plupart des techniques couramment utilisées pour la réalisation de cristaux BIE 3D utilise des matériaux à faible indice de réfraction. A part la lithographie classique qui utilise typiquement des semi-conducteurs dont l'indice de réfraction est proche de 3.5, la plupart des résines utilisées par les autres techniques ne présentent que peu d'intérêt dans le domaines des ondes millimétriques. En effet, à cause de leurs trop fortes pertes diélectriques et surtout de leur faible indice de réfraction, elles ne permettent pas de créer de larges bandes de fréquences interdites.

Il est alors pertinent de ce tourner vers des matériaux alternatifs à ces résines qui ont comme propriétés de présenter de très fortes permittivités. C'est pourquoi nous allons nous intéresser dans le paragraphe suivant aux techniques de fabrication utilisant des matériaux céramiques.

III.6. Techniques de fabrication utilisant des céramiques.

Deux technologies compatibles avec l'utilisation de céramiques ont été déjà évoquées dans ce chapitre.

La première présenté par Gonzalo *et al.* [41] utilise des disques diamantées afin de découper des wafers de Silicium. Cette technique s'est révélée par la suite compatible avec l'utilisation de céramique à plus forte permittivité comme le Titanate de Zirconium (ZTT) présentant une permittivité de 37. Dans la référence [68], il est montré que la réalisation de cristaux 3D comme le tas de bois [37, 38] ou les structures proposées par le MIT [28, 31] peut

être envisagée. La seule restriction amenée par cette technique vient du fait que l'introduction de défauts structurels au sein d'un cristal régulier peut se révéler délicate.

La deuxième technique utilisée par Chappell *et al.*[42], reposant sur l'utilisation d'un moule réalisé en polymères par stéréolithographie dans lequel est coulée une pâte de céramique, a aussi montré sa compatibilité avec de tels matériaux. Ce procédé n'a ici été validé qu'avec de l'alumine qui présente une permittivité de 9. Cette technique de fabrication présente un inconvénient directement lié aux moules utilisés puisque l'injection de pâte dans ceux-ci nécessite des structures débouchantes et peut limiter les formes 3D réalisables. Lorsque les dimensions de la structure 3D sont trop petites, des problèmes dans le remplissage du moule peuvent aussi apparaître, problèmes liés le plus souvent à la viscosité de la pâte utilisée.

Nous allons maintenant nous intéresser à un autre type de technique appelée prototypage rapide qui présente le principe très intéressant de réaliser les formes 3D les plus complexes en céramique en une seule pièce.

III.6.a. Selective Laser Sintering (SLS)

Développée par Carl Deckard pour la compagnie DTM (3D Systems) en 1986, cette technique est basée sur la fusion localisée de poudres céramiques. La Figure I-50 présente le principe de cette technique.

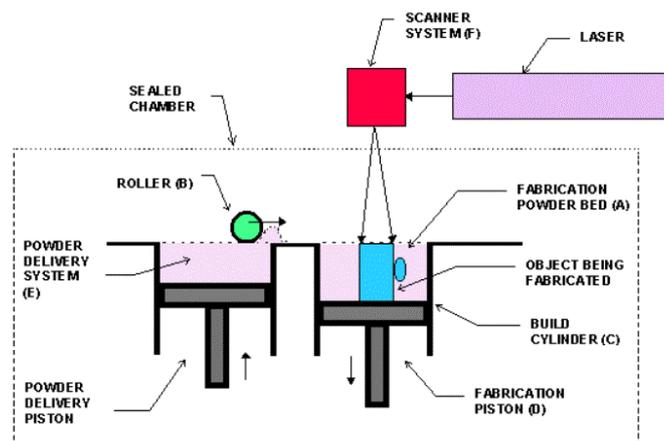


Figure I-50. Principe du frittage sélectif par laser.

Le principe repose sur une construction 3D d'un objet dessiné par CAO. Cet objet est « tranché numériquement » et ces tranches sont réalisées les unes à la suite des autres afin de reproduire l'objet 3D.

Sur chacune de ces couches, un laser au CO₂ vient porter localement à sa température de fusion une pâte constituée de particules céramiques. Ce laser reproduit ainsi le dessin correspondant à la couche à réaliser en venant localement faire fondre les particules céramiques pour en faire une pièce dense et solide. Cette procédure est réalisée pour chaque tranche et nécessite d'être effectuée dans une enceinte remplie de gaz inerte (de l'Azote la plupart du temps), enceinte dont la température ambiante est très proche de celle de fusion des matériaux. Le laser n'a ainsi qu'à amener un léger supplément d'énergie pour que la fusion s'opère. Sachant que la majorité des céramiques les plus courantes ont un point de fusion de plusieurs centaines de degrés Celsius, l'installation requise pour faire fonctionner cette technologie se révèle délicate à mettre en place.

La Figure I-51 présente une photographie de l'état de surface obtenue sur une pièce terminée dense issue de [69].

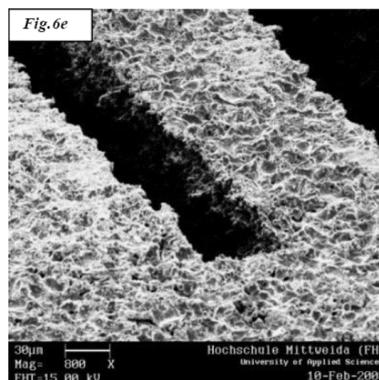


Figure I-51. [69] Vue rapprochée d'une pièce réalisée par SLS.

Les précisions de fabrication sont de l'ordre de 20 μm . Un inconvénient de cette technique vient de la grande rugosité obtenue ($\sim 10 \mu m$) sur la pièce finale ainsi que d'un important pourcentage de porosité qui peut apparaître (jusqu'à 10%).

III.6.b. Multi-Jet Modeling (MJM)

Cette technique développée par la société 3D Systems [70] reprend les techniques d'impressions utilisées par les imprimantes à jet d'encre et remplace l'encre par une pâte composée de particules céramiques. Ici, chaque tête d'impression regroupe un grand nombre de jets de pâte (jusqu'à 100). La pièce ainsi réalisée subit ensuite un traitement thermique afin d'être densifiée. La Figure I-52 présente un schéma du principe de cette technique et une pièce réalisée après cuisson.

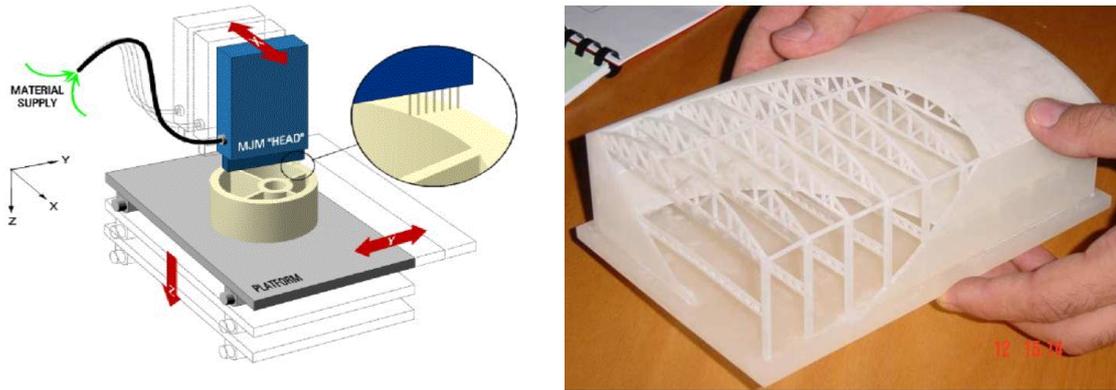


Figure I-52. Principe de l'impression multi-jets et photographie d'une pièce céramique réalisée par cette technique.

Les pièces sont comme précédemment réalisées couches par couches. Elles peuvent être de grandes dimensions et présentent une bonne tolérance de fabrication de l'ordre de $40 \mu m$.

Cependant ces pièces sont fragiles, présentent une forte rugosité et le choix des matériaux compatibles avec cette technique est limité.

III.6.c. Three Dimensional Printing (3DP).

Développée par le MIT [71], cette méthode de fabrication utilise sensiblement la même technique utilisée par les imprimantes à jets d'encre. La Figure I-53 présente le schéma de principe de celle-ci.

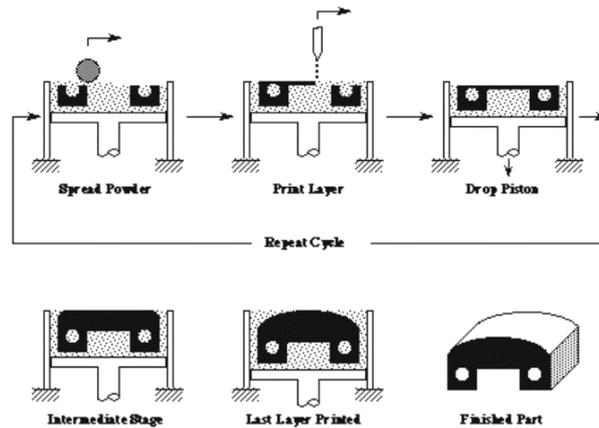


Figure I-53. Principe de l'impression tri-dimensionnelle.

Le principe repose comme précédemment sur la construction d'un objet couches par couches. Tout d'abord de la poudre céramique est répartie de façon homogène sur toute la surface d'un plan de travail. Ensuite une tête d'impression vient positionner de façon sélective un liant qui va joindre les particules aux endroits où l'objet doit être construit. Le plan de travail descend et une autre couche de poudre est étalée sur la précédente. Le liant est réparti sur cette nouvelle couche aux endroits souhaités, et ainsi de suite pour toutes les couches constituant l'objet 3D à réaliser. Après un traitement thermique, la poudre non liée est enlevée, laissant l'objet fabriqué. La Figure I-54 présente une pièce réalisée en alumine avant et après cuisson finale.

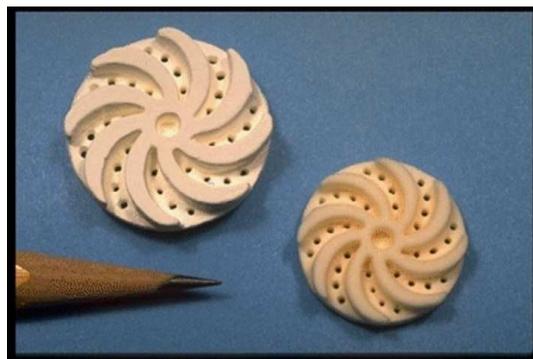


Figure I-54. [71] Pièce réalisée en alumine avant (gauche) et après cuisson (droite).

Des résolutions de l'ordre de $50 \mu\text{m}$ sont atteintes mais cette technique n'est jusqu'à maintenant compatible qu'avec un faible nombre de céramique qui sont l'alumine, le nitrure de Silicium et le PZT.

III.6.d. Stéréolithographie 3D.

Cette technique repose sur la polymérisation d'une résine photosensible par un laser. Les objets sont ici aussi réalisés couches par couches [72].

Intéressons-nous tout d'abord au principe de cette technique dont celui-ci est résumé sur la Figure I-55 issue de la publication de Serge Monneret [73]. Dans ce papier, sont présentés les différentes techniques utilisées couramment pour la technologie de micro-stéréolithographie, technologie qui est une évolution récente de la stéréolithographie 3D.

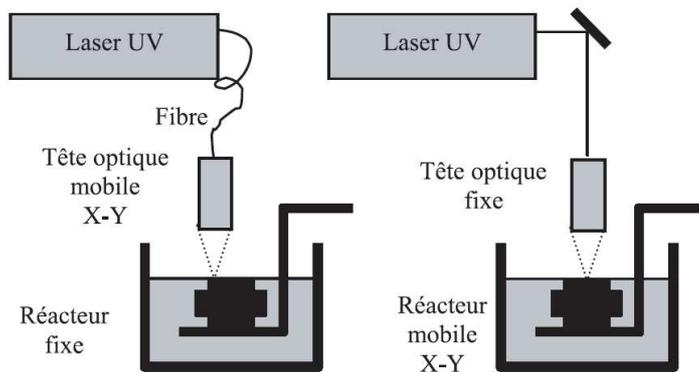


Figure I-55.[73] Les deux grandes techniques de stéréolithographie 3D dans le cas de systèmes d'illuminations vectoriels.

Après avoir dessiné par ordinateur l'objet 3D à réaliser, celui-ci est découpé en tranches, permettant ainsi de définir les formes à réaliser couches après couches. Ces données sont alors envoyées à la machine automatisée afin de construire la pièce physiquement.

Tout d'abord une résine d'aspect liquide est déposée sur le support de la pièce visible sur la Figure I-55 par un racleur, cette résine étant composée d'un monomère et d'un photo-initiateur qui déclenchera la réaction de polymérisation que nous détaillerons un peu plus loin. Ce support dont on peut régler la profondeur (descente selon l'axe z (vertical) de cette même Figure I-55), permet de contrôler l'épaisseur de la couche déposée, typiquement de quelques dizaines de micromètres par pas de $1 \mu m$, voire moins.

Deux grandes familles de techniques sont alors utilisées pour l'étape suivante consistant à illuminer sélectivement la couche déposée avec un laser.

La première famille est basée sur une écriture dite vectorielle [73]. Ainsi, soit un laser UV est envoyé sur un miroir galvano-métrique dont l'inclinaison sur les axes x et y de la

Figure I-55 (droite) est pilotée par ordinateur, soit c'est la tête du système optique qui est mobile sur ces deux même axes (Figure I-55 (gauche)).

Que ce soit l'une ou l'autre des techniques qui est choisie, le laser balaye la couche selon la surface définie par le modèle informatique de la tranche à réaliser. Cette surface de la résine recevant l'énergie transmise par le rayon laser se polymérise et se solidifie ainsi, le reste de la résine restant liquide. Après cela le plan de travail descend pour qu'une nouvelle couche de pâte soit déposée sur la précédente avant d'être de nouveau polymérisée sélectivement, et ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les couches composant la structure soient déposées.

Il ne reste plus alors qu'à sortir la pièce polymérisée du bain de pâte pour récupérer l'objet fini qui ne nécessite aucun traitement supplémentaire.

La taille de l'objet réalisé dépend bien entendu de la taille du faisceau laser à la surface de la résine et les résolutions obtenues sont de l'ordre de $5 \mu m$.

La deuxième famille de technique consiste à éclairer entièrement en une seule fois la couche de résine au travers d'un masque cachant les zones de la résine qui ne doivent pas être exposées. Si la pièce à réaliser est très complexe, un grand nombre de masques doit alors être utilisé. Pour pallier à ce problème, des masques dynamiques reconfigurables sont utilisés comme schématisé dans la Figure I-56 issue de [73].

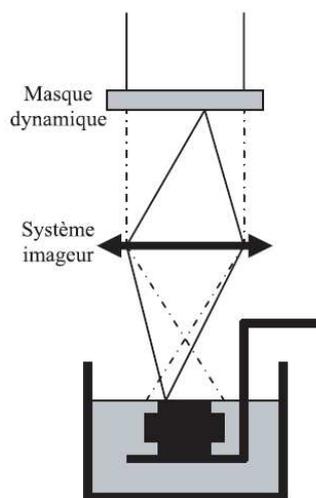


Figure I-56.[73] Utilisation d'un masque dynamique dont le motif présenté peut-être reconfigurable à volonté.

Cette deuxième technique présente par rapport à la précédente une rapidité de réalisation des couches plus importantes puisque toute la couche de résine est illuminée en une seule fois. Les résolutions latérales atteignables sont de l'ordre de $3\ \mu\text{m}$ [73].

Les objets réalisés par stéréolithographie 3D peuvent alors présenter des formes extrêmement complexes comme ces quasi-cristaux à bande interdite complète réalisés en polymères dans [74] et présentés dans la Figure I-57.

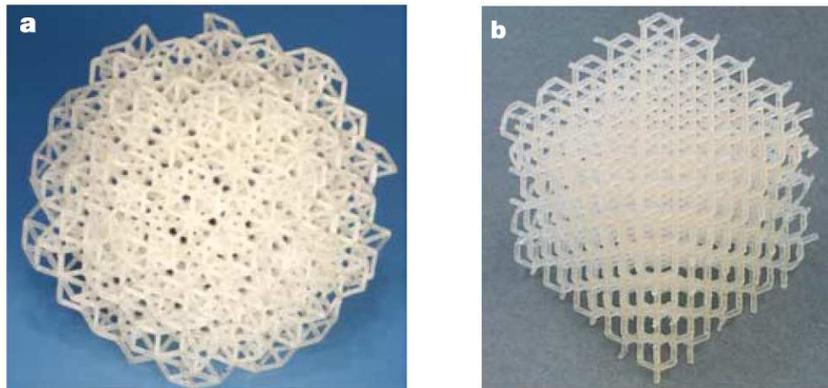


Figure I-57.[74] Quasi-cristal isocahedral (a) et structure de type diamant réalisés en polymère par stéréolithographie 3D.

Les tailles typiques de ces pièces vont du mm^3 au cm^3 .

Cette technique est surtout utilisée pour la réalisation de moules permettant le coulage de pâte céramique comme nous l'avons vu dans [42].

Le procédé présenté peut être transposé à la fabrication directe d'objets céramiques complexes à partir d'un système réactif aux UV, constitué d'une composition de pâte ou *dispersion* de particules céramiques dans le monomère liquide en présence d'un photo initiateur [75]. C'est cette évolution que nous allons aborder dans le paragraphe suivant.

III.6.e. Stéréolithographie céramique 3D.

Comme l'ont montré Bertsch *et al.* dans [76], la plupart des équipes de recherche ont essayé cette transposition en reprenant directement le principe de dépôt de couches présenté dans les Figure I-55 et I-56, principe qui nécessite une importante fluidité de la pâte utilisée. Cette fluidité impose alors deux paramètres importants qui sont un faible pourcentage volumique de particules céramiques et l'utilisation de résines photosensibles très fluides qui

sont peu réactives aux UV. Un faible taux de particules, appelé taux de charge, a pour conséquence de fortement diminuer les précisions de fabrication et de fragiliser la pièce fabriquée. Nous reviendrons sur ce point particulier plus en détail dans le chapitre suivant.

Malgré les bons résultats obtenus comme cette micro-théière montrée sur la Figure I-58 grâce à une technique de micro-stéréolithographie utilisant des masques dynamiques reconfigurables, l'impossibilité d'obtenir d'importants taux de charge, typiquement supérieurs à 50% volumique, peut être très handicapante.

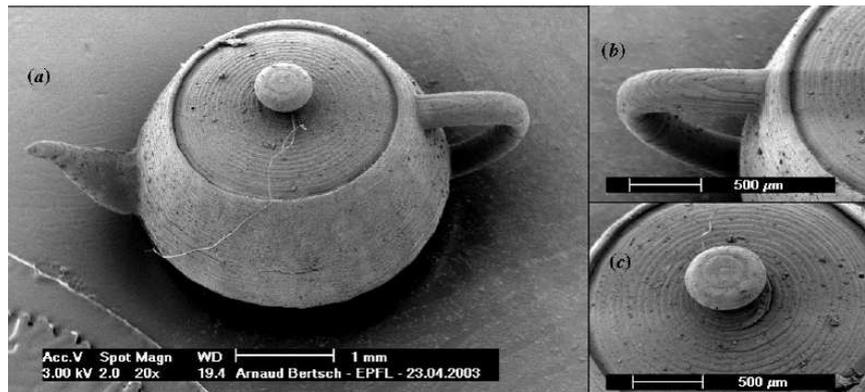


Figure I-58. [76] Micro-théière obtenue par micro-stéréolithographie 3D. Les précisions de fabrication ne sont pas précisées.

C'est face à cette constatation que l'équipe dirigée par Thierry Chartier, directeur de recherche au laboratoire « Science des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface » (SPCTS) de Limoges, eu une approche innovante à contre-courant [77]. Son équipe et lui ont développé un milieu réactif contenant une résine photosensible, des dispersants, un épaississeur et un grand pourcentage de poudre céramique (65% volumique environ).

La composition de pâte résultante a été associée à un procédé de fabrication particulier adapté à la forte viscosité de cette suspension. Cette association s'est révélée capable d'être compatible avec un très grand nombre de céramiques différentes, que ce soit des matériaux à très grande résistance mécanique et thermique (Al_2O_3 , ZrO_2 , SiC , ...), des matériaux biocompatibles (Hydroxyapatite, Phosphate tricalcique, ...) , piézoélectriques (PZT), ...

Ce développement spécifique a permis au Centre de Transfert de Technologies Céramiques (CTTC) de Limoges [78] de développer son activité dans de très nombreux domaines comme le spatial, le bio-médical, la métallurgie réfractaire, l'électrochimie, ...

Nous citerons plus particulièrement deux exemples d'applications qui ont justifiés le choix de cette dernière technologie et du CTTC comme collaborateur sur ces travaux de thèse.

Le premier exemple vient du secteur médical où de très récents travaux menés par Thierry Chartier en collaboration avec le CTTC et le C.H.U. de Limoges ont permis une grande avancée dans le domaine de la reconstruction faciale comme le montre la Figure I-59.

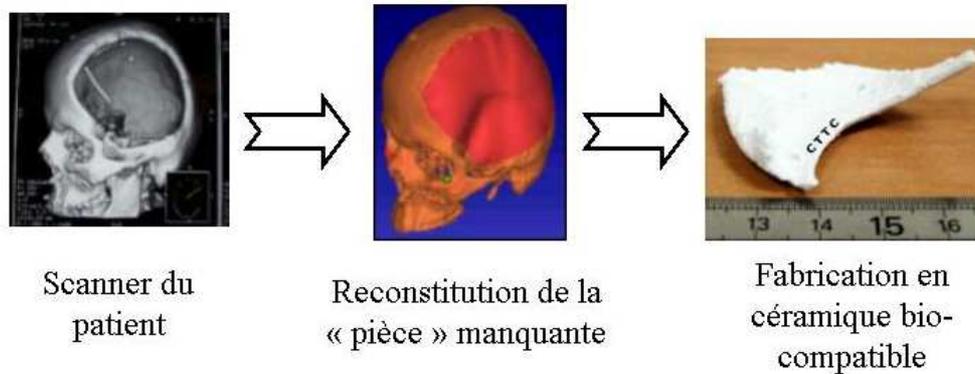


Figure I-59. [78] Principe de fabrication d'un morceau de crâne manquant en céramique à partir du scanner d'un patient. Copyright CTTC.

Ainsi, à partir du scanner d'un patient, le morceau d'os manquant au patient est reconstitué informatiquement puis fabriqué par stéréolithographie dans un matériau biocompatible (Hydroxyapatite). La pièce résultante peut alors être ajustée très exactement lors de l'intervention chirurgicale de reconstruction.

Le deuxième exemple que nous citerons vient d'une précédente collaboration du département Ondes et Systèmes Associées (OSA) d'Xlim avec le CTTC où la réalisation d'un cristal BIE 3D placé au dessus d'un élément rayonnant a permis avec succès d'améliorer les performances de celui-ci [79].

La Figure I-60 montre une photographie de la structure réalisée en alumine par stéréolithographie céramique 3D où des précisions inférieures à $100 \mu\text{m}$ ont été observées.



Figure I-60. [79] Cristal BIE 3D réalisé en alumine occupant une surface de 50 cm^2
Copyright CTTC.

Ce travail amène ici une confirmation supplémentaire quant à la capacité de la stéréolithographie 3D, et en particulier celle développée au CTTC, à pouvoir réaliser des cristaux BIE 3D complexes.

Ainsi, aux vues de la précision des réalisations précédemment effectuées, de la diversité des matériaux accessibles, des dimensions importantes qu'il est possible d'atteindre, du potentiel offert par cette technologie de fabrication, de la complexité des formes réalisables, le choix de la stéréolithographie 3D et du CTTC de Limoges se révèle des plus pertinents pour la mise en pratique des études que nous allons entreprendre sur les cristaux BIE dans ces travaux de thèse. Compte tenu des objectifs que nous nous sommes fixés, une phase d'adaptation du procédé et de tests sera cependant nécessaire à la réalisation des structures envisagées. Une présentation plus poussée de la technique de fabrication présente au CTTC sera alors proposée dans le chapitre suivant.

IV. Conclusion générale.

Les cristaux photoniques ont depuis de nombreuses années intéressé les recherches scientifiques pour différents domaines d'applications. Parmi les nombreux cristaux auxquels se sont intéressés les chercheurs, le tas de bois présente le meilleur compromis entre performances électromagnétiques et facilité de réalisation. C'est ce cristal BIE 3D que nous proposons d'étudier afin de réaliser des structures guidantes et résonnantes, dans le domaine des ondes millimétriques.

A ces fréquences d'application, compte tenu des dimensions mises en jeu et des matériaux à permittivité relative élevée (≥ 10) qu'il est pertinent d'utiliser, deux technologies de fabrication ont été retenues : la stéréolithographie céramique 3D et la technologie de fabrication par lithographie. Ces dernières feront l'objet de descriptions plus détaillées au cours des prochains chapitres lors de leur utilisation.

Références :

- [1] Lord Rayleigh, "On the influence of obstacles arranged in rectangular order upon the properties of a medium," *Philos. Mag.*, vol. 34, pp. 481-502, 1892.
- [2] J. P. Vigneron, J.-F. Colomer, M. Rassart, A. L. Ingram, and V. Lousse, "Structural origin of the colored reflections from the black-billed magpie feathers," *Phys. Rev. E*, vol. 73, pp. 021914, 2006.
- [3] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid state-physics and electronics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, pp. 2059-2062, May 1987.
- [4] S. John, "Strong localization of photons in certain disordered dielectric superlattices," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 23, pp. 2486-2489, June 1987.
- [5] K. Ohtaka, "Energy band of photons and low-energy photon diffraction", *Phys. Rev. B*, vol. 19, no. 10, pp. 5057-5067, May 1979.
- [6] F. Bloch, *Z. Physik*, vol. 52, pp. 2887, 1928.
- [7] Gaston Floquet, "Sur les équations différentielles linéaires à coefficients périodiques," *Ann. École Norm. Sup.* 12, p.47-88, 1883.
- [8] Léon Nicolas Brillouin, "Wave propagation in periodic structures".
- [9] Laurent Oyhenart, "Modélisation, réalisation et caractérisation de matériaux tridimensionnelles à bandes interdites photoniques appliqués à la compatibilité électromagnétique," Thèse de doctorat de l'Université de Bordeaux I, Décembre 2005.
- [10] J. D. Joannopoulos, R.D. Meade, J. N. Winn, "Photonic crystals," *Princeton University Press*, New Jersey, 1995.
- [11] P.M. Bell, J.B. Pendry, L. Martin Moreno, and A.J Ward, "A program for calculating photonic band structures and transmission coefficients of complex structures," *Comp. Phys. Comm.*, vol. 85, pp. 306-322, 1995.
- [12] J. N. Winn, Y. Fink, S. Fan, and J. D. Joannopoulos, "Omnidirectional reflection from a one-dimensional photonic crystal," *Opt. Lett.*, vol. 23, no. 20, pp. 1573-1575, October 1998.
- [13] J.-M. Lourtioz *et al.* « Les cristaux photoniques », *Hermès*, Paris, 2003.
- [14] P.R.Villeneuve, M. Piche, " Photonic band gap in two dimensional square and hexagonal lattices," *Phys. Rev. B*, vol. 46, no. 8, pp. 4969-4972, August 1992.
- [15] M. Plihal, and A.A. Maradudin, "Photonic band structure of two-dimensional systems : the triangular lattice," *Phys. Rev. B*, vol. 44, no. 16, pp. 8565-8571, October 1991.

- [16] D. Cassagne, C. Jouanin, and D. Bertho, "Hexagonal photonic band-gap structures," *Phys. Rev. B*, vol. 53, no. 11, pp. 7134-7142, March 1996.
- [17] M. J. A. De Dood, E. Snoeks, A. Moroz, and A. Polman, "Design and optimization of 2D photonic crystal waveguides based on silicon," *Opt. Quant. Elect.* Vol. 34, pp. 145-159, 2002.
- [18] P. R. Villeneuve, and M. Piché, "Photonic band gaps in two-dimensional square and hexagonal lattices," *Phys. Rev. B*, vol. 46, no. 8pp. 4969-4972, August 1992.
- [19] R. D. Meade, K. R. Brommer, A. M. Rappe, and J. D. Joannopoulos, "Existence of a photonic band gap in two dimensions," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 61, no. 4, pp- 495-497, July 1992.
- [20] P. R. Villeneuve, and M. Piché, "Photonic band gaps in two-dimensional square lattices: square and circular rods," *Phys. Rev. B*, vol. 46, no. 8, pp. 4973- 4975, August 1992.
- [21] F. Gadot, A. Chelnokov, A. de Lustrac, P. Crozat, J.M. Lourtioz, D. Cassagne, and C. Jouanin, "Experimental demonstration of complete photonic band gap in graphite structure," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 71, no. 13, pp. 1780-1782, September 1997.
- [22] M. M. Sigalas, R. Biswas, K. M. Ho, and C. M. Soukoulis, "Theoretical of off-plane propagation of electromagnetic waves in two-dimensional photonic crystals," *Phys. Rev. B*, vol. 58, no. 11, pp. 6791-6794 , September 1998.
- [23] E. Yablonovitch, "Inhibited spontaneous emission in solid state-physics and electronics," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 58, no. 20, pp. 2059-2062, May 1987.
- [24] J., Madox, "Photonic band-gaps bite the dust," *Nature*, vol. 348, pp 481-481, 1990.
- [25] K. Ho, C. T. Chan, and C. M Soukoulis, "Existence of a photonic band gap in periodic dielectric structures," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 65, pp 3152-3155, 1990.
- [26] C.T. Chan, S. Datta, K. M. Ho, and C.M. Soukoulis, "A7 structure: a family of photonic crystals," *Phys. Rev B*, vol. 50, no. 3, pp 1988-1991, July 1994.
- [27] E. Yablonovitch, T.J. Gmitter, and K. M. Leung, "Photonic Band Structure : the Face-Centered-Cubic Case Employing Nonspherical Atoms," *Phys. Rev. Lett.* Vol. 67, no. 17, pp. 2295-2298, October 1991.
- [28] S. Fan, P. R. Villeneuve, R. D. Meade, and J. D. Joannopoulos, "Design of three-dimensional photonic crystals at submicron lengthscales," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 65, no. 11, pp. 1466-1468, September 1994.
- [29] K. M. Leung, " Diamond-like photonic band-gap crystal with a sizeable band gap," *Phys. Rev. B*, vol. 56, no. 7, pp. 3517-3519, August 1997.

- [30] A. Chutinan, and S. Noda, "Spiral three-dimensional photonic band-gap structure," *Phys. Rev. B*, vol. 57, no. 4, pp. R2006-R2008, January 1998.
- [31] S. G. Johnson, and J. D. Joannopoulos, "Three-dimensionally periodic dielectric layered structure with omnidirectional photonic band gap," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 77, no. 22, pp. 3490-3492, November 2000.
- [32] M. Qi, E. Lidorikis, P. T. Rakick, S. G. Johnson, J. D. Joannopoulos, E. P. Ippen, and H. I. Smith, "A three-dimensional optical photonic crystal with designed point defect", *Nature*, vol. 429, pp. 538-541, June 2004.
- [33] K. Busch, and S. John, "Photonic band gap formation in certain self-organizing systems," *Phys. Rev. E*, vol. 58, no. 3, pp. 3896-3908, September 1998.
- [34] Y. A. Vlasov, X.Z. Bo, J. C. Sturm, and D. J. Norris, "On-chip natural assembly of silicon photonic bandgap crystals," *Nature*, vol. 414, pp. 289-293, November 2001..
- [35] X. Checoury, S. Enoch, C. Lopez, and A. Blanco, "Stacking patterns in self-assembly opal photonic crystals," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, pp. 161131, 2007.
- [36] M. Scharrer, X. Wu, A. Yamikov, H. Cao, and R. P. H. Chang, "Fabrication of inverted opal ZnO photonic crystals by atomic layer deposition," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, pp. 151113, 2005.
- [37] K. M. Ho, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, R. Biswas, and M. Sigalas, "Photonic band gaps in three dimensions: new layer-by-layer periodic structures," *Solid State Commun*, vol. 89, pp. 413-416, 1994.
- [38] H. S. Sozuer, and J. P. Dowling, "Photonic band calculations for woodpile structure," *J. Mod. Opt.*, vol. 43, pp. 231, 1994.
- [39] E. Ozbay, A. Abeyta, G. Tuttle, M. Tringides, R. Biswas, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho, "Measurement of a three-dimensional photonic band gap in a crystal made of dielectric rods," *Phys. Rev. B*, vol. 50, no. 3, pp. 1945-1948, July 1994.
- [40] E. Ozbay, "Layer-by-layer photonic crystals from microwave to far-infrared frequencies," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 13, no. 9, pp. 1945-1955, September 1996.
- [41] R. Gonzalo, B. Martinez, C. M. Mann, H. Pellemans, P. H. Bolivar, and P. de Maagt, "A low-cost fabrication technique for symmetrical and asymmetrical layer-by-layer photonic crystals at submillimeter-wave frequencies," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 50, no. 10, pp. 2384-2392, October 2002.

- [42] W. J. Chappell, C. Reilly, J. Halloran, and L. P. B. Katehi, "Ceramic synthetic substrates using solid freeform fabrication," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 51, no. 3, pp. 752-760, March 2003.
- [43] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, R. D. Meade, A. M. Rappe, K. D. Brommer, and J. D. Joannopoulos, "Donor and acceptor modes in photonic band structure," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 67, no. 24, pp. 3380-3383, December 1991.
- [44] E. Ozbay, G. Tuttle, M. Sigalas, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho, "Defect structures in a layer-by-layer photonic band-gap crystal," *Phys. Rev. B*, vol. 51, no. 20, pp. 13961, May 1995.
- [45] B. Temelkuran, and E. Ozbay, "Experimental demonstration of photonic crystal based waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, no. 4, pp. 486-488, January 1999.
- [46] A. Chutinan, and S. Noda, "Highly confined waveguides and waveguide bends in three-dimensional photonic crystal," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, no. 24, pp. 3739-3741, December 1999.
- [47] M. Bayindir, E. Ozbay, B. Temelkuran, M.M. Sigalas, C. M. Soukoulis, R. Biswas, and K. M. Ho, "Guiding, bending, and splitting of electromagnetic waves in highly confined photonic crystal waveguides," *Phys. Rev. B*, vol. 63, pp. 081107, 2001.
- [48] C. Sell, C. Christensen, J. Muehlmeier, G. Tuttle, Z. Y. Li, and K. M. Ho, "Waveguide networks in three-dimensional layer-by-layer photonic crystals," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 23, pp. 4605-4607, June 2004.
- [49] A. R. Weily, K. P. Esselle, T. P. Bird, and B. C. Sanders, "Experimental woodpile EBG waveguides bends and power dividers at microwave frequencies," *Elec. Lett.*, vol. 42, no. 1, pp. 32-33, September 2005.
- [50] C. Sell, C. Christensen, J. Muehlmeier, G. Tuttle, Z. Y. Li, and K. M. Ho, "Integrated horn for improved side coupling into in-plane three-dimensional photonic crystal waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 85, no. 5, pp. 707-709, August 2004.
- [51] A. Chutinan, S. John, and O. Toader, "Diffractionless flow of light in two and three-dimensional photonic band gap heterostructures: theory, design rules, and simulations," *Phys. Rev. E*, vol. 71, pp. 026605, February 2005.
- [52] E. R. Brown, C. D. Parker, and E. Yablonovitch, "Radiation properties of a planar antenna on a photonic-crystal substrate," *J; Opt; Soc. Am. B*, vol. 10, pp. 404-407, 1993.

- [53]] E. R. Brown, C. D. Parker, and C.D. MacMahon, "Effect of surface composition on the radiation pattern from a photonic planar dipole antenna," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 64, pp. 3345-3347, 1994.
- [54] I. Ederra, B. M. Pascual, A. B. Labajos, J. Teniente, R. Gonzalo, and P. de Maagt, "Experimental verification of the reduction of coupling between dipole antennas by using a woodpile substrate," *IEEE Trans. On Ant. and Propag.*, vol. 54, no. 7, July 2006.
- [55] M. Thévenot, C. Cheype, C. Reineix, and B. Jecko, "Directive photonic bandgap antennas," *IEEE Trans. Mic. Th. and Tech.*, vol. 47, pp. 2115, 1999.
- [56] A. R. Weily, L. Horvath; K. P. Esselle, B. C. Sanders, and T. S. Bird, "A planar resonator antenna based on a woodpile EBG material," *IEEE Trans. on Ant. and Propag.*, vol. 53, no. 1, pp. 216-223, January 2005.
- [57] A. R. Weily, K. P. Esselle, T. S. Bird, and B. C Sanders, "Linear array of woodpile EBG sectoral horn antennas," *IEEE Trans. on Ant. and Propag.*, vol. 54, no. 8, pp. 2263-2273, August 2006.
- [58] STARTIGER, "THz Imaging and Technology", <http://www.startiger.org/index.htm>
- [59] A.C. van Popta, M. J. Brett, and J. C. Sit, "Double-handed circular Bragg phenomena in polygonal helix thin films," *J. Appl. Phys*, vol. 98, pp. 083517, October 2005.
- [60] S. R. Kennedy, M . J. Brett, O. Toader, and S. John, "Fabrication of tetragonal square spiral photonic crystals," *Nano. Lett.*, vol. 2, pp. 59, 2002.
- [61] F. Garcia-Santamaria, H. T. Miyazaki, A. Urquia, M. Ibisate, M. Belmonte, N. Shinya, F. Meseguer, and C. Lopez, "Nanorobotic manipulation of microspheres for on-chip diamond architectures," *Adv. Mater.*, vol. 14, no. 16, pp. 1144-1147, August 2002.
- [62] K. Aoki, H. T. Miyazaki, H. Hirayama, K. Inoshita, T. Baba, K. Sakoda, N. Shinya, and Y. Aoyagi, "Microassembly of semiconductor three-dimensional photonic photonic crystals," *Nat. Mater.*, vol. 2, pp. 117, 2003.
- [63] G. M. Gratson, F. Garcia-Santamaria, V. Lousse, M. Xu, S. Fan, J. A. Lewis, and Paul V. Braun, "Direct-Write Assembly of Three-Dimensional Photonic Crystals conversion of polymer scaffolds to silicon hollow-woodpile structures," *Adv. Mater.*, vol. 18, pp. 461-465, 2006.
- [64] M. Deubel, G. von Freymann, M. Wegemer, S. Preira, K. Busch, and C. M. Soukoulis, "Direct laser writing of three-dimensional photonic-crystal templates for telecommunications," *Nat. Mater.*, vol. 3, pp. 444-447, July 2004.
- [65] V. Berger, O. Gauthier-Lafaye, and E. Costard, "Photonic band gaps and holography," *J. Appl. Phys.* , vol. 82, no. 1, pp. 60-64, July 1997.

- [66] M. Campbell, D. N. Sharp, M. T. Harrison, R. G. Denning, and A. J. Turberfield, "Fabrication of photonic crystals for the visible spectrum by holographic lithography," *Nature*, vol. 404, pp. 53-56, March 2000.
- [67] S. Y. Lin, J. G. Fleming, D. L. Hetherington, B. K. Smith, R. Biswas, K. M. Ho, M. M. Sigalas, W. Zubrzycki, S. R. Kurtz, and J. Bur, "A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths," *Nature*, vol. 394, pp. 251-253, July 1998.
- [68] L. Azcona, B. Alderman, D. N. Matheson, P.G. Huggard, B. Martinez, I. Ederra, C. Del Rio, R. Gonzalo, B. de Hon, M. C. van Beurden, L. Marchand, and P. de Maagt, "Micromachined electromagnetic bandgap crystals as antenna substrates for a 500 GHz imaging array," *Proc. Electromag. Res. Symp.*, Hangzhou, China, August 2005.
- [69] H. Exner, P. Regenfuss, L. Hartwig, S. Kloetzer, and R. Ebert, "Selective laser micro sintering with a novel process," *International Society for Optical Engineering*, vol. 5063, pp. 145-151, November 2003.
- [70] <http://www.3dsystems.com/>
- [71] <http://web.mit.edu/tdp/www/index.html>
- [72] C. Hull, "Apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography," U.S. Pat. No. 4575 330, 1986.
- [73] S. Monneret, "La microstéréolithographie et ses applications," *Mécanique et Industries*, vol. 6, p. 457-462, Mai 2005.
- [74] W. Man, M. Megens, P. J. Steinhardt and P. M. Chaikin "Experimental measurement of the photonic properties of icosahedral quasicrystals" *Nature*, vol. 436, pp. 993-996, August 2005.
- [75] M. L. Griffith and J. W. Halloran, "Freeform Fabrication of Ceramics via Stereolithography," *J. Am. Ceram. Soc.*, vol. 79, no. 10, pp. 2601-608, 1996.
- [76] A. Bertsch, S. Jiguet, and P. Renaud, "Microfabrication of ceramic components by microstereolithography," *J. Micromech. Microeng.*, vol. 14, pp. 197-203, October 2003.
- [77] F. Doreau, C. Chaput, and T. Chartirt, "Stereolithography for manufacturing ceramic parts," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 2, pp. 493-496, 2000.
- [78] <http://www.ceramic-center.com/>
- [79] T. Jaffre, L. Leger, B. Jecko, J. Claus, C. Chaput, " Fabrication of 3-D Alumine Photonic Bandgap Structures by Laser Rapid Prototyping. Application to the design of three dimensional photonic crystal resonator antenna," *IEEE ICECOM*, pp. 255-258, 1-3 October 2003, Dubrovnik.

Chapitre II

Résonateurs diélectriques originaux

CHAPITRE 2. RESONATEURS DIELECTRIQUES ORIGINAUX.

I. Introduction.....	74
II. Stéréolithographie céramique 3D.....	75
II.1. Introduction : stéréolithographie 3D.....	75
II.2. Ajout de particules céramiques.....	78
II.3. Composants et préparation de la suspensions céramique.....	79
II.4. Technique de fabrication utilisée au CTTC.....	81
II.5. Propriétés de la suspension.....	82
II.6. Conclusion.....	88
III. Résonateur diélectrique original.....	89
III.1. Introduction.....	89
III.2. Principe de la structure.....	95
IV. Optimisation des performances.....	97
IV.1. Mise en place de la structure initiale d'optimisation.....	97
IV.2. Optimisation et choix des dimensions.....	104
IV.3. Motif d'excitation coplanaire.....	111
V. Premier prototype.....	114
V.1. Mesure du prototype.....	115
V.2. Rétro-simulation.....	117
V.3. Bilan sur le premier prototype.....	118
VI. Nouveaux prototypes.....	119
VI.1. Nouvelle composition.....	119
VI.2. Nouveaux designs.....	119
VII. Filtre deux pôles.....	123
VII.1. Paramètres de couplage.....	123
VII.2. Gabarit de filtrage.....	124
VII.3. Topologie hybride.....	125
VII.4. Topologie tout céramique.....	137
VIII. Conclusion.....	141

I. Introduction.

Le chapitre précédent nous a permis de mettre en avant une technologie spécifique, développée à Limoges, permettant la réalisation d'objets tridimensionnels complexes en céramique. Capable de réaliser les cristaux BIE 3D que nous souhaitons étudier dans ces travaux de thèse, ce procédé peut tout aussi bien amener des solutions technologiques innovantes pour des applications très classiques. C'est sur ce postulat que l'objectif de ce chapitre est double.

Tout d'abord nous allons présenter plus en détail la technologie de stéréolithographie céramique 3D qui a été retenue. Ce procédé de fabrication et ses différentes spécificités seront décrits afin de mieux cerner les avantages et les contraintes associés.

A partir de ces informations, le potentiel de cette technologie appliqué à la fabrication de structures microondes, sera validé par la réalisation de solutions innovantes de filtrage.

Ces topologies originales à base de résonateurs diélectriques devront satisfaire à des contraintes d'intégration dans un environnement planaire grâce à des systèmes d'excitation adaptés et compatibles avec des techniques de report classiques. Les structures ainsi proposées seront considérées comme des composants montés en surface (CMS). Dans ce contexte, nous proposerons ainsi des formes de résonateur originales amenant des solutions de packaging alternatives à celles appliquées actuellement. La conception de tels éléments se fera en s'appuyant sur le logiciel de simulation électromagnétique 3D *EMXD* développé au sein d'Xlim.

Après avoir réalisé par stéréolithographie céramique 3D et testé ces éléments résonants originaux, nous en associeront plusieurs afin de concevoir des filtres multipôles. Nous conserverons toujours comme axe de développement la volonté d'améliorer l'intégration dans un environnement RF et le packaging de tels filtres.

II. Stéréolithographie céramique 3D.

II.1. Introduction : stéréolithographie 3D.

La technologie de stéréolithographie céramique 3D découle directement des précédents travaux réalisés sur la fabrication d'objets tri-dimensionnels en polymères [1]. Le principe que nous décrirons ici est celui le plus couramment utilisé par les équipes de recherche et les machines commerciales. La première étape présentée dans la Figure II-1 consiste à dessiner à l'aide d'un logiciel de CAO une vue 3D de l'objet à réaliser.

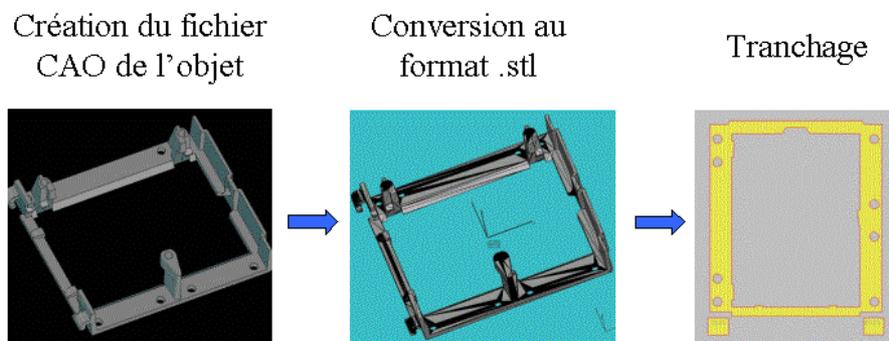


Figure II-1. Etape numérique dans le procédé de stéréolithographie.

Ce dessin initial est ensuite converti dans un format particulier, le format .stl qui a comme particularité de découper chaque surface en un ensemble de triangles élémentaires. Cette opération est nécessaire pour l'étape suivante qui consiste en un découpage numérique en tranches de cet objet. Chacune de ces tranches ont des épaisseurs qui peuvent aller de dix à quelques centaines de micromètres. Ce sont ces différentes tranches qui seront réalisées physiquement les unes à la suite des autres et qui permettront de recréer l'objet en entier.

L'étape suivante va maintenant consister en la fabrication de ces différentes couches à l'aide du procédé montré dans la Figure II-2.

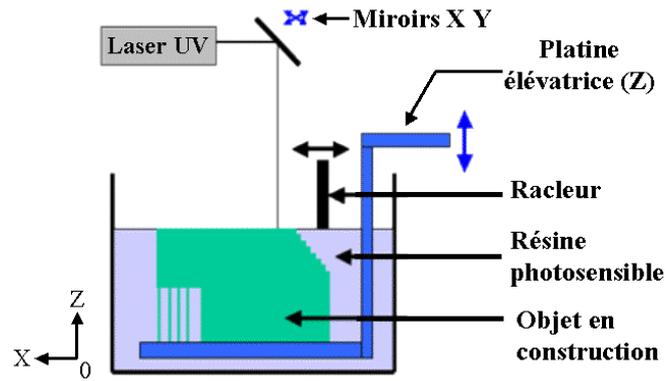


Figure II-2. Schéma de principe de la fabrication d'objets 3D par stéréolithographie.

Pour cette fabrication, une résine photosensible est utilisée. Cette résine présentant une très bonne fluidité est composée de monomères photoréactifs. Ces monomères très particuliers se polymérisent sous l'action d'un laser Ultra Violet (UV) qui fournit l'énergie nécessaire au déclenchement de la réaction. Ce sont ces types de résines qui sont à l'origine même des procédés de mise en forme 3D [1].

Dans le bac contenant la résine est placée une platine élévatrice qui servira de support à la pièce à fabriquer. La position en profondeur (axe z sur la Figure II-2) de cette platine est contrôlée par ordinateur avec une grande précision généralement de quelques micromètres. Pour la réalisation de la première couche, cette platine est descendue par rapport à la surface de la résine d'une épaisseur correspondante à l'épaisseur de cette tranche à réaliser. Un racleur, dont le déplacement longitudinal (axe x de la Figure II-2) est piloté par ordinateur, vient alors aplanir cette première couche de résine.

La tranche numérique que l'on souhaite réaliser va imposer une insolation sélective de la première couche de résine, les endroits à polymériser devant être illuminés au contraire du reste de la couche. Afin de réaliser cette opération, la technique que nous décrirons ici et qui est utilisée au CTTC repose sur une technique vectorielle.

Cette technique consiste à envoyer un faisceau laser UV sur un miroir galvanométrique dont l'orientation selon les axes x et y est contrôlable par ordinateur. Ainsi, en fonction de l'orientation de ce miroir, le faisceau laser réfléchi vient éclairer de façon sélective la couche de résine, polymérisant cette dernière aux endroits souhaités.

La Figure II-3 présente la forme que prend la tâche polymérisée.

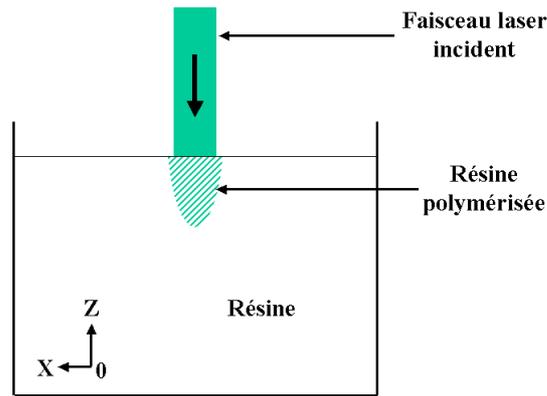


Figure II-3. Vue en coupe de l'allure de polymérisation.

Le faisceau laser diffuse légèrement lorsqu'il rentre au contact de la résine, c'est à dire que le diamètre que prend le faisceau à la surface de la résine augmente très légèrement par rapport à son diamètre initial. La forme que prend la partie polymérisée de la pâte est oblongue, son diamètre diminuant avec la profondeur.

Après cela, la platine élévatrice descend d'une profondeur correspondant à l'épaisseur de la deuxième tranche numérique à fabriquer et le protocole continu ainsi de suite jusqu'à ce que toutes les couches soient réalisées.

La puissance du faisceau doit être bien définie lors de son réglage puisque la profondeur de polymérisation est directement dépendante de l'énergie apportée [2].

Il faut ainsi que la densité d'énergie amenée par le faisceau laser soit suffisante pour déclencher la polymérisation et que celle-ci se fasse sur une profondeur légèrement supérieure à l'épaisseur de la couche afin de que la couche en cours de fabrication « adhère » à la couche précédente. Si ce n'est pas le cas, chacune des couches restent indépendantes les unes des autres et l'objet global ne se tient pas en une seule pièce.

A la fin de la fabrication, il ne reste plus qu'à sortir la pièce polymérisée solide de la matrice de monomères liquides. Cette pièce tridimensionnelle reproduit alors fidèlement l'objet dessiné informatiquement avec des précisions avoisinant $5\ \mu m$ lorsque le faisceau laser à la surface de la résine avoisine ce diamètre [3].

La fabrication d'objet en céramique peut alors se faire en s'appuyant sur des moules en polymères dans lesquels une pâte céramique est injectée. Aux cours des cycles de cuisson

que doit subir le matériau céramique pour atteindre sa forme et sa densité finale, le moule en polymère est pyrolysé, laissant alors la pièce céramique. Nous reviendrons plus tard sur ces différents cycles de cuisson. L'utilisation de tels moules, réalisés avec de très bonnes précisions amène cependant deux inconvénients. Le premier est que cette technique limite les formes qui peuvent être réalisées et les moules les plus petites peuvent présenter des difficultés pour l'injection de la pâte. La deuxième vient du fait que deux étapes technologiques différentes sont nécessaires pour l'obtention d'une pièce céramique, à savoir la réalisation du moule et l'injection.

L'idée émergeant de ces constatations fut alors la suivante : pourquoi ne pas réaliser les pièces en céramique directement par la stéréolithographie ?

Ce concept de départ a été par la suite repris par de nombreuses équipes [4] qui incorporèrent alors un certain pourcentage de particules céramiques dans la résine photosensible initiale. Nous parlerons par la suite de suspensions pour décrire ce mélange de résine et de particules céramiques. Comme nous allons le voir dans le paragraphe suivant, cet ajout de particules amena un niveau de difficulté supplémentaire dans l'obtention de pièces céramiques aux dimensions et aux formes bien contrôlées.

II.2. Ajout de particules céramiques.

Afin de pouvoir conserver le principe de fabrication de la Figure II-2, il faut que la résine, à laquelle est maintenant adjointe un certain pourcentage volumique de particules céramiques, soit très fluide. Si la pâte est trop visqueuse, lors de la descente du support de la pièce, le racleur ne parvient plus à étaler correctement une couche de résine au dessus de la précédente. Pour conserver une bonne fluidité, il faut alors que le pourcentage volumique de particules reste peu élevé car la viscosité dépend directement du pourcentage de particules [5].

Seulement, afin d'obtenir des caractéristiques de la pièce céramique satisfaisantes en terme de forme et de tenue mécanique, il faut que le pourcentage volumique de ces particules soit au moins de 50% [4]. Or pour de tels pourcentages, la suspension présente une forte viscosité. L'utilisation de résines très fluides pourrait alors permettre de contourner ce problème, mais celles-ci sont systématiquement moins réactives aux UV que des résines plus visqueuses [5]. Le risque est alors de devoir allonger très fortement les temps d'exposition aux UV. Il existe même un risque non négligeable que le seuil de densité d'énergie critique nécessaire pour déclencher la polymérisation ne soit pas atteint.

Devant de telles constatations, Thierry Chartier, directeur de recherche au laboratoire Science des Procédés Céramiques et de Traitements de Surface (SPCTS) de Limoges, en collaboration avec le Centre de Transfert de Technologies Céramiques (CTTC) de Limoges proposa une approche différente [6]. Au lieu de développer une suspension la plus fluide possible qui limite les taux de charges atteignables, Chartier *et al.* s'intéressa à des suspensions présentant de très forts pourcentages en particules céramique (~65% volumique) et des résines très réactives [6]. Le résultat donna alors une suspension dont l'aspect se rapproche plus d'une pâte que d'un liquide.

Intéressons nous maintenant aux différents composants de cette pâte et à sa fabrication.

II.3. Composants et préparation de la suspensions céramique.

L'ajout de particules céramiques aux résines photosensibles a grandement complexifié les propriétés des suspensions obtenues. La qualité d'une suspension dépend en tout premier lieu de la répartition homogène de ses différents composants. Pour s'assurer de cela, un protocole particulier doit être suivi pour leur préparation.

La première étape consiste à tamiser la poudre céramique que nous souhaitons utiliser. Pour la description qui va suivre, nous prendrons l'exemple d'une poudre d'alumine très pure utilisée classiquement. Ces poudres présentent une pureté supérieure à 99%. Cette étape permet, par des tamisages de plus en plus fins (de plusieurs centaines à quelques dizaines de micromètres), de ne conserver que les particules de poudre les plus fines possibles. La taille, la distribution de taille ainsi que la géométrie des particules sont des éléments qui peuvent fortement modifier les propriétés de la suspension en préparation et donc celles de la pièce céramique à réaliser [5]. On considère que des tailles de particules de 1 à quelques micromètres amène un compromis des plus satisfaisant.

Ces particules déjà très fines présentent encore des agrégats qu'il faut casser. Pour cela, cette poudre est mélangée à de l'éthanol et à un agent dispersant. Ce dernier est un élément incontournable de la suspension qui assure à celle-ci un état de désagglomération des particules. Le dispersant a pour rôle de modifier les forces d'interactions entre les particules, par exemple en créant des forces de répulsion électrostatiques entre celles-ci. Ces forces

permettent de favoriser l'homogénéité globale de la suspension. Ce mélange est alors broyé par des billes de céramiques pendant un temps pouvant aller de plusieurs dizaines de minutes à plusieurs heures en fonction des poudres utilisées.

Après ce broyage, le mélange est passé à l'étuve afin de faire s'évaporer l'éthanol. Nous récupérons alors la partie décantée qui est constituée d'une poudre d'alumine très fine, servant de constituant principal à notre suspension.

Cette poudre est alors mélangée dans un mortier à d'autres éléments qui sont :

- La résine photosensible : constituée de monomères réactifs aux UV, elle nécessite un apport d'énergie pour déclencher la polymérisation de ses constituants.
- Le photo-initiateur : ce produit absorbe les émission laser dans le domaine de l'UV, aidant ainsi la résine à récupérer l'énergie nécessaire à sa polymérisation.
- Le liant : celui-ci assure la cohésion entre les particules de poudre ainsi que la résistance mécanique de la pièce avant cuisson appelée à juste titre pièce « *crue* ». Pour le procédé de stéréolithographie, ce sont les monomères réactifs qui dans la plupart des cas assurent ce rôle.
- Le plastifiant : il donne à la pièce crue d'avantage de flexibilité permettant la tenue de celle-ci pendant le procédé de fabrication.
- Le fluidifiant : comme son nom l'indique, il permet de fluidifié la suspension si besoin est.
- Le mouillant : il améliore l'adhésion poudre-liant, favorisant ainsi l'homogénéité en particules de la suspensions.

Cette suspension subit alors un passage entre des rouleaux qui ont pour but de casser encore une fois les agglomérats de particules pouvant subsister. Après un dégazage s'opérant en laissant se reposer la pâte pendant quelques heures, la suspension, présentant un aspect assez visqueux, est prête à être utilisée.

Afin de pouvoir utiliser de telles suspensions présentant une forte viscosité, une technique de fabrication et un système de raclage particuliers furent alors développés.

II.4. Technique de fabrication utilisée au CTTC.

La Figure II-4 présente un schéma descriptif de la technique de fabrication par stéréolithographie utilisée par le CTTC de Limoges.

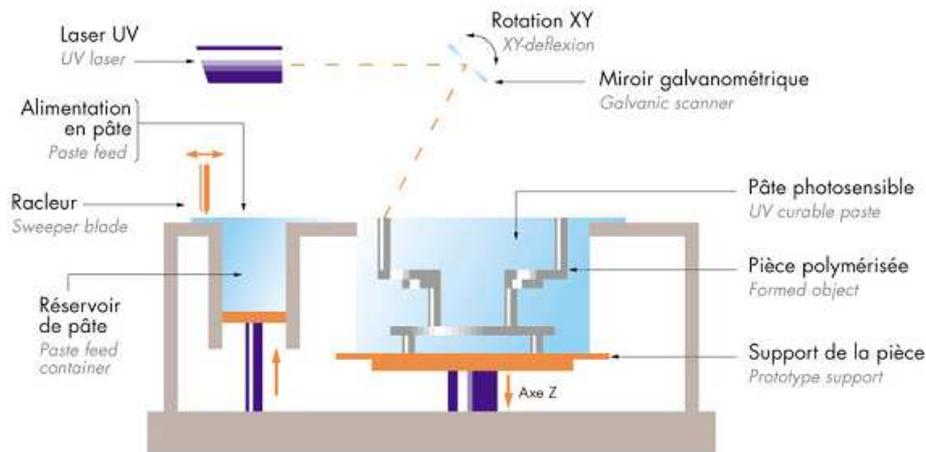


Figure II-4. Schéma de principe de la fabrication d'objets 3D par stéréolithographie utilisée par le CTTC.

Cette technique conserve des points communs avec la méthode de fabrication décrite dans le paragraphe II-1. Ainsi, un laser UV à l'Argon ($\lambda=351$ nm) dont le faisceau vient se réfléchir sur un miroir galvanométrique est toujours utilisé pour la polymérisation sélective de multiples couches afin de réaliser un objet 3D. Néanmoins la forte viscosité des pâtes utilisées a nécessité quelques aménagements.

Ici, le système de distribution de la pâte est fournie par un piston qui, par sa poussée, donne la quantité de pâte nécessaire à la réalisation d'une couche (partie de gauche de la Figure II-4) La grosse « noix » de pâte ainsi obtenue nécessite un système de raclage très spécifique afin de pouvoir étaler des suspensions dont la viscosité est très élevée. Ce système a été développé et breveté par la société française Optoform en 1999 [7], société aujourd'hui rachetée par 3D Systems ©. Ce système très particulier repose principalement sur l'utilisation d'une lame à double tranchant à même d'étaler de manière uniforme les pâtes les plus visqueuses. Sa particularité est que l'étalement d'une couche de pâte se fait à la fois de gauche vers la droite mais aussi de droite vers la gauche, tout en conservant les mêmes propriétés d'une couche étalée à l'autre.

Par un mouvement longitudinal (de gauche vers la droite et aussi de droite vers la gauche sur la Figure II-4), cette lame étale une couche de pâte sur le plan de travail occupant

une surface de 25 cm par 25 cm. Ce plan de travail est aussi le support de la pièce, et c'est ce dernier monté sur piston qui, par sa descente contrôlée par ordinateur, permet de fixer les épaisseurs de pâte étalée. Les épaisseurs typiquement atteignables vont de 10 à plusieurs centaines de micromètres.

Après un passage de la lame, qui prend de 10 à 15 secondes, la couche de pâte est alors insolée sélectivement par un faisceau laser d'un diamètre de $120 \mu\text{m}$ réfléchi par le miroir galvanométrique, le balayage de la surface prenant quelques secondes. Après cela, le support de la pièce descend d'une profondeur équivalente à l'épaisseur de la tranche suivante à réaliser, une nouvelle couche de pâte est étalée, et le processus se reproduit jusqu'à ce que toutes les tranches de l'objet soient réalisées. L'objet final peut sans problème présenter une hauteur de 25 cm. Pour une pièce haute de 1 cm, le temps de fabrication moyen est de une heure.

A la fin de la fabrication, du fait de la viscosité de la pâte, la pièce polymérisée est pour ainsi dire noyée dans la pâte non-polymérisée. Il faut alors enlever ce surplus de pâte par des bains successifs dans différents diluants, bains ne nécessitant pas de manipulations particulières. Cette étape de nettoyage oblige ainsi à ce que la pièce présente des orifices d'écoulement. Ces trous doivent présenter des diamètres d'au moins $250 \mu\text{m}$ pour que ce nettoyage se face correctement.

La pièce alors obtenue est appelée pièce *crue*, car elle nécessite des cycles de cuisson afin d'obtenir ses dimensions et ses propriétés finales.

Maintenant que le système de fabrication choisi permet de se servir sans problème de pâtes très visqueuses, intéressons nous plus particulièrement à leur propriétés avant, pendant et après cuisson.

II.5. Propriétés de la suspension.

II.5.a. Tenue mécanique de la pièce crue.

La première propriété que doit présenter la pâte doit être une viscosité suffisante pour pouvoir être étalée correctement par le système de raclage. Elle doit conserver une épaisseur constante et un aspect uniforme sur toute la surface de la couche étalée. Lors du passage de la lame, un ménisque se forme à sa base. En jouant sur les concentrations des éléments

composant la suspension, on peut faire en sorte qu'aucun temps de repos ne soit nécessaire pour que ce ménisque s'étale uniformément sur le plan de travail. Le gain de temps pour la fabrication de chaque couche et donc de la pièce globale n'en est que grandement amélioré. La composition utilisée typiquement présente une viscosité qui est 10 fois supérieure à celle des suspensions utilisées par les autres équipes [4]. Cette forte viscosité, principalement liée aux fortes concentrations volumiques de particules, permet notamment qu'une couche de pâte, même non-polymérisée, puisse supporter sans se déformer les autres couches qui s'empilent sur elle. Des épaisseurs de 25 voire 10 μm peuvent être atteintes.

Malgré la bonne tenue des différentes couches et afin d'éviter des déformations dues au passage du racleur, il peut être nécessaire de rajouter des supports dans quelques cas particuliers. Ces supports sont en fait des éléments polymérisés indépendants de la pièce en cours de fabrication. Un cas typique où de tels supports sont requis est présenté sur la Figure II-5.

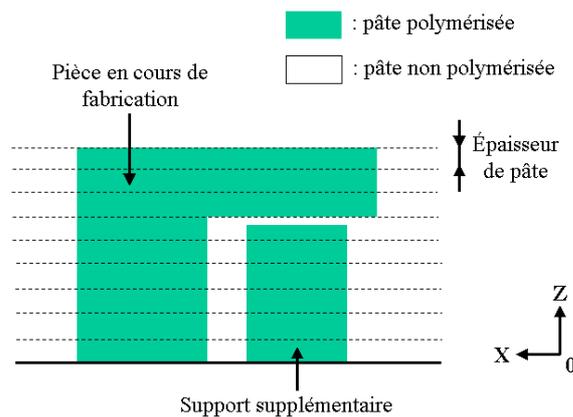


Figure II-5. Cas typique nécessitant des supports pendant la fabrication par stéréolithographie.

Pour des parties suspendues dans le vide comme on le voit sur la pièce en cours de fabrication présentée sur la Figure II-5, un support en forme de pilier placé légèrement en retrait permet à la première couche passant dans le vide de se déposer sans déformation. Sans cet élément supplémentaire, le passage du racleur risquerait de faire « s'effondrer » cette couche.

La haute viscosité des pâtes utilisées confère alors à la pièce crue une tenue mécanique supplémentaire qui permet d'éviter des déformations au cours de la fabrication.

II.5.b. Diffusion et absorption.

L'ajout de particules céramiques à la résine photosensible a comme conséquence de fortement modifier la profondeur et la largeur de polymérisation amenée par l'exposition de la pâte par le faisceau laser. En effet, la présence de ces éléments amènent un phénomène de diffusion et d'absorption schématisé dans la Figure II-6.

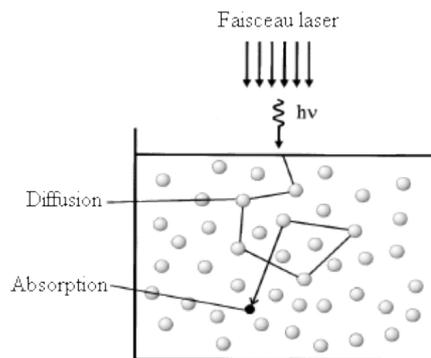


Figure II-6. Illustration du phénomène de diffusion dans un milieu chargé en particules.

La taille présentée par le faisceau laser à la surface de la suspension est beaucoup plus large à cause de la présence des particules céramiques. Le diamètre apparent du faisceau est alors typiquement de 1.5 à 2.5 fois supérieur à son diamètre initial en fonction des compositions utilisées. Ceci a alors pour conséquence une perte de résolution par rapport à des systèmes non chargés et amène alors des tolérances de fabrication de l'ordre de $100 \mu m$. A titre de comparaison, les machines de stéréolithographie céramique 3D commercialisée par 3D Systems © sont données pour des précisions de fabrication de $200 \mu m$.

Les particules ont, au travers d'un phénomène d'absorption de l'énergie apportée par le laser, tendance à limiter l'épaisseur de polymérisation. Pour comprendre cela, il faut se référer aux équations régissant ce paramètre.

La profondeur de polymérisation E_p est donnée par l'équation :

$$E_p = D_p \ln\left(\frac{DE}{DE_c}\right) \quad (\text{m}) \quad \text{II.1}$$

DE est la densité d'énergie transmise à la résine ($J.m^2$) tel que

$$DE = \frac{2P}{\pi \cdot w_0 \cdot v} \quad \text{II.2}$$

P est la puissance d'insolation ($J.s^{-1}$), w_0 le rayon du laser (m) et v la vitesse de balayage du faisceau ($m.s^{-1}$).

DE_C la densité d'énergie critique qui est la valeur minimale pour laquelle la polymérisation est amorcée ($J.m^2$)

D_p le profondeur de pénétration du faisceau (m).

La profondeur de polymérisation de la pâte E_p est directement proportionnelle à la profondeur de pénétration du faisceau laser D_p . Sachant que dans le cas de systèmes chargés en particules, D_p est défini tel que :

$$D_p = \frac{2}{3} \frac{d_{50}}{Q \cdot \phi} \text{ (m)} \quad \text{II.3}$$

d_{50} est le diamètre moyen des particules (m)

ϕ le pourcentage volumique de particules

Q est un coefficient défini par :

$$Q = \frac{h}{\lambda} \cdot \Delta n^2 \quad \text{II.4}$$

h est la distance interparticulaire moyenne

λ est la longueur d'onde du laser

Δn^2 représente la différence entre les indices de réfraction de la poudre et de la résine tel que $\Delta n^2 = (n_{\text{poudre}} - n_{\text{résine}})^2$.

Nous voyons alors que la profondeur de pénétration du faisceau laser D_p a tendance à diminuer avec l'augmentation du pourcentage volumique de particules. De même, l'utilisation de particules présentant un indice de réfraction plus élevé, ou simplement de plus petit diamètre, peut fortement diminuer cette profondeur de pénétration.

L'équation II.1 nous permet de voir qu'une diminution de D_p entraîne une diminution équivalente de la profondeur de polymérisation E_p .

Or ce dernier paramètre se trouve avoir un impact significatif sur les largeurs de polymérisation. Pour comprendre cet effet, il faut se reporter à la forme oblong que prend la tâche polymérisée (Figure II-3). Plus cette tâche sera profonde, moins bonne sera la résolution

latérale et inversement. Il faut alors trouver un compromis entre une profondeur de polymérisation suffisante pour polymériser totalement l'épaisseur de la couche sans trop polymériser pour ne pas perdre en résolution latérale.

Comme l'a montré Chartier *et al.* dans [2], il existe une dépendance de la profondeur de polymérisation et de la résolution latérale par rapport au pourcentage de photo-initiateur dans la suspension. Des concentrations plus élevées de cet élément augmentent effectivement la densité d'énergie reçue par la pâte. Or comme on peut le voir dans l'équation II.1, l'augmentation de cette densité d'énergie augmente la profondeur de polymérisation et donc influe effectivement sur la résolution latérale.

En définitive, chaque constituant présent dans une suspension a un impact sur la profondeur de polymérisation de pâte et sur la résolution latérale de cette technologie. Ce n'est qu'une optimisation de chacun de ces composants qui peut amener un compromis des plus satisfaisant.

II.5.c. Retrait à la cuisson.

Nous avons vu que la présence de forts pourcentages de particules dans la suspension a pour conséquence de diminuer la résolution des pièces fabriquées et apparaît comme un réel handicap. Cependant de fortes concentrations de poudre sont néanmoins extrêmement intéressantes car elles permettent de fortement diminuer les déformations subies par la pièce au cours de sa fabrication. Les étapes de cuisson que subissent la pièce crue amènent comme nous allons le voir des contraintes mécaniques supplémentaires.

La première étape de cuisson qui permettra d'obtenir une pièce en céramique s'appelle le *déliantage*. Comme son nom l'indique, cette cuisson permet de retirer les liants présents dans la pâte, et plus généralement tous les éléments organiques comme les polymères. Pour cela, on chauffe la pièce crue jusqu'aux alentours de 500 à 600 °C où un plateau est maintenu pendant quelques heures. Au cours de cette cuisson, les différents éléments organiques migrent de l'intérieur vers l'extérieur de la pièce. Lors de cette phase, des déformations importantes de la pièces, voire des fissures peuvent apparaître si la montée en température est

trop importante. Il faut donc que cette montée se fasse lentement, généralement à quelques dixièmes de degré Celsius par minute.

Après cette première phase, la pièce est montée jusqu'à près de 1700 °C avec une montée plus importante de 5°C par minute. Cette phase de la cuisson s'appelle le *frittage*. C'est pendant celle-ci que la pièce se densifie jusqu'à des valeurs typiques supérieures à 97% de densité. Elle prend alors sa forme et sa taille définitive.

Au cours de ces deux cuissons, la pièce perd en se densifiant une bonne partie de son volume initial selon un pourcentage de retrait directement lié au taux de charge dans la suspension. La Figure II-7 et II-8 montrent deux exemples de pièces avant et après frittage.

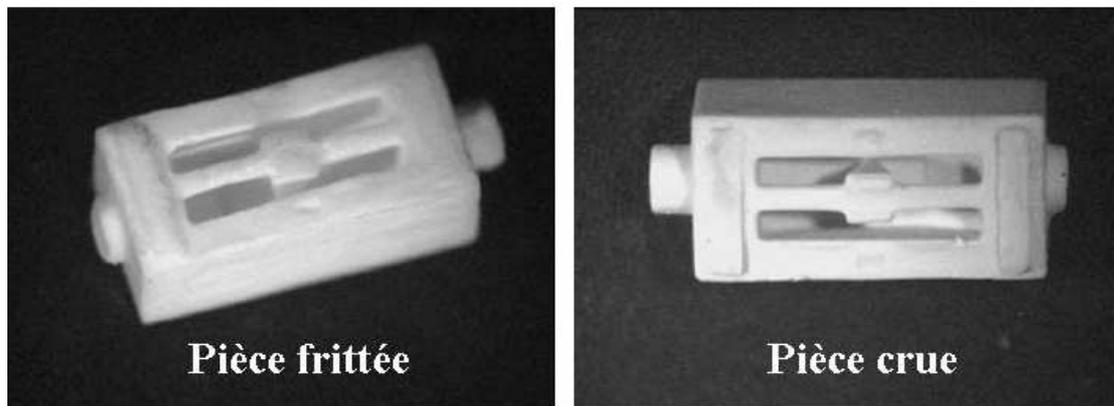


Figure II-7. [9] Pièce en céramique réalisé par Monneret *et al.* avant (gauche) et après cuisson (droite).

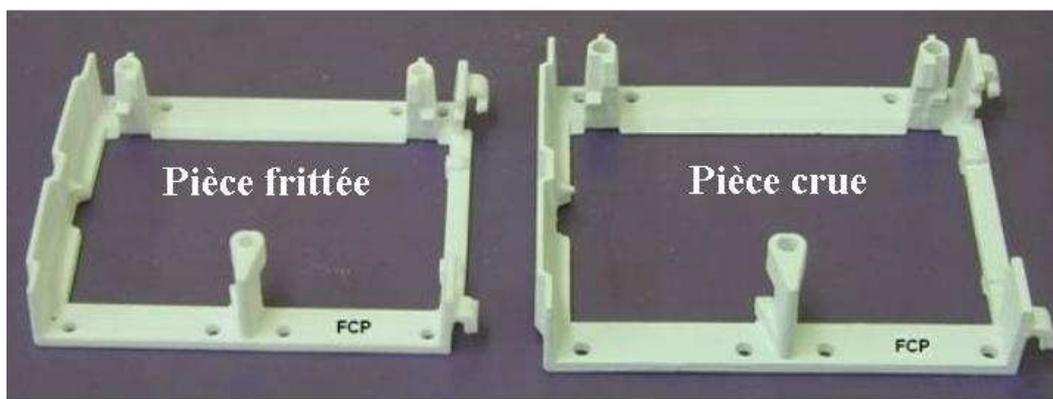


Figure II-8. Pièce en céramique réalisé par le CTTC avant (droite) et après cuisson (gauche).

La Figure II-7 montre une pièce réalisée en alumine pour un taux de charge inférieur à 50% [9]. Nous pouvons voir de légères déformations structurelles apparaître. La Figure II-8 montre une pièce réalisée au CTTC en alumine avec des taux de charge supérieurs à 65%. La

pièce frittée ne présente pas de déformation structurelle. Les compositions de ces pâtes font d'ailleurs l'objet d'un brevet international déposé par le CTTC [10].

L'utilisation de faibles taux volumiques de particules peut alors engendrer d'importants retraits de plus de 25%, entraînant de fortes déformations sur les pièces céramiques. Dans ces cas, des fissures voire des cassures peuvent apparaître.

Il faut alors, en fonction de la suspension choisie, connaître très précisément le retrait subi par la pièce crue au cours de ces cycles de cuisson. Ce n'est qu'à partir de là que la pièce fabriquée pourra être surdimensionnée afin que celle-ci présente, après cuisson, la forme et les dimensions requises par la conception. Cependant cette étape peut-être assez délicate puisque ce retrait peut être anisotrope pour des structures complexes. Il est cependant identique d'une fabrication à l'autre.

II.6. Conclusion.

Le pourcentage de particules céramiques et des autres éléments présents dans la suspension apparaît comme un paramètre extrêmement important tant chacun conditionne la solidité de la pièce et sa précision de fabrication. Il faut donc trouver un compromis sur ces différents paramètres parce que chacun d'eux peut radicalement changer les propriétés de la pièce fabriquée. Que ce soit au niveau de la tenue mécanique pendant et après la fabrication, de la résolution latérale, de la densité finale, des retraits, ..., chaque composition de pâte doit être étudiée et réalisée avec soin afin d'atteindre les performances souhaitées.

Comme nous l'avons vu, de fortes concentrations de particules ont tendance à diminuer la résolution latérale présentée par la stéréolithographie, à cause notamment des phénomènes de diffusion de la lumière dans des milieux fortement chargés en particules.

Cependant les résolutions latérales atteignables actuellement au CTTC de Limoges qui sont de l'ordre de $80\ \mu\text{m}$ nous semblent satisfaisantes pour les applications que nous envisageons. Considérant de plus qu'il est primordiale que les pièces réalisées ne présentent

ni cassures, ni fêlures, ni déformations importantes, le choix de cette technologie céramique et du CTTC se révèle être des plus pertinent pour la réalisation de pièces 3D complexes.

Afin de valider ce choix notamment pour des applications microondes, des designs originaux de résonateurs diélectriques vont être étudiés afin de proposer de nouvelles solutions de filtrage packagées et compatibles à un environnement donné.

III. Résonateur diélectrique original.

III.1. Introduction.

Nous pouvons retrouver l'utilisation de résonateurs diélectriques (RD) à forts facteurs de qualité à vide (Q_0) pour la conception de filtres jusqu'en 1968 [11]. A partir de l'association de plusieurs de ces résonateurs unitaires, des filtres passe bande le plus souvent bande étroite sont créés [12] comme le montre la Figure II-9. Les résonateurs utilisés ici présentent des facteurs de qualité à vide à 6 GHz de l'ordre de 6000 et la bande passante est inférieure à 1% à 6 GHz.

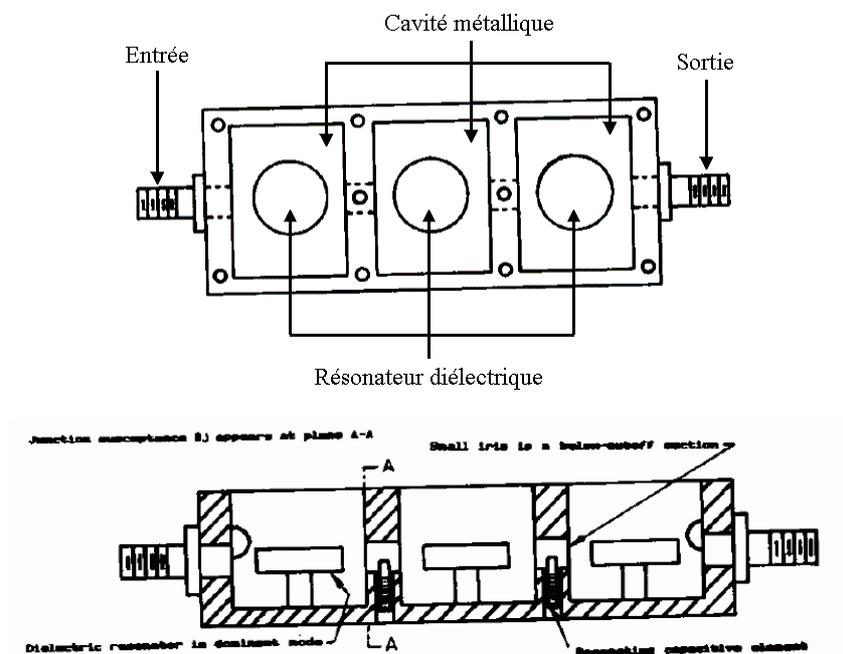


Figure II-9. [12] Filtre passe-bande trois pôles utilisant trois résonateurs diélectriques. Vue de dessus (haut) et de côté (bas).

Classiquement ces résonateurs sont de formes cylindriques et posés sur un support au milieu d'une cavité métallique. Ce support n'est pas obligatoire mais permet dans la plupart des configurations d'éloigner le RD du fond métallique de la cavité et de limiter les pertes amenées par cette paroi métallique. Cette forme de résonateur permet l'utilisation du mode fondamental $TE_{01\delta}$ qui est très souvent choisi pour des applications de filtrage notamment dans les stations de bases de télécommunication sans fils [13].

Ce mode de par sa configuration des champs électromagnétiques peut être excité par différents méthodes de couplages comme indiquées sur la Figure II-10 issue de [14].

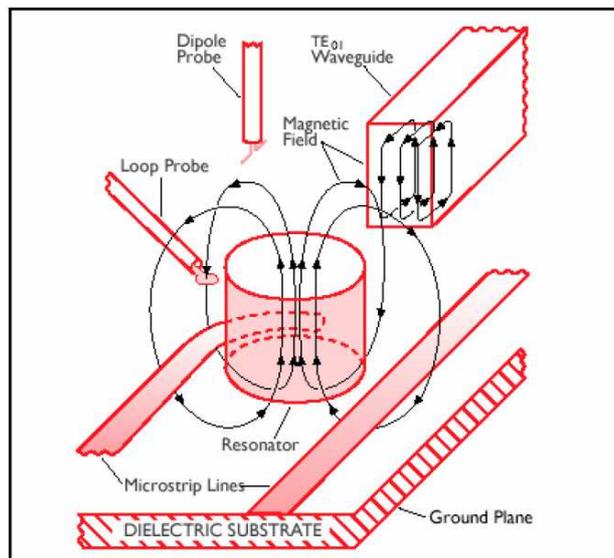


Figure II-10. [14] Différentes méthodes d'excitation pour un résonateur diélectrique fonctionnant sur le mode $TE_{01\delta}$.

Les plus utilisées sont les excitations par des boucles de courant qui produisent un couplage de type magnétique. Néanmoins beaucoup d'autres méthodes peuvent être utilisées comme des guides d'ondes ou encore des sondes de type dipôle qui produisent un couplage de type électrique.

Ces configurations de résonateurs classiques sont encore aujourd'hui reprises pour la conception de filtres accordables en fréquences à l'aide d'éléments novateurs comme les

Micro-Electro-Mechanical-Systems (MEMS) [15]. La Figure II-11 présente un filtre trois pôles à bases de résonateurs positionnés dans des cavités métalliques. Le capot supérieur reçoit les MEMS permettant l'accordabilité en fréquence de ce filtre. Ces MEMS permettent d'abaisser ou de relever une plaque métallique. C'est cette plaque qui, par sa position, permet de faire varier la fréquence de résonance du résonateur diélectrique placé en dessous d'elle.

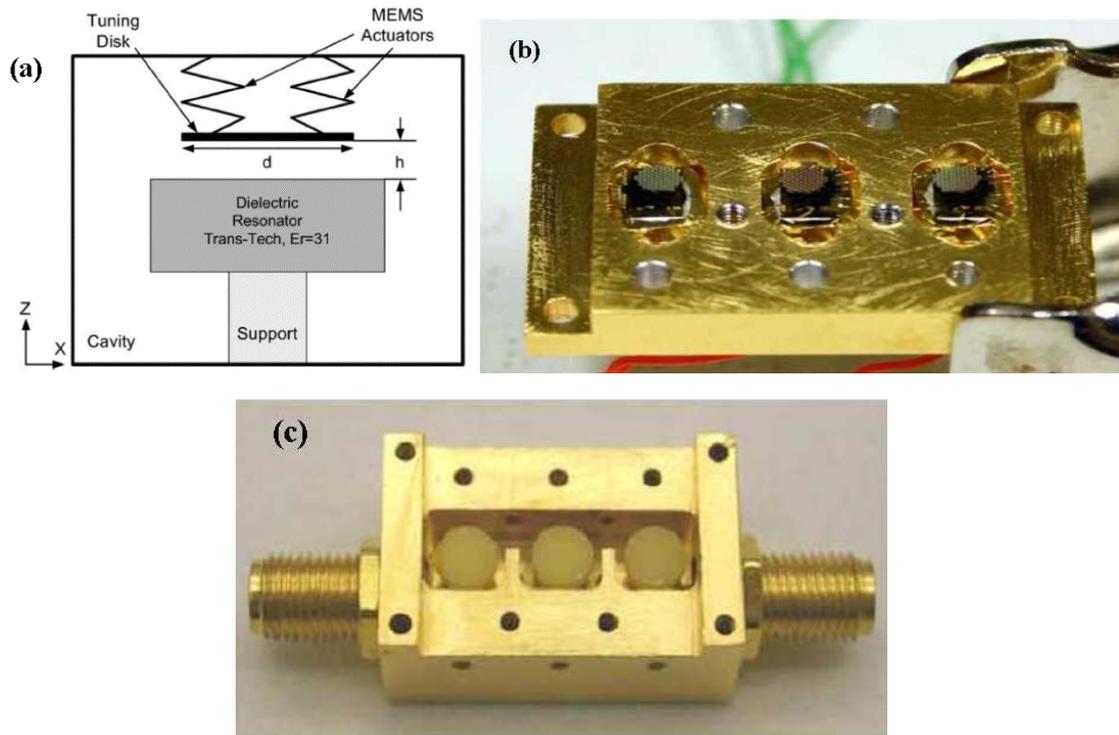


Figure II-11. [15] (a) Principe de la structure. (b) Vue du capot supérieur du filtre trois pôles comportant les MEMS. (c) Résonateurs diélectriques positionnées dans trois cavités métalliques adjacentes.

Des facteurs de qualité à vide compris entre 300 et 1600 sont obtenus sur une bande allant de 15.6 à 16 GHz. La bande passante de ce filtre est de 1%.

Les matériaux utilisés pour ces résonateurs sont le plus généralement des matériaux céramiques présentant une forte permittivité et de faibles pertes diélectriques. Ces pertes ont en effet besoin d'être faibles pour que les facteurs de qualités à vide produits par les RD soient les plus élevés possibles. Une forte permittivité permet de réduire fortement la taille du

résonateur parce que sa fréquence de résonance est inversement proportionnelle à la permittivité du matériau [14].

De tels éléments permettent alors d'obtenir des structures résonantes possédant des dimensions plus réduites qu'une cavité métallique classique tout en conservant des facteurs de qualités élevés. Ainsi, la référence [16] a comparé deux structures résonante à 33 GHz.

La première est une cavité d'air cylindrique de 7 mm de diamètre et de 3 mm de hauteur plaquée or. Cette cavité résonne sur son mode fondamental à 33 GHz et présente un facteur de qualité de 3200.

La deuxième est composé d'un résonateur diélectrique d'un diamètre de 2.5 mm et d'une hauteur de 0.82 mm. Ce RD est placé sur une support de 0.33 mm de hauteur au milieu d'une cavité métallique en or de 4 mm de diamètre pour une hauteur de 1.5 mm. La permittivité du résonateur diélectrique est de 24 et sa tangente de perte de $1.7 \cdot 10^{-4}$ à cette fréquence. Le facteur de qualité présenté par cette structure à 33 GHz est de 2600.

Il est à noter que ces structures classiques se révèlent présenter des facteurs de qualité plus élevés que ce que des technologies céramiques concurrentes comme le LTCC peuvent donner. La référence [17] rapporte un facteur de qualité à vide de l'ordre de 1000 à une fréquence de résonance équivalente pour une cavité tridimensionnelle construite par cette technologie.

Nous voyons alors que le facteur de qualité du système à résonateur diélectrique produit un facteur de qualité 19% inférieur à ce que donne la cavité métallique cylindrique. Seulement le volume occupé par le RD et sa cavité l'entourant est 84% plus faible que le volume de la cavité cylindrique remplie d'air.

Nous voyons alors l'intérêt d'utiliser des résonateurs diélectriques. Ceux-ci permettront de fournir des facteurs de qualité à vide, certes en retrait par rapport à ceux des cavités métalliques classiques, mais dans des configurations plus compactes que les cavités classiques.

Les configurations classiques présentées ici utilisant des RD sont donc constituées de quatre éléments fondamentaux que nous allons détailler plus en avant :

- un résonateur diélectrique
- une cavité métallique entourant le résonateur
- un système d'excitation
- un support

III.1.a. Résonateur diélectrique et cavité.

La taille du RD ainsi que celle de la cavité permettent notamment de régler deux paramètres qui sont le facteur de qualité à vide (Q_0) et l'isolation fréquentielle.

Ce dernier paramètre définit la largeur fréquentielle sur laquelle aucun mode de résonance n'existe en dehors de la résonance du résonateur. En effet dans la plupart des configurations, nous cherchons à maximiser cette bande pour garantir un fonctionnement sans résonances parasites de la structure résonante. Les différents modes existant dans une structure classique à base de RD proviennent des modes de cavité dus au blindage métallique et aussi des autres polarisations du résonateur diélectrique qui peuvent exister. Un dimensionnement attentif à la fois de la taille du RD mais aussi de celle de la cavité est alors nécessaire afin d'obtenir la meilleure isolation fréquentielle possible.

Le facteur de qualité Q_0 est lui principalement dépendant de la proximité des parois métalliques avec le RD. Plus celles-ci seront près du RD et plus les pertes métalliques ramenées seront élevées. L'obtention de fortes valeurs nécessite alors d'écarter au maximum ces parois de résonateur.

Nous avons alors concernant l'isolation et le facteur de qualité à vide deux axes d'optimisation qui peuvent être contradictoires. Ainsi écarter les parois de la cavité métallique pour augmenter Q_0 peut ramener des modes parasites à proximité de la fréquence de résonance du RD, la réciproque étant tout aussi problématique.

Il convient alors d'optimiser avec soin les dimensions à la fois du RD et de la cavité afin d'obtenir le meilleur compromis entre isolation fréquentielle et facteur de qualité à vide.

III.1.b. Système d'excitation.

L'un des buts de cette étude et de l'utilisation de la stéréolithographie 3D consiste à proposer et développer des topologies permettant une intégration aisée de telles structures résonantes dans un environnement planaire. Nous cherchons ici à concevoir une solution de filtrage assimilable à un composant monté en surface (CMS). Afin d'atteindre cet objectif, le système d'excitation que nous avons retenu est un système d'excitation coplanaire qui a déjà été validé à de nombreuses reprises [18, 19] et dont nous reviendrons sur le principe plus loin.

Ce système offre le grand avantage d'être compatible avec des technologies de report de type Flip-Chip ou par bonding qui permettent son intégration aisée dans un environnement planaire.

III.1.c. Support et assemblage.

Enfin concernant le support sur lequel vient se positionner le résonateur diélectrique, une grande attention sera accordée à sa forme et à sa taille. Comme nous l'avons évoqué plus tôt, son rôle est classiquement de surélever le résonateur du fond de la cavité afin de limiter les pertes ramenées par la paroi inférieure de la cavité métallique. Cet élément se doit de présenter une forme et une taille la plus discrète possible afin de ne pas perturber le fonctionnement du résonateur.

Un dernier point est aussi à prendre en considération concernant ces quatre éléments. La réalisation de la structure complète nécessite un assemblage et un positionnement des plus précis de ces différents éléments. La structure ne présentera pas le comportement souhaité en terme d'isolation fréquentielle et de facteur de qualité à vide si le RD n'est pas positionné correctement dans la cavité. Aussi, les fréquences de fonctionnement demandées de plus en plus élevées nécessitent l'utilisation de cavités et de résonateurs de plus en plus petits. Leur assemblage peut alors se révéler problématique et engendrer des coûts de fabrication qui peuvent devenir handicapants face aux technologies concurrentes [16].

C'est à partir de cette constatation que le deuxième but de notre étude a émergé. En plus de favoriser l'intégration de la structure que nous allons étudier, nous nous servirons de la versatilité de la stéréolithographie céramique 3D pour développer une topologie de résonateur innovante permettant de limiter les contraintes d'assemblage, notamment au niveau du positionnement du résonateur au sein de la cavité métallique. La structure que nous allons étudier, qui sera principalement constituée de céramique, amènera aussi potentiellement des performances de tenues mécaniques et thermiques quasi-inégalables par d'autres technologies de fabrication.

III.2. Principe de la structure.

La structure développée est basée sur le principe d'associer en *une seule* pièce céramique le résonateur, la cavité et le support.

Le cahier des charges amené par une telle structure est donc le suivant :

- Résonateur en une pièce (résonateur + support + cavité) réalisée en céramique faibles pertes.
- Forme du résonateur diélectrique : libre afin de garantir le meilleur compromis entre le facteur de qualité à vide et l'isolation fréquentielle.
- Mode de résonance du RD : fondamental pour diminuer au maximum sa taille à une fréquence donnée.
- Excitation de type coplanaire pour des raisons d'intégration.
- Forme du support compatible avec la technologie de fabrication et entraînant le moins de perturbations possible.
- Parois de la cavité suffisamment fines pour éviter la création de modes parasites tout en assurant une bonne tenue mécanique notamment au cours de la fabrication.
- Fréquence de fonctionnement : supérieure à 10 GHz.
- Technique de métallisation pour le blindage extérieur la plus souple d'application possible.

Pour satisfaire les contraintes décrites ci-dessus, nous avons considéré la structure suivante présentée sur la Figure II-12.

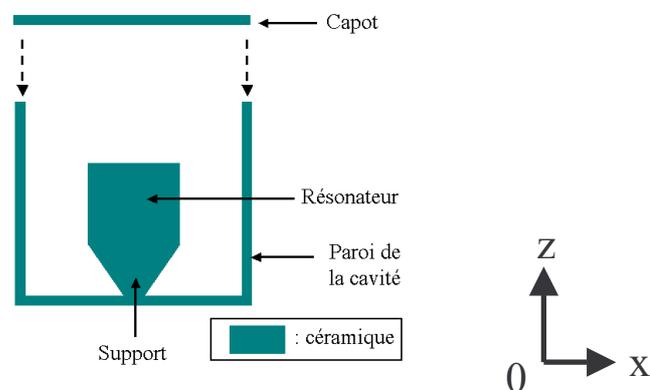


Figure II-12. Principe de la structure (vue en coupe). Toutes les faces extérieures sont métallisées.

Ce dispositif se répartie en deux parties céramiques, la première étant composée du résonateur, de son pied de support et d'une partie de la cavité. Cette pièce se trouve alors ouverte sur sa face supérieure ce qui permet le nettoyage de la pâte non polymérisée (étape de la stéréolithographie céramique 3D nécessaire avant sa cuisson).

La deuxième partie en céramique de cette structure est un capot rajouté pour compléter le blindage.

Les supports classiquement utilisés pour les résonateurs diélectriques sont d'une taille largement inférieure à celle du RD. Dans cette configuration, une grande surface du RD n'est donc pas soutenu par le support.

Nous envisageons de réaliser en une seule pièce le support et le résonateur diélectrique. Or, compte tenu des remarques du paragraphe II.5.a sur les pièces présentant des parties suspendues dans le vide, cette topologie peut typiquement se révéler problématique à fabriquer par stéréolithographie. Un type de support particulier a été choisi comme nous pouvons le voir sur la Figure II-12. Ce support permet d'être construit sans avoir recours à des piliers supplémentaires pour éviter des déformations lors du dépôt des couches de pâte. De plus, il permet de présenter une tenue mécanique forte du résonateur qui devient alors solidaire du fond de la cavité, éliminant alors tout problème de positionnement et d'assemblage du RD dans la cavité.

C'est aussi pour ces raisons de tenue mécanique au cours de la réalisation que le résonateur a été choisi de forme cubique.

Une fois le capot déposé sur la pièce céramique principale, toutes les faces extérieures de ce parallélépipède sont métallisées.

Intéressons nous maintenant à l'optimisation des performances de l'élément résonnant de cette structure et à son dimensionnement. Ce travail s'effectuera grâce au logiciel de simulation électromagnétique (EM) 3D développé par Michel Aubourg dans le laboratoire Xlim [20]. Ce logiciel, appelé *EMXD* et basé sur la méthode des éléments finis (MEF), effectue la résolutions des équations de Maxwell dans le domaine fréquentiel. Il permet de réaliser des simulations en oscillations forcées et oscillations libres. Ces deux méthodes de résolution permettent respectivement de connaître le comportement en fréquence de la structure étudiée avec et sans contraintes d'excitation. La résolution en oscillations libres permet notamment d'avoir accès aux différents modes propres existants dans une structure ainsi qu'aux facteurs de qualités à vide des modes de résonances trouvés et à leur répartition de champs EM. La résolution en oscillations forcées permet de connaître l'évolution des

paramètres S en fonction de la fréquence et aussi la configuration de champs EM à une fréquence donnée.

IV. Optimisation des performances.

IV.1. Mise en place de la structure initiale d'optimisation.

La première étape consiste à caractériser la céramique utilisée lors de la fabrication. La priorité étant l'utilisation d'une céramique ayant la plus faible tangente de perte possible, le choix s'est naturellement porté sur l'alumine qui présente de plus une permittivité assez élevée pour permettre une réduction intéressante des dimensions du RD.

L'alumine utilisée par le CTTC a pour cela été caractérisée à Xlim par la méthode décrite dans la référence [21]. Cette méthode consiste à introduire une plaque de matériau de quelques centaines de micromètres d'épaisseur dans une cavité résonnante métallique et d'observer les effets de cette insertion sur le comportement en fréquence de cette cavité résonnante. Ainsi en fonction du décalage fréquentiel subit par la résonance de la cavité et de la dégradation du facteur de qualité à vide de celle-ci, il est possible de connaître la permittivité et la tangente de pertes du matériau inséré.

Ainsi les propriétés suivantes ont été obtenues à 15 GHz :

- permittivité relative : 8.3
- tangente de perte : $1.3 \cdot 10^{-4}$

Comme attendu, cette céramique présente une faible tangente de perte.

Connaissant maintenant précisément la céramique utilisée, une étude en oscillation libre est conduite afin de connaître la répartition des modes de résonances existant dans cette structure. Pour cela, la structure montrée dans la Figure II-12 est considérée entièrement métallisée sur ses faces extérieures avec de l'or dont la conductivité est de $4.1 \cdot 10^7$ S/m.

L'objectif de filtrage devant être atteint se compose de trois points essentiels :

- une fréquence de fonctionnement >10 GHz.

- une isolation fréquentielle égale à au moins 10% de la fréquence de fonctionnement, et cela de part et d'autre de la fréquence de résonance du RD.
- le meilleur facteur de qualité possible en conservant l'isolation fréquentielle choisie.

Cette étude a pour but de dimensionner la cavité et le résonateur afin de satisfaire la fréquence de travail objective et de garantir un bon compromis entre le facteur de qualité à vide et l'isolation fréquentielle. Ce design présenté sur la Figure II-13 servira par la suite de base à son optimisation. Il possède deux plans de symétrie rendant les plan $x0y$ et $y0z$ identiques.

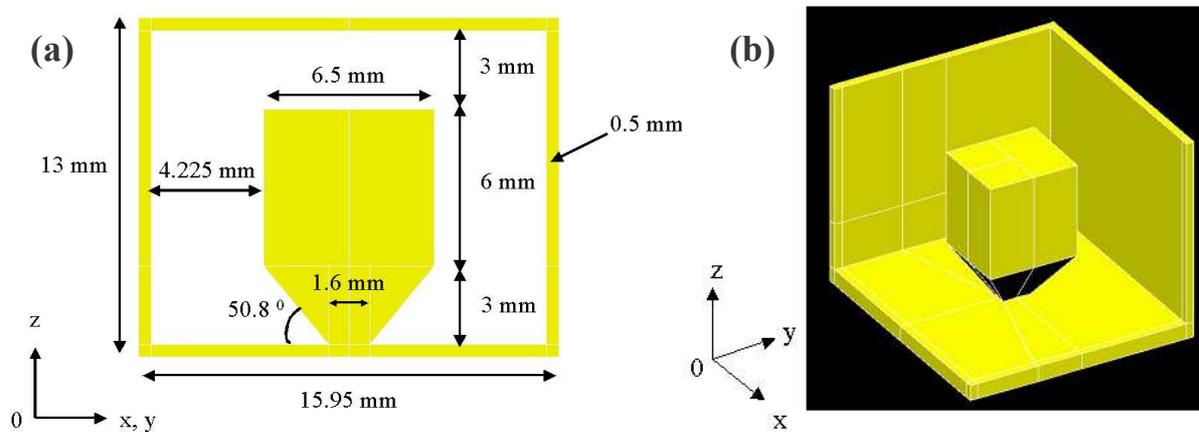


Figure II-13. (a) Dimensions de la structure de base choisie. (b) Vue 3D ouverte du maillage de la structure.

L'épaisseur des parois a été fixée dans un premier temps à 0.5 mm afin de garantir une tenue mécanique satisfaisante pour endurer les contraintes liées à la réalisation. Cette valeur a été fixée dans les premières phases de conception après discussion avec Cyrille Delage, responsable du service Recherche et Développement du CTTC. Celle-ci, compte tenue de la hauteur de la pièce, donne aux parois une rigidité mécanique suffisante pour endurer le processus de fabrication.

Ces dimensions donnent une répartition des modes résonants comme suit :

- mode de cavité TM_{110} à 10.84 GHz
- résonance du RD sur le mode $TE_{01\delta}$ à 12.61GHz
- mode cavité TM_{111} à 13.98 GHz

L'isolation fréquentielle de cette structure préliminaire se révèle très intéressante avec 10% de chaque côté de la résonance du RD.

La métallisation extérieure dorée envisagée donne alors un facteur de qualité à vide à 12.61 GHz très intéressant. Celui-ci est de 7100 et a été obtenu par la simulation de ce RD par le logiciel EMXD en oscillation libre en considérant une conductivité pour l'or de $4.1 \cdot 10^7$ S/m. L'alumine simulée présente une permittivité de 8.3 et une tangente de pertes de $1.3 \cdot 10^{-4}$. Concernant ce facteur de qualité, environ 80% des pertes sont dues au matériau diélectrique et 20% à la métallisation.

Le Tableau 1 montre l'évolution de ce même facteur de qualité en fonction de trois configurations différentes qui sont, pour une taille globale et une fréquence de résonance du RD identique :

- la structure sans support
- la structure avec support mais entouré d'une cavité métallique d'or (pas de parois en alumine) dont la conductivité est de $4.1 \cdot 10^7$ S/m.
- la structure sans support ni parois diélectriques.

Ces configurations purement théoriques sont étudiées afin de connaître l'impact des différents éléments sur le facteur de qualité à vide du résonateur diélectrique.

	Structure complète	Pas de support	Pas de parois céramiques	Ni support ni parois
Q0	7100	7500	7200	7700

Tableau 1. Evolution du facteur de qualité à vide pour différentes configurations.

Comme on peut le voir, le support n'influe que très peu sur le facteur de qualité en ne rajoutant que 5% de pertes en plus. Les parois céramiques rajoutent de même moins de 1.5% de pertes en plus. Il est aussi intéressant de regarder la répartition du champ électrique à la résonance du RD afin de regarder l'impact sur sa configuration amené par la présence du pied de support (Figure II-14 et II-15). Cette observation permettra de plus de repérer les endroits susceptibles de recevoir les motifs coplanaires choisis qui serviront à exciter la structure.

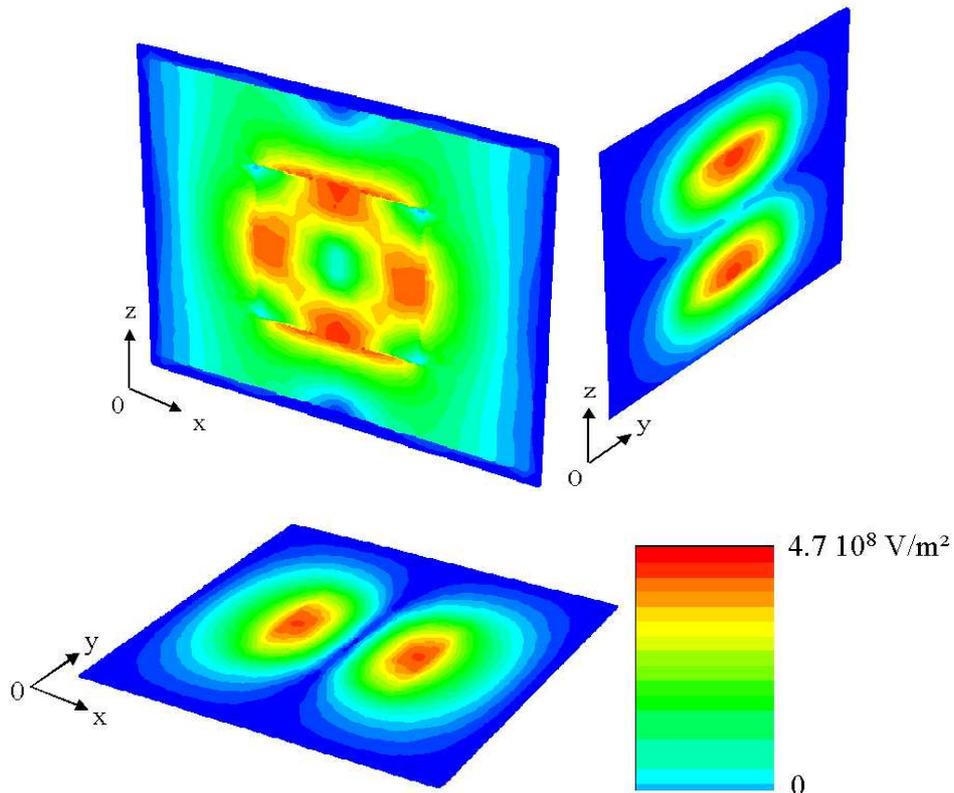


Figure II-14. Répartition du champ électrique à la résonance du résonateur diélectrique. Cette configuration ne possède pas de support par rapport à la configuration présentée Figure II-12.

Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

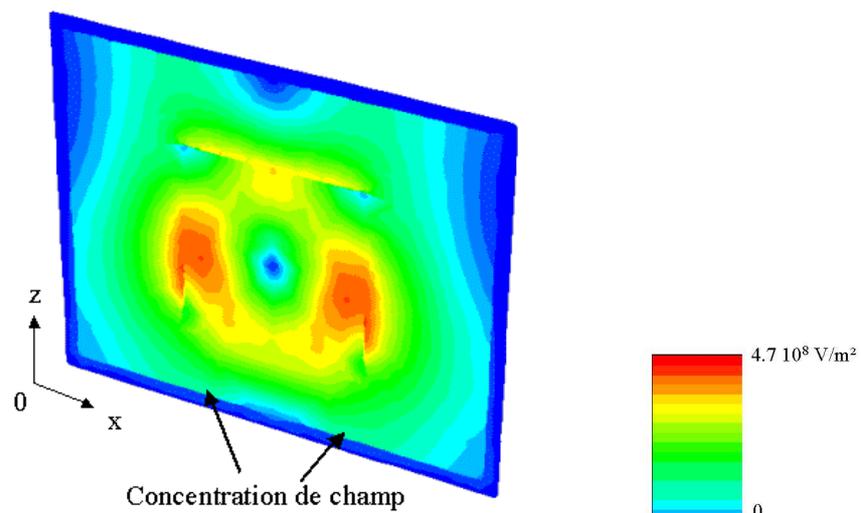


Figure II-15. Configuration de champ électrique pour la structure dans la configuration initialement choisie (avec support) à la fréquence de résonance du RD. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

La présence du support ne modifie fondamentalement pas la configuration du champ électrique pour le résonateur à sa résonance. Il est intéressant de noter que la présence du pied provoque tout de même une concentration E du champ plus importante dans sa périphérie que sur le dessus du résonateur. De plus, on peut observer la présence de deux maximums du champ électrique de part et d'autre du pied, lieux qui apparaissent comme tout à fait adaptés pour la mise en place des motifs d'excitations.

Ces motifs seront ainsi positionnés sur la face extérieure du fond de la cavité. L'intégration de ce RD dans un environnement planaire sera alors très aisé puisqu'il suffira de venir reporter notre structure sur une carte mère possédant des lignes d'accès de type coplanaire. Ceci pourra se faire par des techniques standards utilisées pour le montage de puces sur ce type de carte mère.

Toutefois, compte tenu de la hauteur globale de la structure, les méthodes de lithographie et de gravure des métaux disponibles à Xlim ne permettent pas de réaliser la métallisation et la gravure nécessaire à la définition des motifs d'excitation sur cette face inférieure.

La solution appliquée consiste à coller sur le fond de la structure une plaque d'alumine commerciale rectifiée pré-métallisée. D'une épaisseur de $250 \mu m$, ces plaques présentent une permittivité de 9.8 et une tangente de perte de $1 \cdot 10^{-4}$ sur la bande de fréquence étudiée. Elles reçoivent une épaisseur de $8 \mu m$ d'or déposée sur une couche d'accroche de Chrome de 40 nm. La face opposée à cette face métallisée reste nue. Ainsi, après avoir coupé cette plaque aux dimensions correspondantes à celles de la face inférieure de la structure, celle-ci sera lithographiée et gravée afin de positionner le motif d'excitation choisi. Nous rappelons ici que cette procédure n'est due qu'aux moyens technologiques d'Xlim non adaptés. Un procédé technologique industriel adapté pourrait parfaitement graver les motifs d'excitation directement sur la face inférieure de la structure monobloc (RD + cavité + support).

Une plaque d'alumine du même type est choisie pour servir de capot et ainsi fermer la structure. Celle-ci ne recevra aucun motif d'excitation.

La Figure II-16 résume ces opérations.

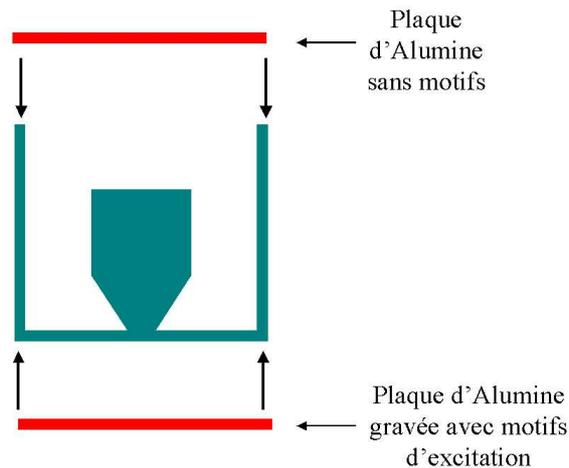


Figure II-16. Principe définitif de montage.

La métallisation des faces latérales a constitué une phase délicate du travail. Il a donc fallu adapter notre technologie. Nous nous sommes alors orientés vers une approche simple mais efficace. Elle consiste en l'utilisation d'une peinture métallisée à l'argent Epotek E202. En effet cette peinture et son mode d'application extrêmement simple (pinceau, trempage, ...) la rendent assez souple d'utilisation pour assurer un blindage continu sur toutes les faces latérales de cette structure. Pour la réalisation d'un démonstrateur tel que nous le concevons, cette technique est suffisante. Une métallisation par évaporation pourrait être appliquée si nécessaire.

La peinture utilisée possède une conductivité variant entre 1 et $8 \cdot 10^5$ S/m (données constructeur), ce qui est beaucoup moins que la conductivité envisagée initialement. En effet, le facteur de qualité décroît alors à 4000 (à comparer au 7100 pour un blindage latéral à l'or). Sur cette configuration 55% des pertes proviennent du métal et 45% des pertes diélectriques. De plus, la qualité de la métallisation latérale se révèle très importante puisqu'elle est à l'origine d'une baisse de 44% sur le facteur de qualité à vide du résonateur.

Remarque : les facteurs de qualité des modes de cavité à 10.8 GHz (TM_{110}) et 14 GHz (TM_{111}) sont respectivement de 2000 et 1450 pour la configuration envisagée avec la métallisation à la peinture à l'argent.

Afin de confirmer cela, une étude plus approfondie sur l'impact de la qualité de métallisation des faces latérales et supérieures / inférieures est menée. La Figure II-17 présente l'évolution du facteur de qualité à vide du résonateur diélectrique en fonction de la

qualité de métallisation des faces supérieure et inférieure. La conductivité des faces latérales est fixée à $4.1 \cdot 10^7$ S/m, c'est à dire celle de l'or.

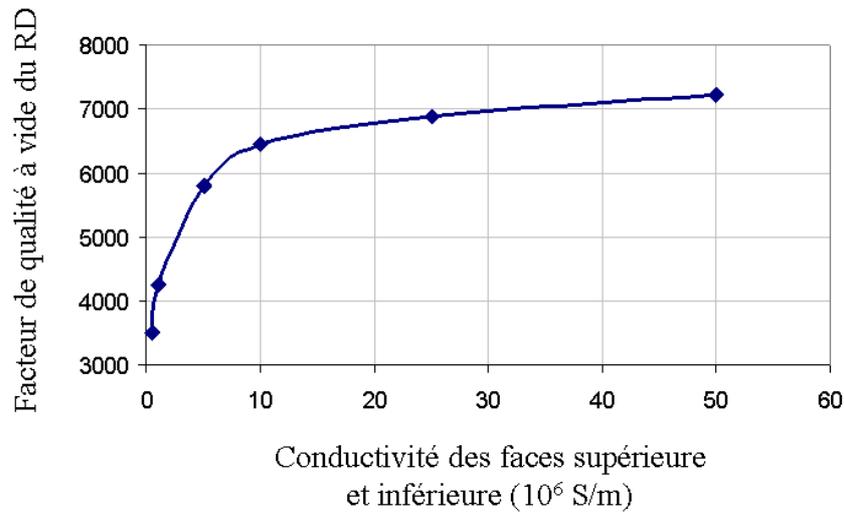


Figure II-17. Evolution du facteur de qualité à vide du RD en fonction de la conductivité des faces supérieures et inférieures.

La Figure II-18 montre l'évolution de ce même facteur de qualité pour des conductivités différentes apposées sur les faces latérales, les faces supérieures et inférieures étant dorées.

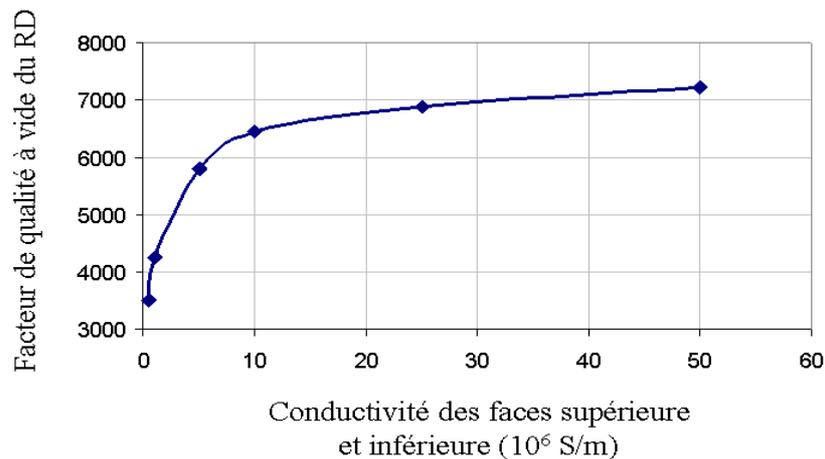


Figure II-18. Evolution du facteur de qualité à vide du RD en fonction de la conductivité des faces latérales.

Nous pouvons alors voir que les faces latérales et supérieures / inférieures ont quasiment le même impact sur le facteur de qualité à vide du résonateur diélectrique. Il est

alors évident que sa valeur est fortement liée à la qualité de métallisation appliquée sur l'ensemble des faces extérieures de cette structure.

Un point important du cahier des charges concerne la recherche du compromis facteur de qualité / isolation fréquentielle optimum. Nous procédons donc ensuite à l'optimisation des dimensions de notre structure.

IV.2. Optimisation et choix des dimensions.

Cette optimisation résulte de calculs EM. Elle a été réalisée à partir de l'évolution des fréquences de résonance des trois modes existant dans la bande 12-18 GHz en fonction des différents éléments géométriques essentiels de la structure. Ces modes de résonance sont respectivement le mode de cavité TE_{110} de fréquence f_1 , le mode de résonance du résonateur $TE_{01\delta}$ de fréquence f_0 et enfin le mode de cavité TM_{111} de fréquence f_2 . Les fréquences f_0 , f_1 , et f_2 sont en GHz. Les facteurs de qualité à vide respectifs associés à ces modes seront appelés Q_1 , Q_0 et Q_2 . Les résultats de cette étude seront présentés de la Figure II-19 à la Figure II-32. Pour chacune des études considérées, l'alumine utilisée présente une permittivité de 8.3 et une tangente de perte de $1.3 \cdot 10^{-4}$ considérée constante sur la bande de fréquence 10 – 16 GHz. La structure sera entièrement métallisée sur ses faces extérieures avec de l'or dont la conductivité est de $4.1 \cdot 10^7$ S/m. Chacun de ces calculs a été réalisé avec le logiciel EMXD en oscillations libres.

Un schéma est présent sur chaque figure pour mettre en évidence le paramètre géométrique considéré.

- Optimisation de la hauteur du pied de support.

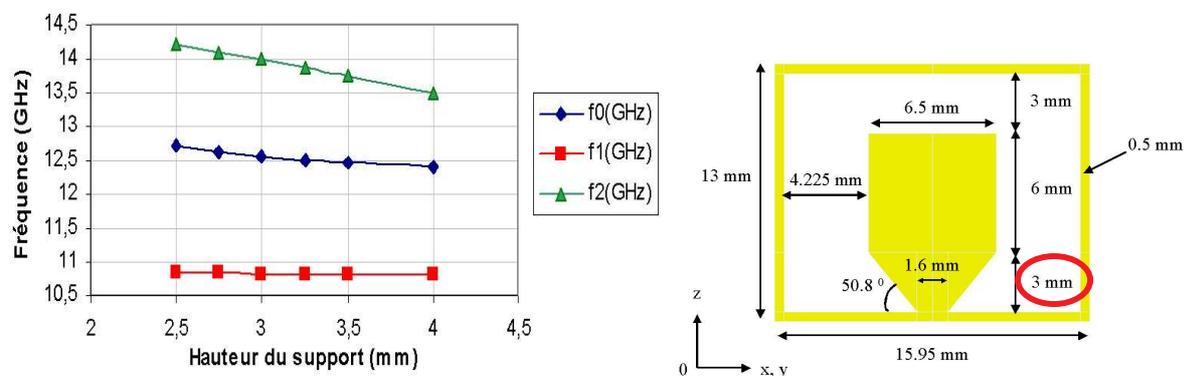


Figure II-19. Evolution des fréquences de résonance en fonction de la hauteur du support.

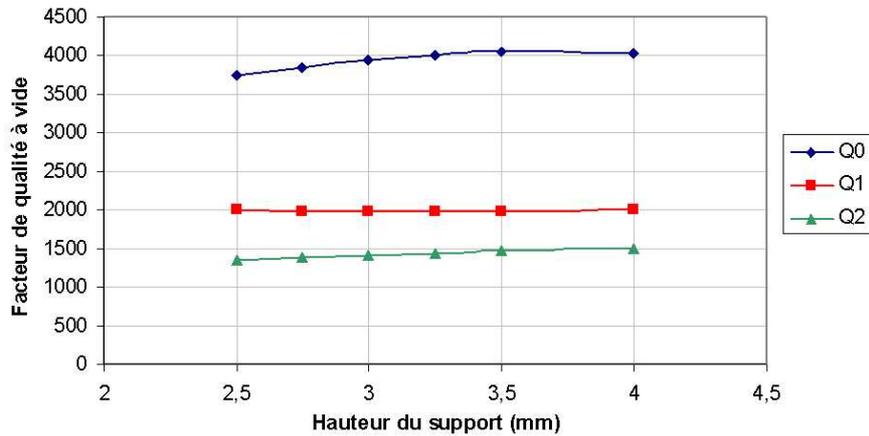


Figure II-20. Evolution des facteurs de qualité Q0, Q1 et Q2 en fonction de la hauteur du support.

L'augmentation de la hauteur du support tend à diminuer l'isolation fréquentielle sans modifier notablement le facteur Q0. Au contraire, ce dernier décroît pour des hauteurs de support plus faibles à cause de la proximité du RD avec la paroi métallisée inférieure. La fréquence de résonance du résonateur apparaît assez peu sensible à ce paramètre. Ainsi 3 mm semble un bon compromis. Autour de cette valeur, si l'on considère une tolérance de fabrication de plus ou moins $100 \mu m$, la fréquence de résonance du RD subit une variation de plus ou moins 0.2%.

- Optimisation de la hauteur du résonateur.

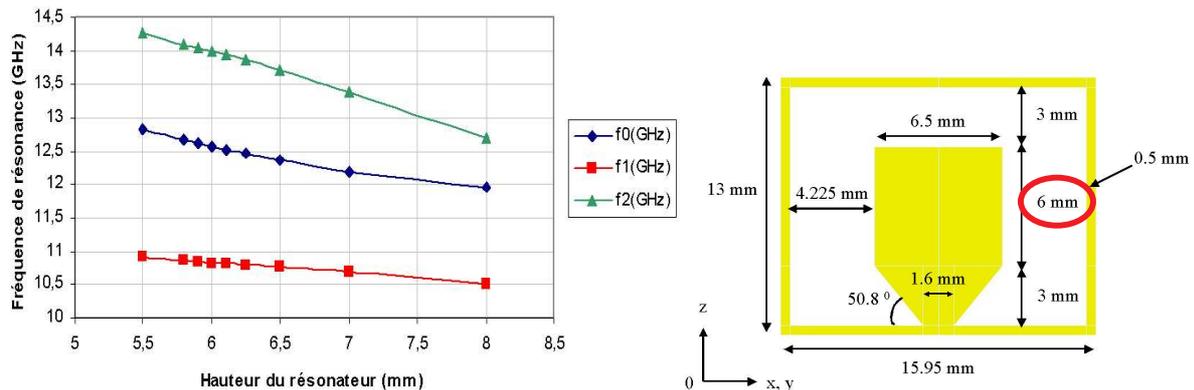


Figure II-21. Evolution des fréquences de résonance en fonction de la hauteur du résonateur.

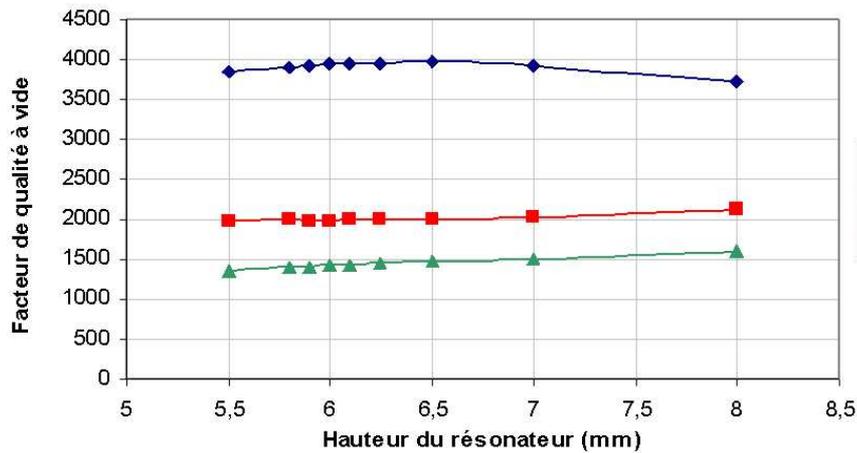


Figure II-22. Evolution des facteurs de qualité Q0, Q1 et Q2 en fonction de la hauteur du résonateur.

Ici l'isolation fréquentielle est fortement améliorée par la diminution de la hauteur de résonateur diélectrique. Le facteur de qualité Q0 passe lui par un optimum pour une hauteur voisine de 6.5 mm.

La fréquence f_0 est naturellement très sensible à une modification de la hauteur du résonateur. Une hauteur de 6 mm apparaît comme un bon compromis. si l'on considère une tolérance de fabrication de plus ou moins $100 \mu m$, la fréquence de résonance du RD subit une variation de plus ou moins de 0.4% sur f_0 .

- Optimisation de la largeur (longueur) du résonateur.

Etant donné que le résonateur diélectrique possède la même longueur et largeur, l'étude ne sera menée que sur une seule de ces deux dimensions.

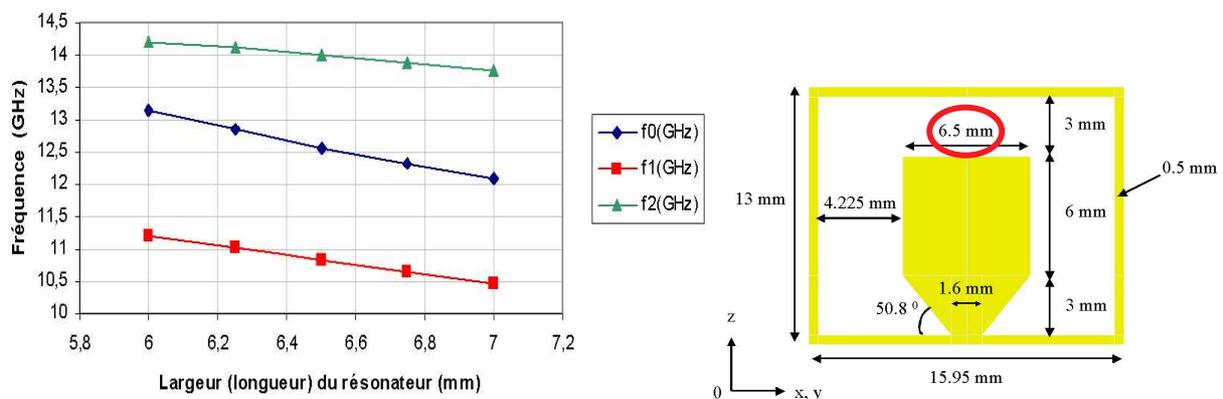


Figure II-23. Evolution des fréquences de résonance en fonction de la largeur (longueur) du résonateur.

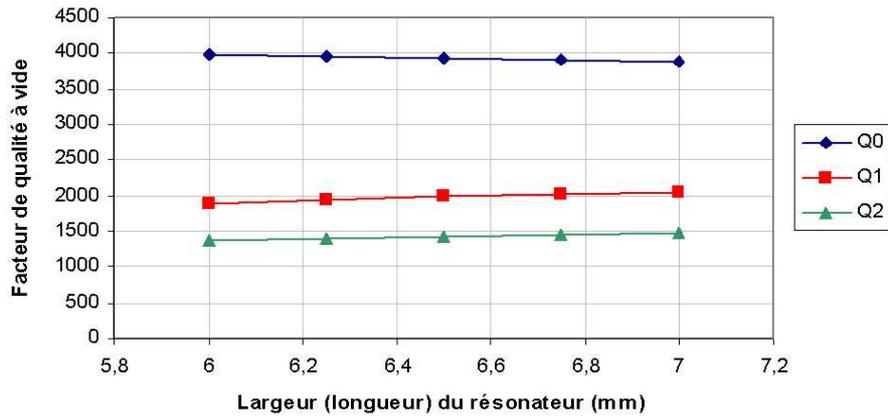


Figure II-24. Evolution des facteurs de qualité Q0, Q1 et Q2 en fonction de la largeur (longueur) du résonateur.

La fréquence de résonance du résonateur diélectrique est également très perturbée par des variations de ce paramètre. Le facteur de qualité n'est que peu modifié. La meilleure isolation fréquentielle est obtenue pour une largeur (longueur) de RD de 6.5 mm.

Si l'on considère une tolérance de fabrication de plus ou moins $100 \mu m$, la fréquence de résonance du RD subit une variation de plus ou moins de 0.8%.

- Optimisation de l'épaisseur du fond de la structure.

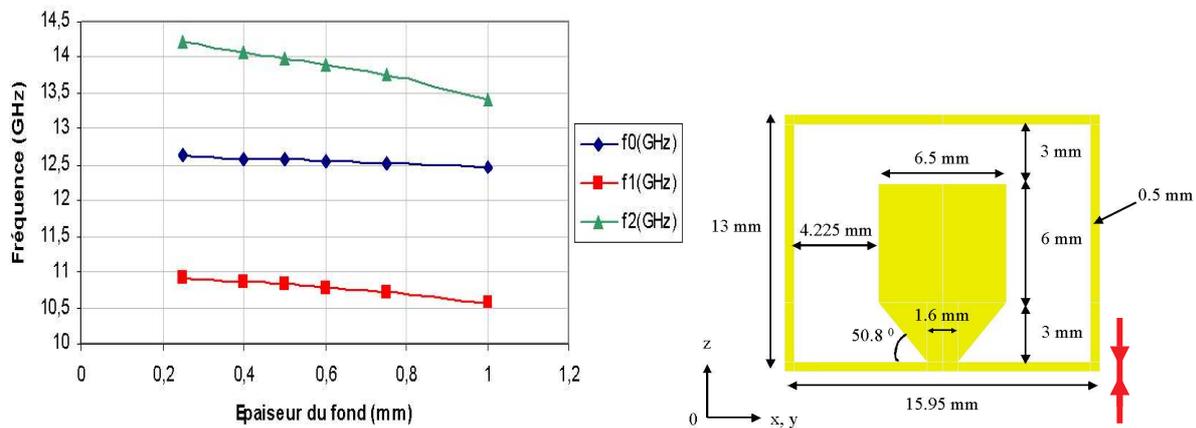


Figure II-25. Evolution des fréquences de résonance en fonction de l'épaisseur du fond de la structure.

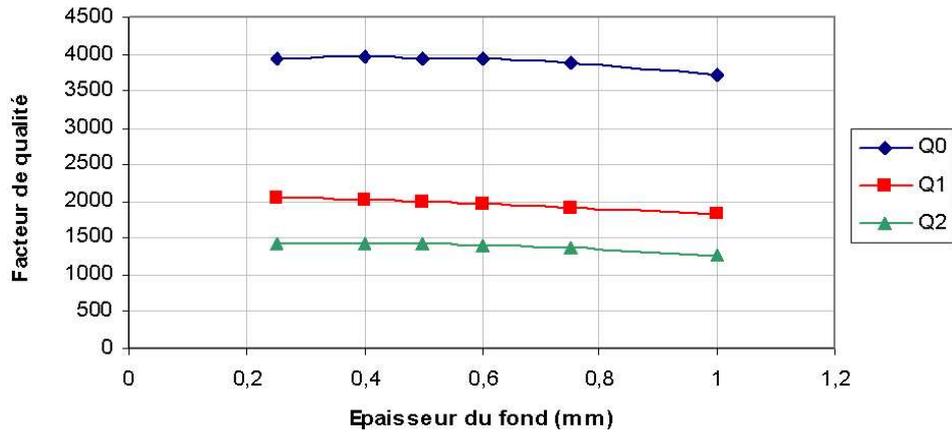


Figure II-26. Evolution des facteurs de qualité Q0, Q1 et Q2 en fonction de l'épaisseur du fond de la structure.

Ce paramètre n'a que peu d'influence sur la fréquence f_0 . L'isolation fréquentielle reste quasiment constante tant que cette épaisseur ne dépasse pas 0.5 mm. Cette dernière valeur est d'ailleurs retenue afin d'assurer une base solide à la structure en vue de sa construction.

Si l'on considère une tolérance de fabrication de plus ou moins $100 \mu m$, la fréquence de résonance du RD subit une variation de plus ou moins à 0.2%.

- Optimisation de l'épaisseur des parois latérales de la cavité.

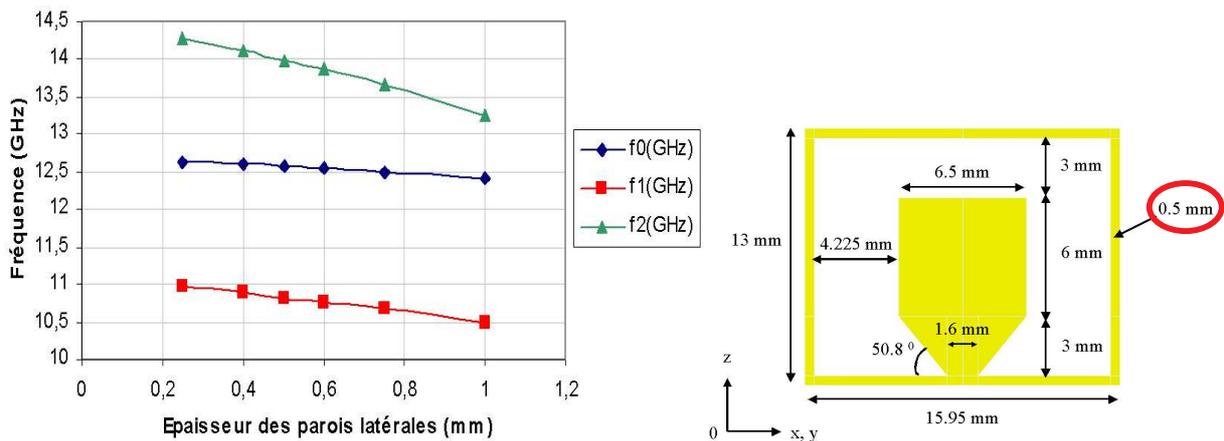


Figure II-27. Evolution des fréquences de résonance en fonction de l'épaisseur des parois latérales.

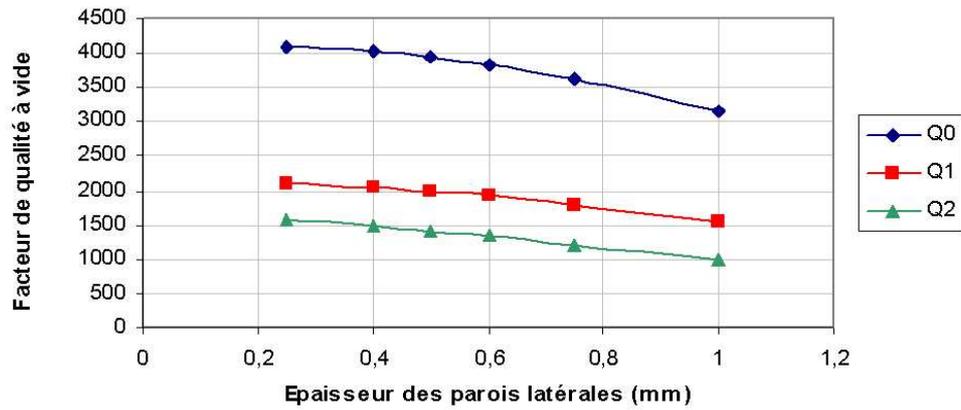


Figure II-28. Evolution des facteurs de qualité Q0, Q1 et Q2 en fonction de l'épaisseur des parois latérales.

Ce paramètre n'influe que très peu sur la fréquence de résonance du résonateur. Par contre les résonances de cavités le sont beaucoup plus. L'isolation devient meilleure et le facteur de qualité plus important pour les valeurs les plus faibles. Toutefois le stress enduré par la pièce au cours de la fabrication ne permet pas de réaliser des parois inférieures à $500 \mu m$ pour de telles hauteurs. Une épaisseur de 0.5 mm est ainsi choisie en se basant notamment sur l'expérience du CTTC au niveau de la fabrication afin de trouver ici un compromis isolation fréquentielle / facteur de qualité / tenue mécanique satisfaisant.

Si l'on considère une tolérance de fabrication de plus ou moins $100 \mu m$, la fréquence de résonance du RD subit une variation de plus ou moins 0.2% .

- Optimisation de la hauteur de la cavité.

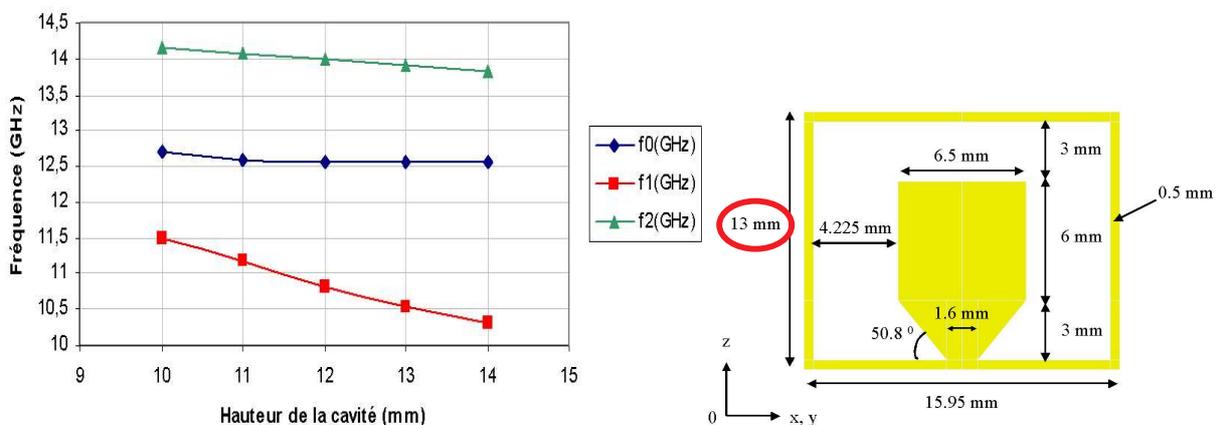


Figure II-29. Evolution des fréquences de résonance en fonction de la hauteur de la cavité.

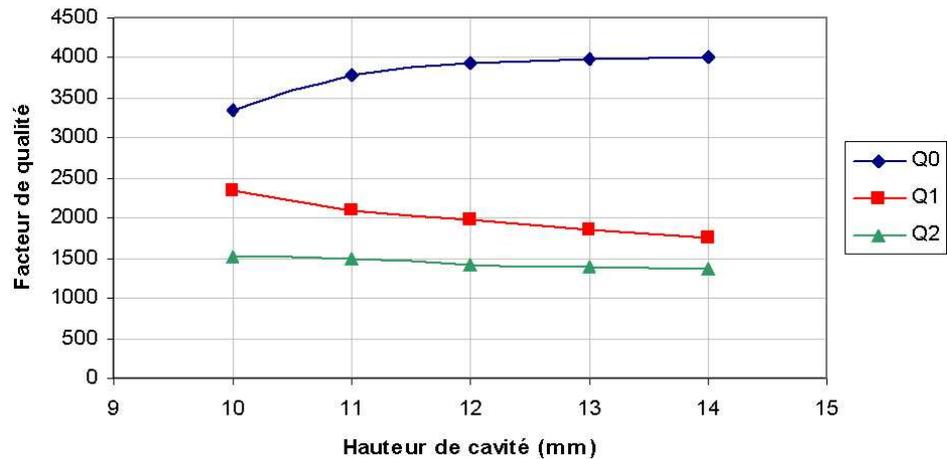


Figure II-30. Evolution des facteurs de qualité Q0, Q1 et Q2 en fonction de la hauteur de la cavité.

Ce paramètre n'a que très peu d'impact sur la fréquence f_0 . Par contre une hauteur trop faible réduit la distance entre le capot supérieur métallisé et le résonateur diélectrique. Ceci conduit à une forte dégradation du facteur de qualité à vide. Celui-ci atteint sa valeur maximale proche de 4000 à partir d'une hauteur de 12 mm et l'isolation fréquentielle reste intéressante pour cette valeur. Si l'on considère une tolérance de fabrication de plus ou moins $100 \mu m$, la fréquence de résonance du RD subit une variation de plus ou moins 0.02%.

- Optimisation de la largeur (longueur) de la cavité.

De même que pour les dimensions latérales du RD, la symétrie de la cavité ne nécessite qu'une étude sur une de ses deux dimensions latérales.

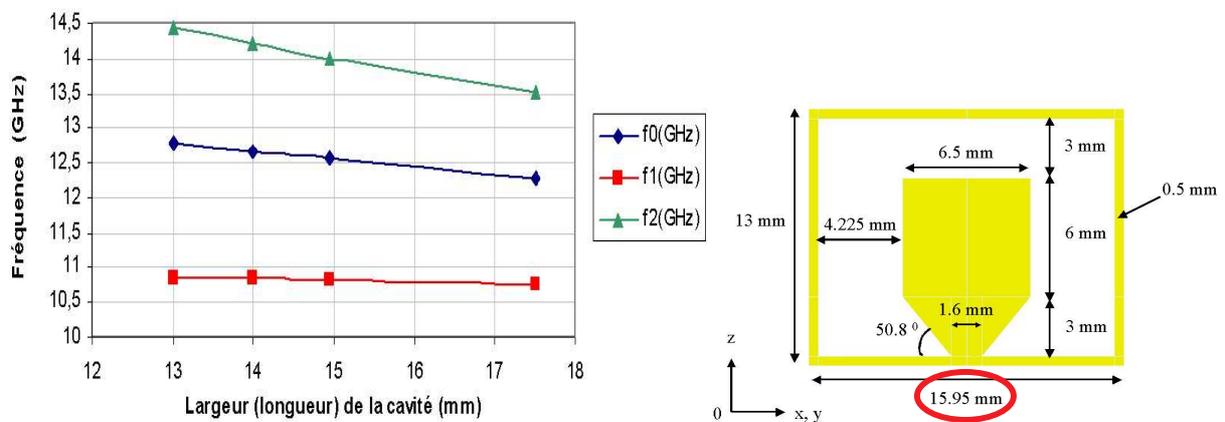


Figure II-31. Evolution des fréquences de résonance en fonction de la largeur (longueur) de la cavité.

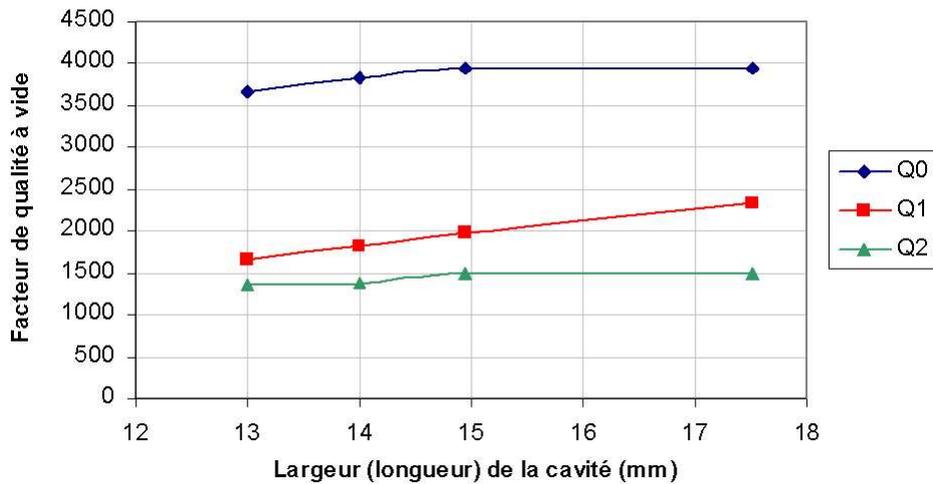


Figure II-32. Evolution des facteurs de qualité Q0, Q1 et Q2 en fonction de la largeur (longueur) de la cavité.

L'impact de ce paramètre sur la fréquence de résonance du RD est assez modéré. Le facteur de qualité à vide de celui-ci est dégradé lorsque les parois se rapprochent du résonateur et ne dépasse pas 4000 pour une longueur (largeur) supérieure à 15mm. L'isolation en fréquence par contre s'améliore quand les parois se rapprochent du RD. Un bon compromis est obtenu pour une largeur (longueur) de 15 mm.

Si l'on considère une tolérance de fabrication de plus ou moins $100 \mu m$, la fréquence de résonance du RD subit une variation de plus ou moins 0.1%.

Les valeurs choisies pour la structure initiale se révèlent être un compromis très satisfaisant entre l'isolation fréquentielle autour de la résonance du résonateur, son facteur de qualité à vide et la tenue mécanique liée au procédé de fabrication par stéréolithographie.

Un tout dernier point reste alors à finaliser avant la réalisation et l'assemblage : le motif d'excitation.

IV.3. Motif d'excitation coplanaire.

Compte tenu de la configuration des champs EM liés au mode $TE_{01\delta}$ et à partir des études antérieures [18, 19], nous avons choisi l'utilisation de motifs d'excitations de type coplanaire. Ceux-ci viendront se positionner par gravure au niveau de la métallisation de la face intérieure de la structure envisagée. Comme nous l'avons précisé précédemment, ces motifs permettront une excellente intégration de la structure résonnante dans un environnement hyperfréquence.

Ce motif a été dimensionné afin de produire une faible excitation du résonateur. Ceci permettra d'identifier et de caractériser dans de bonnes conditions expérimentales les modes de résonance produit par la structure et de mesurer le facteur de qualité à vide avec précision.

La Figure II-33 présente le motif utilisé.

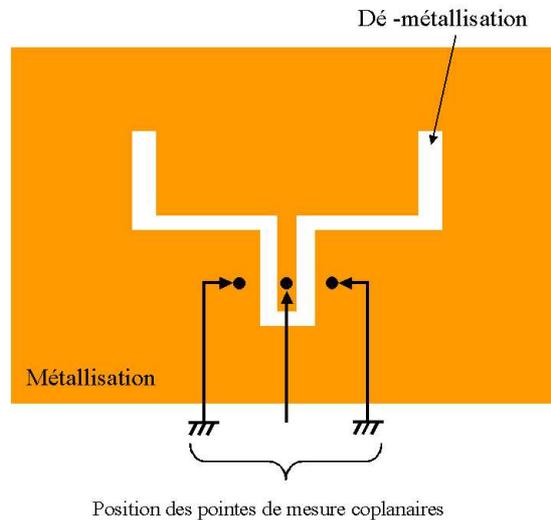


Figure II-33. Motif coplanaire court-circuité.

Ce motif court-circuité à son extrémité permet une concentration du champ électromagnétique en ce point. Le coefficient de couplage extérieur Q_e sera en outre réglé et contrôlé en jouant sur la position et la taille globale de ce motif. Q_e traduit le couplage entre le système d'excitation et le mode de résonance excité.

Ainsi, un motif de taille réduite a été choisi en vue de sous coupler le résonateur ; la valeur du terme quantifiant ce couplage appelé le facteur de qualité extérieur Q_e sera alors suffisant élevé pour pouvoir mesurer directement sur la réponse en fréquence de la structure le facteur de qualité à vide Q_0 .

En effet, le facteur de qualité en charge mesuré expérimentalement Q_l est lié aux deux autres termes par la relation : $\frac{1}{Q_l} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{e1}} + \frac{1}{Q_{e2}}$ [22], Q_{e1} et Q_{e2} étant respectivement les

coefficients de qualité extérieures de l'accès 1 et 2. Lorsque le couplage est très faible, ces deux derniers termes tendent vers de très grandes valeurs, amenant à l'approximation $\frac{1}{Q_l} \approx \frac{1}{Q_0}$.

Ainsi pour une excitation suffisamment faible, la valeur du facteur de qualité à vide Q_0 sera immédiatement déduite du facteur de qualité en charge issu de la mesure.

Les dimensions du motif retenu pour ce critère sont présentées sur la Figure II-34 ainsi que leur position relative sur la face inférieure de la structure.

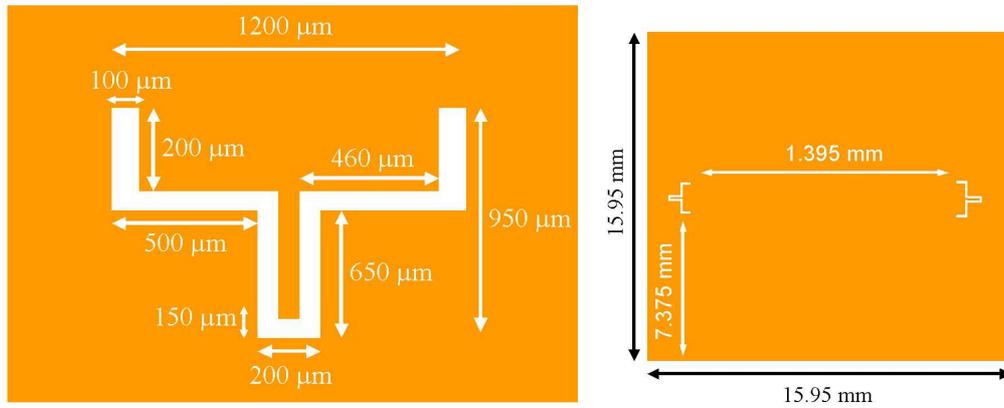


Figure II-34. Motif coplanaire d'excitation retenu (droite) et position par rapport aux dimensions extérieures de la face postérieure de la cavité.

Le résultat de simulation en oscillations forcées est présenté sur la Figure II-35.

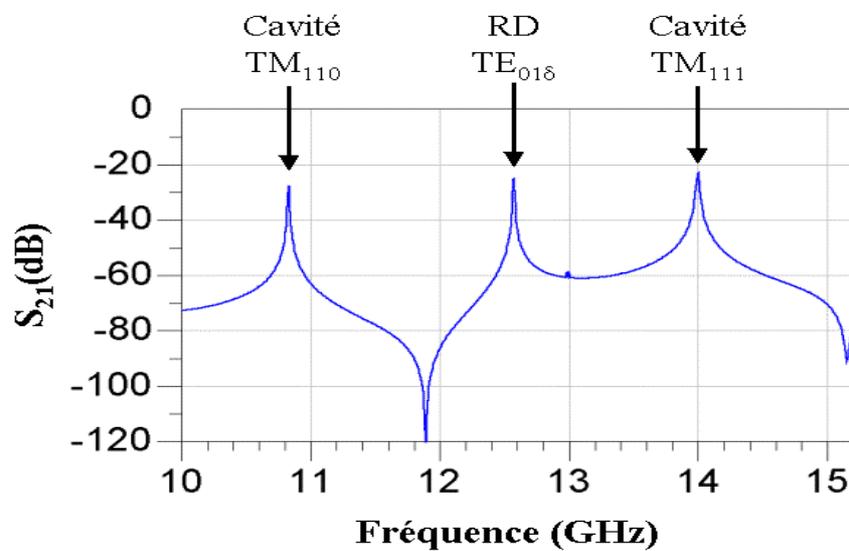


Figure II-35. Simulation en oscillations forcées.

Les modes de résonances TM_{110} de la cavité, $\text{TE}_{01\delta}$ du résonateur diélectrique, TM_{111} de la cavité sont comme attendus faiblement excités avec un coefficient de transmission avoisinant les -25 dB. Elles sont de plus présentes aux fréquences établies précédemment en oscillations libres à savoir respectivement 10.84 GHz, 12.61 GHz et 13.98 GHz.

Un point très important est à noter à ce moment de l'étude. La forme cubique du résonateur fait qu'à 12.61 GHz coexistent deux modes de résonances dont les polarisations sont orthogonales (polarisation suivant l'axe x et suivant l'axe y). Les motifs d'excitations tels que nous les avons choisis et positionnés, c'est à dire dans la direction x, ne permettent d'exciter sur ces deux polarisations que celle orientée suivant ce même axe x. C'est ce comportement observé en simulation en oscillations forcées sur la Figure II-35 que nous devons retrouver en mesure.

Avec ce motif d'excitation, le tout dernier point à régler du cahier des charges vient d'être terminé. Tous les éléments sont en place pour passer à la partie expérimentale de cette étude avec en premier lieu la réalisation du premier prototype par le CTTC.

V. Premier prototype.

Deux structures de test sont réalisées en une même fabrication. La première servira de témoin afin de vérifier les dimensions réalisées, la deuxième constituera le premier prototype fonctionnel.

Pour vérifier efficacement les dimensions de la pièce manufacturée, celle-ci a été découpée à l'aide d'un fil diamanté. Le résultat de la découpe est présenté sur la Figure II-36 et les dimensions relevées sont reportées sur la Figure II-37.

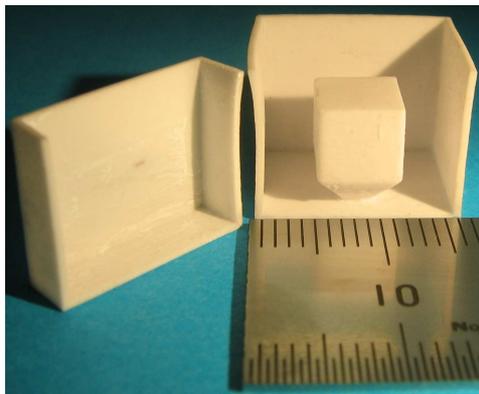


Figure II-36. Premier prototype après découpe.

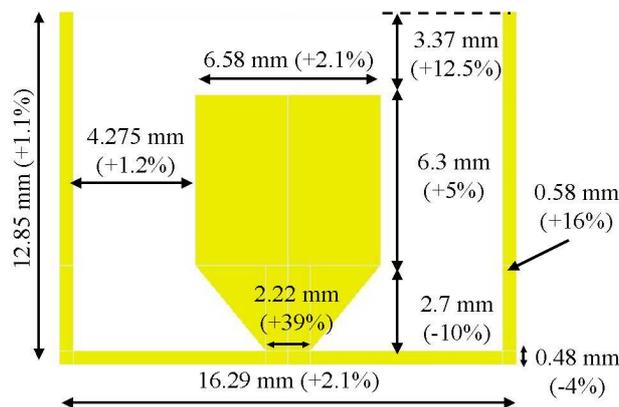


Figure II-37. Relevé des dimensions du premier prototype après découpe et écart en pourcentage avec les dimensions théoriques.

Nous pouvons remarquer une légère déformation apparaissant au niveau des parois de la cavité. On note de même une certaine variation dans les dimensions par rapport à celles attendues. Les plus fortes variations sont imputables aux parois déformées. Ce phénomène est lié directement aux contraintes mécaniques que subissent les parois pendant le processus de fabrication, que ce soit au niveau du nettoyage que pendant les étapes de cuisson.

Sur ces structures, le processus de nettoyage n'est pas purement chimique mais en partie manuelle. Cette étape a été améliorée au cours de ce travail de thèse afin tendre vers un protocole de nettoyage uniquement chimique.

V.1. Mesure du prototype.

La Figure II-38 et II-39 présentent le montage sous pointes de la deuxième pièce après assemblage et métallisation à la peinture à l'argent et le résultat de cette mesure.

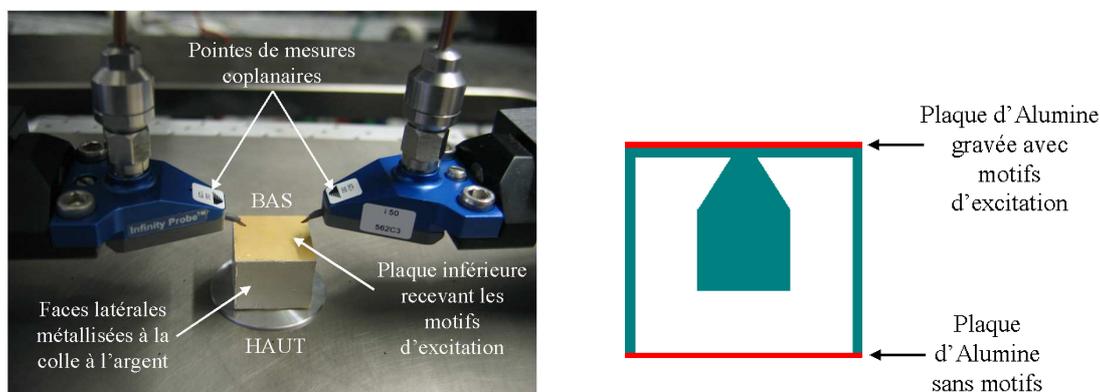


Figure II-38. Montage expérimental pour la mesure. Le résonateur est à l'envers par rapport à la Figure II-37.

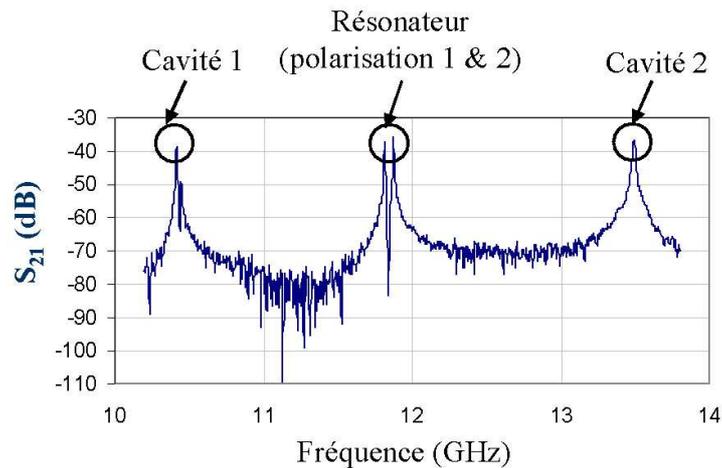


Figure II-39. Mesure en transmission du prototype.

Les fréquences relevées sont les suivantes :

- Cavité TM_{110} : $f_1 = 10.4197$ GHz (théorie : 10.84 GHz), $Q_0 = 2000$ (théorie : 2000).
- Cavité TM_{111} : $f_2 = 13.4955$ GHz (théorie : 13.98 GHz), $Q_0 = 870$ (théorie : 1450).
- Résonateur (polarisation 1) : $f_0 = 11.8767$ GHz (théorie : 12.61 GHz), $Q_0 = 4300$ (théorie : 4000).
- Résonateur (polarisation 2) : $f_0' = 11.817125$ GHz, $Q_0 = 4300$.

Les valeurs théoriques données sont celles considérées pour une alumine présentant une permittivité de 8.3 et une tangente de pertes de $1.3 \cdot 10^{-4}$. La métallisation appliquée sur les faces extérieures de la cavité est à base de peinture à l'argent présentant une conductivité de $5 \cdot 10^5$ S/m. Nous constatons une bonne concordance entre la simulation et la mesure sur les valeurs des différents facteurs de qualité à vide obtenus. Seul celui de la résonance de cavité TM_{111} est plus bas que la prédiction théorique.

Une variation attendue des fréquences de résonance de cette structure est observée à cause des modifications de dimensions de la structure expérimentale. Par contre l'apparition de la deuxième polarisation du résonateur diélectrique sur son mode $TE_{01\delta}$ est plus surprenante. Cette dernière, provenant de la dégénérescence du mode étudié pour le RD traduit une dissymétrie du résonateur qui favorise à la fois son apparition et son excitation par les motifs coplanaires. Notons alors que le facteur de qualité présenté par cette seconde polarisation est similaire à celui de la première polarisation. Nous avons alors ici une application potentielle de RD à mode dual permettant la conception de filtres deux pôles passe

bande [23]. Considérant les dimensions mesurées sur la structure fabriquée, nous effectuons une rétro-simulation par analyse électromagnétique 3D afin de vérifier que les décalages en fréquence observés sont uniquement dus aux variations dimensionnelles.

V.2. Rétro-simulation.

Pour des raisons de gain de mémoire et de temps de calcul, nous profitons des deux plans de symétries présentées par notre structure. Les simulations effectuées ne se font que sur un quart de la structure. Le volume à simuler et la quantité de mémoire informatique utilisée s'en trouve alors grandement réduite. Le problème est que l'on ne peut pas correctement considérer la structure dans son entier avec toutes les déformations présentées par le résonateur. En conséquence, dans ces rétro-simulations effectuées en oscillations forcées, la deuxième polarisation du mode de résonance du RD n'est pas excitée puisque nous considérons une structure parfaitement symétrique.

La rétro-simulation nous donne respectivement pour f_1 , f_0 et f_2 : 10.497, 12.355 et 13.606 GHz à comparer aux valeurs mesurées : 10.42, 11.877 et 13.5 GHz. Les valeurs obtenues pour les fréquences de résonances ne correspondent pas à celles de la mesure. Nous en déduisons alors que la permittivité relative présentée par la structure est différente de celle attendue qui était de 8.3.

Ainsi grâce aux rétro-simulations, une bonne concordance entre celles-ci et la mesure apparaît lorsque nous considérons les dimensions mesurées et une permittivité de 9.1 comme présenté sur la Figure II-40.

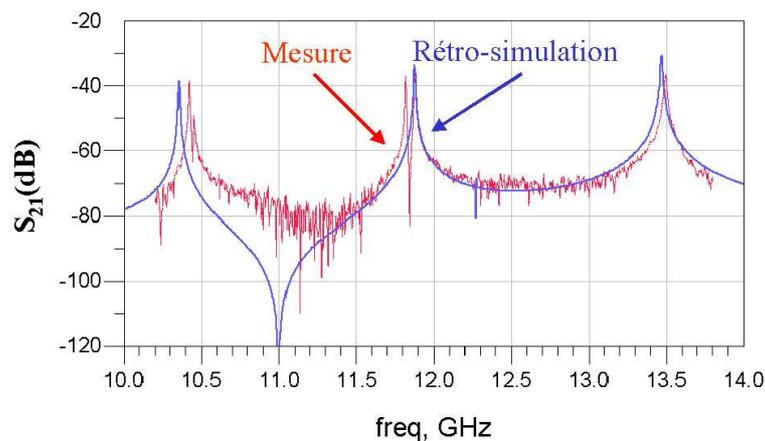


Figure II-40. Comparaison entre mesure et rétro-simulation considérant les dimensions présentées par le prototype et une permittivité de 9.1.

Les valeurs des résonances mesurées sont respectivement pour les fréquences f_1 , f_0 et f_2 : 10.356, 11.876 et 13.469 GHz à comparer aux valeurs mesurées qui sont : 10.42, 11.877 et 13.495 GHz. Une bonne concordance apparaît compte tenu du fait que les légères déformations des parois ne sont pas prises en compte par cette simulation.

Nous pouvons alors en déduire qu'une variation de la permittivité relative par rapport à l'échantillon utilisé pour la caractérisation s'est produite au cours de la fabrication.

V.3. Bilan sur le premier prototype.

Au cours de cette étude nous avons validé expérimentalement le principe de fonctionnement de la structure. La fabrication d'une pièce monobloc comportant le RD, son support et la cavité environnante par stéréolithographie a de même été validée. L'assemblage des éléments constitutifs et les étapes technologiques utilisées ont également été validés. Néanmoins quelques problèmes subsistent. Parmi ceux-ci nous notons la légère déformation subit par les parois latérales de la cavité. Il y a aussi l'excitation de la deuxième polarisation du résonateur qui n'était pas attendue et enfin la valeur de la permittivité relative de l'alumine qui se révèle plus forte que prévue.

Pour remédier à ces problèmes, nous allons dans la suite de ce travail étudier un résonateur non plus cubique mais parallélépipédique qui permettra de modifier la fréquence de résonance de la deuxième polarisation du résonateur diélectrique. Cette configuration permettra de s'affranchir de l'influence de la seconde polarisation en cas d'excitation.

Concernant les déformations de la structure, une nouvelle composition de pâte a été développée avec le CTTC afin de mieux supporter les contraintes physiques de la procédure de fabrication tout en présentant des propriétés adaptées aux besoins de structures microondes. L'alumine fabriquée à partir de cette composition sera tout d'abord attentivement testée afin de vérifier la constance de ses propriétés diélectriques d'une fabrication à l'autre.

VI. Nouveaux prototypes.

VI.1. Nouvelle composition.

La nouvelle formulation développée au CTTC a été caractérisée sur trois fabrications différentes afin de tester à la fois ses caractéristiques et la bonne tenue de celle-ci au fil des fabrications par des méthodes de caractérisation similaires à celles utilisées dans la partie IV.1.

- Fabrication 1 : $\tan \delta = 4.5 \cdot 10^{-5}$
- Fabrication 2 : $\tan \delta = 4.5 \cdot 10^{-5}$
- Fabrication 3 : $\tan \delta = 5.5 \cdot 10^{-5}$

La permittivité relative est mesurée à 9 ± 0.1 . Ces paramètres ont été mesurés à une fréquence de 15 GHz.

Nous notons une bonne tenue de la tangente de pertes avec une valeur de $5 \cdot 10^{-5}$ à plus ou moins $0.5 \cdot 10^{-5}$. Une vérification de la microstructure a montré une augmentation de la densité de la céramique après frittage par rapport à la précédente composition utilisée ce qui a pour conséquence une meilleure tenue mécanique de la pièce cuite.

VI.2. Nouveaux designs.

Afin de s'affranchir des problèmes de polarisations excitées par disymétrisation du RD, deux formes différentes sont adoptées pour le résonateur.

VI.2.a. Forme parallélépipédique : deuxième prototype.

Reprenant directement la forme initiée sur le premier prototype, nous donnons à la nouvelle version du résonateur diélectrique une forme non plus cubique mais parallélépipédique. Les parois de la cavité choisies sont plus épaisses de $100 \mu m$ afin de limiter leur déformation au cours de la fabrication. De même que précédemment, un compromis optimal facteur de qualité / isolation fréquentielle est recherché.

La forme et les tailles fixées alors sont présentées Figure II-41.

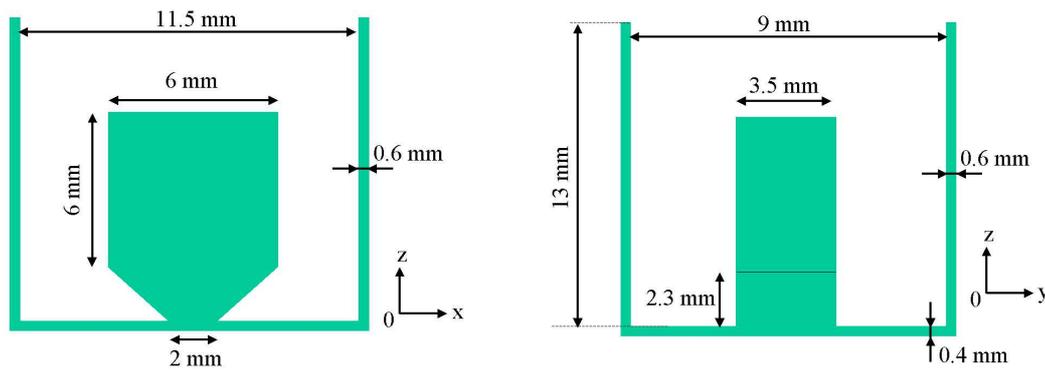


Figure II-41. Dimensions du deuxième prototype de résonateur diélectrique.

Pour de telles dimensions, la cartographie des modes existants dans cette structure calculée par le logiciel EMXD en oscillations libres est la suivante :

- 12.26 GHz : mode de cavité TE_{101}
- 12.67 GHz : mode de cavité TE_{011}
- 14.88 GHz : résonance $TE_{01\delta}$ du résonateur diélectrique (polarisation selon x)
- 17 GHz : résonance $TE_{01\delta}$ du résonateur diélectrique (polarisation selon y)
- 17 GHz : mode de cavité TM_{111}
- 17.5 GHz : résonance $TE_{01\delta}$ (troisième polarisation) du résonateur diélectrique

Le facteur de qualité obtenu est de 3600 pour le RD à 14.88 GHz tout en conservant une isolation fréquentielle supérieure à 2.1GHz, que ce soit par rapport aux fréquences supérieures ou inférieures. Cette valeur a été calculée par oscillations libres en considérant une alumine présentant une permittivité relative de 9 et une tangente de pertes de $5 \cdot 10^{-5}$. La métallisation considérée pour les faces extérieures de la cavité est de la peinture à l'argent ($\sigma = 5 \cdot 10^5$ S/m).

La cavité est ici plus compacte comparée au premier prototype, ce qui amène une plus grande isolation fréquentielle (+33%) au détriment du facteur de qualité (-10%). Cette baisse sur la facteur de qualité vient des pertes métalliques supplémentaires amenées par la plus grande proximité des parois métalliques vis à vis du RD. Néanmoins le compromis isolation fréquentielle / facteur de qualité reste très intéressant.

Le motif d'excitation décrit pour le premier prototype est conservé. Une analyse EM en oscillations forcées conduit aux résultats théoriques montrés Figure II-42.

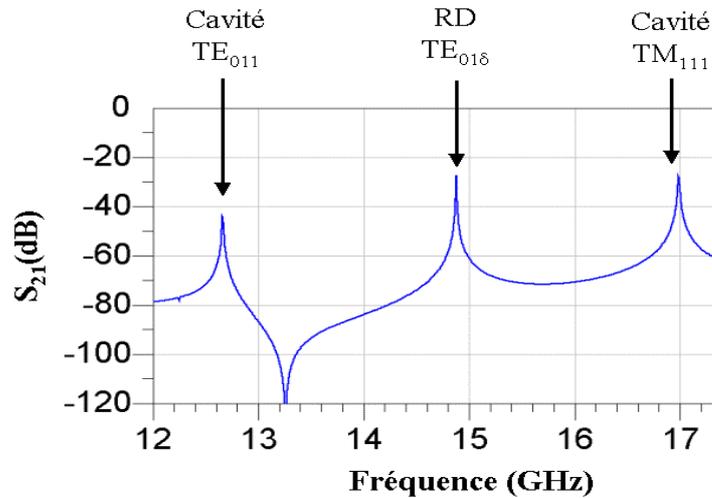


Figure II-42. Paramètre de transmission du deuxième prototype.

VI.2.b. Forme octogonale : troisième prototype.

Une géométrie en octogone est aussi retenue. Celle-ci s'avère réalisable sans problème par stéréolithographie. Grâce aux propriétés mécaniques de cette nouvelle composition d'alumine, un support plus petit est envisagé afin que celui-ci perturbe le moins possible le fonctionnement du résonateur diélectrique.

La Figure II-43 présente la géométrie retenue et ses principales dimensions.

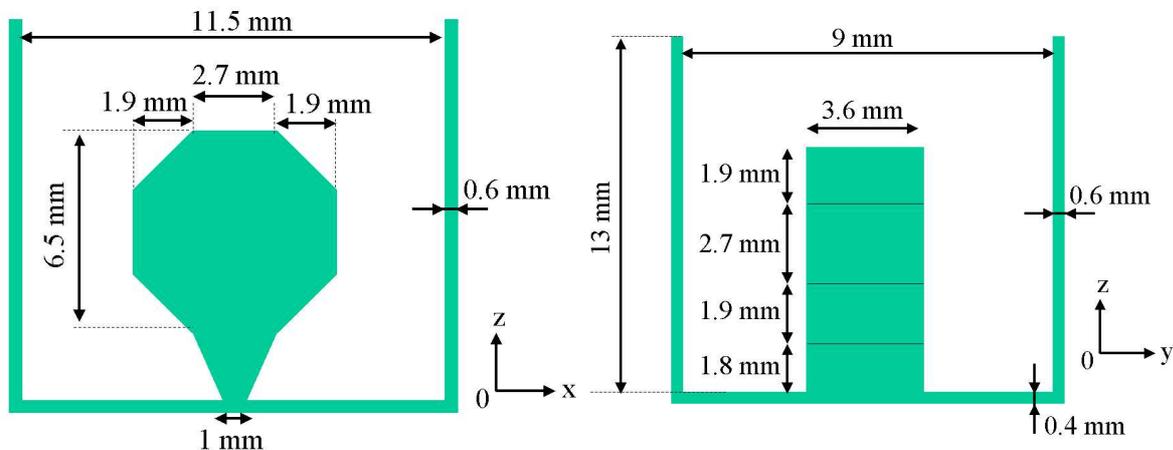


Figure II-43. Dimensions du troisième prototype de résonateur diélectrique.

La cartographie de modes de résonances de cette structure est la suivante :

- 12.31 GHz : mode de cavité TE_{101}
- 12.95 GHz : mode de cavité TE_{011}
- 15.24 GHz : résonance $TE_{z01\delta}$ du résonateur diélectrique (polarisation selon x)
- 17.23 GHz : résonance $TE_{z01\delta}$ du résonateur diélectrique (polarisation selon y)
- 17.27 GHz : mode de cavité TM_{111}
- 17.54 GHz : résonance $TE_{01\delta}$ (troisième polarisation) du résonateur diélectrique

Pour les mêmes alumine et métallisation considérées dans le paragraphe précédent, le facteur de qualité du résonateur diélectrique donnée par la simulation EM en oscillations libres à 15.24 GHz est de 3900 pour une isolation fréquentielle supérieure à 2 GHz que ce soit pour les fréquences supérieures ou inférieures. Nous avons donc obtenu pour ce troisième prototype, comparé au deuxième, une augmentation de 8.5 % sur le facteur de qualité à vide tout en ne perdant que 5 % sur l'isolation fréquentielle. La taille globale du composant est conservée.

Le motif d'excitation qui sera utilisé reste identique à celui du premier prototype, donnant par simulation en oscillations forcées les résultats théoriques montrés Figure II-44.

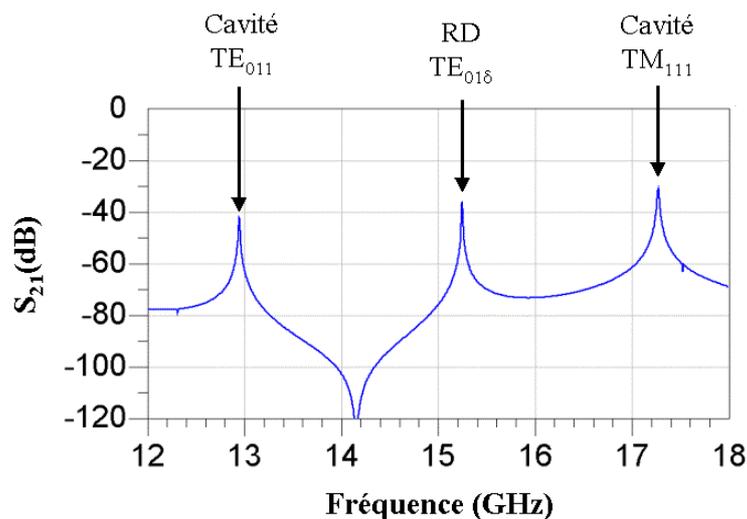


Figure II-44. Paramètre de transmission du deuxième prototype.

Nous avons choisi de réaliser le résonateur de forme octogonale à cause de son facteur de qualité à vide. A cause de problèmes technologiques et de temps, nous ne sommes pas en mesure de présenter le comportement électrique expérimentale de ces nouvelles structures. Nous espérons cependant les décrire lors de la soutenance de ces travaux de recherche.

VII. Filtre deux pôles.

Dans cette partie deux filtres deux pôles différents vont être étudiés. Le premier sera composé d'un assemblage classique de résonateurs diélectriques blindés par une cavité métallique alors que le deuxième sera réalisé en une pièce céramique unique. Avant cela, un rappel des éléments importants concernant ces filtres est présenté.

VII.1. Paramètres de couplage.

La réalisation d'un filtre passe bande multipôles à éléments résonants consiste typiquement à associer au mieux ces éléments entre eux et avec l'extérieur. Ces couplages doivent satisfaire une matrice de couplage représentative des objectifs de filtrage. Dans le cas d'un filtre deux pôles, la conception est simplifiée. Deux couplages sont à caractériser : le coefficient k_{12} représentatif du couplage inter-résonateur et le facteur de qualité extérieur Q_e , décrivant les couplages d'entrée et de sortie du filtre.

Le coefficient k_{12} peut être modulé par la distance et/ou par le dimensionnement d'une fente dans un plan métallique séparant les deux résonateurs par exemple. Ce paramètre est calculé par la formule :

$$k_{12} = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 + f_2^2} [22] \quad \text{II.5}$$

f_1 et f_2 étant les deux fréquences de résonances du système couplé comme montré Figure II-45. Sur cette figure deux résonateurs diélectriques sont placés dans une cavité métallique et séparés par une paroi métallique percée d'une iris ; le champ magnétique visible est celui du mode fondamentale $TE_{01\delta}$.

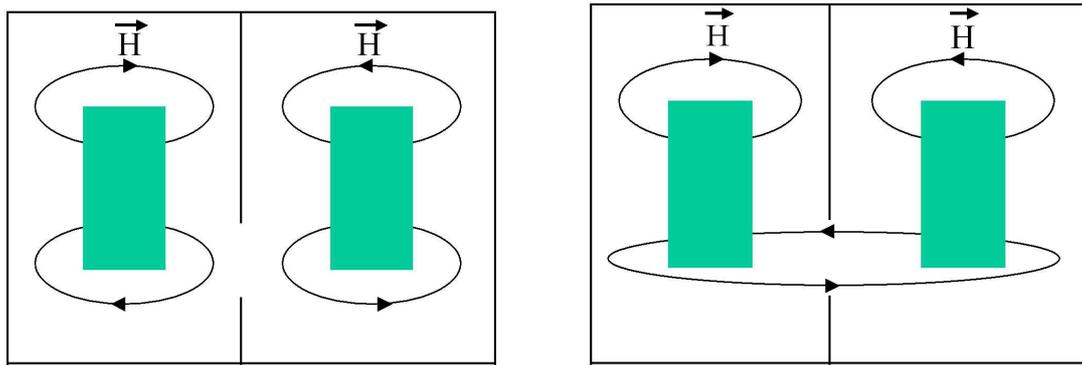


Figure II-45. Les deux modes (mode 1 à gauche et mode 2 à droite) existants dans un système à deux résonateurs diélectriques fonctionnant sur leur mode fondamental (vue en coupe).

La position et le dimensionnement de la fente permettent de régler le couplage, typiquement en modifiant la fréquence du mode 2. En effet en jouant sur l'iris, on peut jouer sur la configuration du champ EM présenté par ce deuxième mode afin de lui donner une configuration plus ou moins similaire à celle présentée par le mode 1. Du point de vue fréquentielle, cela revient à rapprocher la fréquence de résonance du mode 2 plus ou moins près de la fréquence de résonance du mode 1.

Le plan de symétrie de cette structure passant au niveau du plan métallique séparant les deux résonateurs peut être associé à des conditions de court-circuit électrique (CCE) pour le mode 1 et de court-circuit magnétique (CCM) pour le mode 2.

Ce sont ces conditions aux limites qui seront utilisées lors des simulations EM 3D avec le logiciel EMXD afin d'établir les fréquences de résonance des modes 1 et 2 et ainsi pouvoir connaître la valeur de k_{12} en fonction de la position et de la taille de l'iris.

VII.2. Gabarit de filtrage.

Il est décidé de fixer un gabarit de filtrage à bande passante étroite afin d'exploiter le fort Q_0 des résonateurs diélectriques.

Les spécifications sont les suivantes :

- $f_0 \approx 15$ GHz
- Bande passante à -3 dB = 1%
- Ondulation dans la bande = 0.1 dB

D'après la théorie des oscillateurs couplés exposée dans [22], un coefficient de couplage extérieur Q_e de 100 et un coefficient de couplage inter-cavité k_{12} de l'ordre de 0.011, permettent de satisfaire ce gabarit de filtrage.

Le filtre va être étudié selon deux topologies différentes : une topologie hybride qui associe deux résonateurs diélectriques à une cavité en métal et une topologie toute céramique.

VII.3. Topologie hybride.

Ainsi, ce filtre sera constituée de deux cavités métalliques adjacentes dont le mur métallique de séparation sera percé d'un iris permettant le couplage des résonateurs présents dans ces cavités. Cette structure sera décrite sur la Figure II-53 plus loin dans ce paragraphe.

Tout d'abord nous nous intéressons au dimensionnement du RD élémentaire et de la cavité métallique l'entourant ainsi qu'à la détermination du Q_e requis. Pour cela, nous avons étudié un résonateur simple dont le principe est expliqué par la suite.

La première topologie retenue consiste en l'association de trois parties :

- (1) La première est une pièce céramique monobloc composée d'une plaque d'alumine surmontée du résonateur octogonale avec son support étudié dans la partie VI.2.b. Cette pièce ne comporte pas de parois céramiques verticales comme ce fut le cas dans la partie VI.2.b mais conserve exactement les mêmes dimensions.
- (2) La deuxième se compose d'une cavité métallique classique en laiton.
- (3) La troisième est la plaque d'alumine métallisée sur une de ses faces et recevant les motifs d'excitation.

La Figure II-46 résume ce montage.

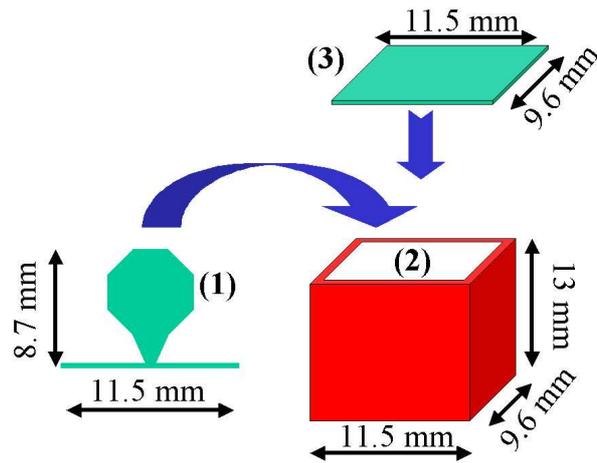


Figure II-46. Principe du montage de la première topologie. Les dimensions montrées sur (2) sont les dimensions internes de la cavité.

Ainsi comme indiqué sur la Figure II-46, la pièce céramique (1) est retournée et vient coiffer la cavité métallique (2). La plaque d'alumine (3) dont la face supérieure est métallisée se pose enfin sur le dessous de (1) afin de refermer la cavité tout en assurant une continuité du blindage. La plaque d'alumine commerciale (3) utilisée sera une plaque de $250 \mu\text{m}$ d'épaisseur recevant une épaisseur de $8 \mu\text{m}$ d'or sur sa face extérieure. L'alumine commerciale utilisée présente une permittivité de 9.8 et une tangente de pertes de $1 \cdot 10^{-4}$ autour de 15 GHz (données constructeur). C'est sur cette métallisation que seront gravés des motifs d'excitation coplanaires similaires à ceux utilisés précédemment.

La Figure II-47 présente une vue de profil du montage complet.

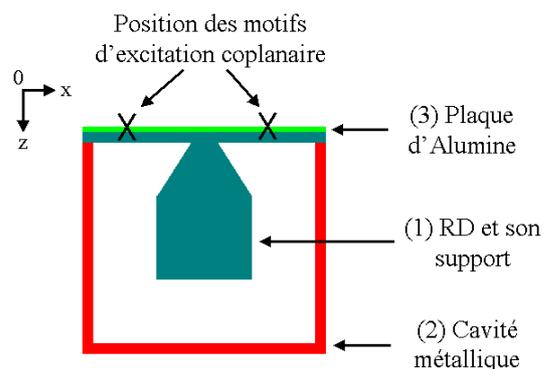


Figure II-47. Vue de profil de la structure résonante hybride.

Les avantages de cette structure sont multiples :

- Une métallisation de bonne qualité est amenée par cette cavité en laiton.
- La possibilité d'intégrer des vis de réglage dans les parois de la cavité métallique amène des solutions de réglage simples et efficaces.

L'inconvénient de cette structure vient du nombre de pièces et des multiples manipulations nécessaires à l'assemblage de la structure.

Le troisième prototype (octogonale) de résonateur a été choisi en raison des meilleurs facteurs de qualité présentés par rapport au deuxième (parallélépipédique).

Afin de connaître l'isolation fréquentielle présentée par cette configuration, une étude en oscillation libre a été menée et nous donne la répartition des modes de résonance dans la bande 12-18 GHz suivante :

- 13.54 GHz : mode de cavité TE_{101}
- 13.54 GHz : mode de cavité TE_{011}
- 15.1 GHz : résonance $TE_{01\delta}$ du résonateur diélectrique
- 16.71 GHz : mode de cavité TM_{111}
- 17.24 GHz : résonance $TE_{01\delta}$ (deuxième polarisation) du résonateur diélectrique
- 17.72 GHz : résonance $TE_{01\delta}$ (troisième polarisation) du résonateur diélectrique

Le facteur de qualité à vide du RD donné par la simulation est de 6500 pour une isolation fréquentielle de 1.6 GHz, soit un compromis tout à fait satisfaisant. Nous remarquons que le facteur de qualité à vide est nettement augmenté par rapport à la configuration décrite au paragraphe VI.2.b. Celui-ci est dû à la meilleure conductivité du laiton ($2.56 \cdot 10^7$ S/m) comparée à celle de la colle à l'argent précédemment utilisée ($\sim 5 \cdot 10^5$ S/m).

La première étape de la réalisation du filtre deux pôles basés sur ce principe est le réglage du couplage extérieur amené par le motif d'excitation coplanaire.

VII.3.a. Détermination du coefficient de couplage extérieur.

Le choix se porte cette fois sur un motif en circuit ouvert qui apparaît comme plus à même de fournir le coefficient Q_e requis. Celui-ci est présenté Figure II-48. Il dépend de trois paramètres :

- P_x : distance entre les motifs. Ceux-ci sont centrés autour du centre de la plaque d'alumine les recevant.
- L_x : taille du motif suivant l'axe des x .
- L_y : taille du motif suivant l'axe des y .

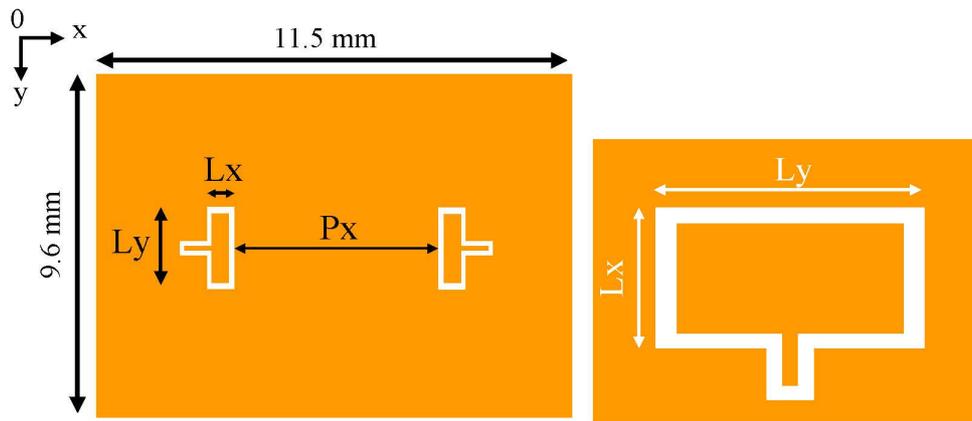


Figure II-48. Motif coplanaire en circuit ouvert utilisé.

Les trois paramètres P_x , L_x et L_y vont nous permettre de régler le facteur de qualité extérieur afin d'obtenir la valeur demandée.

Pour pouvoir régler le coefficient de qualité extérieur de chacun des accès, coefficients que nous appellerons désormais Q_{e1} et Q_{e2} , il convient de les définir plus précisément et d'expliquer comment les déterminer.

Ces deux paramètres sont liés par la relation : $\frac{1}{Q_l} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{e1}} + \frac{1}{Q_{e2}}$ [22] II.6

Avec :

- Q_l : le facteur de qualité en charge
- Q_0 : le facteur de qualité à vide
- Q_{e1} et Q_{e2} respectivement les coefficients de qualité extérieur des accès 1 et 2.

Le facteur de qualité en charge est déterminé typiquement en mesurant le rapport fréquence centrale du résonateur sur bande passante à -3 dB du maximum de transmission sur la courbe donnant l'évolution de la fréquence en fonction de la fréquence.

Ce paramètre nous informe du comportement global du système résonant considéré en tenant compte des performances intrinsèques de la cavité, données par le facteur de qualité à vide, et des performances du système d'excitation grâce au coefficient de qualité extérieur pour les accès d'entrée et de sortie.

Lors de la simulation EM en oscillations forcées, le coefficient de qualité Q_e est obtenu en ne considérant que les excitations d'entrée et de sortie, et aucunes pertes d'origines diélectriques ou métalliques dans le système. Dans une telle configuration, le coefficient Q_0 tend à devenir infini.

A ce moment la relation II-6 devient :

$$\frac{1}{Q_t} = \frac{1}{Q_{e1}} + \frac{1}{Q_{e2}} \quad \text{II.7,}$$

et si le système est symétrique, $Q_{e1} = Q_{e2}$ et donc $Q_e = 2 Q_l$.

Ainsi à partir de la courbe de réponse en fréquence du résonateur obtenue par simulation EM en oscillations forcées sans pertes, nous pourrions obtenir la valeur du facteur de qualité extérieur.

Les paramètres P_x , L_x et L_y sont arbitrairement (à partir des études précédentes) et respectivement fixés à 3.6, 1.5 et 2.8 mm. Cette configuration pour le motif d'excitation nous donne un facteur de qualité extérieur de 450. Or le gabarit nous impose 100. IL faut donc modifier ces différents paramètres afin de converger vers la valeur souhaitée.

- Variation sur P_x .

La Figure II-49 donne l'évolution du facteur de qualité extérieur en fonction de P_x .

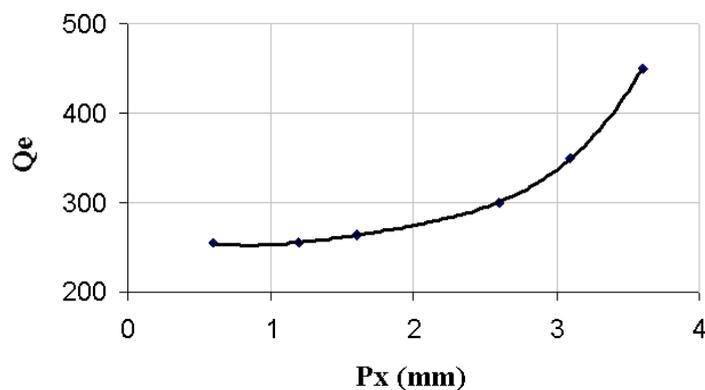


Figure II-49. Evolution de Q_e en fonction de P_x .

Nous observons qu'un minimum pour Q_e et donc un maximum pour l'excitation en entrée sont obtenus à partir de $P_x = 1.2$ mm. Seulement cela n'est pas encore suffisant et les autres paramètres L_x et L_y doivent être optimisés.

- Variation sur L_x

La Figure II-50 donne l'évolution du facteur de qualité en fonction de L_x .

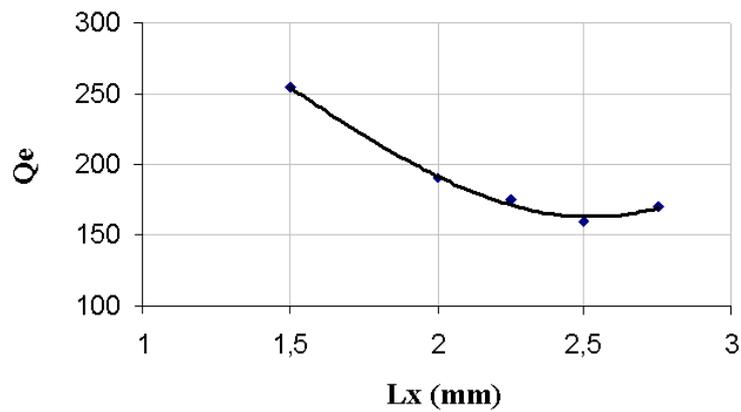


Figure II-50. Evolution de Q_e en fonction de P_x .

Un minimum pour Q_e à 160 est atteint pour $L_x = 2.5$ mm. Il reste à jouer sur L_y pour enfin atteindre la valeur souhaitée de Q_e .

- Variation sur L_y

Le Figure II-51 donne l'évolution de Q_e en fonction de L_y .

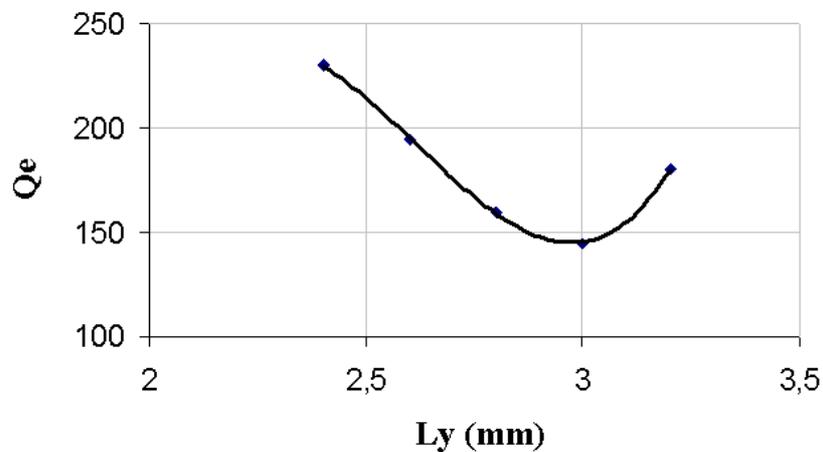


Figure II-51. Evolution de Q_e en fonction de L_y .

Nous pouvons observer une légère diminution de Q_e pour $L_y = 3$ mm sans toutefois être suffisante. Les trois paramètres P_x , L_x et L_y ont donc été optimisés pour fournir une excitation la plus forte possible sans toutefois atteindre la valeur nécessaire au gabarit du filtre deux pôles. La solution restante consiste à diminuer la taille du support de ce résonateur afin de rapprocher le résonateur diélectrique de l'excitation pour encore augmenter le couplage en entrée/sortie. Nous pouvons alors nous attendre à une diminution du Q_o du RD, malheureusement celle-ci semble incontournable pour obtenir le facteur Q_e requis.

- Variation sur la hauteur du support.

Sur la structure initiale, ce paramètre est fixé à 1.8mm. La Figure II-52 montre l'évolution de Q_e en fonction de la hauteur du support.

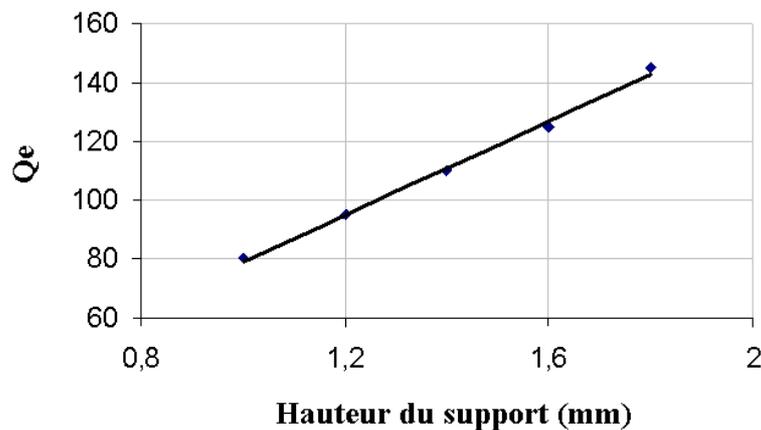


Figure II-52. Evolution de Q_e en fonction de la hauteur du support du résonateur diélectrique.

Nous pouvons observer que pour une hauteur de pied de 1.2 mm, un facteur de qualité extérieur proche de 100 est obtenu.

Afin de vérifier l'impact qu'amène une telle variation sur les performances de la structure, la cartographie des modes existants est vérifiée par une étude EM en oscillations libres :

- 13.31 GHz : mode de cavité TE_{101}
- 15.68 GHz : résonance $TE_{01\delta}$ du résonateur diélectrique
- 17.81 GHz : résonance $TE_{01\delta}$ (deuxième polarisation) du résonateur diélectrique
- 17.83 GHz : résonance $TE_{01\delta}$ (troisième polarisation) du résonateur diélectrique

L'isolation fréquentielle est supérieure à 2.1 GHz pour un coefficient de qualité à vide de 6000. L'étape suivante consiste à étudier la structure à deux résonateurs pour déterminer le coefficient de couplage extérieur k_{12} .

VII.3.b. Détermination du coefficient de couplage k_{12} .

La structure deux pôles complète est présentée Figure II-53.

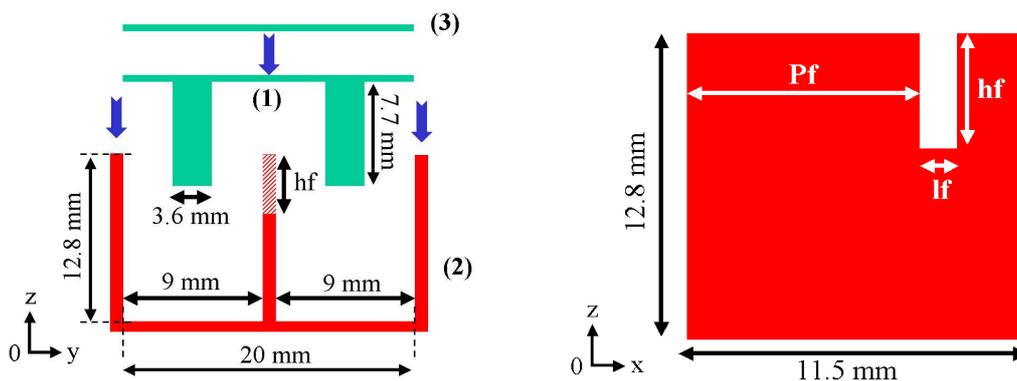


Figure II-53. (gauche) Les trois parties composant le filtre deux pôles. (droite) Détail de la paroi métallique séparant les deux cavités et des paramètres définissant la position de l'iris.

Elle se compose de deux résonateurs diélectriques côte à côte dans une cavité métallique et séparées par une plaque métallique. La pièce (1) est une pièce céramique fabriquée en stéréolithographie se composant d'une plaque de $400 \mu m$ d'épaisseur surmontée de deux résonateurs diélectriques octogonaux avec leur support identiques à ceux précédemment étudiés. La pièce (2) est une cavité métallique en laiton de 20 mm par 11.5 mm par 12.8 mm. Elle est séparée en deux dans le sens de sa hauteur par une plaque métallique en laiton de 2 mm d'épaisseur, comportant un iris qui servira, par sa position et ses dimensions, à moduler le coefficient de couplage entre les deux résonateurs. Les paramètres Pf, lf et hf serviront à cela. La pièce (1) vient donc se déposer sur la pièce (2) et le tout est recouvert d'une plaque d'alumine de 20 mm x 11.5 mm x 0.25 mm ayant sa face supérieure métallisée (or) pour recevoir les motifs d'excitation d'entrée et de sortie.

Ce principe de base a rapidement montré qu'il donnait naissance à des modes s'établissant dans l'épaisseur de la plaque de fond de la pièce (1) comme le montre la Figure II-54 dans la bande passante du filtre deux pôles.

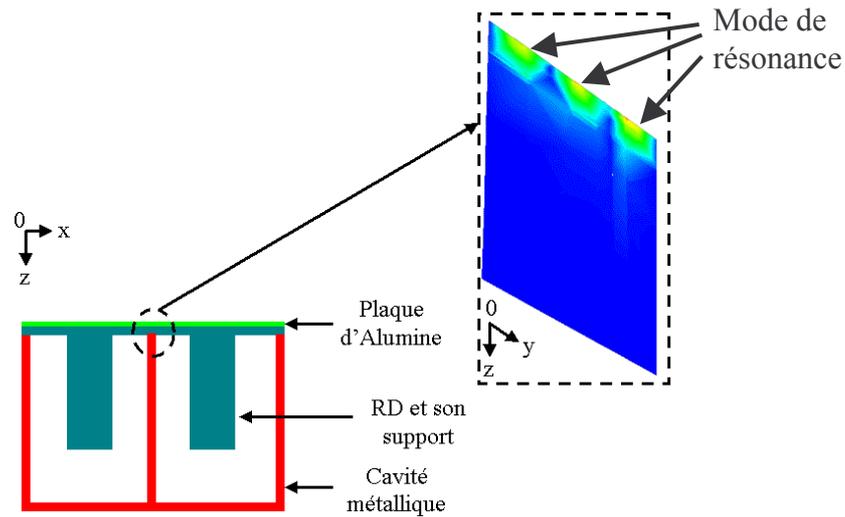


Figure II-54. Mode de résonance apparaissant dans l'épaisseur diélectrique de la structure hybride à 15.5 GHz. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Pour pallier à ce problème, avant d'optimiser le coefficient de couplage inter-résonateurs, un design plus poussé est adopté et est présenté Figure II-55. Cette fois-ci, quatre pièces différentes sont assemblées.

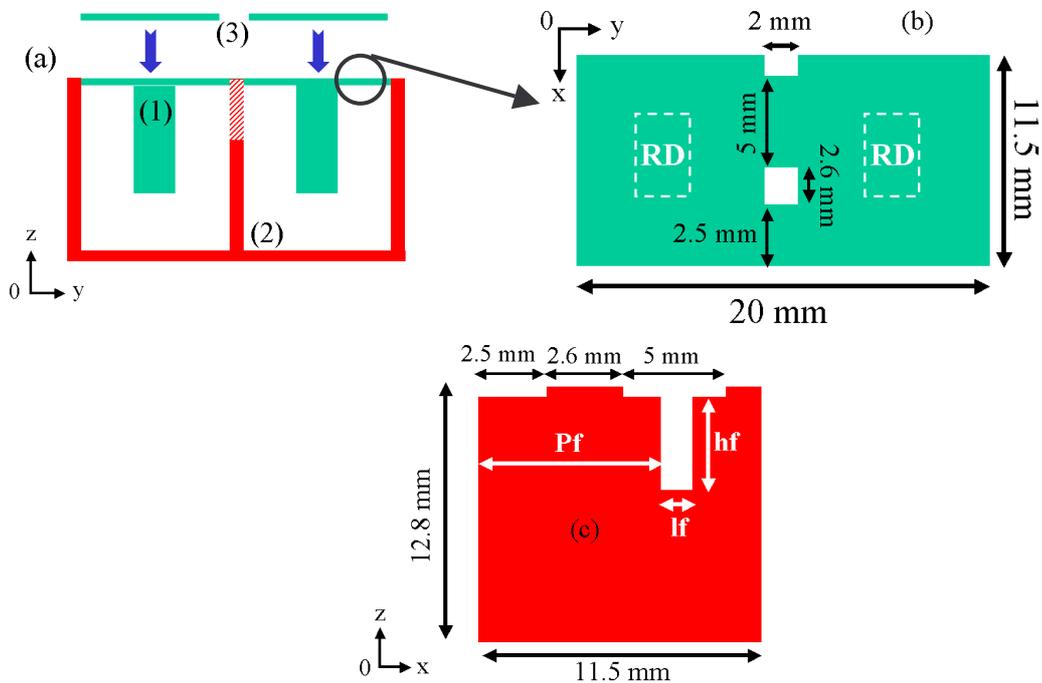


Figure II-55. (a) Principe de montage. (b) Vue de dessus de la pièce (1). (c) Détail de la plaque de métal séparant les deux cavités de la pièce (2).

La plaque céramique de support de la pièce (1) reçoit deux encoches dans lesquelles viendront se loger les parties supérieures de la plaque métallique séparant les deux cavités (voir Figure II-55 (c)). La présence de métal au niveau de ces encoches permet d'éliminer les modes parasites s'installant à ces endroits. Dans la même idée, la plaque d'alumine métallisée recevant les motifs d'excitation est maintenant séparée en deux parties (3), chacune recevant un motif.

Afin de rechercher quelle configuration d'iris permettra d'atteindre le coefficient de couplage inter-résonateur fixé par le gabarit, les paramètres géométriques de l'iris et sa position sont pris comme suit initialement et arbitrairement :

- $P_f = 6.1 \text{ mm}$
- $L_f = 3 \text{ mm}$

Le paramètre h_f va maintenant être étudié afin d'établir son influence sur le coefficient k_{12} . Pour cela, des simulations électromagnétiques en oscillations libres sont réalisées en ne simulant que la moitié de la structure comme montré sur la Figure II-56.

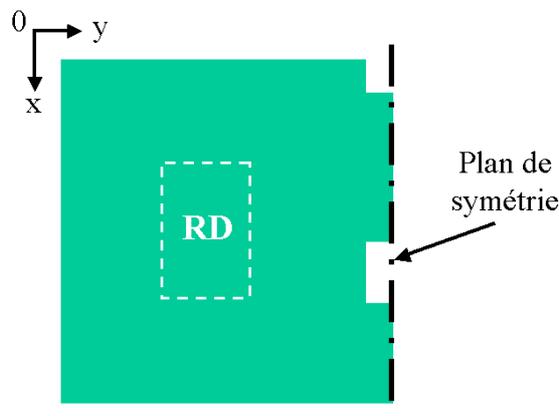


Figure II-56. Vue de dessus de la structure simulée : seulement la moitié du filtre global est simulé grâce à un plan de symétrie.

Ainsi, en fonction de la condition surfacique associée à ce plan de symétrie, court-circuit électrique (CCE) ou magnétique (CCM), nous obtenons deux fréquences de résonance du résonateur appelées respectivement f_1 et f_2 . Le paramètre k_{12} est obtenu par la formule définie par l'équation II.5 donnée précédemment.

La Figure II-57 présente l'évolution de ce coefficient tracé en fonction du paramètre hf.

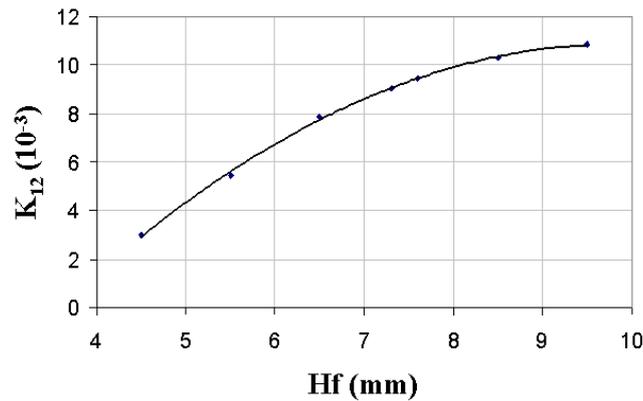


Figure II-57. Evolution de k_{12} en fonction de la hauteur de l'iris hf (mm).

La valeur requise de k_{12} est atteinte pour une hauteur d'iris proche de 9.5 mm.

VII.3.c. Analyse EM globale.

Une simulation électromagnétique globale est alors effectuée afin de vérifier le comportement en fréquence du montage maintenant que tous les paramètres le constituant sont finalisés. La prise en compte de l'ensemble des couplages intervenants dans la structure nécessite alors une phase d'optimisation. Quelques itérations sont nécessaires. La réponse obtenue est présentée sur la Figure II-58.

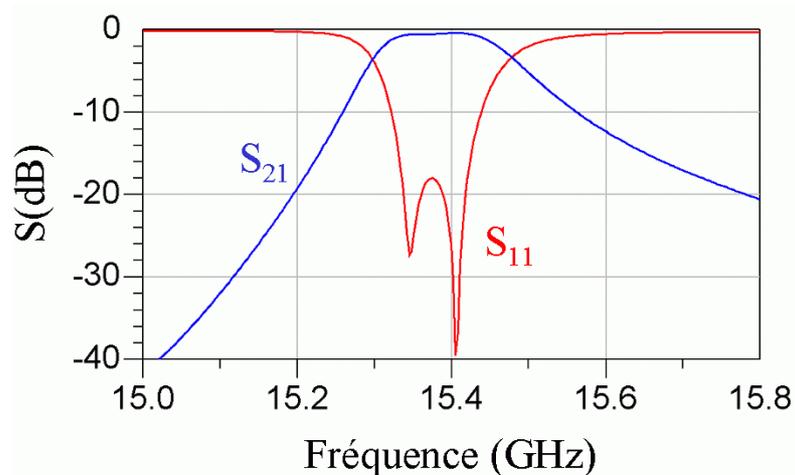


Figure II-58. Simulation EM globale du filtre deux pôles.

Les caractéristiques obtenues sur ce filtre sont les suivantes :

- $F_0 = 15.375$ GHz
- Bande passante à -3 dB = 1.18 %
- Ondulation dans la bande = 0.18 dB
- Pertes d'insertion = 0.5 dB

Pour cette simulation, l'alumine considérée présente une permittivité de 9 et une tangente de pertes de $5 \cdot 10^{-5}$ à 15 GHz. Les plaques d'alumine venant coiffer la structure présentent sur leur face extérieure une conductivité de $4.1 \cdot 10^7$ S/m. La cavité métallique en laiton présente une conductivité de $2.56 \cdot 10^7$ S/m.

Comme nous pouvons constater, les performances théoriques satisfont le gabarit fixé pour ce filtre.

VII.3.d. Fabrication et mesure.

Cette pièce céramique a été réalisée en alumine par le CTTC et est présentée sur la Figure II-59.

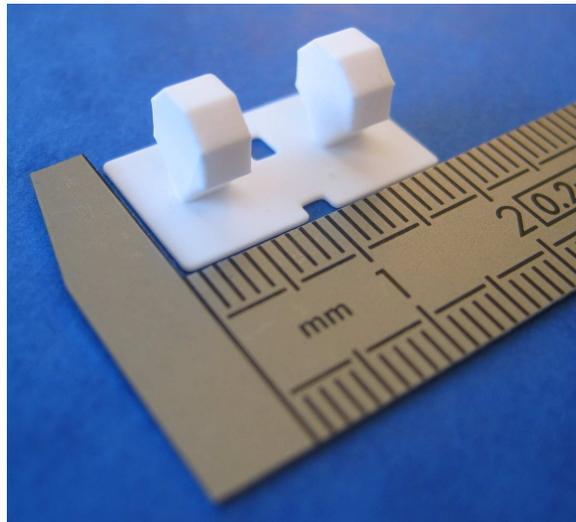


Figure II-59. Photographie de la pièce céramique principale du filtre deux pôles.

La précision de fabrication moyenne est de 3.5%. La tolérance de fabrication relevée est en moyenne de 0.12 mm.

A cause des mêmes problèmes technologique, nous ne sommes ici aussi pas en mesure de présenter le comportement électrique expérimentale de ce filtre. Nous espérons de même pouvoir les décrire lors de la soutenance.

VII.4. Topologie tout céramique.

L'idée est de reprendre le concept du résonateur céramique blindé monobloc décrit au paragraphe VII.3 et de l'étendre à la conception d'un filtre deux pôles à résonateur couplé. Afin de limiter les dimensions, nous devons définir un système de couplage adapté.

VII.4.a. Principe du couplage inter-résonateur.

La solution retenue est proposée sur la Figure II-60.

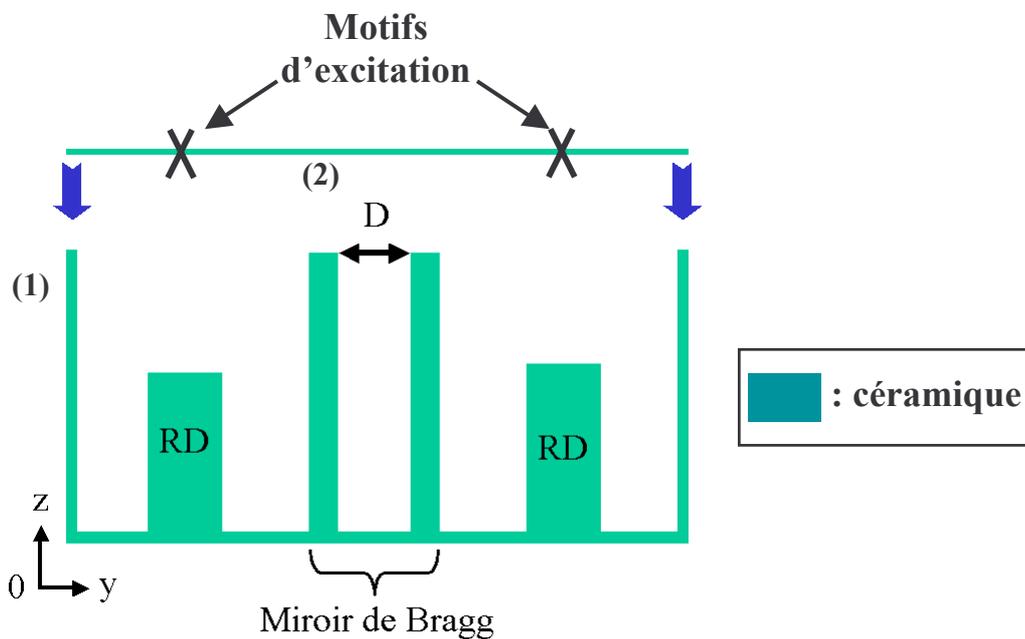


Figure II-60. Principe du filtre deux pôles tout céramique (vue en coupe).

Le filtre est constitué ici de deux parties. La première pièce monobloc (1) se compose des résonateurs et de leur support respectif, d'une cavité et d'un « miroir de Bragg » positionné entre les deux RD. Les faces extérieures de la cavité de la pièce (1) sont

métallisées à la colle à l'argent ($\sigma = 5 \cdot 10^5$ S/m). La deuxième pièce (2) est comme précédemment une plaque d'alumine métallisée sur une de ses faces qui reçoit les motifs d'excitation d'entrée et de sortie.

Le recours à un « miroir de Bragg » dont le principe a été plus en détail décrit dans le Chapitre 1, permet de ne plus utiliser le système d'iris dans une plaque métallique utilisé précédemment pour coupler les deux résonateurs diélectriques. Nous jouons sur le fait que la réflexion présentée par un miroir de Bragg possédant un faible nombre de périodes n'est pas parfaite. En effet, le coefficient de réflexion amené par un tel miroir se situe aux alentours de 93%, valeur donnée par le logiciel open source *Translight* [24] utilisé précédemment dans le Chapitre 1.

En modifiant la distance appelée D sur la Figure II-60, nous pouvons jouer sur les performances d'un tel miroir et finalement modifier le couplage produit par ce miroir de Bragg.

Classiquement [25] et afin de présenter une bande interdite autour de la fréquence de fonctionnement, à savoir 15 GHz, les plaques d'alumine devront avoir une épaisseur de $\frac{\lambda_g}{4}$, soit 1.67 mm et la distance D devra être égale à $\frac{\lambda_0}{4}$, soit 5 mm.

λ_g étant la longueur d'onde guidée dans le matériau défini par $\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\varepsilon}}$. λ_0 est la longueur d'onde dans le vide et ε la permittivité relative du matériau.

La principale difficulté amenée par la configuration de cette structure est que, étant donné l'épaisseur en $\frac{\lambda}{4}$ des plaques du miroir, de très nombreux parasites s'installent dans et entre les plaques de céramique constituant le miroir. La difficulté consiste donc à faire en sorte que ces modes ne viennent pas perturber le fonctionnement du filtre.

Les dimensions initiales sont présentée sur la Figure II-61.

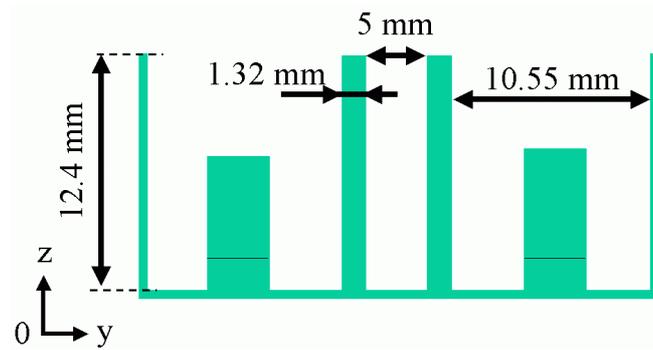


Figure II-61. Principales dimensions du filtre initial deux pôles céramique.

Les dimensions des résonateurs octogonaux utilisés sont les mêmes que pour le filtre hybride. Les parois de la cavité font $500 \mu\text{m}$ d'épaisseur. Cette épaisseur est définie à partir des fabrications précédentes, comme étant l'épaisseur la plus fine que nous pouvons avoir afin de garantir une bonne tenue mécanique durant la fabrication en stéréolithographie. Le fond de la structure fait quant à lui $400 \mu\text{m}$, valeur choisie pour les mêmes raisons.

En changeant l'épaisseur des plaques d'alumine par rapport à la valeur qu'elles devraient avoir classiquement pour un miroir de Bragg, les fréquences de résonance des modes parasites y apparaissant sont modifiées. Cette légère variation de l'épaisseur des plaques et de la distance D ne diminue pas significativement les performances du miroir. Ce phénomène sera abordé dans la partie II du troisième chapitre où une étude plus poussée d'une structure à base de miroirs de Bragg permettra de mettre en évidence et d'expliquer ce comportement.

VII.4.b. Obtention du filtre requis.

Nous avons suivi ici exactement la même démarche de conception que pour le filtre hybride précédemment optimisé. Ainsi, nous avons commencé à déterminer quel motif d'excitation est le plus à même de fournir le coefficient de qualité extérieur proche de 100 nécessaire pour le gabarit demandé.

Ses principales dimensions, en reprenant la nomenclature introduite sur le filtre précédent sont :

- $P_x = 1.2\text{mm}$
- $L_x = 2.5\text{mm}$
- $L_y = 4.2 \text{ mm}$

Le support des résonateurs octogonaux ont de même été modifiés et font 0.8 mm de hauteur.

Cette configuration amène un coefficient de qualité extérieur de 110, soit une valeur tout à fait satisfaisante pour obtenir le gabarit de filtrage demandé.

Nous avons également suivi exactement la même démarche que précédemment consistant à étudier l'évolution du coefficient de couplage inter-résonateur k_{12} en fonction de la géométrie du système de couplage (dans notre cas la taille du miroir de Bragg et plus particulièrement la distance D). La valeur souhaitée pour k_{12} est obtenue pour une distance D entre les deux plaques du miroir de Bragg de 5.7 mm. Les plaques ont quant à elle une épaisseur de 1.32 mm.

La Figure II-62 montre alors les résultats obtenus théoriquement par simulation EM en oscillations forcées.

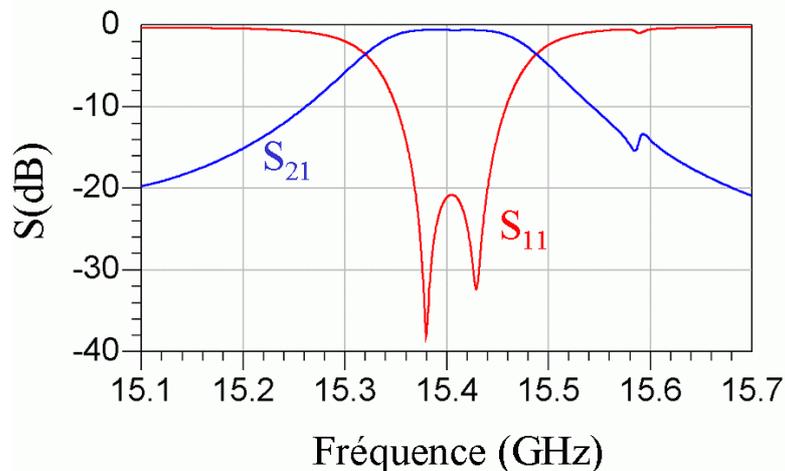


Figure II-62. Paramètres S théoriques du filtre deux pôles tout céramique.

Les performances obtenues sont les suivantes :

- $f_0 = 15.4$ GHz
- Bande passante à -3 dB = 1.1%
- Ondulation dans la bande = 0.015 dB
- Pertes d'insertions = 0.57 dB

Le gabarit de filtrage obtenu est ainsi conforme celui souhaité.

A cause des mêmes problèmes technologique, nous ne sommes ici aussi pas en mesure de présenter le comportement électrique expérimentale de ce filtre entièrement fait de céramique. Nous espérons de même pouvoir les décrire lors de la soutenance.

VIII. Conclusion.

Au cours de cette étude nous avons à la fois validé une nouvelle topologie de résonateur diélectrique sur support monobloc, mais aussi la méthode de fabrication par la stéréolithographie céramique 3D proposée au CTTC de Limoges.

Cette structure, grâce aux motifs d'excitation et à sa configuration monobloc, est assimilable à un composant de type CMS reportable sur un substrat d'accueil.

La topologie monobloc proposée amène une alternative originale aux structures équivalentes, la méthode d'assemblage utilisée au cours de la conception étant en effet simple à mettre en œuvre.

Nous proposons en résumé une structure compacte, aisée d'assemblage, qui présente des facteurs de qualités à vide élevés de plusieurs milliers qui amènent une alternative intéressante par rapport aux technologies concurrentes à ces fréquences de fonctionnement.

La réalisation et l'assemblage des filtres deux pôles et des nouvelles versions des RD unitaires sont actuellement en cours et seront fournis dans la version définitive du manuscrit.

Les perspectives pour cette structure sont notamment tournées vers l'utilisation de résonateurs à modes duaux pour proposer des solutions de filtrage plus compactes, et profiter d'une intégration monobloc pour concevoir des fonctions de filtrage à des fréquences élevées supérieures à 70 GHz. En effet à ces fréquences les dimensions et le positionnement des résonateurs sont problématiques, et la topologie du résonateur packagé proposée est une alternative intéressante.

Références :

- [1] C. Hull, "Apparatus for production of three dimensional objects by stereolithography ," U.S. Pat. No. 4575 330, 1986.
- [2] T. Chartier, C. Chaput, F. Doreau, M. Loiseau, "Stereolithography of structural complex ceramic parts," *J. Mat. Sci.*, vol. 37, pp. 3141-3147, 2002.
- [3] S. Monneret, "La microstereolithographie et ses applications," *Méc. & Ind.*, vol. 6, pp. 457-462, 2005.
- [4] A. Bertsch, S. Jiguet, and P. Renaud, "Microfabrication of ceramic components by microstereolithography," *J. Micromech.*, vol. 14, pp. 197-203, Octobre 2003.
- [5] C. Hinczewski, Thèse de Doctorat en Physique, Institut National Polytechnique de Lorraine, France, 1998.
- [6] F. Doreau, C. Chaput, and T. Chartier, "Stereolithography for manufacturing ceramic parts," *Adv. Eng. Mater.*, vol. 2, pp. 493-496, 2000.
- [7] A-L. Allanic and P. Schaeffer, "Procédé de prototypage rapide permettant l'utilisation de matériaux pâteux, et dispositif pour sa mise en œuvre, " Brevet français FR 2 790 418-A1.
- [8] <http://www.3dsystems.com/>
- [9] C. Provin, S. Monneret, H. Le Gall, et S. Corbel, "Three-dimensional ceramic microcomponents made using microstereolithography," *Adv. Mater.*, vol. 15, no. 12, pp. 994-997, June 2003.
- [10] Brevets US 2005090575 et WO 0042471.
- [11] S. B. Cohn, "Microwave bandpass filters containing high-Q dielectric resonators," *IEEE Trans. Mic. Th. Tech.*, vol. 16, no. 4, pp. 2318-227, Avril 1968.
- [12] R. V. Snyder, "Dielectric resonator filters with wide stopbands," *IEEE Trans. Mic. Th. Tech.*, vol. 40, no. 11, pp. 2100-2103, November 1992.
- [13] J.-F. Liang, and W. D. Blair, "High Q $TE_{01\delta}$ mode DR filters for PCS wireless base stations," *IEEE Trans. Mic. Th. Tech.*, vol. 46, pp. 2493-2500, December 1998.
- [14] D. Kajfez and P. Guillon, "Dielectric resonators," *Artech House Inc.*, Norwood, 1986.
- [15] W. D. Yan, and R. R. Mansour, "Tunable dielectric resonator bandpass filter with embedded MEMS tuning elements," *IEEE Trans. Mic. Th. Tech.*, vol. 55, no. 1, pp. 154-160, January 2007.

- [16] J. Hesselbarth, P. Nuechter, and U. Goebel, "Surface-mount high-Q resonators for millimeter-wave LTCC oscillators," *Eur. Mic. Symp.*, Munich, 2003.
- [17] A. El-Tager, J. Bray, L. Roy, "High-Q LTCC resonators for millimeter wave applications," *Proc. Int. Mic. Symp.*, vol. 3, pp. 2257-2260, Philadelphia, 2003.
- [18] P. ferrand, "Solutions de filtrage millimétrique et submillimétrique à structures périodiques en technologies innovantes," *Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges*, Février 2005.
- [19] N. Faure-Muret, "Conception, réalisation et tests de filtres millimétriques volumiques micro-usinés," *Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges*, Juin 2005.
- [20] M. Aubourg, "Méthode des éléments finis appliquée à des problèmes de propagation d'onde électromagnétique guidée," *Thèse de Doctorat de l'Université de Limoges*, Juillet 1985.
- [21] D. Thompson, O. Tantot, H. Jallageas, G.E. Ponchak, E. Tentzeris, J. Papapolymerou, "Characterization of Liquid Crystal Polymer (LCP) Material and Transmission Lines on LCP Substrates from 30 to 110 GHz," *IEEE Trans. On MTT*, vol. 52, no. 4, pp. 1343-1352, April 2004.
- [22] G. L. Matthaei, L. Young, and E. Jones, "Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures," *MacGraw-Hill*, New-York, 1964.
- [23] S. Amari, and M. Bekheit, "New Dual-mode dielectric resonator filters," *IEEE Mic. Wir. Comp. Lett.*, vol. 15, no. 3, pp. 162-164, Mars 2005.
- [24] Andrew L. Reynolds, Translight Software, University of Glasgow, UK, September 2, 2000.
- [25] J.-M. Lourtioz, *et al.* "Les cristaux photoniques," *Hermès*, Paris, 2003.

Chapitre III

Filtres passe bande étroite
originaux à base de cristaux à
bande interdite
électromagnétique

CHAPITRE 3. FILTRES PASSE BANDE ETROITE ORIGINAUX A BASE DE CRISTAUX A BANDE INTERDITE ELECTROMAGNETQUE.

I. Introduction.....	148
II. Cavité résonnante originale.....	150
II.1. Principe.....	150
II.2. Comparaison alumine – zircon.	151
II.3. Etude d'une cavité créée par un miroir de Bragg.....	152
II.4. Elimination des parasites et compensation de la dérive fréquentielle.....	161
II.5. Partie expérimentale.....	163
III. Filtre deux pôles original.....	167
III.1. Principe et gabarit du filtre deux pôles.....	168
III.2. Coefficient de couplage inter-cavité.....	169
III.3. Mesure du filtre deux pôles.....	171
IV. Filtre trois pôles original.....	173
IV.1. Principe et gabarit du filtre trois pôles.....	174
IV.2. Mesure du filtre deux pôles.....	175
V. Utilisation de céramiques hautes performances.....	184
V.1. Etude préliminaire.....	184
V.2. Céramiques à haute permittivité et faibles pertes.....	185
V.3. Stéréolithographie et BZT.....	187
VI. Conclusion et perspectives.....	195

I. Introduction

L'utilisation de cavités résonantes métalliques reste encore aujourd'hui pertinente, notamment pour la création de multiplexeurs ou de filtres multi-bande où les forts facteurs de qualités à vide (> 5000) de ces cavités résonantes sont nécessaires. Des fonctions de filtrages le plus souvent de type quasi-elliptique permettent d'atteindre des bandes passantes étroites (inférieures à 1%) accessibles quasi-exclusivement par cette technologie pour des fréquences de fonctionnement pouvant aller jusqu'à 20 GHz. [1-3].

Les cavités résonantes remplies d'air présentées dans [1] donnent ainsi de très bons facteurs de qualité à vide de près de 10 000 à 18.5 GHz. Les cavités utilisées présentent une hauteur de 28 mm pour un diamètre de 18 mm et sont métallisées à l'argent (conductivité de $6.17 \cdot 10^7$ S/m). Les cavités fonctionnent sur le mode TE_{113} et l'association de six d'entre elles permettent d'obtenir des bandes passantes de l'ordre de 0.5 %. La Figure III-1 montre une photographie de ce filtre.



Figure III-1. [1] Filtre dual-bande 11 pôles fonctionnant à 18.5 GHz.

Ces cavités fabriquées par Alcatel © [4] sont typiquement utilisées jusqu'à des fréquences de 30 GHz. Au delà de ces fréquences d'application, les tolérances de fabrication pourtant aux alentours de $10 \mu m$, deviennent trop importantes pour le respect des cotes de fabrication.

La montée en fréquence de ces filtres entraîne ainsi une diminution très importante de la taille des éléments unitaires et les techniques d'usinage classiquement utilisées par leur fabrication peuvent présenter des limites. Le recours à la stéréolithographie avec des polymères peut être une des alternatives pour continuer à utiliser ces éléments résonants que sont les cavités en assurant de bonnes tolérances de fabrication et de bons facteurs de qualité à

vide [5]. Dans ce cas, une cavité en résine est fabriquée puis métallisée au Cuivre par des techniques de dépôt sous vide. Les conductivités atteintes sont de l'ordre de $4.3 \cdot 10^7$ S/m. La cavité présente des dimensions de 10.6 mm x 10.6 mm x 2.6 mm et fonctionne sur son mode fondamental TM_{110} à 19.5 GHz. La Figure III-2 présente une photographie de cette cavité.

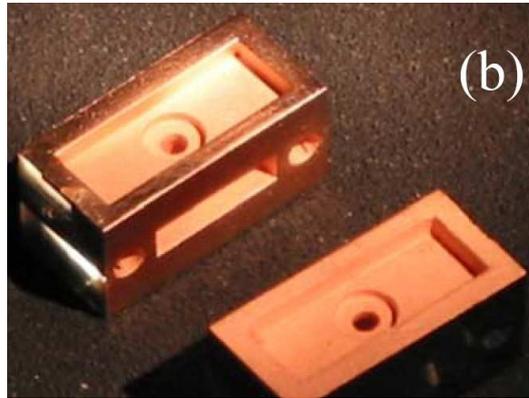


Figure III-2. [5] Vue éclatée d'une cavité métallisée au Cuivre fabriquée par stéréolithographie polymère et fonctionnant à 19.5 GHz.

Le facteur de qualité à vide obtenu est de 3000 à cette fréquence. L'association de deux de ces cavités permet d'obtenir une bande passante de 2%. Les tolérances de fabrication de la stéréolithographie sur polymères sont estimées à quelques micromètres. Les performances de telles cavités sont bien évidemment dépendante de la qualité de la métallisation appliquée sur ses parois, paramètre devenant de plus en plus critique lors de la montée en fréquence.

Une alternative consiste à imaginer des structures dans lesquelles les pertes ne seraient plus entièrement dues au métal, mais seulement en partie. L'idée de départ est alors de remplacer les murs métalliques d'une cavité classique par des structures périodiques à bande interdite électromagnétique (BIE). Si ceux-ci donnent des coefficients de réflexion proches de ceux d'une paroi métallique sans apporter autant de pertes, alors il sera possible de dépasser les facteurs de qualité à vide donnés par une cavité résonnante métallique simple.

II. Cavité résonnante originale.

II.1. Principe.

La première décision à prendre consiste à choisir la structure périodique et le matériau diélectrique à utiliser pour la réalisation. Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, le cristal BIE le plus simple existant est le cristal 1D dit miroir de Bragg constitué de plaques de diélectrique d'épaisseur $\lambda_g/4$ séparées par une distance $\lambda_0/4$ [6]. λ_0 est la longueur d'onde correspondante à la fréquence centrale de la bande interdite. λ_g est la longueur d'onde dans le matériau diélectrique et est définie par $\lambda_g = \lambda_0 / \sqrt{\varepsilon}$ avec ε la permittivité relative du matériau. Ainsi, le choix du matériau et de la fréquence centrale conditionne la taille des éléments présents dans le miroir de Bragg. La Figure III-3 résume ces différentes grandeurs.

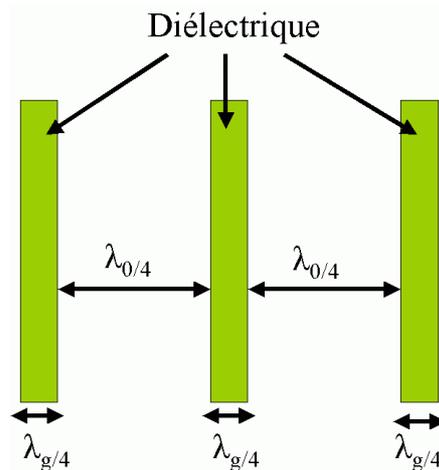


Figure III-3. Cristal 1D : le miroir de Bragg.

Un telle structure sera d'autant plus efficace en terme de coefficient de réflexion et de largeur de bande interdite en fréquence que le contraste de permittivité et que le nombre de couches le composant sera élevé. La céramique du nom de zircone ou dioxyde de zirconium (ZrO_2) semble tout à fait adaptée pour réaliser ce cristal 1D.

En effet, la caractérisation de matériau réalisée sur cette céramique à 30 GHz a révélé que celle-ci présente une permittivité de 31.2 pour une tangente de pertes de $1.8 \cdot 10^{-3}$. Cette caractérisation a été réalisée dans nos laboratoires selon la méthode décrite dans le Chapitre 2 qui est plus en détail expliquée dans [7]. Cette forte permittivité en fait potentiellement un

candidate de premier choix pour la réalisation d'un miroir de Bragg. Afin de confirmer cela, une comparaison entre un miroir réalisé en alumine et en zircone a été menée.

II.2. Comparaison alumine – zircone.

La structure de test utilisée consiste en un guide rectangulaire standard WR 28 qui fonctionne d'une façon monomode sur la bande Ka de 26.4 à 40.1 GHz. Sa taille intérieure est de 3.55 mm par 7.11 mm et il fonctionne sur le mode TE₁₀. A l'intérieur de ce guide est inséré un miroir de Bragg présentant une bande interdite arbitrairement centrée sur 33 GHz (Figure III-4).

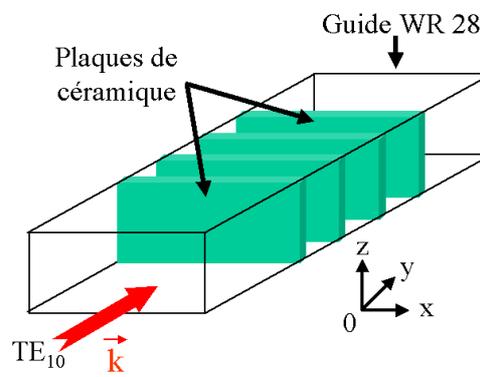


Figure III-4. Structure de test des performances du miroir de Bragg. Le vecteur k est le vecteur d'onde du mode TE₁₀ orienté selon l'axe y .

La bande interdite en fréquence est arbitrairement centrée à 33 GHz. Les plaques de diélectrique ont alors une épaisseur de $\lambda_g / 4$ et sont séparées d'une distance de $\lambda_0 / 4$ comme nous l'avons vu dans le paragraphe précédent. Les deux matériaux diélectriques choisis ont donc les dimensions résumées dans le Tableau I.

	alumine	zircone
Épaisseur des plaques (mm)	0.758	0.407
Distance entre deux plaques (mm)	2.27	2.27

Tableau I. Principales dimensions des miroirs de Bragg utilisés.

Étant donnée la plus forte permittivité de la zircone, les plaques d'épaisseur $\lambda_g / 4$ sont naturellement moins épaisses que celle en alumine d'environ 46%. Le paramètre de réflexion pour les deux types de miroir est alors étudié en fonction du nombre de plaques le composant. Les résultats pour un cristal 1D en alumine et en zircone sont résumés dans le Tableau II. Ces

calculs ont été effectués avec le logiciel open source *Translight* déjà utilisé dans les deux chapitres précédents.

Nombre de plaques	alumine (%)	zircone (%)
2	97.46	99.84
3	99.78	99.996
4	99.98	100
5	99.998	100

Tableau II. Evolution du coefficient de réflexion pour le miroir de Bragg en alumine et en zircone en fonction du nombre de plaques le constituant.

Du fait de sa plus faible permittivité, un miroir de Bragg en alumine nécessite 1.5 à 2 fois plus de plaques pour donner le même coefficient de réflexion que son équivalent en zircone. Il est de plus extrêmement important que le coefficient de réflexion soit le plus élevé possible afin de limiter toute fuite au travers du miroir. En effet, le but de ce miroir étant de remplacer une paroi métallique, il faut absolument éviter tout risque de fuite qui entraînerait forcément une diminution importante du facteur de qualité à vide d'une telle cavité [5].

La taille occupée par ce miroir est aussi un élément important et la zircone permet d'obtenir des plaques plus fines que celles en alumine.

Ainsi, considérant ces différents critères, un miroir de Bragg composé de plaques de zircone permet d'obtenir une structure plus compacte et plus efficace en terme de réflexion pour un nombre de plaques modéré.

L'étape suivante de cette étude consiste à créer une cavité à partir d'un tel miroir.

II.3. Etude d'une cavité créée par un miroir de Bragg.

Il faut tout d'abord fixer la fréquence de fonctionnement de la cavité : elle est arbitrairement choisie à 33 GHz en accord avec la BIE établie précédemment. Dans le cas d'une cavité parallélépipédique métallique classique remplie d'un diélectrique de permittivité ϵ_r , sa fréquence de résonance est donnée par la formule [8] :

$$f = \frac{c}{2\pi\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{\left(\frac{n\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{m\pi}{b}\right)^2 + \left(\frac{l\pi}{c}\right)^2}, \quad \text{III.1}$$

a , b et c sont respectivement la largeur, longueur et hauteur de cette cavité. Les paramètres n , m , et l représentent les variations modales suivant les trois dimensions de la cavité.

Ainsi pour une cavité remplie d'air fonctionnant sur son mode fondamental TM_{110} à 33 GHz et dont la largeur et hauteur seront les mêmes que les dimensions internes du guide WR 28, celle-ci doit présenter une longueur de 5.911 mm comme résumé sur la Figure III-5.

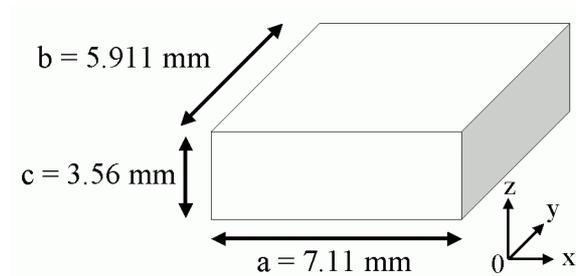


Figure III-5. Taille d'une cavité fonctionnant sur son mode fondamental TM_{110} à 33GHz.

En se basant sur cette cavité, nous commençons par supprimer les deux parois définies dans le plan xOz et les remplacer par deux plaques de zircon de $407 \mu\text{m}$ d'épaisseur (cf. Tableau I) comme montré sur la Figure III-6. Cette cavité se trouve « insérée » dans un guide WR 28 qui permettra son excitation par le mode TE_{10} guidé dans ce guide d'onde : deux plaques écartées l'une de l'autre de 5.911 mm sont tout simplement placées dans ce guide.

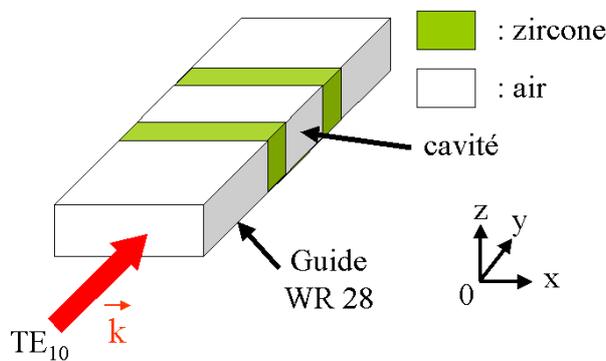


Figure III-6. Cavité dans le guide WR 28.

Dans cette configuration, les murs métalliques présents dans le plan xOz ont ainsi été supprimés. La Figure III-7 montre les paramètres S d'une telle structure obtenus par la simulation EM 3D en oscillations forcées réalisée par le logiciel EMXD.

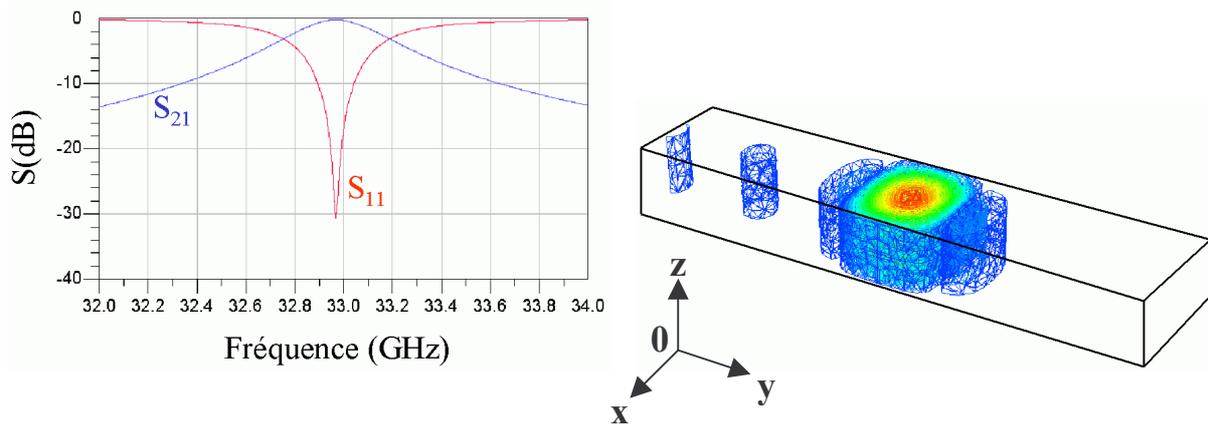


Figure III-7. Paramètres S de la cavité insérée dans un guide WR 28 et champ électrique à 33 GHz.

Nous obtenons alors une cavité résonante fonctionnant à 32.97 GHz. Afin d'évaluer les performances d'une telle cavité, nous avons étudié l'évolution du facteur de qualité à vide Q_0 et du facteur de qualité extérieur Q_e en fonction du nombre de plaques de zircone placée avant et après cette cavité (sur l'axe y).

II.3.a. Evolution des paramètres Q_0 et Q_e .

Comme nous l'avons montré dans le Chapitre 2, le facteur de qualité en charge Q_l est déterminé typiquement en mesurant le rapport fréquence centrale du résonateur sur bande passante à -3 dB du maximum de transmission comme indiqué sur la Figure III-8. La réponse en transmission nécessaire à ce calcul est obtenue en effectuant une simulation EM en oscillations forcées dans laquelle aucunes pertes métalliques ni diélectriques ne sont considérées. Dans de telles conditions, le facteur de qualité extérieur vaut deux fois Q_l .

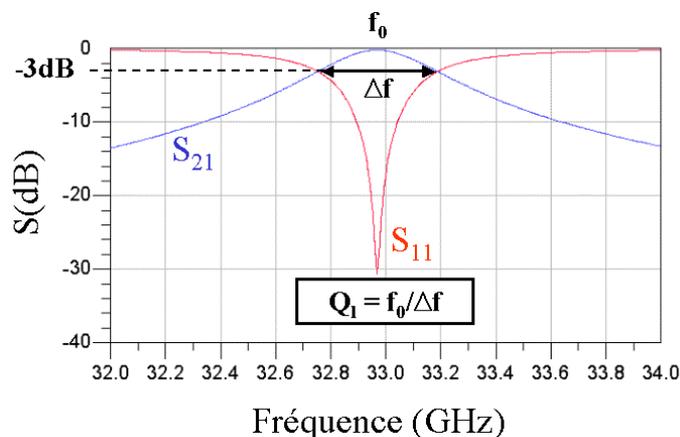


Figure III-8. Calcul du coefficient de couplage en charge Q_l de la cavité résonante.

Le facteur de qualité extérieur Q_0 est lui obtenu en simulant en oscillations forcées la structure avec ses pertes diélectriques et métalliques. Grâce aux paramètres S obtenus par cette simulation EM, nous pouvons obtenir ce coefficient par les formules suivantes [8]:

$$Q_0 = Q_i(1 + \alpha_1 + \alpha_2) \quad \text{III.2}$$

$$\text{avec } \alpha_i = \frac{1 - |S_{ii}(f_0)|}{2|S_{ii}(f_0)|}, \quad i = 1 \text{ ou } 2 \quad \text{III.3}$$

Nous avons alors étudié en simulation EM 3D en oscillations forcées l'évolution des coefficients de qualité Q_0 et Q_e en fonction du nombre de plaques de zircone définissant la cavité dans le guide. La métallisation considérée pour le guide d'onde est du laiton présentant une conductivité de $2.56 \cdot 10^7$ S/m. La zircone présente une permittivité relative de 31.2 et une tangente de pertes de $1.8 \cdot 10^{-3}$ à 30 GHz.

Les résultats obtenus sont récapitulés dans le Tableau III.

Nombre de plaques (plan x0z)	f_0 (GHz)	Q_e	Q_0
1	32,967	150	156
2	33,05	7000	2270
3	33,05	184000	3250

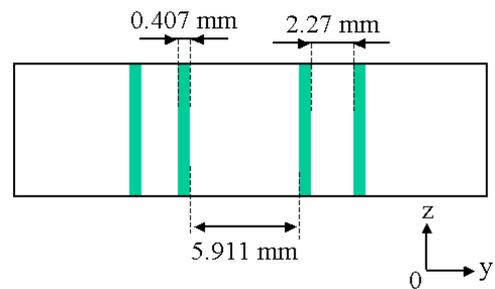


Tableau III. Evolution des coefficients Q_0 et Q_e en fonction du nombre de plaques avant et après la cavité. L'illustration montre le cas avec deux plaques.

NB : pour une cavité résonnante de même dimension (7.11 mm x 5.911 mm x 3.55 mm), remplie d'air et métallisée par du laiton, son facteur de qualité sur le mode TM_{110} est théoriquement de 2950. Cette valeur nous servira par la suite de valeur référence.

Plus le nombre de plaques est important et plus le coefficient de qualité à vide de la cavité ainsi créée devient élevé, voire dépasse la valeur donnée par une cavité résonnante classique. Ce comportement vient tout naturellement du fait que l'augmentation du nombre de plaques des miroirs de Bragg placées avant et après la cavité augmente son pouvoir réfléchissant. De ce fait, les pertes dues aux fuites (ou radiations) sont fortement diminuées. Cependant l'augmentation du nombre de plaques entraîne une baisse importante du couplage extérieur, phénomène qui se traduit par l'augmentation du coefficient de couplage externe Q_e .

Ce dernier phénomène est d'autant plus visible lorsque l'on observe les courbes en transmission obtenues par simulation EM en oscillations forcées pour ces trois cas. Les résultats de ces simulations sont présentés sur la Figure III-9. Nous tiendrons compte de ce comportement lors de la synthèse du filtre global plus loin dans ce chapitre.

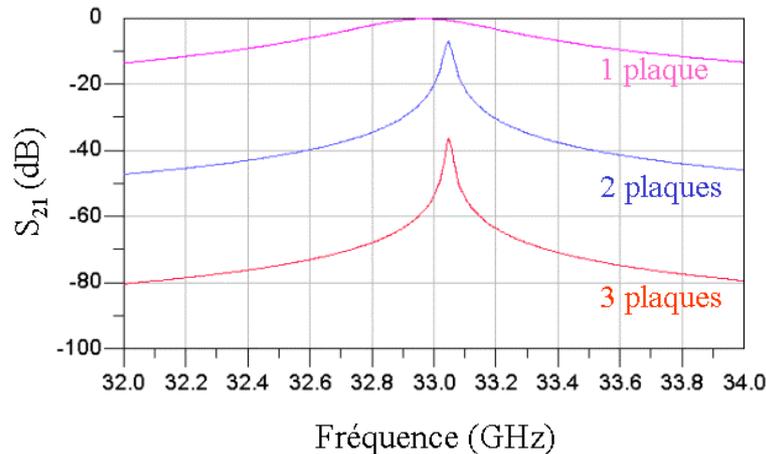


Figure III-9. Paramètre S_{21} de la cavité insérée dans un guide WR 28 pour différentes configurations des miroirs de Bragg.

Nous allons dans le paragraphe suivant remplacer les parois métalliques de cette cavité selon le plan $y0z$ par des miroirs de Bragg et étudier l'impact sur la facteur de qualité à vide de la cavité résonante et sur le facteur de qualité extérieur.

II.3.b. Suppression des parois métalliques latérales.

La structure considérée pour la suite de cette étude est présentée sur la Figure III-10 : elle se base sur une cavité résonante entourée de miroir de Bragg composée de deux plaques dans les plans $y0z$ et $x0z$. Les épaisseurs des plaques ainsi que leur périodicité au sein du cristal sont les mêmes que sur la structure précédente. La structure en céramique est blindée par deux plaques métalliques en laiton sur sa face supérieure et sur sa face inférieure. Elle est excitée par un guide d'onde WR28 fonctionnant sur le mode TE_{10} placé devant et derrière la structure comme indiqué sur la Figure III-10 (image du bas.).

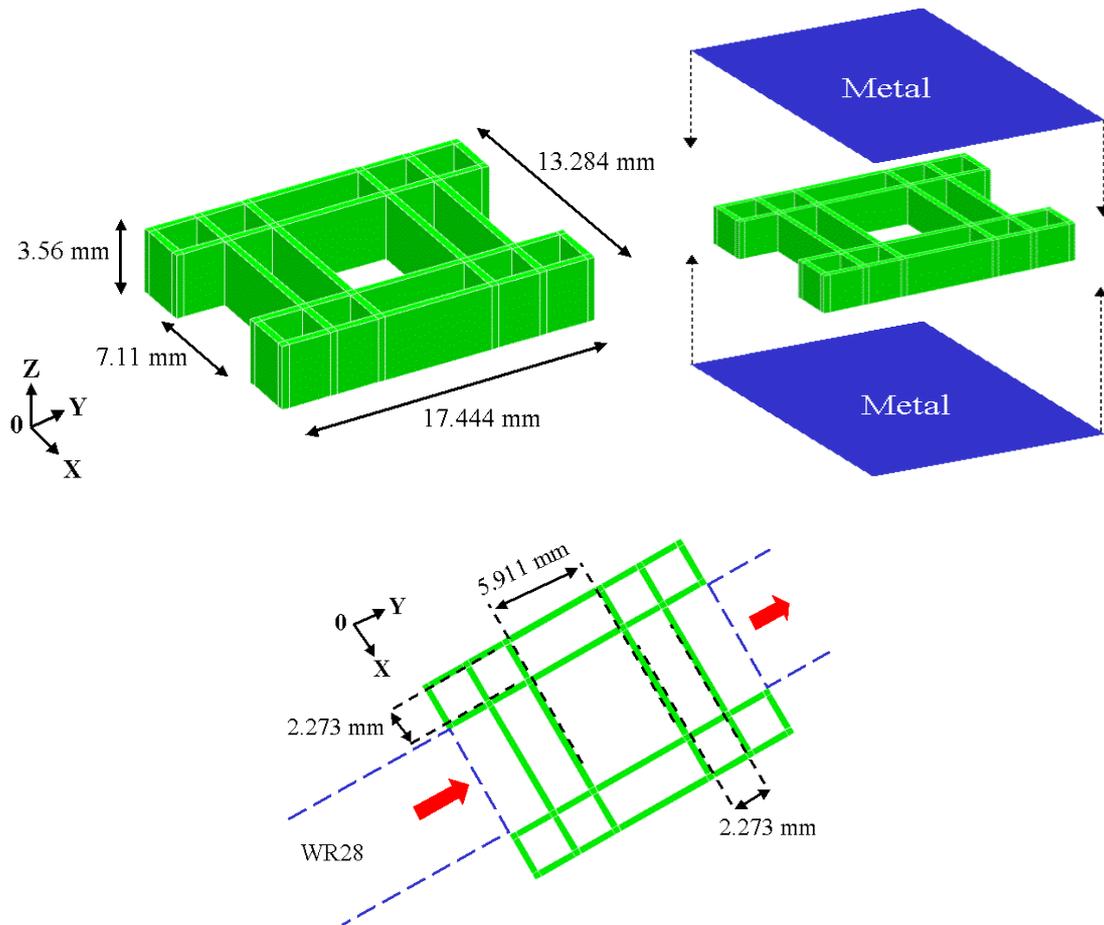


Figure III-10. (Gauche) Cavité résonante entourée de miroirs de Bragg sur deux de ses axes. (Droite) Représentation de la pièce céramique prise en sandwich entre deux plaques de laiton. (Bas) Vue de dessus avec notamment les guides WR28 d'entrée et de sortie.

Cette cavité résonante est placée en sandwich entre deux plaques métalliques de laiton afin d'assurer l'orientation verticale du champ électrique du mode résonant considéré TM_{110} (orienté selon l'axe z). Comme pour la cavité placée dans un guide d'onde étudiée précédemment, nous allons observer l'évolution des paramètres Q_0 et Q_e en fonction du nombre de plaques composant les miroirs de Bragg latéraux (plan $y0z$). Les résultats obtenus sont résumés dans le Tableau IV.

Nombre de plaques	Q_e	Q_0
2	4400	1800
3	7000	2770
4	7320	2854
5	7240	2800
6	7200	2885

Tableau IV. Evolution des coefficients Q_0 et Q_e en fonction du nombre de plaques présent dans les miroirs dans le plan $y0z$.

Les simulations EM 3D réalisées en oscillations forcées pour obtenir ces valeurs prennent en compte les mêmes valeurs de permittivité pour le diélectrique et de conductivité pour le laiton que celles définies dans le paragraphe précédent.

Il apparaît qu'il faut un minimum de trois plaques latérales afin de correctement confiner le champ électromagnétique. Nous portons notre choix sur la configuration présentant quatre plaques latérales ; en effet au delà le gain sur le facteur de qualité à vide n'est pas significatif.

Remarque : en considérant la configuration retenue, le passage du nombre de plaques composant les miroirs de Bragg, placés sur la direction de propagation (axe y), de deux à trois n'améliore pas le facteur de qualité à vide. En effet celui-ci ne dépasse pas les 2700.

La structure retenue pour la suite de cette étude est donc présentée sur la Figure III-11.

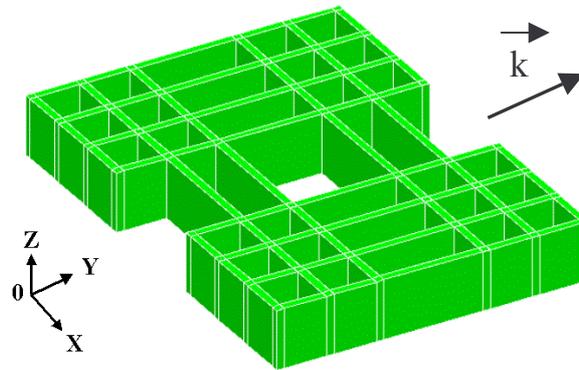


Figure III-11. Cavity résonante retenue.

La Figure III-12 montre, comme l'évolution du facteur de qualité à vide le laissait supposer, un bon confinement du champ électrique au sein de la cavité à la fréquence de résonance.

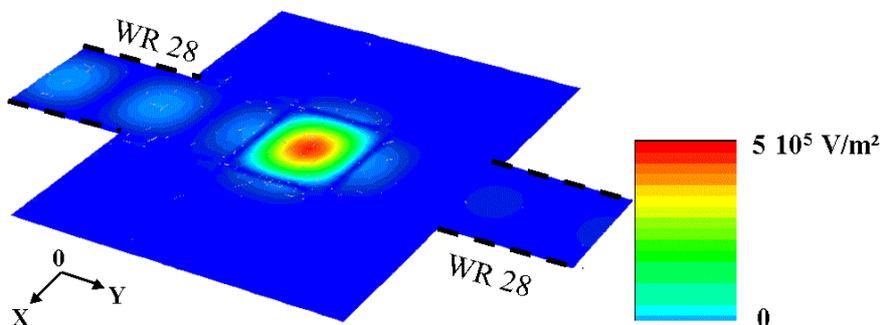


Figure III-12. Champ électrique à la fréquence de résonance de la cavité (33 GHz) sur un plan de coupe situé à mi-hauteur de la structure. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe

Cependant la réponse en fréquence laisse apparaître un comportement singulier comme montré sur la Figure III-13.

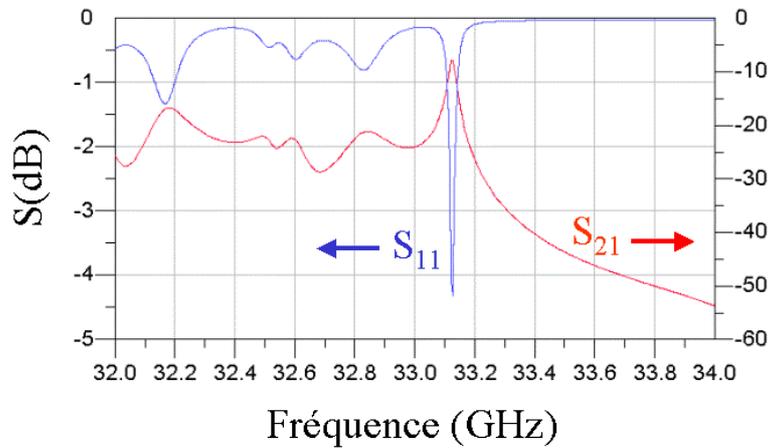


Figure III-13. Paramètres S de la structure retenue.

Deux phénomènes sont visibles sur la réponse en fréquence. Tout d'abord des ondulations sont observées. Celles-ci sont dues à des résonances apparaissant dans les plaques de zircone du fait de leur épaisseur égale à $\lambda_g/4$ à 33 GHz comme celle observée vers 32.85 GHz sur la Figure III-14.

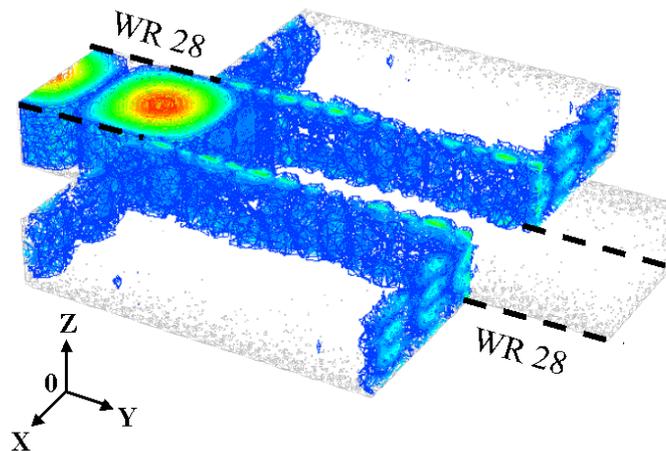


Figure III-14. Mode parasite apparaissant dans les plaques des miroirs de Bragg à 32.85 GHz.

Il apparaît que ces parasites ne pourront être évités tant que nous resterons sur ce type de structure. L'idée consiste alors à essayer de repousser le plus loin possible en fréquence ces parasites, et plus particulièrement vers les plus basses fréquences compte tenu de leur localisation initiale.

Chapitre III. Filtres passe bande étroite originaux à base de cristaux à bande interdite électromagnétique.

Pour cela, nous choisissons d'augmenter les épaisseurs des plaques. Nous modifions alors la configuration optimale du miroir de Bragg établi précédemment et devons donc procéder à une nouvelle optimisation de ce dernier afin de le rendre de nouveau optimal.

Cette configuration optimale comprend, nous le rappelons, des épaisseurs de plaques de $\lambda_g/4$ séparées par une distance égale à $\lambda_0/4$.

λ_g et λ_0 sont respectivement les longueurs d'onde guidée dans le diélectrique et dans l'air correspondant **à la fréquence centrale de la bande interdite**, sachant que :

$$\sqrt{\varepsilon} \cdot \lambda_g = \lambda_0. \quad \text{III.4}$$

(ε étant la permittivité du matériau diélectrique)

ou encore
$$\sqrt{\varepsilon} \cdot \lambda_g / 4 = \lambda_0 / 4 \quad \text{III.5}$$

et donc :

$$\sqrt{\varepsilon} \cdot \text{épaisseur d'une plaque} = \text{écartement entre deux plaques} \quad \text{III.6}$$

si l'on est dans le cas d'un miroir de Bragg parfait.

Pour respecter la condition de configuration optimale d'un miroir de Bragg, il suffit de conserver l'égalité de l'équation III.6. La fréquence centrale de la BIE sera aussi fonction de l'épaisseur d'une plaque, et donc du miroir de Bragg associé. Une augmentation de l'épaisseur d'une plaque de céramique conduira dans ces conditions à une diminution de la fréquence centrale de la BIE.

Nous nous retrouvons alors avec deux contraintes :

- Augmenter les épaisseurs de plaques pour repousser les modes parasites
- Conserver la configuration optimale du miroir de Bragg qui peut se résumer à conserver l'égalité de l'équation III.6.

Néanmoins, avant de donner aux plaques une nouvelle épaisseur assez importante pour repousser les modes parasites, nous devons tenir compte de la deuxième constatation apparaissant sur la réponse en fréquence de la Figure III-13. En effet la résonance de la cavité n'est plus à 33 GHz comme nous l'avions configurée initialement (voir Figure III-8) mais se retrouve vers 33.17 GHz. La présence des miroirs à la place des parois métalliques a pour

conséquence de modifier légèrement la fréquence de résonance de la cavité en modifiant la position des murs électriques équivalents ramenés par le miroir de Bragg. Sur la Figure III-9, nous pouvons déjà visualiser ce phénomène.

Ce phénomène de dérive fréquentielle devra être pris en compte lors de la modification de l'épaisseur des plaques et donc, de la nouvelle configuration du miroir de Bragg.

II.4. Elimination des parasites et compensation de la dérive fréquentielle.

Nous regardons l'évolution de la fréquence de résonance de la cavité en fonction de la fréquence centrale de la bande interdite électromagnétique présentée par le miroir de Bragg. Comme nous venons de l'expliquer, chaque valeur de fréquence centrale de la BI impose une valeur différente de l'épaisseur de plaque, et donc d'espacement entre plaque, puisque nous conservons la configuration optimale du miroir de Bragg.

La cavité entourée par les dits miroirs reste quant à elle fixée sur les dimensions initialement prévues pour une résonance à 33 GHz (7.11 mm par 5.911 mm par 3.55 mm). Les résultats sont tracés sur la Figure III-15.

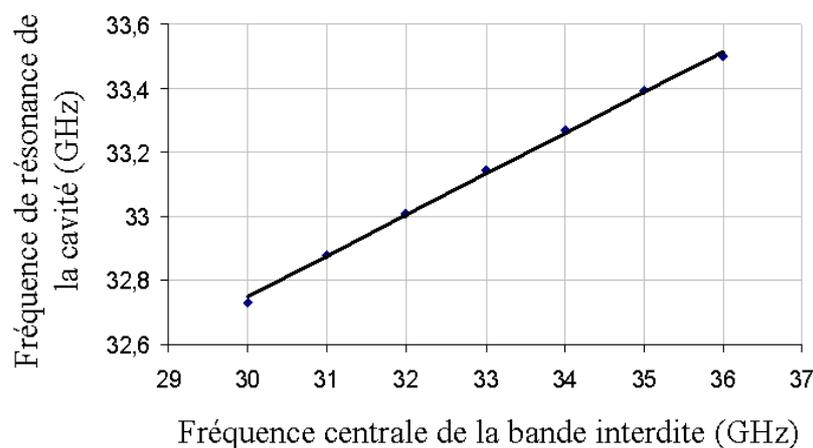


Figure III-15. Dérive fréquentielle de la fréquence de résonance de la cavité en fonction de la fréquence centrale de la bande interdite des miroirs.

Nous observons une évolution linéaire de la dérive fréquentielle de la fréquence de résonance de la cavité en fonction de la fréquence centrale de la bande interdite.

En diminuant la fréquence centrale de la bande interdite, ce qui revient dans notre cas à augmenter notamment l'épaisseur des plaques de zircone, nous repoussons les fréquences parasites de ces plaques vers les basses fréquences. Après plusieurs simulations EM en oscillations forcées, nous observons que les parasites sont éliminés sur une bande de 31 à 35 GHz pour une fréquence centrale de bande interdite égale à 30 GHz.

Néanmoins cette configuration des miroirs de Bragg entraîne une dérive de la fréquence de résonance de la cavité à 32.7 GHz comme le montre la Figure III-15. Le comportement linéaire de dérive fréquentielle nous montre qu'il suffit alors de fixer les dimensions internes de la cavité pour que celle-ci résonne vers 33.3 GHz pour ramener la fréquence de travail en présence des miroirs de Bragg à la valeur objective souhaitée de 33 GHz.

Sachant que théoriquement une cavité métallique parallélépipédique de dimensions 7.11 mm par 5.82 mm par 3.55 mm résonne sur son mode fondamental à 33.3 GHz, nous considérons ces dimensions pour la cavité résonante. Le résultat de la simulation EM en oscillations forcées de cette nouvelle structure optimale est présenté sur la Figure III-16.

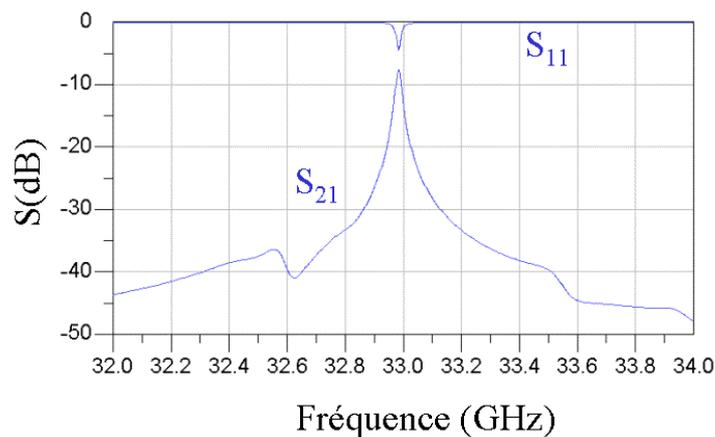


Figure III-16. Réponse en fréquence de la cavité pour une fréquence centrale de la bande interdite de 30 GHz.

Les résultats sont les suivants :

- $f_0 = 32.98\text{GHz}$
- $Q_0 = 2820$

La structure simulée possède quatre plaques dans le plan $y0z$ et deux dans le plan $x0z$ de part et d'autre de la cavité résonante. Ce nombre de plaque dans le plan $x0z$ amène un coefficient de transmission assez faible de l'ordre de -8 dB. Le facteur de qualité à vide est équivalent à celui obtenu par simulation EM pour la configuration conservant un miroir de Bragg dont la fréquence centrale est de 33 GHz.

La compensation linéaire a ramené la fréquence de résonance à 33 GHz.

La Figure III-17 nous montre la réponse large bande en fréquence .

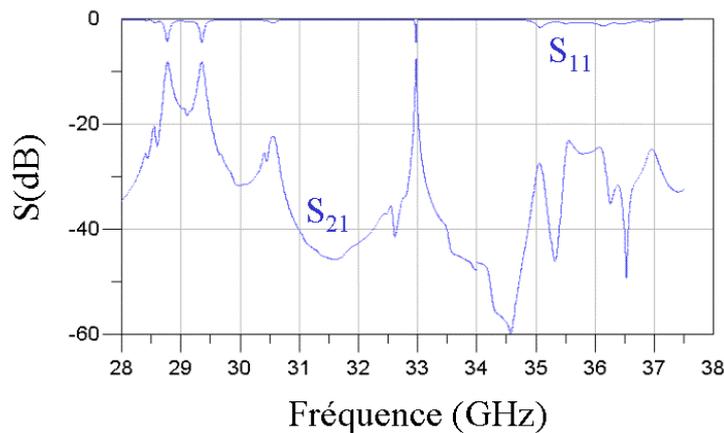


Figure III-17. Réponse large bande de la cavité.

Nous pouvons observer que les résonances parasites dans les parois des plaques ont bien été repoussées vers les plus basses fréquences comme attendues. Nous pouvons alors passer à la partie expérimentale de cette étude.

II.5. Partie expérimentale.

Tout d'abord une légère modification est introduite sur le design choisi afin de faciliter sa mesure. Les dernières plaques des miroirs latéraux (plan $y0z$) d'épaisseur $\lambda_g/4$ sont remplacées par des plaques d'épaisseur $3\lambda_g/4$ afin de donner une solidité mécanique supplémentaire à la pièce sur ses flancs. Le comportement fréquentiel du miroir n'en est pas modifié. De plus des ajouts supplémentaires sont apportés comme montrés sur la Figure III-18 afin de faciliter la fixation de l'ensemble dans le support métallique qui est prévu pour la mesure de ce composant.

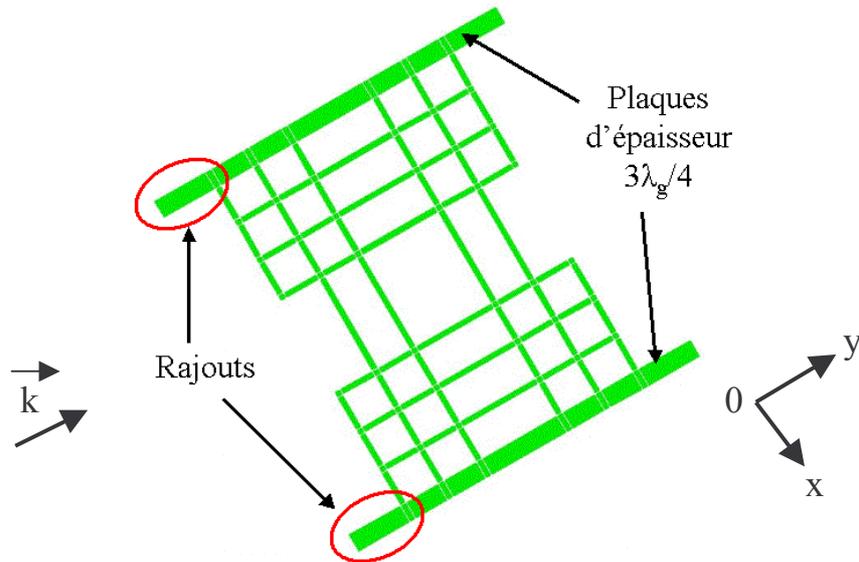


Figure III-18. Structure retenue avec rajouts de diélectriques.

Cette pièce sera insérée dans un support en laiton puis une plaque métallique viendra se positionner sur la pièce céramique afin de refermer la cavité. Sur ce montage viendra se brancher un guide WR 28 en entrée et en sortie afin de mesurer la réponse en fréquence sur un analyseur de réseau vectoriel. Ce montage sera visible sur les photographies de la configuration expérimentale montrées dans le paragraphe suivant à la Figure III-20.

II.5.a. Réalisation de la pièce céramique.

La pièce centrale a été réalisée par stéréolithographie céramique 3D et est visible sur la Figure III-19.

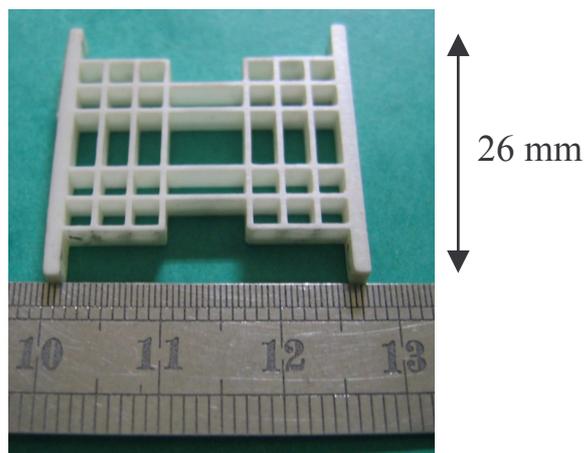


Figure III-19. Photographie de la structure un pôle fabriquée.

Le Tableau V résume les dimensions relevées sur la pièce fabriquée afin de les comparer aux dimensions demandées.

	Fabrication (mm)	Théorie (mm)	Erreur (% / μm)
Largeur de la cavité	5.86	5.82	0.7 / 40
Longueur de la cavité	7	7.11	0.15 / 110
Hauteur de la pièce	3.5	3.55	1.4 / 50
Epaisseur moyenne des plaques	0.47	0.448	4.9 / 22
Espacement entre les plaques	2.45	2.5	2 / 50

Tableau V. Comparaison entre les dimensions obtenues sur la pièce fabriquée et celles attendues.

Nous obtenons des valeurs très proches des dimensions demandées : une tolérance de fabrication comprise entre 0.15 et 4.9 % est ainsi obtenue. Cet écart entre le maximum et le minimum de variation provient du retrait anisotrope que subit la pièce crue lors de sa cuisson étant donnée la forme non homogène de la structure. La pièce est maintenant prête à être mesurée.

II.5.b. Mesure de la cavité résonante.

La Figure III-20 présente le montage mécanique utilisé pour la mesure de la cavité résonante.

La pièce céramique est insérée dans un support tenant lieu de plaque métallique inférieure. La pièce réalisée en laiton a été dimensionnée pour que la cavité céramique vienne parfaitement se positionner au centre afin que les tronçons de guide de part et d'autre de la céramique soit alignés avec la cavité comme montré sur la Figure III-20 (a). Ensuite une plaque supérieure vient se positionner sur le support précédent afin de refermer la cavité (Figure III-20 (b)). La structure obtenue est alors extrêmement robuste et présente sur sa face avant et arrière une connexion standard pour venir y connecter un guide d'onde WR 28. Ce guide de dimensions internes 7.11 mm par 3.55 mm fonctionne sur son mode fondamentale TE_{10} de 26 à 40 GHz. Le tout est alors connecté à un analyseur de réseaux vectoriel afin d'obtenir le réponse en fréquence de la cavité (Figure III-20 (c)).

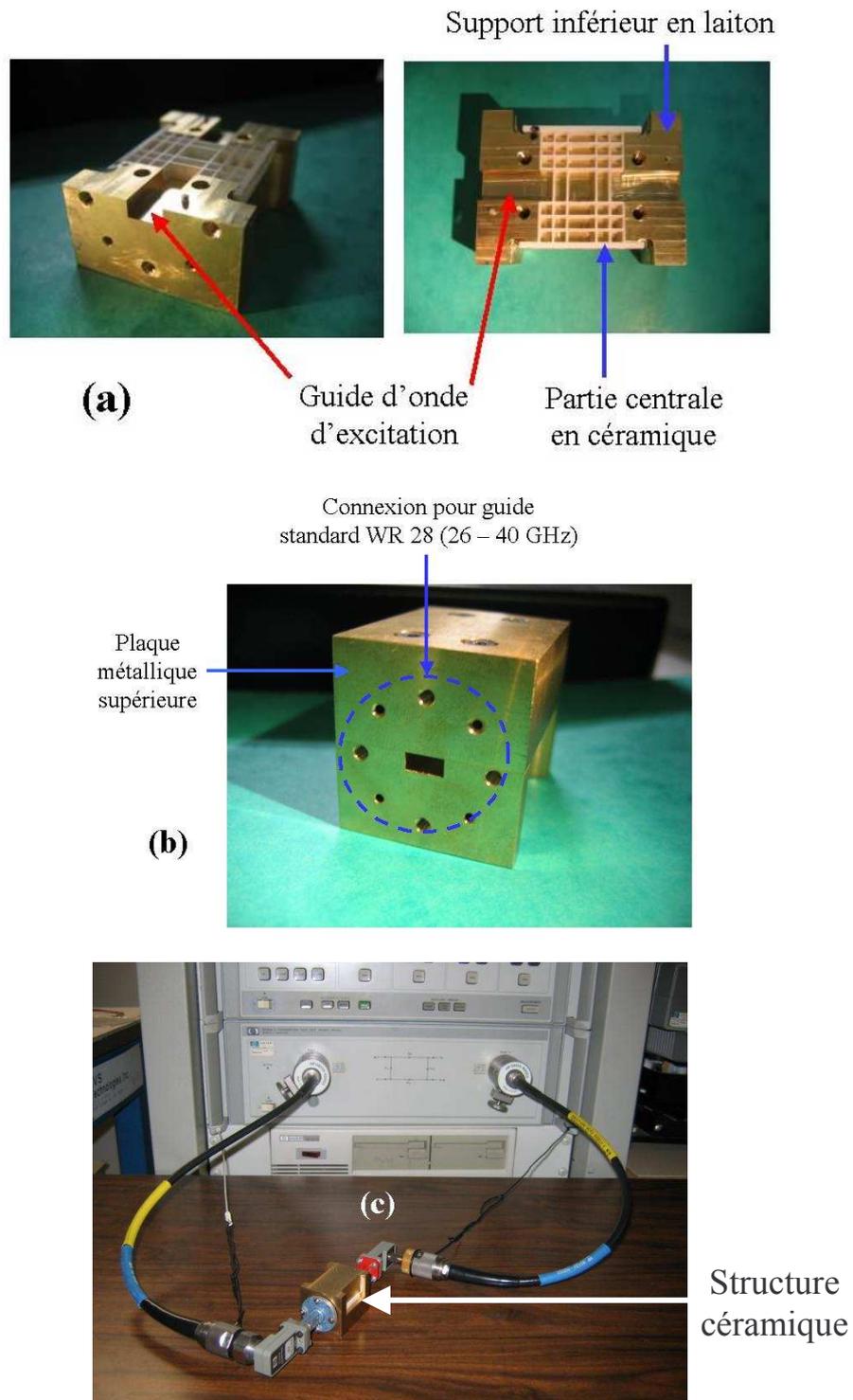


Figure III-20. Principe du montage pour la mesure de la cavité.

La réponse en fréquence mesurée est présentée sur la Figure III-21.

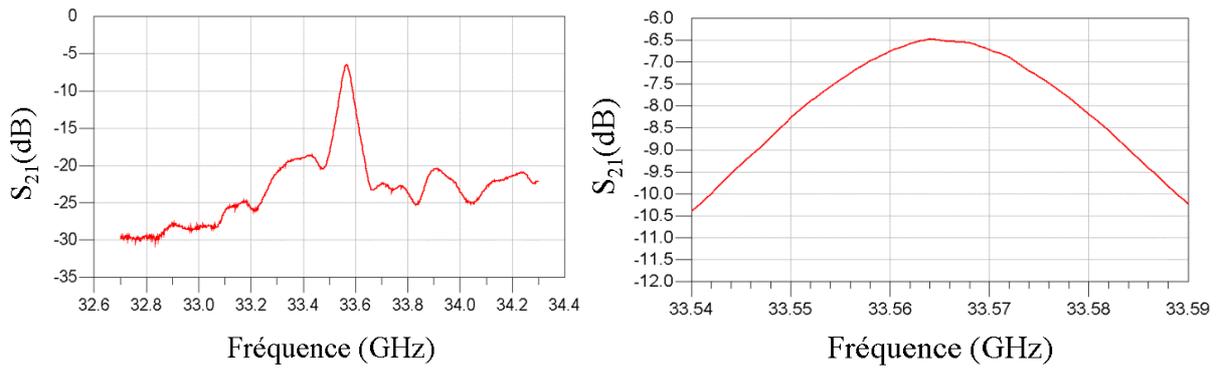


Figure III-21. Paramètre en transmission expérimental de la cavité résonante sur une large bande (gauche) et faible bande (droite) de fréquence.

La fréquence de résonance obtenue est de 33.56 GHz et le facteur de qualité à vide mesuré est de l'ordre de 2400, ce qui est assez proche des valeurs théoriques attendues qui sont une fréquence de fonctionnement de 33 GHz et d'un facteur de qualité de 2800.

Le décalage en fréquence obtenu expérimentalement est expliqué par le fait que la taille mesurée de la cavité est plus petite que celle attendue. La légère diminution survenue sur le facteur de qualité est quant à elle attribuée au fait que les contacts entre la pièce céramique et les plaques supérieures et inférieures ne sont pas tout à fait optimaux. En effet cela a pour conséquence d'introduire des fuites au niveau du confinement du champ électromagnétique au sein de la cavité qui dégradent sensiblement le facteur de qualité à vide mesuré.

Néanmoins le concept a été totalement validé et les tolérances de fabrication se révèlent très encourageantes pour la suite de cette étude.

Nous procédons maintenant à l'étude et à l'optimisation d'un filtre deux pôles.

III. Filtre deux pôles original.

Le filtre considéré se base sur le principe introduit sur la cavité résonante précédente. Il est basé sur le principe des cavités résonantes couplées.

La première étape du design de ce filtre consiste à fixer son gabarit.

III.1. Principe et gabarit du filtre deux pôles.

Nous fixons le gabarit suivant :

- Fréquence de fonctionnement : 33 GHz
- Bande passante à -3 dB : 1 %
- Soit une bande équi-ondulation de 100 MHz
- Ondulation dans la bande : 0.01 dB

En se basant sur la référence [8], il apparaît que le coefficient de couplage extérieur Q_e doit présenter une valeur de 150 et le coefficient de couplage inter-cavité k_{12} une valeur de $7 \cdot 10^{-3}$.

Compte tenu des résultats obtenus dans le Tableau III de la partie II.3.a, il apparaît qu'une cavité résonante comme celle étudiée précédemment présente la valeur de Q_e objectif pour une seule plaque de diélectrique placée avant et après la cavité.

Le réglage du coefficient de couplage inter-cavité k_{12} sera lui réglé par un couplage de type évanescent à travers un miroir de Bragg séparant les cavités résonantes.

La structure ainsi formée est présentée sur la Figure III-22.

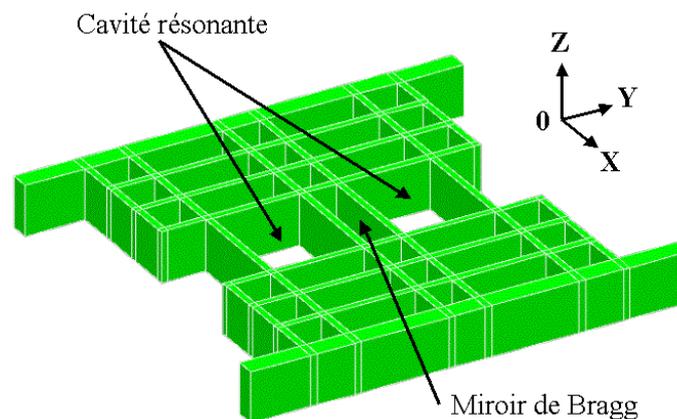


Figure III-22. Description géométrique du filtre deux pôles.

La partie céramique (zircone) du filtre est constituée de deux cavités résonantes couplées placées suivant l'axe y et séparées par miroir de Bragg constitué de deux plaques de céramique.

Ces cavités sont entourées selon l'axe x de deux miroirs de Bragg présentant quatre plaques. La dernière de ces plaques (celle la plus à l'extérieur), possède une épaisseur trois

fois supérieures à celle des autres plaques. Nous reprenons ici la configuration choisie pour la cavité BIE simple.

Comme précédemment, cette pièce céramique est pris en sandwich entre des plaques de laiton et est excitée par des guides d'ondes rectangulaires WR28 fonctionnant sur leur mode fondamental TE_{10} sur la bande Ka (26-40 GHz).

La taille des deux cavités, l'épaisseur des plaques des miroirs de Bragg ainsi que la distance les séparant est la même que sur la structure un pôle précédente. Le coefficient de couplage entre les deux cavités sera ainsi simplement réglé en agissant sur la distance séparant les deux cavités adjacentes. Nous avons alors étudié l'évolution du coefficient k_{12} en fonction de cette distance afin de trouver celle qui correspond au coefficient requis pour obtenir le gabarit fixé.

III.2. Coefficient de couplage inter-cavité.

Ce coefficient est étudié en fonction de la distance D séparant les deux cavités comme indiqué sur la Figure III-23.

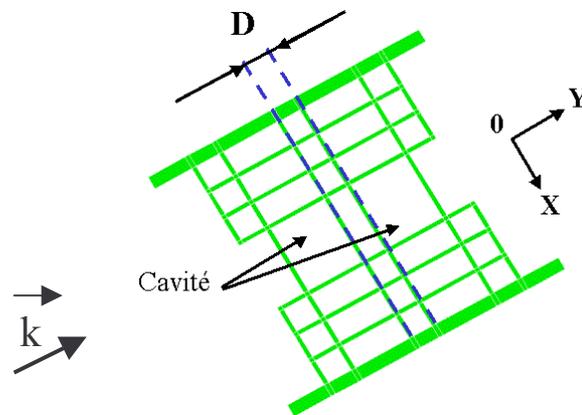


Figure III-23. Vue de dessus du filtre deux pôles.

Afin d'extraire par le calcul la valeur du coefficient k_{12} , un plan de symétrie est défini entre les deux cavités. Ainsi, en fonction de la nature de celui-ci, CCE ou CCM, nous calculons par des simulations en oscillations libres les fréquences de résonance des modes couplés, fréquences appelées respectivement f_1 et f_2 .

En appliquant la formule précédemment utilisée dans le Chapitre 2 :

$$k_{12} = \frac{f_1^2 - f_2^2}{f_1^2 + f_2^2}, \text{ nous pouvons déterminer la valeur } k_{12} \text{ donnée par la structure.}$$

La Figure III-24 montre le positionnement du plan de symétrie sur le filtre deux pôles ainsi que l'évolution de k_{12} en fonction de la distance D .

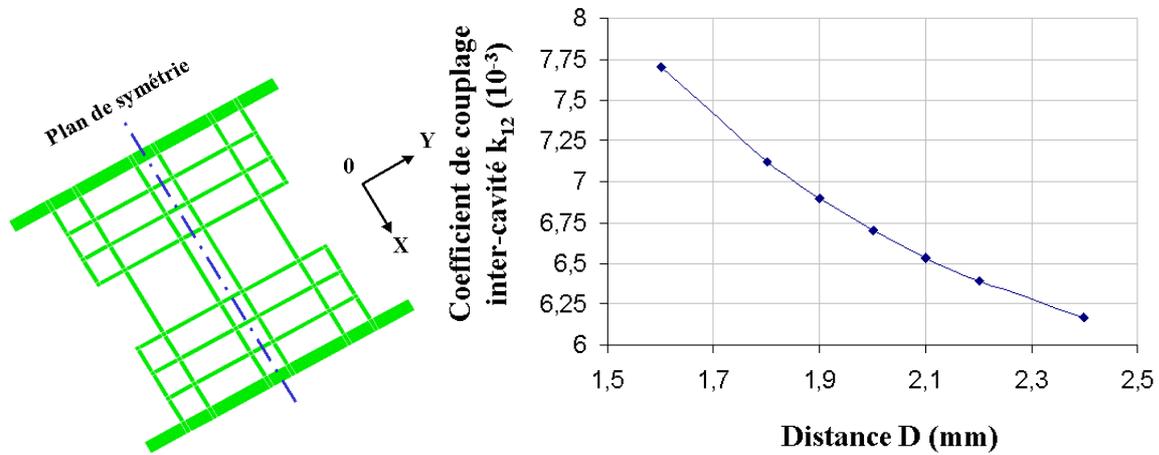


Figure III-24. Position du plan de symétrie sur le filtre deux pôles et évolution de k_{12} en fonction de la distance D .

La valeur de D nécessaire pour obtenir le gabarit du filtre fixé est voisine de 1.8 mm.

Nous procédons alors à l'analyse EM globale de la structure en oscillations forcées. Après ajustement de la valeur de D à 2 mm, nous obtenons le gabarit fixé. La réponse en fréquence du filtre deux pôles optimisé est présentée sur la Figure III-25.

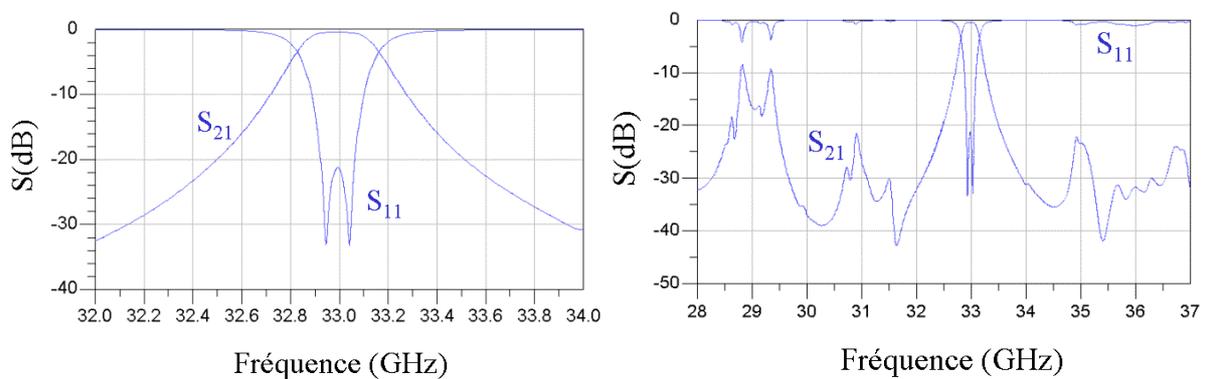


Figure III-25. Réponse en fréquence objective du filtre deux pôles autour de la fréquence de résonance (gauche) et sur une large bande (droite).

Les performances obtenues par simulations EM sont les suivantes :

- Fréquence de fonctionnement : 33 GHz
- Bande passante à -3 dB : 1.02 %
- Soit une bande équi-ondulation de 97 MHz
- Ondulation dans la bande : 0.02 dB
- Pertes d'insertions : 0.5 dB
- Adaptation dans la bande : -20 dB
- Réjection hors bande : 30 dB à ± 1 GHz de la fréquence centrale

Nous rappelons que la céramique utilisée présente une permittivité de 31.2 et une tangente de perte de $1.8 \cdot 10^{-3}$ à 30 GHz. Les plaques de laiton placées au dessus et au dessous de la pièce céramique présentent une conductivité de $2.56 \cdot 10^7$ S/m.

La réponse obtenue vérifie le gabarit de filtrage. Nous observons une bonne isolation fréquentielle d'au moins 3 GHz de part et d'autre de la fréquence de résonance. Il est également intéressant de noter que des modes de résonances, parasites similaires à ceux observés dans la partie II.3.b, sont présents autour de 29 GHz.

III.3. Mesure du filtre deux pôles.

III.3.a. Fabrication de la pièce céramique.

La partie centrale en zircone du filtre deux pôles a été réalisée par stéréolithographie 3D. La Figure III-26 montre une photo de celle-ci.

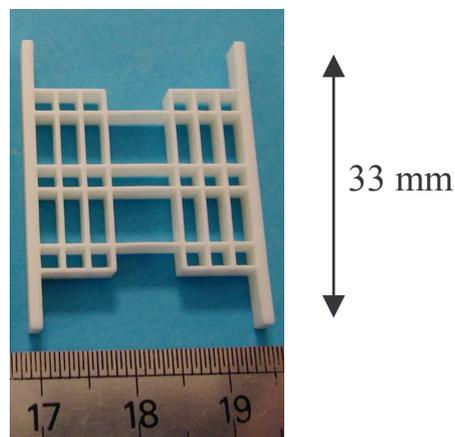


Figure III-26. Filtre deux pôles en céramique.

Le Tableau VI résume les dimensions relevées sur la pièce fabriquée afin de les comparer aux dimensions demandées.

	Fabrication (mm)	Théorie (mm)	Erreur (% / μm)
Largeur de la cavité	5.87	5.82	0.9 / 50
Longueur de la cavité	7.1	7.11	0.15 / 10
Hauteur de la pièce	3.4	3.55	4.2 / 150
Epaisseur moyenne des plaques	0.49	0.448	9.4 / 42
Espacement entre les plaques	2.4	2.5	4 / 100

Tableau VI. Comparaison entre les dimensions obtenues sur le filtre deux pôles fabriqué et théorique.

Nous pouvons observer une bonne concordance entre les dimensions relevées sur la pièce réalisée et les dimensions attendues. Une tolérance de fabrication entre 0.15 et 9.4% a ainsi été obtenue.

III.3.b. Mesure du filtre deux pôles.

La pièce céramique est insérée dans un support en laiton similaire à celui qui a été utilisé pour le résonateur précédent.

Ce support est de même connecté à un analyseur de réseaux vectoriel afin d'établir sa réponse en fréquence montrée sur la Figure III-27.

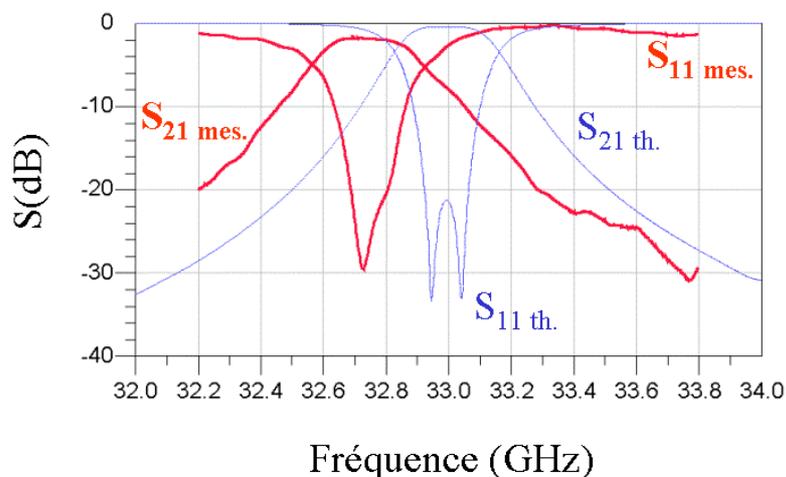


Figure III-27. Comparaison des courbes de réponse en fréquence théorique et mesurée.

Nous observons une légère variation au niveau de la fréquence centrale du filtre ; néanmoins, et comme récapitulé dans le Tableau VII, les caractéristiques de ce filtre sont très intéressantes avec notamment une bande passante étroite de 1% observée.

	Fréquence centrale (GHz)	Bande passante à -3dB (%)	Pertes d'insertions (dB)	Ondulation (dB)
Théorie	32.99	1.02	0.5	0.02
Mesure	32.74	1.05	1.8	0.2

Tableau VII. Comparaison entre les performances théoriques et mesurées du filtre deux pôles.

Le léger décalage fréquentielle (-0.75%) vers les basses fréquences provient principalement du fait que les cavités réalisées sont légèrement plus larges que celles attendues. La bande passante relevée est en très bon accord avec la valeur attendue. Les pertes d'insertions quant à elle sont plus élevées (+1.3 dB) et sont imputables à un contact non-optimum entre la pièce céramique et les plaques métalliques inférieure et supérieure. L'ondulation de 0.2 dB, certes plus élevée que prévue, reste cependant tout à fait acceptable pour la réalisation de filtres bande étroite dans cette gamme de fréquence. Pour terminer, l'adaptation dans la bande équiondulation est très bonne puisque restant inférieure à -20 dB et la réjection hors-bande est relevée proche de 30 dB à +/- 1 GHz de la fréquence centrale.

Aux vues de ces résultats, cette structure originale apparaît tout à fait adaptée pour la réalisation de filtres. Encouragé par ce premier prototype, nous avons alors décidé de complexifier la présente structure en synthétisant un filtre passe bande trois pôles.

IV. Filtre trois pôles original.

Le principe appliqué précédemment est repris et légèrement complexifié par l'adjonction d'une cavité couplée supplémentaire.

IV.1. Principe et gabarit du filtre trois pôles.

Ce filtre de type Tchebychev, permet d'obtenir une réjection hors bande plus élevée que pour un filtre deux pôles équivalent. La structure retenue est présentée sur la Figure III-28. Nous conservons une plaque de céramique en entrée/sortie pour ajuster le facteur Q_e .

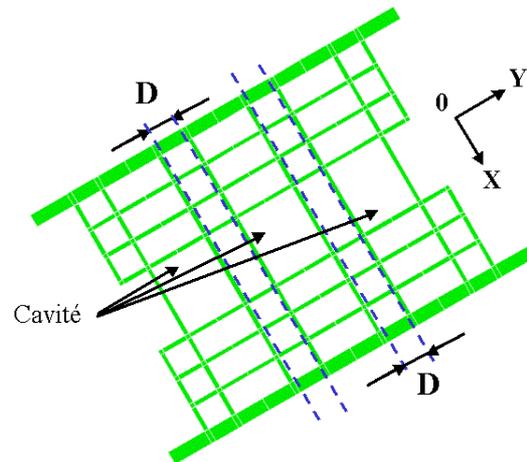


Figure III-28. Vue de dessus du filtre trois pôles.

Comme précédemment, ce sera la distance D séparant deux cavités adjacentes (voir Figure III-28) qui permet de régler le couplage nécessaire pour atteindre le gabarit choisi.

Les cavités utilisées ainsi que les différents miroirs de Bragg composant la structure possèdent exactement les mêmes caractéristiques que pour le filtre deux pôles.

Afin de comparer les performances d'un tel filtre par rapport au précédent ne comportant que deux pôles, un gabarit de filtrage équivalent est retenu, à savoir :

- Fréquence de fonctionnement : 33 GHz
- Bande passante à -3 dB : 1 %
- Ondulation dans la bande : 0.1 dB.

Après quelques simulations en oscillations forcées qui ont permis d'affiner la valeur de D requise pour l'obtention du gabarit souhaité, la réponse optimisée est présentée Figure III-29. Elle est obtenue pour une distance D de 2.85 mm.

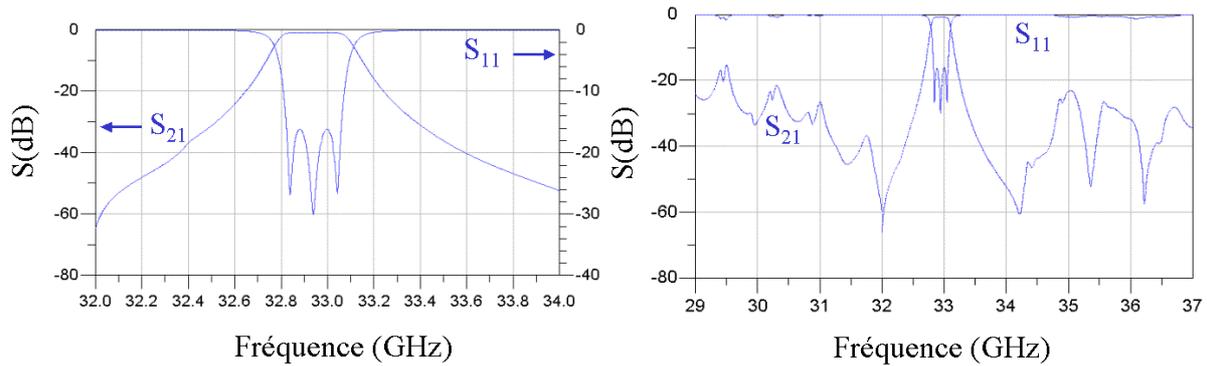


Figure III-29. Réponse en fréquence objective du filtre trois pôles autour de la fréquence centrale du filtre (gauche) et sur une large bande (droite).

Les performances théoriques sont les suivantes:

- Fréquence de fonctionnement : 32.94 GHz
- Bande passante à -3 dB : 0.95 %
- Soit une bande équi-ondulation de 204 MHz
- Ondulation dans la bande : 0.1 dB
- Pertes d'insertions : 1 dB
- Adaptation dans la bande : -16 dB
- Réjection hors bande : 60 dB à ± 1 GHz de la fréquence centrale

Les propriétés des matériaux diélectriques et métalliques considérés pour la simulation sont les mêmes que pour les précédentes simulations.

Les performances théoriques sont tout à fait en accord avec celles attendues avec une isolation fréquentielle acceptable supérieure à 3 GHz de part et d'autre de la fréquence centrale du filtre. Sa réalisation en zircone et sa mesure peuvent donc être lancées.

IV.2. Mesure du filtre deux pôles.

IV.2.a. Fabrication de la pièce céramique.

La partie centrale en zircone du filtre trois pôles a été réalisée par stéréolithographie 3D. La Figure III-30 montre une photo de celle-ci.

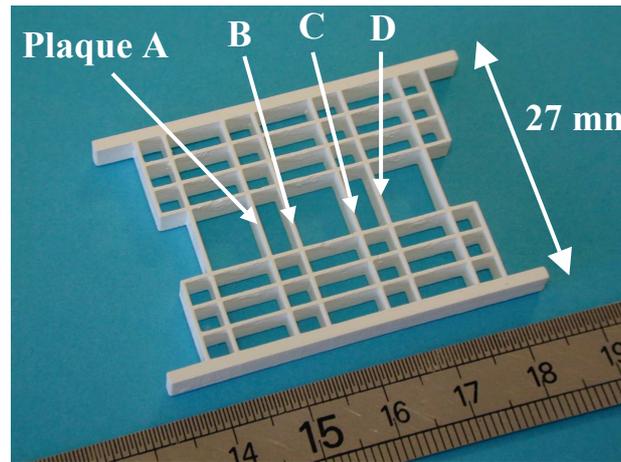


Figure III-30. Filtre trois pôles en zircone.

Le Tableau VIII résume les dimensions relevées sur la pièce fabriquée afin de les comparer aux dimensions demandées.

	Fabrication (mm)	Théorie (mm)	Erreur (% / μm)
Largeur de la cavité	5.86	5.82	0.7 / 40
Longueur de la cavité	7.1	7.11	0.15 / 10
Hauteur de la pièce	3.45	3.55	2.8 / 100
Epaisseur moyenne des plaques	0.41	0.448	8.5 / 38
Espacement entre les plaques	2.52	2.5	0.8 / 20

Tableau VIII. Comparaison entre les dimensions obtenues sur le filtre trois pôles fabriqué et celles attendues.

Une bonne concordance entre les dimensions requises et celles mesurées est obtenue avec ici une tolérance de fabrication comprise entre 0.15 et 8.5%. Néanmoins de légères déformations sont visibles sur les plaques de zircone référencées A, B, C et D sur la Figure III-30. Il est alors probable que ces déformations modifient les dimensions des cavités résonantes et le distance D les séparant. Nous nous attendons alors à une modification de la fréquence de résonance de chaque cavité résonante ainsi qu'à une modification du coefficient de couplage inter-cavité k_{12} .

IV.2.b. Mesure du filtre trois pôles.

La pièce céramique est placée dans un support en laiton similaire à ceux utilisés pour les précédentes mesures dans ce chapitre. La Figure III-31 présente la réponse en fréquence obtenue aux alentours de 33 GHz.

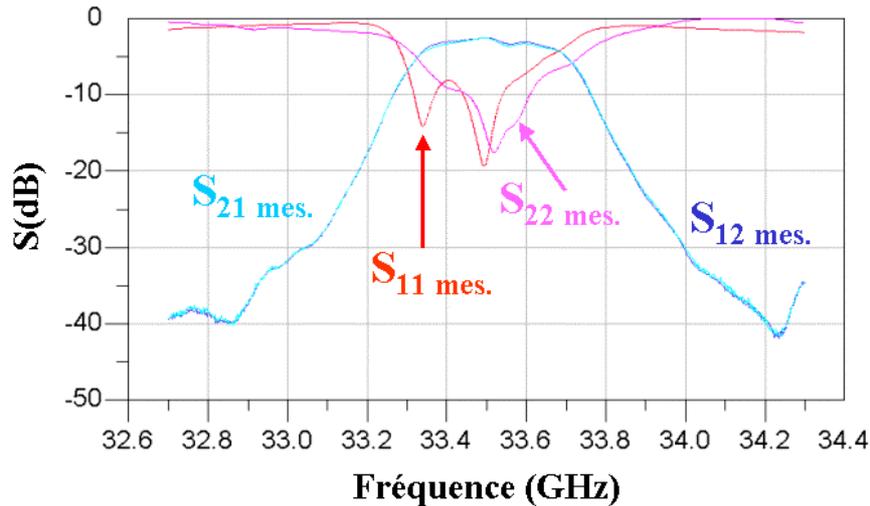


Figure III-31. Paramètres S mesurés du filtre trois pôles.

Les caractéristiques mesurées du filtre sont récapitulées dans le Tableau IX et comparée aux valeurs attendues.

	Fréquence centrale (GHz)	Bande passante à -3dB (%)	Pertes d'insertions (dB)	Ondulation (dB)
Théorie	32.94	0.95	1	0.1
Mesure	33.494	1.16	2.2	1

Tableau IX. Comparaison entre les performances théoriques et mesurées du filtre trois pôles.

Une déviation de +1.7% est observée sur la fréquence centrale de la réponse mesurée. Les pertes d'insertion, l'ondulation dans la bande et la bande passante sont plus importantes que les valeurs théoriquement attendues. Enfin l'adaptation dans la bande n'est que de -8 dB au lieu des -16 dB attendus.

Une rétro-simulation en oscillations forcées se basant sur les dimensions de la pièce réalisée a été faite afin de comprendre la dégradation des performances observées. Cette simulation ne permet toutefois pas de tenir compte de façon optimale des déformations présentées par la pièce. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure III-32.

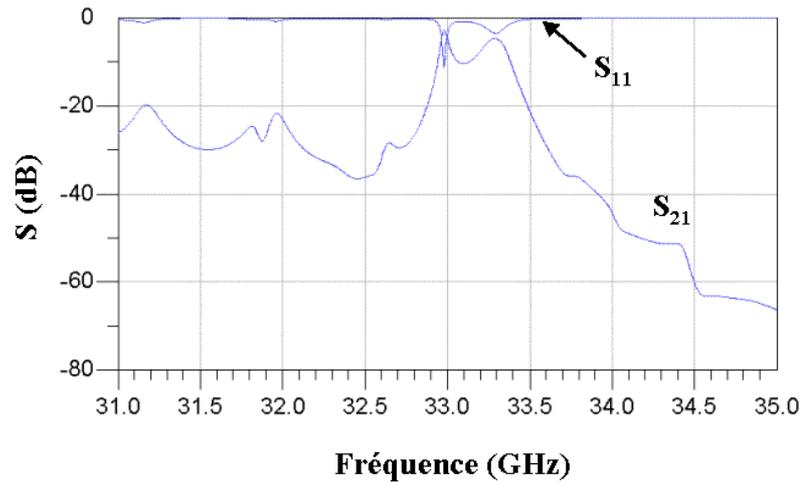


Figure III-32. Rétro-simulation du filtre trois pôles.

Le comportement obtenu par rétro-simulation ne correspond pas exactement à la réponse mesurée très certainement à cause des difficultés à reproduire fidèlement en simulation les variations géométriques de la pièce réelle. Néanmoins nous observons une importante modification des couplages entre les trois cavités et un décalage de la fréquence centrale du filtre de plus de 300 MHz vers les fréquences supérieures.

NB : Le filtre trois pôles est en fait la première structure réalisée par stéréolithographie 3D. En conséquence les problèmes de réalisation rencontrés lors de sa fabrication ont été en partie corrigés lors de la réalisation des autres pièces, ce qui justifie de leur meilleur concordance entre la théorie et l'expérimentation.

Afin d'obtenir un comportement satisfaisant de filtre, le recours à des vis de réglage est envisagé.

IV.2.c. Réglage du filtre trois pôles.

Nous avons alors positionné des vis métalliques au dessus de chaque cavité afin de pouvoir modifier leur fréquence de résonance propre en réglant la profondeur de pénétration de ces vis.

La Figure III-33 résume le principe de positionnement des vis au sein du dispositif.

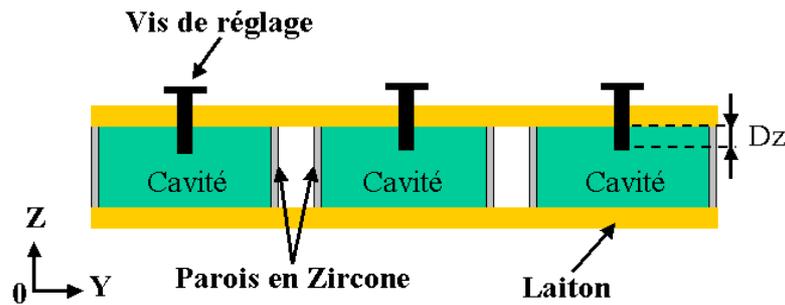


Figure III-33. Vue en coupe du filtre trois pôles inséré dans son support en laiton.

Des vis en laiton de 2 mm de diamètre sont insérées dans la plaque de laiton positionnée au-dessus de la pièce céramique. Ces vis sont placées juste au centre de la cavité là où le champ électrique du mode TM_{110} est maximum. Ainsi l'effet perturbant de ces vis est maximisé afin d'obtenir la dynamique de réglage en fréquence la plus importante possible. Des simulations en oscillations forcées sont réalisées afin de connaître l'évolution du décalage en fréquence en fonction de la profondeur de pénétration Dz (voir Figure III-33) d'une vis dans la cavité résonante.

Pour cela une cavité simple comme celle mesurée dans la partie I.5.a est utilisée. Les résultats de cette étude sont présentés dans la Figure III-34. Les valeurs positives de Dz correspondent à un enfoncement de la vis dans la cavité et les valeurs négatives au fait de retirer la vis de la cavité. Pour une valeur nulle, la tête de la vis est à fleur de la paroi métallique supérieure de la cavité.

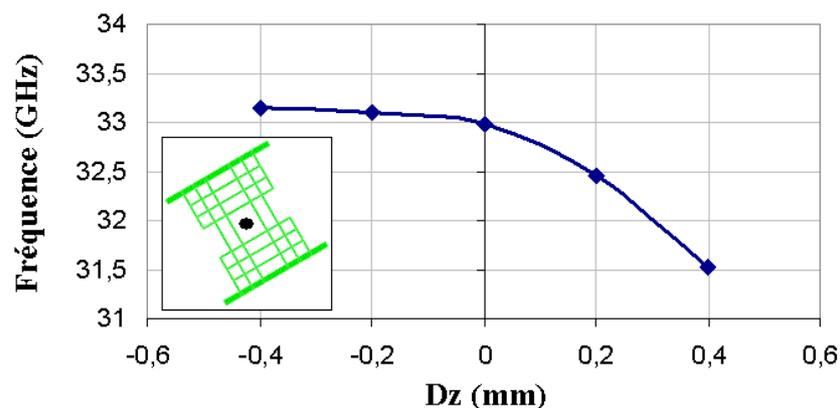


Figure III-34. Evolution de la fréquence de résonance d'une cavité en fonction de l'enfoncement Dz d'une vis dans celle-ci. L'insert montre la cavité considérée et le placement de la vis de réglage.

Il apparaît qu'une dynamique d'environ 600 MHz peut être obtenue pour un enfoncement de +/- 0.4 mm. Nous observons aussi clairement qu'il y a une plus grande sensibilité lorsque l'on enfonce la vis. Par conséquent il sera plus aisé de diminuer la fréquence de résonance plutôt que de l'augmenter.

Typiquement l'effet remarqué ici a été observé et étudié précédemment et s'apparente à un phénomène de plot capacitif. Ces plots, généralement métalliques, sont insérés au milieu d'une cavité afin de faire fonctionner celle-ci à plus basse fréquence que ce que ses dimensions laisseraient supposer, amenant ainsi un gain de place substantiel [9].

Aux vues de ces résultats, ces dispositifs de réglage en fréquence s'avèrent tout à fait satisfaisant afin de re-positionner en fréquence le filtre.

Ces vis sont alors réparties au dessus de chaque cavité. La Figure III-35 présentent alors les réponses obtenues pour des insertions modérées de ces vis de réglages de quelques dizaines de micromètres.

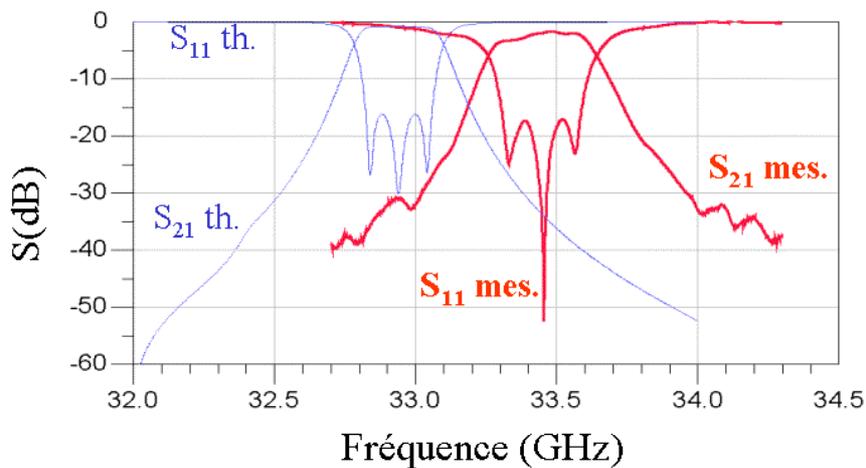


Figure III-35. Comparaison des courbes de réponse en fréquence théorique et mesurée pour le filtre trois pôles pour un faible réglage.

Une insertion faible des vis de réglages (quelques dizaines de micromètres) permet de réajuster l'adaptation dans la bande. Les caractéristiques de la réponse en fréquence obtenue sont résumées dans le Tableau X.

	Fréquence	Bande passante à	Pertes	Ondulation (dB)
Théorie	32.94	0.95	1	0.1
Mesure	33.45	1.05	1.7	1

Tableau X. Comparaison entre les performances théoriques et mesurées du filtre trois pôles réglé.

Comparés aux résultats du filtre expérimentale non-réglé, nous avons diminué les pertes d'insertions (-0.5 dB) et réajuster la bande passante à -3 dB aux alentours de l'objectif de 1%. Ce premier réglage permet de mettre en évidence que l'ajout de ces vis et leur utilisation modérée permet de réajuster les performances d'un tel filtre.

Néanmoins la fréquence centrale de fonctionnement du filtre expérimentale obtenu reste encore trop élevée et une insertion plus importante d'au moins 100 μm des vis de réglage dans les cavités est nécessaire afin de recentrer ce filtre sur l'objectif de 33 GHz.

La Figure III-36 montre les résultats obtenus pour plusieurs centaines de micromètres d'insertion de ces vis.

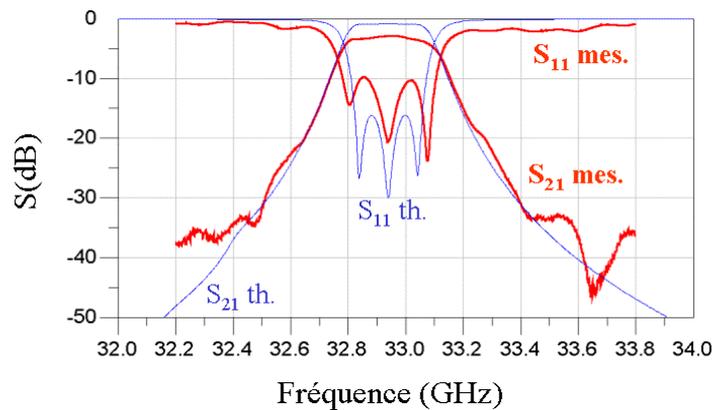


Figure III-36. Comparaison des courbes de réponse en fréquence théorique et mesurée pour le filtre trois pôles recentré sur la fréquence centrale théorique.

A l'aide des trois vis de réglages, le filtre a pu être repositionné autour de la fréquence objective théorique de 32.94 GHz. Le Tableau XI résume les principales caractéristiques du filtre expérimental obtenu et les compare aux valeurs théoriquement attendues.

	Fréquence	Bande passante à	Pertes	Ondulation (dB)
Théorie	32.94	0.95	1	0.1
Mesure	32.94	1.03	3	0.5

Tableau XI. Comparaison entre les performances théoriques et mesurées du filtre trois pôles réglé.

Chapitre III. Filtres passe bande étroite originaux à base de cristaux à bande interdite électromagnétique.

Nous avons alors obtenus un filtre fonctionnant autour de la fréquence attendue de 32.94 GHz et présentant une bande passante à -3 dB de 1%. L'ondulation dans la bande est de 0.5 dB pour une adaptation dans celle-ci de -10 dB. La réjection hors bande relevée est proche de 35 dB à ± 500 MHz de la fréquence centrale du filtre.

Il est intéressant de noter que l'insertion plus importante des vis de réglage au sein des cavités a entraîné une augmentation importante des pertes d'insertions, probablement par une baisse du facteur de qualité à vide de la cavité élémentaire. Cette baisse est mise sur le compte des pertes métalliques supplémentaires ramenées la vis en laiton. Le fait que nous synthétisons un filtre à bande passante très étroite le rend très sensible aux facteurs de qualité à vide.

Ainsi plusieurs points sont à retenir sur le réglage de ce filtre trois pôles. Tout d'abord l'ajout de vis de réglages permet de compenser sans difficulté les imprécisions de fabrication. Ces outils de réglages permettent de retrouver les propriétés attendues et de régler la fréquence de fonctionnement de tels filtres d'une manière précise et analogique.

En conclusion, voici une liste exhaustive des avantages du filtre présenté :

- Facteur de qualité à vide des cavités résonantes élevé
- Filtrage sur une faible bande passante utilisant plusieurs pôles possible
- Simplicité de conception et d'optimisation
- Recours à des vis de réglage possible
- Limitation de l'utilisation de métal pour les cavités
- Poids de la pièce céramique réduit
- Peu de pièces différentes ne nécessitant pas un assemblage complexe
- Compatibilité de connexion avec les guides standards
- Importante résistance à la rupture (600 Mpa, 1.5 fois supérieur à l'alumine).
- Faible coefficient de dilatation thermique de la pièce céramique (9.8 ppm/°K, similaire à l'alumine).
- Grande résistance aux chocs thermiques ($300 \Delta T^{\circ}C$, deux fois supérieur à l'alumine).

Concernant les trois derniers points, les informations sur la zircone stabilisée à l'Yttrium ont été fournies par le CTTC et sont disponibles sur leur site [10].

Néanmoins, deux points restent problématiques :

- Le premier concerne l'utilisation des murs de Bragg en lieu et place des parois métalliques séparant les cavités. Leur utilisation se fait au prix d'un encombrement plus élevé que ne le serait l'association de cavité parallélépipédiques métalliques classiques. Par exemple, le résonateur présenté dans le paragraphe II.5 occupe un volume 12 fois supérieur à celui occupé par la cavité au centre du résonateur qui présenterait la même fréquence de résonance si elle était entourée de métal.

- Le deuxième point concerne les facteurs de qualités à vide obtenus pour une cavité BIE simple. Ils sont certes élevés mais restent en retrait par rapport à ce qu'une cavité métallique peut présenter. A titre de comparaison, une cavité métallique en laiton possédant les dimensions de celle au centre du résonateur un pôle (7.11 mm x 5.82 mm x 3.55 mm) donne un facteur de qualité théorique de 3000 là où la valeur mesurée de notre structure n'est que de 2400.

NB : Sous certaines conditions où le nombre de plaques dans les miroirs de Bragg est important, les valeurs théoriques pouvaient aller jusqu'à 3250 pour la structure proposée (voir Tableau dans la partie II.3.a).

Toutefois, une considération très importante doit être portée sur la répartition des pertes au sein de la structure présentée dans ce chapitre. Une cavité métallique classique doit ses performances uniquement à sa taille et surtout à la qualité de la métallisation de ses parois. Le résonateur présenté ici tient ses performances à la fois du métal appliqué au dessus et au dessous de la pièce céramique, mais aussi aux pertes présentées par la céramique utilisée. Nos calculs ont montrés que la répartition des pertes au sein de prototype présenté est le suivant :

- 40% des pertes proviennent du métal
- 60% des pertes viennent du matériau diélectrique utilisé

Ce résultat est extrêmement important puisqu'il montre que si l'on peut utiliser un diélectrique très faibles pertes, il est possible de pouvoir dépasser les performances d'une cavité classique métallique.

C'est sur ce postulat que le paragraphe suivant va tenter d'amener des éléments de réponses et d'ouverture.

V. Utilisation de céramiques hautes performances.

Considérons dans un premier temps le résonateur un pôle présenté dans le paragraphe II-5. Ses dimensions ainsi que la permittivité de la céramique utilisée (31.2) seront considérés comme identiques. La fréquence de travail de cette structure reste fixée à 33 GHz.

Afin de rendre l'étude pertinente du point de vue de l'optimisation du facteur de qualité à vide Q_0 , le métal choisi pour les plaques supérieures et inférieures sera l'argent, métal présentant l'une des meilleures conductivités à température ambiante ($\sigma = 6.17 \cdot 10^7$ S/m).

V.1. Etude préliminaire.

Nous avons réalisé une étude par simulation EM en oscillations libres de cette structure afin d'établir l'évolution de son facteur de qualité à vide en fonction de la valeur de la tangente de pertes de la céramique utilisée.

La Figure III-37 présente les résultats de cette étude.

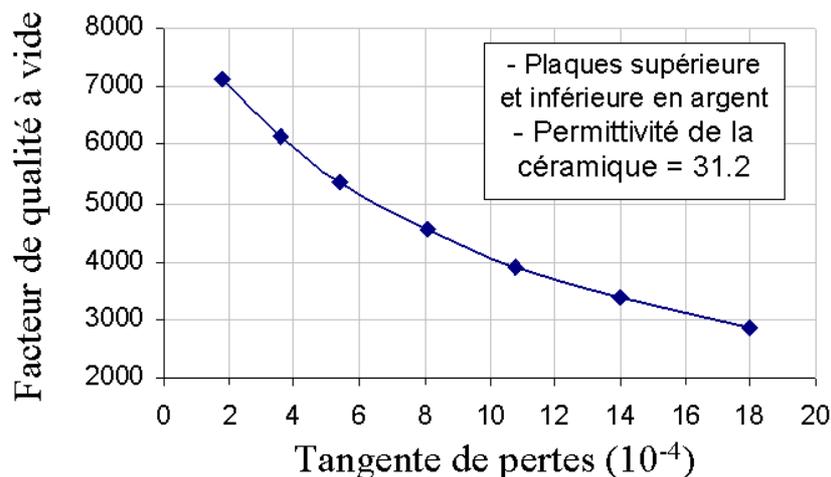


Figure III-37. Evolution du facteur de qualité du résonateur en fonction de la tangente de pertes de la céramique utilisée.

Nous pouvons alors observer une nette augmentation du facteur de qualité à vide Q_0 de la cavité pour des valeurs de tangente de pertes faibles.

Ainsi pour une tangente de pertes de l'ordre de $2 \cdot 10^{-4}$, un Q_0 supérieur à 7000 peut potentiellement être atteint. A titre de comparaison, pour une cavité parallélépipédique possédant une taille équivalente à celle située au sein de la structure résonnante et blindée à l'argent, le facteur de qualité n'est que de 4500.

Ainsi, pour une céramique faible pertes et certes au prix d'un encombrement plus important que pour une cavité simple, des facteurs de qualités à vide supérieurs à ceux classiquement atteignables peuvent être obtenus.

Suite à cette première piste, une recherche a ensuite été menée afin de savoir quelle céramique présente aux fréquences considérées à la fois une permittivité élevée (~ 30) et une tangente de pertes faible ($\sim 2 \cdot 10^{-4}$).

V.2. Céramiques à haute permittivité et faibles pertes.

Des matériaux diélectriques comme le saphir ou le quartz sont connus pour présenter de très faibles pertes diélectriques aux fréquences microondes, typiquement $2 \cdot 10^{-5}$ à 15 GHz, comme le montre les caractérisations par la méthode Galerkin–Rayleigh–Ritz réalisées dans [11]. J.M. Le Floch a ainsi pu obtenir lors de ses travaux de thèse [12], grâce à des cavités résonantes cylindriques utilisant des miroirs de Bragg, des facteurs de qualité à vide supérieurs à 200 000 à 10 GHz. Pour cela il a optimisé les dimensions et la géométrie de ces miroirs fabriqués en saphir grâce à un logiciel de simulation EM semi-analytique basée sur la méthode des lignes.

Cependant la nature mono-cristalline de tels diélectrique les rend incompatibles avec la stéréolithographie qui par son principe produit des diélectriques poly-cristallins.

Naturellement la piste à suivre pour de telles investigations mène aux céramiques utilisées pour la réalisation de résonateurs diélectriques. Celles-ci en effet présentent les deux critères requis :

- Forte permittivité afin d'obtenir des résonateurs les plus compacts possibles
- Faibles pertes diélectriques afin d'obtenir des facteurs de qualités à vide les plus élevés possibles

Parmi les nombreux matériaux céramiques existants, seuls quelques uns présentent les caractéristiques correspondantes à nos attentes. Les plus connues et utilisées pour la

Chapitre III. Filtres passe bande étroite originaux à base de cristaux à bande interdite électromagnétique.

réalisation de tels résonateurs sont les céramiques BMT ($\text{Ba}_3\text{MgTa}_2\text{O}_9$), BZT ($\text{Ba}_3\text{ZnTa}_2\text{O}_9$) et BZNT ($\text{Ba}_3\text{ZnTa}_2\text{O}_9$).

La publication [11] donne les caractéristiques de résonateurs commerciaux cylindriques classiques fabriquées dans ces trois matériaux. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau XII.

Céramique	Permittivité	Tan δ	Tan δ à 33 GHz
BMT	24.5	f(GHz) / 400 000	$8.25 \cdot 10^{-5}$
BZT	30.2	f(GHz) / 174 000	$1.9 \cdot 10^{-4}$
BZNT	34	f(GHz) / 133 000	$2.5 \cdot 10^{-4}$

Tableau XII. Caractéristiques de résonateurs céramiques commerciaux.

Les tangentes de pertes extraites des mesures de ces résonateurs sont données en fonction de leur fréquence de fonctionnement. La permittivité relative est quant à elle sensiblement constante de 5 à 30 GHz. Les deux céramiques les plus intéressantes semblent être le BMT et le BZT respectivement pour la très bonne tangente de pertes du BMT et pour le bon compromis permittivité élevée / tangente de pertes du BZT.

Des poudres céramiques nous ont été fournies par la société Temex Céramics [13] qui présente dans son catalogue des résonateurs réalisés dans ces deux matériaux. Le Tableau XIII résume les caractéristiques de leur produit.

Nom	Type de céramique	Permittivité	Q x f (GHz)	τf (ppm / °C)
E4000	Oxyde de Ba Zn Ta	29.5 – 32	15000 @ 10 GHz	0 à 10
E7000	Oxyde de Ba Mg Ta	24	250 000 @ 10 GHz	0 à 6

Tableau XIII. Caractéristiques des résonateurs céramiques de la série E4000 et E7000 de Temex Ceramics.

Le facteur τf est le coefficient qui donne l'évolution de la fréquence de résonance d'un résonateur en fonction de la température à laquelle il fonctionne : en anglais c'est le

Temperature Coefficient of Frequency (TCF). Ce paramètre est aussi important que la permittivité ou la tangente de perte pour un résonateur et est défini par la formule :

$$TCF = \frac{1}{f_0} \left(\frac{df_0}{dT} \right)$$

Son unité est le ppm / °C, ppm pour « parts per million » ou encore 10^{-6} GHz, si la fréquence de travail du résonateur considéré est le GHz par exemple, par degré Celsius.

La valeur idéale de TCF tend vers 0. Cela indique que la céramique ne subit pas de déformation en fonction de la température et donc qu'elle conserve sa fréquence de fonctionnement quelque soit la température d'utilisation.

Nous avons alors procédé à des tests de compatibilité de la céramique BZT fournie par Temex Ceramics avec la technologie de stéréolithographie céramique 3D du CTTC de Limoges.

V.3. Stéréolithographie et BZT.

IV.3.a Caractéristiques physiques.

Afin de valider le procédé de stéréolithographie avec la poudre BZT nous avons cherché à réaliser des résonateurs identiques à ceux conçus par Temex Ceramics par pressage. Pour cela, nous avons utilisé les mêmes lots de poudre et cycles de cuissons utilisés par Temex Ceramics, la seule différence venant de le technique de mise en forme qui est du prototypage rapide. L'objectif est ici de s'assurer que le procédé de stéréolithographie céramique ne détériore pas les caractéristiques des poudres.

Le résonateur de référence fabriqué et cuit par Temex présente les propriétés suivantes :

- Permittivité = 30.3
- Tangente de pertes à 6.5 GHz = $4.6 \cdot 10^{-5}$
- $Q_f(\text{GHz}) = 113\ 000$ ($Q_0 = 17700$ à 6.5 GHz)

Différents pièces ont été fabriquées par stéréolithographie en suivant le protocole de cuisson de Temex Ceramics et en jouant légèrement sur la température de cuisson maximale. Ce protocole est composé d'une montée en température régulière, d'un premier palier de

Chapitre III. Filtres passe bande étroite originaux à base de cristaux à bande interdite électromagnétique.

cuisson afin d'éliminer les éléments organiques, puis d'un dernier pallier avec une montée plus rapide afin d'atteindre la température maximale de cuisson qui permet la densification finale de la céramique et qui est très importante. La Figure III-38 montre les pièces ainsi obtenues respectivement de gauche à droite pour des températures maximales de 1400, 1450, 1500 et 1550 °C, le résonateur de référence étant situé à droite.

Comme nous le verrons au cours de cette étude, la température de ce dernier pallier modifie d'une manière non négligeable les propriétés physiques de cette céramique.

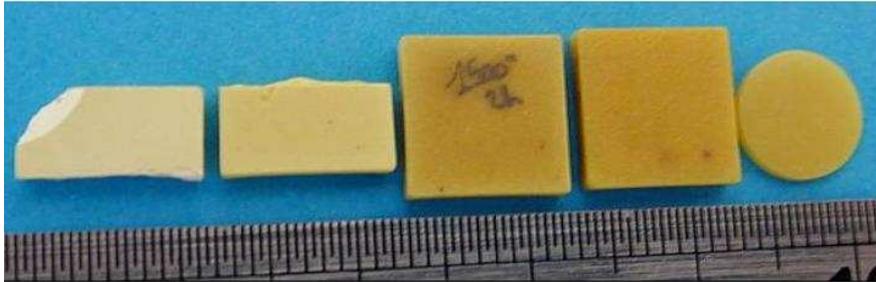


Figure III-38. Pièces en BZT fabriquées par stéréolithographie. La pièce de droite est le résonateur diélectrique de référence.

La première étape consiste à observer les caractéristiques physiques du résonateur de référence (porosité, taille des grains, ...) et à essayer de les reproduire. Pour cela le résonateur de référence ainsi que les pièces cuites à différentes températures ont été découpées puis attentivement étudiées par Cyrille Delage et son équipe au CTTC. Les photos de ces observations sont visibles sur la Figure III-39.

Des observations supplémentaires sont disponibles dans l'Annexe II.

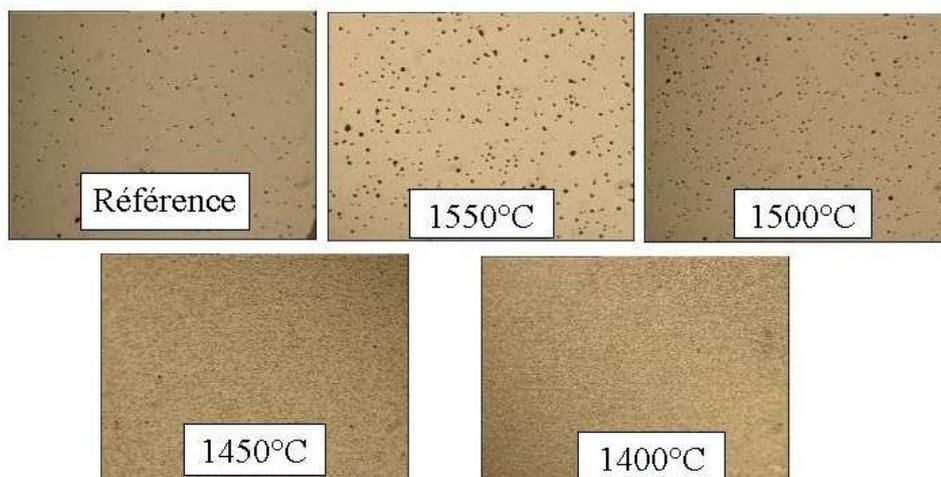


Figure III-39. Observation au microscope optique des pièces en BZT comparées à la référence.

Les conclusions de ces observations sont les suivantes :

Le résonateur de référence et les échantillons cuits à 1550 et 1500°C possèdent une porosité assez importante : une porosité de l'ordre de 10 μm répartie de façon homogène pour ces trois structures. Il faut noter que le résonateur de référence présente des pores plus importante (150 μm) issus probablement du procédé de mise en forme utilisé (pressage).

La structure qui se rapproche le plus de la référence apparaît être la pièce cuite à 1500°C. Les pièces cuites à 1450 et 1400 °C présentent très peu de pores de 10 μm , mais possèdent une fine porosité interparticulaire due aux faibles taux de densification (températures pas suffisantes pour éliminer la porosité issue de la mise en forme).

Comme nous pouvons l'observer dans l'Annexe II, ces deux échantillons à 1450 et 1400 °C présentent des cristaux sur les surfaces non en contact avec le support réfractaire utilisé pour supporter les pièces lors de la cuisson, et ce, sur une épaisseur de 100 à 200 μm . Ces cristaux (probablement issus de la migration par fusion d'un (ou des) constituant(s) de la poudre) ne sont pas visibles à l'intérieur des pièces cuites à 1500 et 1550°C. Mais leur présence est plus importante en surface des échantillons correspondants. L'épaisseur d'environ 100-200 μm où est visible la formation de ces cristaux pour 1400 et 1450 °C, correspond à une épaisseur où la porosité est de taille plus importante dans le cas des pièces cuites à 1500 et 1550°C, confirmant que la porosité observée de taille moyenne de 10 μm est due à la migration d'un composé au cours des cuissons.

Habituellement éliminée par la rectification que subissent les résonateurs au cours du processus de fabrication au sein de Temex Ceramics, cette couche ne pourra ici pas être facilement chassée par polissage si l'on réalise des structures 3D complexes.

Des observations plus poussées au MEB ont de même été réalisées afin de vérifier les propriétés microscopiques. Des photos issues de ces observations sont visibles sur la Figure III-40.

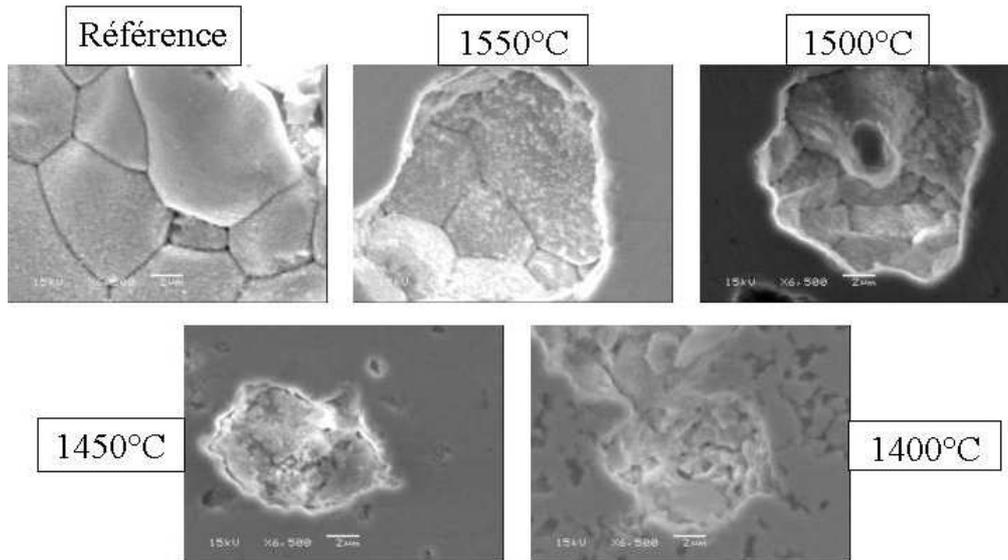


Figure III-40. Observation au microscope électronique à balayage des pièces en BZT comparée à la référence.

Ces analyses au microscope électronique amènent les conclusions suivantes qui confirment les premières observations :

La taille des grains est variable (jusqu'à 20 μm) et la structure obtenue à 1500°C est effectivement similaire à la référence.

Pour les pièces cuites à 1400 et 1450°C, une fine porosité interparticulaire (2-3 μm) note une sous-densification du matériau.

Pour 1400°C, des cristaux sont visibles sur une faible épaisseur (150 μm) alors que pour 1450°C, des cristaux plus gros sont visibles sur une faible épaisseur (150 μm), accompagnés par une formation de porosité

Ces observations confirment qu'un composé fond au cours des cuissons et migre vers la surface pour créer une cristallisation en surface des pièces tout en formant une porosité interne. Ce phénomène est limité pour une température de 1400°C.

En résumé, les pièces cuites à 1500 °C présentent des caractéristiques macro et microscopiques similaires aux résonateurs fabriqués par Temex. Ceramics. La présence d'une phase cristalline amène une interrogation sur son impact quant aux performances électriques de cette céramique.

A partir de ces observations, des résonateurs sont réalisés en se basant sur une température de cuisson de 1500 °C afin de vérifier qu'en plus d'une similarité des caractéristiques physiques, les caractéristiques diélectriques concordent.

IV.3.b Caractéristiques électriques.

Un résonateur cylindrique de 8 mm de diamètre et d'une hauteur 3.6 mm a été fabriqué par stéréolithographie. Une très bonne précision de fabrication a été obtenue avec un diamètre et une hauteur mesurée respectivement de 8 et 3.51 mm. Une photographie de celui-ci est visible sur la Figure III-41.

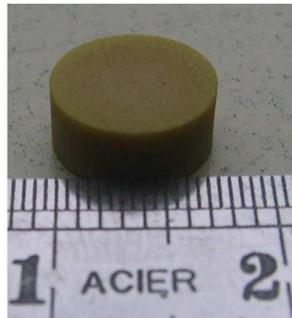


Figure III-41. Résonateur diélectrique réalisé en BZT par stéréolithographie.

Ce résonateur a été inséré sur un support en Rohacell© dans une cavité en cuivre cylindrique de 20 mm de hauteur et de diamètre et excité par deux boucles magnétiques comme indiqué sur la Figure III- 42. Le Rohacell© présente une permittivité de 1.01 et une tangente de perte de l'ordre de $1 \cdot 10^{-5}$. C'est la mesure des paramètres S qui nous permet de caractériser ce résonateur.

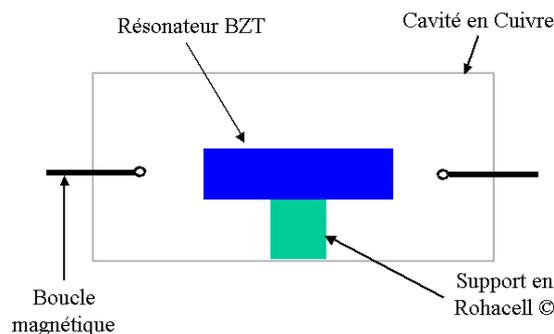


Figure III-42. Principe pour la caractérisation du résonateur en BZT.

Le résonateur ainsi que sa réponse en fréquence sont visibles sur la Figure III-43.

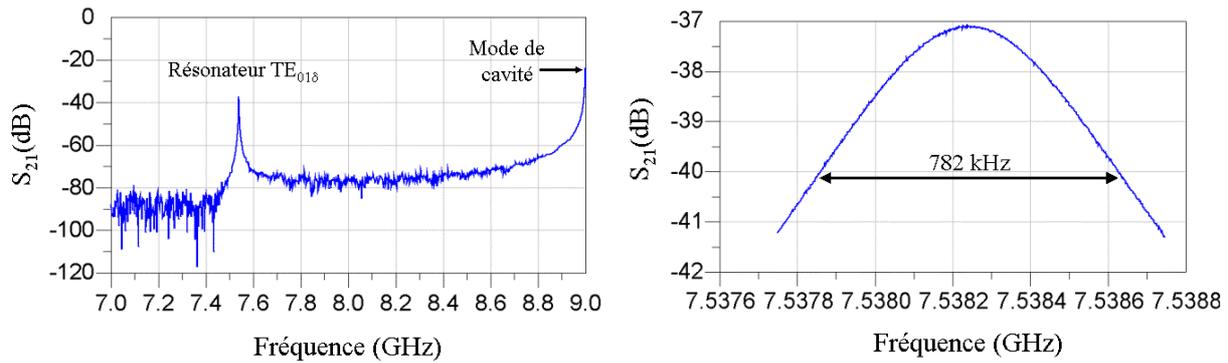


Figure III-43. Réponse en transmission du résonateur BZT inséré dans une cavité en Cuivre.

Le résonateur présente une fréquence de résonance sur le mode TE_{018} de 7.5383 GHz et une bande passante à -3dB de 782 kHz.

Les résultats de cette mesure nous donne les caractéristiques de la céramique BZT suivantes :

- Permittivité = 25.5
- Tangente de pertes à 7.538 GHz = $1 \cdot 10^{-4}$
- Qf (GHz) = 77 000 ($Q_0 = 10200$ à 7.538 GHz)

Ces valeurs sont en retrait par rapport à ce qui est obtenu pour le résonateur Temex Ceramics de référence et semblerait indiquer du point de vue de la permittivité une porosité supérieure à celle attendue.

Afin de voir l'influence de la phase cristalline présente à la surface du résonateur, une autre caractérisation est réalisée après son polissage. Nous observons alors une légère augmentation de la permittivité de 1.5% et une diminution de la tangente de pertes de 12.5%. Il apparaît alors que cette phase cristalline a une influence dommageable sur les propriétés diélectriques de cette céramique. Malheureusement la fabrication de structures complexes par prototypage rapide risque de rendre son élimination difficile voire impossible sur les pièces les plus complexes.

La compatibilité et l'optimisation de cette poudre céramique est actuellement en cours d'étude en collaboration avec le CTTC de Limoges et Temex Ceramics afin d'obtenir à la fois les meilleures tolérances de fabrication et les meilleures propriétés diélectriques que cette céramique peut offrir.

Cependant avec une valeur proche de $4 \cdot 10^{-4}$ à 30 GHz, la tangente de perte présentée par la céramique BZT est environ 22 fois plus faible que celle de la zircone ($1.3 \cdot 10^{-3}$ à 30 GHz). La céramique BZT présente de plus une permittivité à priori suffisamment élevée pour que la structure proposée dans le paragraphe II-5 fonctionne correctement. Sa fabrication avec cette céramique peut alors sérieusement être envisagée, ce que nous allons faire.

Nous nous proposons alors de réaliser la cavité résonante élémentaire à l'aide de la céramique BZT.

IV.3.c Fabrication de structures complexes BZT.

Afin de valider la fabrication de structures complexes par cette technologie et avec cette céramique, plusieurs objets ont été réalisés dont une reproduction de la cavité entourée par des murs de Bragg du paragraphe II-5.

La Figure III-44 montre des photographies de ces objets.

Différents formes ont été testées comme des plaques fines de quelques centaines de micromètres ou encore des empilements de tiges d'environ $700 \mu\text{m}$ d'épaisseur.

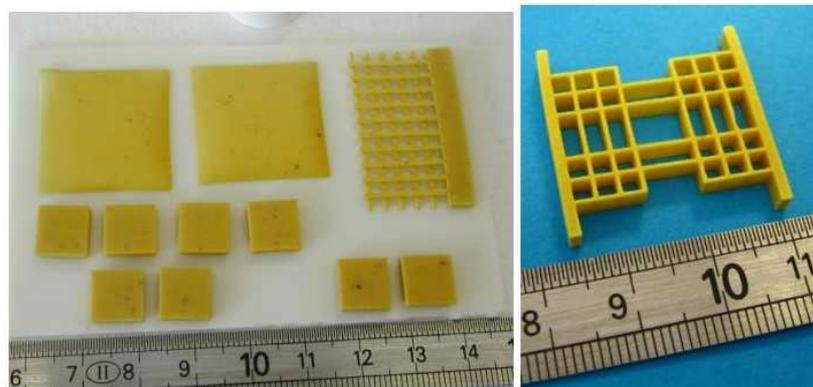


Figure III-44. (gauche) Divers objets réalisés en BZT par stéréolithographie. (droite) Cavité résonante. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Comme nous pouvons le voir, l'utilisation de cette céramique permet de réaliser par la stéréolithographie céramique 3D les formes les plus diverses. La difficulté actuelle consiste à maîtriser les précisions de fabrication.

La cavité résonante entourée de murs de Bragg a alors été insérée dans un support en laiton en vue de sa mesure. Seulement cette manipulation a mis en avant un défaut de fabrication au niveau de la céramique obtenue puisque la pièce n'a pas supporté l'insertion dans le guide et s'est cassée.

Chapitre III. Filtres passe bande étroite originaux à base de cristaux à bande interdite électromagnétique.

Des tests de flexion réalisés au CTTC ont été menés et les résultats obtenus, comparés à titre d'exemple par rapport à la zircone, sont récapitulés dans le Tableau XIV.

	ZrO ₂ -3Y	BZT
Résistance à la flexion (mPa)	1018	55
Standard deviation	80	7

Tableau XIV. Données sur la résistance à la flexion des céramiques zircone et BZT.

Il apparaît alors que la céramique BZT résultante du procédé de prototypage rapide se révèle très fragile, environ treize fois plus que la zircone. Des observations plus poussées laissent à penser que la porosité élevée de cette céramique serait en grande partie responsable de sa fragilité. Des pistes apparaissent alors pour supprimer ce problème en se basant sur les observations effectuées lors des différents cycles de cuisson, notamment en jouant sur la température de cuisson maximale.

Du point de vue diélectrique, l'objectif est de converger vers les performances présentées par le résonateur de référence de Temex Ceramics. Pour cela de nombreux tests sont encore à effectuer notamment en termes de cycles de cuisson et de préparation de la pâte céramique à base de BZT.

Ainsi, en se basant sur les performances présentées par le résonateur de Temex Ceramics, à savoir une permittivité de 30.3 et une tangente de perte tendant vers $2.75 \cdot 10^{-4}$ à 33 GHz, l'évolution du facteur de qualité à vide de la cavité résonante du paragraphe II-5 en fonction du nombre de périodes présentées par les miroirs de Bragg latéraux (plan y0z) est étudiée. Les mêmes dimensions pour la cavité et les miroirs de Bragg l'entourant sont conservées par rapport à celles choisies dans le paragraphe II-5. Le support métallique considéré est ici en laiton. Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau XV.

Nombre de périodes	Q ₀ pour une cavité en BZT	Q ₀ pour une cavité en zircone
2	2670	1800
3	4410	2770
4	4530	2850
5	4500	2800

Tableau XV. Evolution du facteur de qualité de la cavité résonante présentée au paragraphe II-5 en fonction du nombre de périodes dans les miroirs de Bragg latéraux.

Il apparaît que grâce aux performances prévisibles du BZT, il est possible de synthétiser une cavité résonante de facteur de qualité à vide voisin de 4500 (+59% par rapport à la structure équivalente en zircone) là où une cavité résonante métallique classique en laiton donnerait 3000.

Remarque : si l'on utilisait de l'argent à la place du laiton, le facteur de qualité à vide de la cavité résonante métallo-diélectrique serait de 6500. La cavité métallique classique en argent donnerait elle un facteur de qualité de 4500.

Les recherches à mener afin d'atteindre les propriétés diélectriques escomptées du BZT présentent une très grande importance puisque le dispositif associé à cette céramique permettrait d'atteindre des facteurs de qualité 50% supérieurs à celui des cavités classiques métalliques. Malgré un encombrement plus important, ces performances électriques peuvent s'avérer intéressantes pour des applications données.

VI. Conclusion et perspectives.

La structure résonante originale décrite dans ce chapitre présente certains atouts. Nous retiendrons par exemple la connectique standard, la simplicité de conception et d'assemblage du dispositif ainsi que sa bonne résistance mécanique qui destine en tout premier lieu cette structure à fonctionner dans des environnements des plus rigoureux.

La méthode de fabrication de la pièce centrale par stéréolithographie est aussi un point fort de cette structure qui assure au dispositif une bonne précision de fabrication et l'accession à des céramiques très variées. Nous pouvons citer la zircone qui offre une résistance vis à vis de contraintes mécaniques et/ou de température extrêmement élevée ou encore le BZT qui amène potentiellement des facteurs de qualités à vide dépassant largement ce qu'une cavité métallique classique peut donner. L'association de ces éléments résonnants réalisés par stéréolithographie céramique 3D a donné d'une manière très satisfaisante la preuve que des filtres bandes étroites pouvaient être envisagés tout en présentant des capacités de réglages en fréquence intéressantes.

L'une des perspectives amenées par cette première étude concerne dans un premier temps l'utilisation de céramiques faibles pertes. Les premières études réalisées avec le BZT ont montré des dispositions encourageantes quant à sa compatibilité avec le procédé de stéréolithographie céramique 3D. Notons également que d'autres matériaux céramiques

comme le BMT [11] présentent des pertes diélectriques qui peuvent être moins importantes que celles du BZT. La cavité BIE que nous proposons, conçue avec de telles céramiques, pourrait potentiellement amener des structures résonnantes à très fort facteur de qualité à vide concurrentielles des solutions actuelles à bases de cavités résonnantes métalliques.

La forme et le concept même de la structure proposée amène des solutions originales quant à la création de filtres passe-bande. Des études sont actuellement en cours pour la synthèse de filtres elliptiques, multi-bandes ou encore de multiplexeurs reprenant le concept présenté dans ce chapitre comme le suggère la Figure III-45. Ce dernier repose sur le concept de multiplexage par manifold utilisé classiquement avec des cavités résonnantes métalliques classiques.

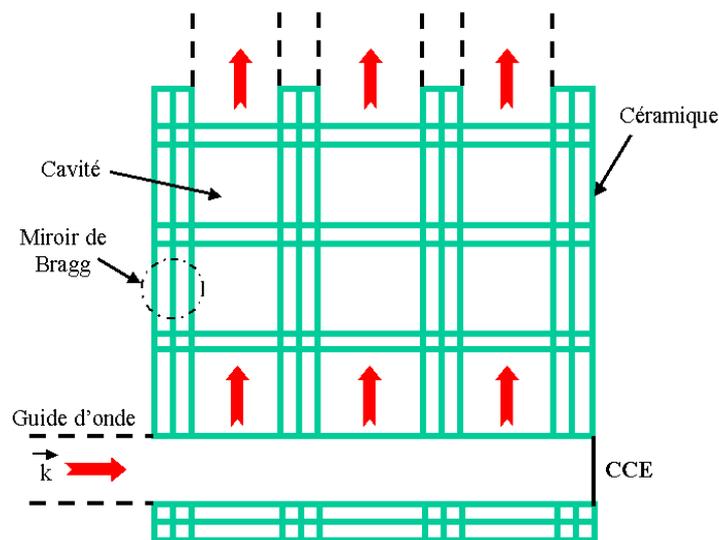


Figure III-45. Concept de multiplexeur reprenant la structure proposée dans ce chapitre (pièce céramique sandwichée entre deux plaques métalliques). La pièce céramique est vue du dessus.

Sur cet exemple de multiplexeur, le sur-encombrement d'une cavité seule est compensé par une intégration compacte des différents filtres favorisée par la géométrie particulière des cavités. Le réglage de l'ensemble peut également être plus aisé puisque sur une seule face.

Références :

- [1] P.Lenoir, S.Bila, F.Seyfert, D.Baillargeat, S.Verdeyme, "Synthesis and design of assymetrical dual-band bandpass filters based on equivalent network simplification," *IEEE Trans. on MTT*, vol. 54, no.7, pp. 3090- 3097, July 2006.
- [2] R.J. Cameron, M. Yu, and Y. Wang, "Direct-coupled microwave filters with single and dual stopbands," *IEEE Trans. Microw. Theory. Tech.*, vol. 53, no. 22, pp. 3288-3297, November 2005.
- [3] A. Nasser, V. Lunot, F. Seyfert, S. Bila, S. Verdeyme, "Synthèse et conception de filtres multi bandes," *Journée Nationales Micro-ondes*, Toulouse, Mai 2007.
- [4] <http://www.europe.alcatel.fr/space/>
- [5] W. J. Chappell, M. P. Little, and Linda P.B. Katehi, "High Q two dimensional defect resonators – Measured and simulated," *2000 IEEE MTT-S Int. Microwave Symp. Dig.*, vol. 3, pp. 1437-1440, June 2000.
- [6] J.-M. Lourtioz, *et al.* "Les cristaux photoniques," *Hermès*, Paris, 2003.
- [7] D. Thompson, O. Tantot, H. Jallageas, G.E. Ponchak, E. Tentzeris, J. Papapolymerou, "Characterization of Liquid Crystal Polymer (LCP) Material and Transmission Lines on LCP Substrates from 30 to 110 GHz," *IEEE Trans. On MTT*, vol. 52, no. 4, pp. 1343-1352, April 2004.
- [8] G. MATTHAEI, L. YOUNG, E.M.T. JONES "Microwave filters, impedance matching, networks and coupling structures," *Mac Grow Hill*, 1964.
- [9] Paul Ferrand, "Solutions de filtrage millimétrique et submillimétrique à structures périodiques en technologie innovantes", *thèse de doctorat*, Février 2005, Limoges.
- [10] <http://www.ceramic-center.com/>
- [11] J Krupka, Wei-Te Huang and Mean-Jue Tung,, " Complex permittivity measurements of low-loss microwave ceramics employing higher order quasi TE_{0np} modes excited in a cylindrical dielectric sample," *Meas. Sci. Technol.* , vol. 16, pp. 1014–1020, Mars 2005.
- [12] Jean-Michel Le Floch, "Modélisation de nouveaux résonateurs diélectriques à forts coefficients de qualité pour des applications de métrologie", *thèse de doctorat*, 2 Février 2007, Limoges.
- [13] www.temex-ceramics.com

Chapitre IV

Structures guidantes et résonantes basées sur des cristaux 3D

CHAPITRE 4. STRUCTURES GUIDANTES ET RESONANTES BASEES SUR DES CRISTAUX 3D.

I. Introduction.....	202
II. Propriétés du tas de bois.....	205
III. Guide d'onde.....	209
III.1. Propriétés géométriques.....	209
III.2. Conception du guide d'onde.....	212
III.3. Réalisation du guide BIE par gravure sèche RIE.....	225
III.4. Conclusion.....	225
IV. Guide d'onde BIE en céramique.....	226
IV.1. Configuration initiale du tas de bois en céramique.....	226
IV.2. Conception du guide d'onde BIE.....	229
IV.3. Fabrication par stéréolithographie céramique 3D.....	233
IV.4. Fabrication <i>monobloc</i> par stéréolithographie 3D.....	240
IV.5. Conclusion.....	242
V. Cavités à haut facteur de qualité dans un cristal 3D.....	243
V.1. Introduction.....	243
V.2. Cavité dans un tas de bois en zirconne.....	246
V.3. Cavité résonante dans un tas de bois en alumine.....	255
V.4. Conclusion et perspectives.....	266
VI. Conclusion.....	267

I. Introduction

Parmi les nombreuses structures à bande interdite complète 3D, la structure dite en opales inversées a été la source de nombreuses études expérimentales dans le domaine des longueurs d'ondes micrométriques. En effet, le recours à l'auto assemblage de billes de silice ou de polymères permet aisément de recréer le schéma de base de ce cristal sans passer par des étapes technologiques lourdes et répétitives [1, 2]. Des technologies poussées telles que le dépôt de couches d'atomes (Atomic Layer Deposition (ALD)) ont permis la réalisation de telles structures avec des matériaux variés comme l'oxyde de Zinc [3] (voir Figure IV-1), le di-oxyde de Titane [4] ou encore le nitrure de Tantale [5].

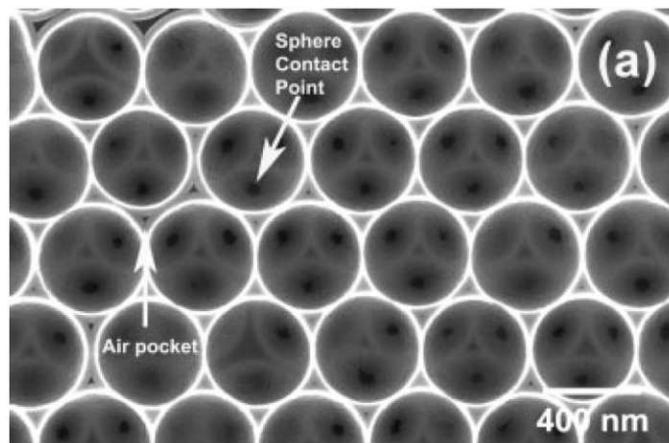


Figure IV-1. Photographie au MEB d'une structure en opale inversée en dioxyde de Titane issu de [3].

Cependant et malgré la haute technicité employée pour sa fabrication, une variation structurelle de moins de 2% sur la périodicité a un effet désastreux sur la bande interdite créée [6]. Malheureusement inévitable, c'est sur ce constat que l'équipe du Pr. Ho s'est tournée très récemment [7] vers un cristal 3D apparu en 1994 connu sous le nom de « layer-by-layer [8] ou « tas de bois » (woodpile) [9]. En effet, ce cristal, connu depuis très longtemps, montre, parmi d'autres particularités, une faible sensibilité de sa bande interdite totale vis-à-vis des irrégularités structurelles [10].

De plus sa forme très particulière consistant en un assemblage de tiges de diélectrique périodique montrée sur la Figure IV-2 permet sa fabrication par un grand nombre de techniques parmi lesquelles des technologies de fabrication classiques sur Silicium par

lithographie [11]. C'est d'ailleurs pour cela que ce cristal a et fait encore l'objet de nombreuses études expérimentales.

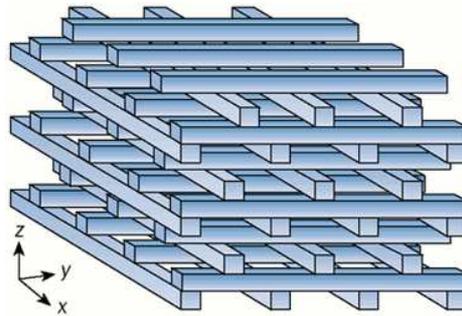


Figure IV-2. Cristal 3D dit en « tas de bois ».

La technique utilisée dans [11] consiste en un dépôt et une gravure selon un processus répétitif d'un grand nombre de film diélectriques. Pour chaque couche du tas de bois, du SiO_2 est tout d'abord déposé suivant un motif particulier et ensuite gravé à la profondeur voulue. Les tranchées résultantes sont ensuite remplies avec du silicium poly-cristallin et le tout est poli par un processus chimique. Après un bain dans une solution d'acide fluorique en milieu aqueux afin d'éliminer le SiO_2 , ces étapes sont successivement répétées pour obtenir un réseau périodique de tiges visibles sur la Figure IV-3.

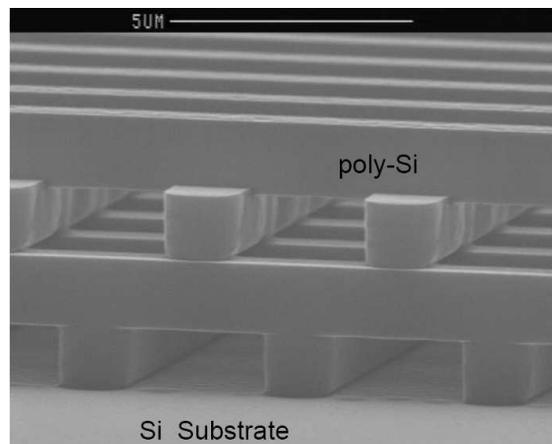


Figure IV-3. Photographie MEB issue de [11] montrant une période de tas de bois réalisée en Silicium.

Les tiges fabriquées possèdent une largeur de $1.2 \mu\text{m}$, une hauteur de $1.6 \mu\text{m}$, et sont séparées de $4.2 \mu\text{m}$. De telles dimensions produisent pour un taux de remplissage de 28% et un contraste d'indice de 3.6 une bande interdite de près de 20% autour de $11.25 \mu\text{m}$.

Nous pouvons aussi citer des techniques avancées de bonding de wafers [12] ou de micro-assemblage à l'aide de nano-robot [13] comme montré sur la Figure IV-4.

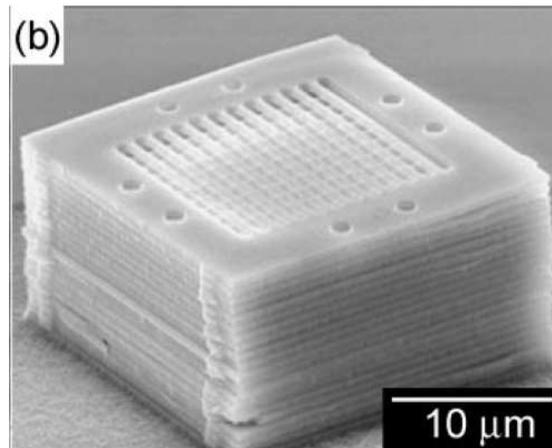


Figure IV-4. Photographie MEB issue de [13] un tas de bois réalisé par micro-manipulation.

D'autres techniques de fabrication existent et ont été décrites plus précisément dans la Chapitre 1 de ce manuscrit.

Parmi toutes les technologies précédemment citées, seules peu d'entre elles peuvent être transposées dans le domaine des ondes millimétriques.

Parmi les exemples trouvés dans la littérature concernant la fabrication de ce cristal pour des applications microondes, nous citerons l'assemblage manuel de tiges d'alumine [14], l'empilement de wafers de Silicium ou d'alumine micro-usinés [15], l'appel à la technique de gravure sèche DRIE (Deep Reactive Ion Etching) et à une automatisation de la découpe des éléments présents par wafers et de leur assemblage [16] et enfin le coulage de pâte d'alumine dans un moule en résine réalisé par stéréolithographie [17].

Néanmoins et respectivement, ces techniques présentent divers inconvénients :

- L'assemblage manuel présente une évidente limitation dans l'accession à des fréquences de fonctionnement supérieures à 12 GHz où la taille des tiges rend toutes manipulations des plus délicates.
- L'empilement de wafers nécessite un grand nombre de wafers unitaires pour construire un cristal entier. La qualité structurale de celui-ci et donc sa bande interdite dépend essentiellement de la rigueur d'empilement et peut être problématique.
- L'automatisation de la découpe et de l'empilement d'éléments issus de wafers présente une très bonne qualité d'assemblage mais est limitée par le fait que cette technique ne pourra pas produire de formes complexes isolées au sein

d'un cristal par exemple. Sorti d'un empilement d'éléments réguliers comme des périodes de tas de bois, des difficultés à produire des formes plus complexes peuvent apparaître.

- L'utilisation de moules polymères peut limiter les formes envisagées. En effet, de par la technique de moulage, seules des structures débouchantes présentant un passage pour le coulage de la pâte céramique peuvent être réalisées. Cela amène une contrainte supplémentaire qui peut interdire les formes 3D les plus complexes.

Devant ce constat et comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, la technique de fabrication par stéréolithographie céramique s'avère des plus pertinentes, notamment par son choix varié de céramiques utilisables et sa capacité à réaliser des formes 3D complexes dans le domaine de fréquence qui nous intéresse.

Il a alors été décidé de mener une étude sur les cristaux 3D tas de bois en vue d'utiliser leurs propriétés pour la réalisation de fonctions de guidage et de filtrage dans le domaine des microondes et de leur fabrication par la stéréolithographie 3D.

Un premier prototype va alors être étudié afin de valider à la fois la pertinence de l'utilisation d'un tel cristal dans le domaine microonde et aussi la choix de la technologie de fabrication pour des telles structures complexes.

La première étape de cette investigation va consister en une étude des propriétés de ce cristal en fonction du matériau choisi pour sa construction et en fonction de ses dimensions.

II. Propriétés du tas de bois.

L'étude théorique menée dans [18] sur des cristaux en tas de bois composés de tiges à section rectangulaire a montré plusieurs résultats intéressants. Pour assurer une meilleure compréhension des conclusions de cette étude, la Figure IV-5 présente une vue du tas de bois considéré.

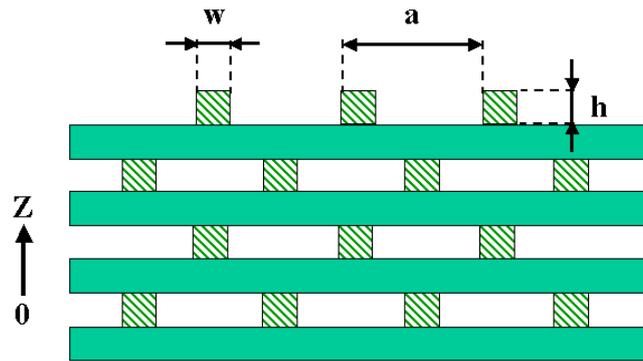


Figure IV-5. Vue de côté du tas de bois considéré pour son étude théorique.

Les trois variables permettant de définir la géométrie d'un cristal 3D dit de tas de bois seront prise comme suit :

- w : largeur des tiges.
- h : hauteur des tiges.
- a : période du tas de bois.

Afin de rendre la suite des explications plus claire, l'axe Oz sera retenu comme axe d'empilement des tiges. Suivant cet axe, une période d'empilement du tas de bois correspond à un assemblage de quatre tiges.

Les différentes configurations géométriques possibles pour cette structure sont réduites suivant une combinaison de deux paramètres particuliers qui sont :

- le rapport hauteur sur largeur des tiges w/h .
- le facteur de remplissage f .

Ce dernier paramètre représente le pourcentage de diélectrique présent dans le volume global occupé par le cristal.

Aux vues de la périodicité présenté par un cristal à bande interdite 3D, il est d'usage de ramener le calcul de ce paramètre sur une cellule élémentaire de ce cristal comme présenté sur la Figure IV-6.

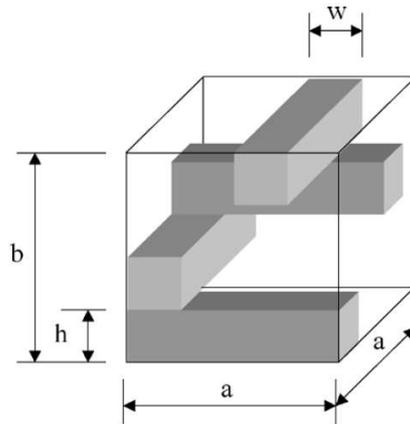


Figure IV-6. Cellule élémentaire d'un tas de bois.

Etant donné la simplicité de cette cellule, le facteur de remplissage est simplement :

$$f = w/a$$

Le choix des matériaux ainsi que le milieu ambiant dans lequel baigne le tas de bois peut lui aussi être résumé en un seul paramètre appelé le contraste d'indice η défini tel que :

$$\eta = \sqrt{\frac{\varepsilon_b}{\varepsilon_a}}$$

avec ε_b la permittivité des tiges et ε_a la permittivité du milieu ambiant.

Les performances d'un cristal à bande interdite électromagnétique peuvent s'exprimer par un paramètre qui permet de connaître la largeur de bande interdite omnidirectionnelle offerte par le cristal.

Ce paramètre que nous appellerons g est simplement le rapport entre la bande interdite totale offerte par le cristal à bande interdite électromagnétique (BIE) sur la fréquence centrale de cette bande. Exprimé en pourcentage, ce paramètre a été étudié dans [18] en fonction du taux de remplissage et du contraste d'indice présenté par le cristal, le milieu ambiant étant choisi comme étant de l'air. Pour cette étude, le rapport h/w des tiges du cristal a été fixé à 1. L'unité des abscisses est le taux de remplissage normalisé f/f_0 avec $f_0 = (1 + \eta)^{-1}$.

Les résultats obtenus sont présentés dans la Figure IV-7.

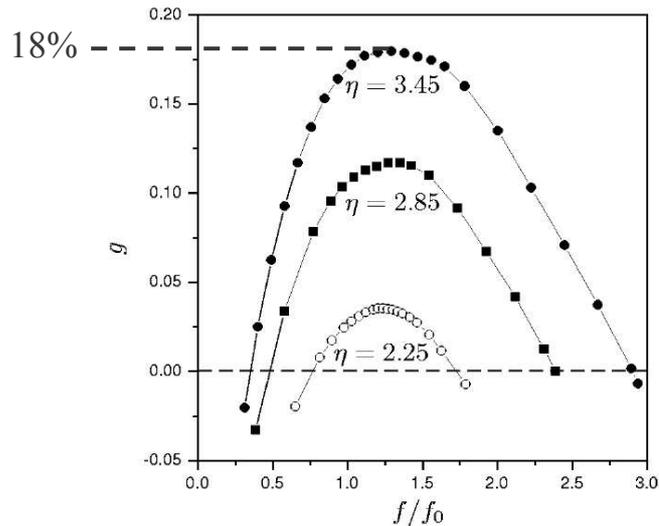


Figure IV-7. Evolution du rapport g largeur de bande interdite sur fréquence centrale de cette bande en fonction du taux de remplissage du cristal pour différents matériaux.

Le contraste d'indice de 3.45 correspond à un tas de bois réalisé en Silicium. Nous voyons que pour un taux de remplissage optimale de 29%, une telle structure ne peut donner des rapports g supérieur à environ 18%. Ce résultat important confirme les études initiales du Pr. Ho et de son équipe en 1994 [8].

Plusieurs résultats cruciaux sont à retenir de cette étude :

- il apparaît clairement que le rapport largeur de bande interdite sur fréquence centrale de cette bande est directement lié au contraste d'indice. L'obtention de fortes valeurs de g passera alors obligatoirement par un fort contraste d'indice.
- il existe un taux de remplissage optimal qui donnera une valeur maximale pour g .
- les résultats présentés ici ne sont valables que pour un rapport w/h particulier (ici égal à un). Le corollaire à cette remarque est que des rapports h/w différents peuvent amener des valeurs de g différentes pour un même taux de remplissage et contraste d'indice. Toutefois l'augmentation de η permettra, quelque soit ce rapport, d'augmenter le paramètre g .
- enfin un contraste minimal d'indice est requis afin d'ouvrir une bande interdite (environ 2).

A partir de ce comportement désormais bien connu et qui est commun à tous cristaux à bande interdite [19], de nombreuses applications furent trouvées pour ce cristal comme nous l'avons décrit au Chapitre 1. Parmi celles-ci, deux en particulier ont retenu notre attention.

La première étape de l'étude suivante va consister à choisir le matériau et les dimensions adéquates pour ce cristal afin de concevoir, dans un premier temps, des structures guidantes à large bande passante et dans un deuxième temps des cavités résonantes à fort facteur de qualité.

Les structures et les applications visées n'imposent pas les mêmes contraintes en termes de choix de matériau et de taille des tiges composant le cristal. Il conviendra donc d'adapter la conception en fonction du cahier des charges imposé dans chacun des cas.

III. Guide d'onde.

Comme nous allons le voir par la suite, deux grands critères sont fondamentaux pour la réalisation d'un guide d'onde au sein d'un cristal à bande interdite électromagnétique : sa géométrie et les matériaux composant le cristal. Nous commencerons cette étude par l'analyse du comportement de ce type de guide afin d'en optimiser le design dans le but d'obtenir une largeur de bande passante optimale.

III.1. Propriétés géométriques.

Pour guider des ondes électromagnétiques au sein d'un cristal 3D comme le tas de bois, il faut créer un défaut dans la périodicité du cristal qui traverse de part en part ce dernier. Pour un tas de bois, il suffit par exemple d'enlever une tige de l'empilement global.

Le guide d'air ainsi créé sera guidant sur une bande de fréquence qui sera principalement dépendante de la bande de fréquence interdite du cristal.

Considérons ainsi le cas simple d'un guide métallique rectangulaire classique dont une vue en coupe est proposée sur la Figure IV-8.

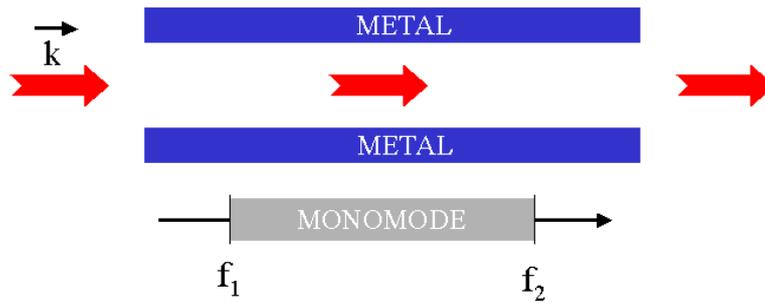


Figure IV-8. Vue en coupe d'un guide métallique rectangulaire standard.

Ce guide rempli d'air, de part ses dimensions, possède un comportement monomode entre les fréquences f_1 et f_2 , f_1 étant sa fréquence de coupure fondamentale et f_2 la fréquence de coupure du mode suivant. Bien sûr, ces deux fréquences dépendent des dimensions internes de ce guide.

Prenons maintenant un guide similaire de même dimensions internes (et donc possédant le même comportement monomode de f_1 à f_2), mais remplaçons les parois métalliques par un cristal à bande interdite électromagnétique 3D comme montré sur la Figure IV-9. On sait que dans la bande de fréquences correspondant à sa bande interdite que nous repérerons ici de f_a à f_b , un tel matériau périodique se comporte comme un réflecteur quasiment parfait si le nombre de périodes le composant est suffisamment élevé (hypothèse que nous prendrons ici pour cet exemple). En dehors de l'intervalle $\{f_a - f_b\}$ par contre, la majorité des ondes arrivant sur ce cristal le traverse. En fait, il existe un continuum d'états propageant au sein de ce cristal qui sont excités par les ondes incidentes.

Deux cas illustrés sur la Figure IV-9 peuvent alors se présenter :

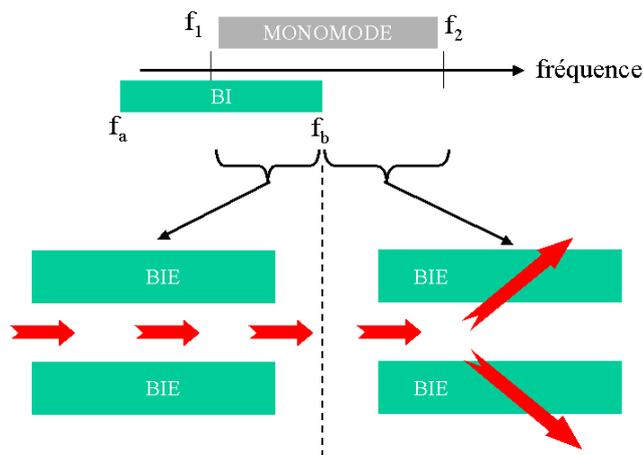


Figure IV-9. Vue en coupe d'un guide d'air au sein d'un cristal BIE 3D dont la bande interdite est comprise entre f_a et f_b .

- Cas n°1 : la fréquence de travail est comprise entre f_a et f_1 (cas non illustré).

Dans cet intervalle de fréquence, le cristal se comporte comme un réflecteur parfait mais aucun mode propageant ne peut s'installer dans le guide puisque nous sommes en dessous de la fréquence de coupure fondamentale de ce dernier.

- Cas n°2 : la fréquence de travail est comprise entre f_1 et f_b (partie de gauche de la Figure IV-9).

Dans cet intervalle de fréquence, le cristal se comporte comme un réflecteur parfait et l'énergie injectée est alors transmise et guidée de l'entrée du guide vers sa sortie. La configuration de l'onde électromagnétique guidée est similaire à celle établie dans le guide métallique équivalent : le guide fonctionne sur son mode fondamental.

- Cas n°3 : la fréquence de travail est comprise entre f_b et f_2 (partie de droite de la Figure IV-9).

Dans cet intervalle de fréquence, le cristal BIE 3D est quasiment transparent aux ondes et l'énergie injectée à l'entrée du guide se perd au travers du cristal. L'énergie n'est pas ou très peu transmise par le guide.

NB : dans les cas traités par la suite, nous ne nous intéresserons seulement aux conditions de guidage monomode.

Plusieurs conséquences sont à retenir pour un tel guide d'air placé au sein d'un cristal 3D.

- Tout d'abord, si l'on veut obtenir un guidage monomode sur une bande de fréquence donnée, il convient de faire se recouper la bande de fréquence du guide fixé par ses dimensions internes sur lequel celui-ci est monomode et la bande interdite du cristal.
- Ensuite, la bande passante d'un tel guide à bande interdite sera d'autant plus importante que cette bande de fréquence en commun sera importante.
- Enfin, une bande passante maximale pour un tel guide sera obtenue si la bande interdite du matériau BIE couvre entièrement celle où le guide est monomode.

Ces différents comportements ont été observés expérimentalement dans [20] et mettent en évidence la cohabitation dans une telle structure des fréquences de coupure fixées par la taille du guide et de la bande interdite du cristal BIE.

En résumé et comme l'a montré l'étude réalisée dans [21], une grande attention doit être apportée à ce type de guide d'onde créé par la mise en place d'un défaut dans un cristal BIE. En effet, il apparaît que la taille, la forme et même l'emplacement de ce défaut au sein de ce cristal influe à la fois sur la largeur de sa bande passante et la qualité du confinement de l'énergie dans celui. En d'autres termes, il faut à la fois optimiser le cristal en lui-même pour qu'il présente la meilleure bande interdite possible et aussi le défaut pour que celui-ci puisse utiliser au mieux cette bande interdite.

III.2. Conception du guide d'onde.

Pour cette étude, nous choisissons de travailler dans la bande normalisée D allant de 110 à 170 GHz. Nous cherchons à obtenir la bande passante d'un guide BIE monomode la plus importante possible dans cette bande. Nous avons choisi de travailler dans cette bande de fréquence car elle est représentative des futures applications dans le domaine des télécommunications. Le tas de bois sera considéré constitué de tiges de Silicium de permittivité relative égale à 11.7 afin de pouvoir être compatible avec les technologies de photolithographie qui seront utilisées par la suite pour sa réalisation.

III.2.a. Configuration initiale.

Nous choisissons d'alimenter le guide d'ondes « tas de bois » par des guides d'ondes standards rectangulaires normalisés WR 6. Ces derniers présentent des dimensions internes de 1.524 mm par 0.762 mm et sont monomode (mode TE_{10}) sur la bande D.

Pour la connexion de ces derniers au guide d'ondes BIE, nous avons choisi de ne pas utiliser de transition d'adaptation. Le guide d'onde BIE devra donc être optimisé afin d'obtenir la meilleure adaptation possible avec le guide d'onde standard.

Du point de vue électromagnétique, il est important que la configuration du champ de part et d'autre de la connexion guide standard – guide BIE soit la plus similaire possible. Du point de vue électrique, cela se traduit par une désadaptation plus ou moins importante en fonction de l'impédance caractéristique présente de chaque côté de cette transition.

La configuration de connexion choisie est présentée sur la Figure IV-10.

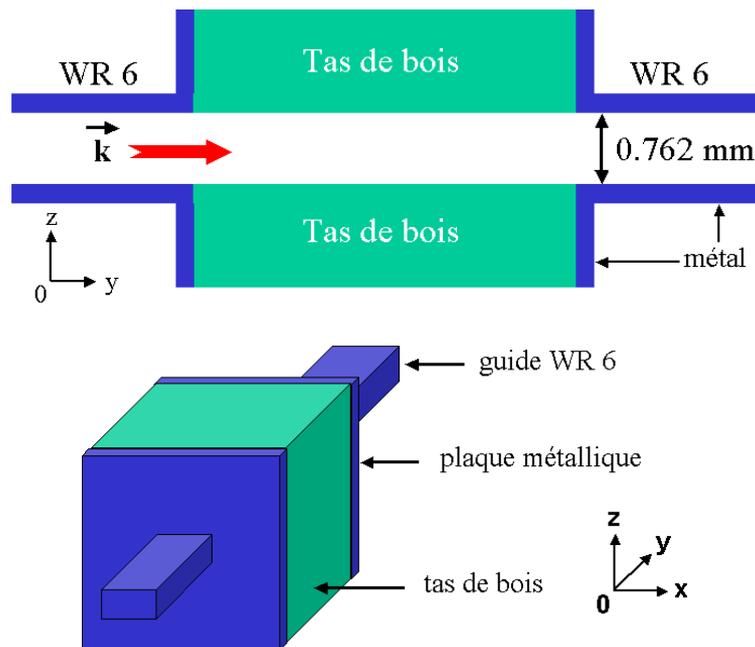


Figure IV-10. Vue en coupe et en perspective du guide dans le tas de bois connecté à deux guides standards WR6.

Le guide dans le tas de bois est pris en sandwich entre deux plaques métalliques de laiton (conductivité égale à $2.56 \cdot 10^7$ S/m) qui reçoivent les guides WR6 d'entrée et de sortie. Les faces avant et arrière se retrouvent donc métallisées alors que les quatre autres faces du tas de bois restent à l'air libre.

Nous pouvons maintenant nous concentrer sur la taille et la forme géométrique du défaut. Le point de départ de cette étude consistera à ce que la taille du guide dans le tas de bois soit proche des dimensions internes du guide WR6 afin que la perturbation amenée par les transitions entre les guides standards et le guide BIE soit la plus faible possible.

III.2.b. Forme du défaut dans le cristal BIE.

Dans la littérature, la création de guides dans un cristal en tas de bois consiste dans la plupart des cas à retirer une ou plusieurs tiges dans le cristal régulier [20-26]. Cette technique, certes efficace, a deux inconvénients.

Le premier est que le nombre de configurations de guide que l'on peut obtenir, que ce soit au niveau de la taille, de la forme ou de l'emplacement dans le cristal se révèle limité.

Le deuxième est que ces différents guides présentés dans ces travaux n'utilisent pas complètement la bande interdite offerte par le cristal. A titre d'exemple, le meilleur guide obtenu expérimentalement dans [22] présente une bande passante de 6% autour de 12.6 GHz, ces 6% étant définis comme la bande relative sur laquelle le coefficient de réflexion du guide est inférieur à -10 dB comme montré sur la Figure IV-11.

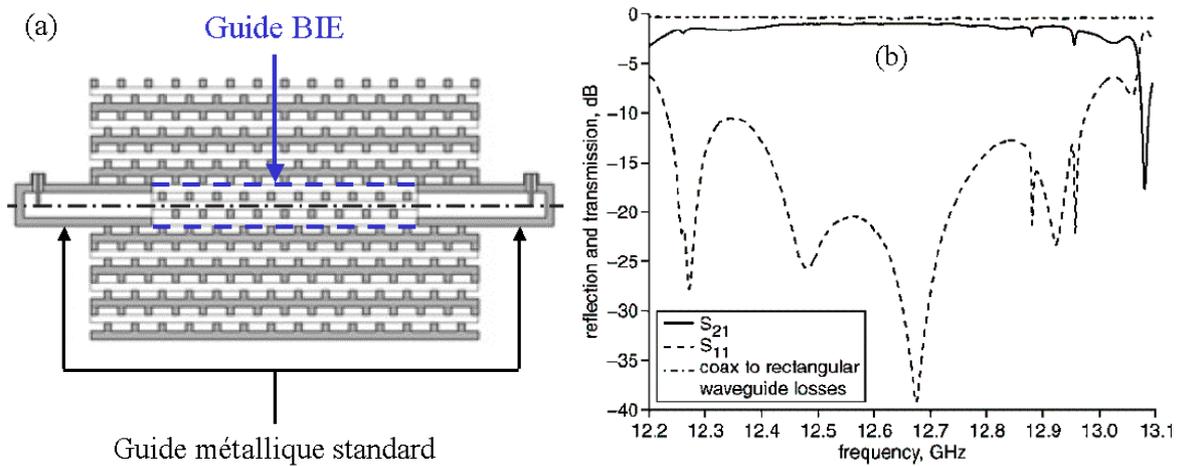


Figure IV-11. (a) Schéma du principe du guide d'onde BIE et (b) réponse en fréquence de ce guide issu de [22].

Ce très bon résultat est cependant pondéré par le fait que le tas de bois, fabriqué en alumine, a été optimisé pour donner une bande interdite totale de 14.4% autour de 12.6 GHz. On a alors ici un guide qui n'utilise que 42% de la bande interdite du cristal BIE 3D. On peut alors penser que d'autres formes de guide doivent être envisagées afin de pouvoir obtenir de larges bandes passantes comme nous le souhaitons.

Ainsi, nous avons décidé de légèrement modifier le cristal en tas de bois afin d'obtenir un degré de liberté supplémentaire et de pouvoir envisager des configurations de guide permettant non seulement une bonne adaptation avec le guide standard choisi, mais aussi de maximiser la bande passante du guide BIE.

Pour cela, une variation structurelle est envisagée. Elle consiste à introduire un plan de symétrie dans le plan horizontal du tas de bois. Cette symétrie n'existe pas dans la configuration classique de ce cristal. La Figure IV-12 montre la modification envisagée.

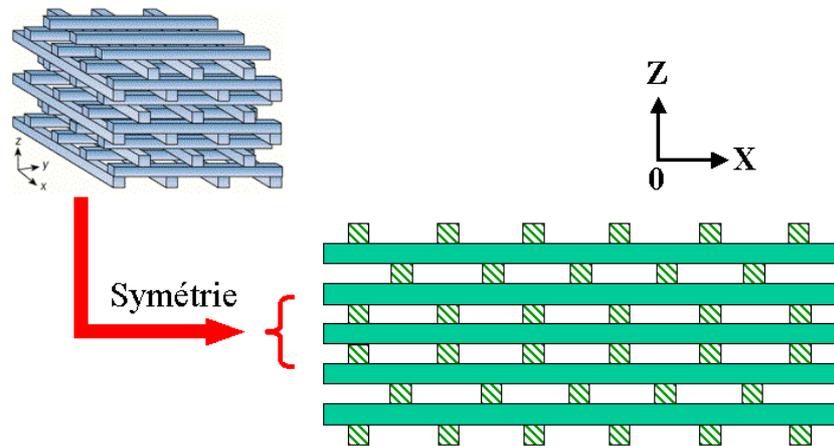


Figure IV-12. Introduction d'une symétrie supplémentaire dans le cristal tas de bois.

Le guide d'onde sera défini au niveau de cette symétrie.

La configuration testée est présentée dans la Figure IV-13. Elle consiste à retirer des portions de tiges de tas de bois dans la zone de la symétrie de ce cristal afin de créer un défaut qui présente des dimensions similaires à celle du guide WR6. La vue présentée est une vue de face du montage considéré, le guide WR6 étant vue de face (en pointillés sur la Figure IV-13). Le guide rectangulaire standard WR6 et le défaut au sein du tas de bois sont considérés parfaitement alignés.

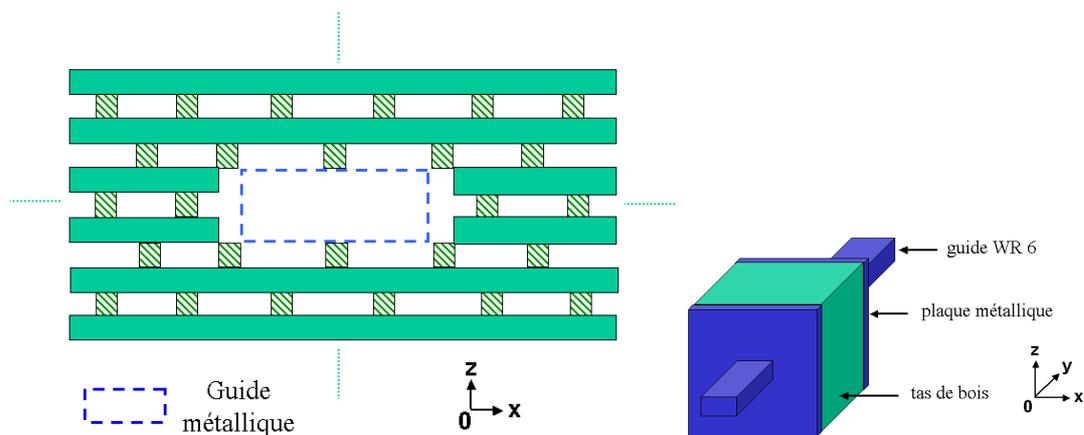


Figure IV-13. Vue rapprochée du guide BIE choisi et de son alimentation par un guide métallique. La configuration de test choisie pour la mesure est aussi rappelée.

Le tas de bois initial choisi pour fonctionner dans la bande D s'inspire directement de l'étude réalisée sur les tas de bois en Silicium d'Ozby dans la référence [15], travaux découlant des travaux précurseurs sur le tas de bois des références [8] et [9].

Dans celle-ci, une bande interdite électromagnétique a été obtenue pour un tas de bois en Silicium ($\epsilon_r = 11.7$) autour de 98 GHz. Les tiges utilisées présentent une largeur de 340 μm , un rapport h/w de 1.15 et un taux de remplissage de 26.7 %. La fréquence centrale normalisée de la BIE ($f_{\text{normalisée}} = a / \lambda$) est donc de 0.42.

Ainsi, comme nous l'avons vu dans le Chapitre 1, si l'on veut fixer la fréquence centrale d'une BIE basée sur la même configuration de tiges (même taux de remplissage, même rapport h/w et même matériau diélectrique), il suffit de choisir correctement a à partir de cette fréquence normalisée.

Nous choisissons pour notre structure initiale de test de fixer arbitrairement la fréquence centrale de la bande interdite à 125 GHz. Il faut donc avoir un pas a de 1.008 mm et donc une largeur de tige w de 269 μm et une hauteur de tige h de 309.5 μm .

Souhaitant de façon tout aussi arbitraire fixer sur la configuration initiale un taux de remplissage de 25%, nous effectuons des simulations EM en oscillations forcées de la configuration présentée sur la Figure IV-13 en jouant sur le taux de remplissage et la taille des tiges afin d'obtenir une BIE centrée sur 125 GHz.

Nous obtenons alors pour un taux de remplissage de 25%, une largeur de tige w de 262.5 μm et un rapport h/w de 1 les résultats simulés présentés sur la Figure IV-14.

Le Silicium simulé présente une permittivité de 11.7 et une tangente de perte de $1 \cdot 10^{-3}$.

Pour cette simulation ainsi que les suivantes qui seront présentées dans ce paragraphe, les faces latérales du tas de bois, de dessus et de dessous ne reçoivent pas de métallisation.

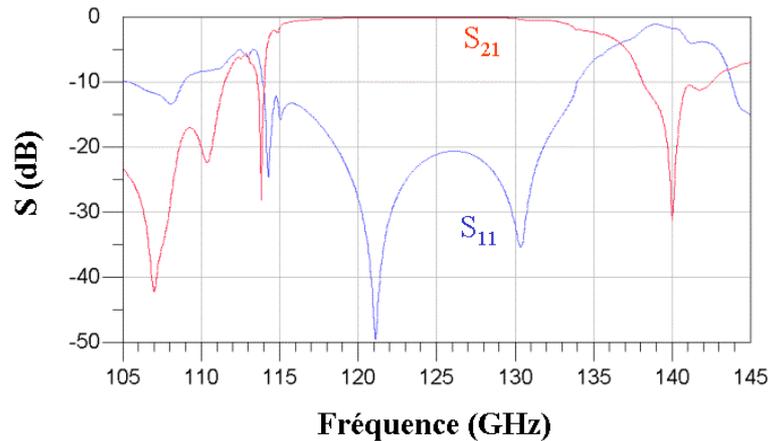


Figure IV-14. Réponse en fréquence de la structure initiale.

Les performances obtenues pour ce guide BIE initial sont les suivantes :

- Fréquence centrale de la bande passante : 125 GHz
- Bande relative à -10 dB : 15%
- Bande relative pour $S_{11} < -20$ dB : 10.5 %

Ce design initial servira de base à l'optimisation du guide BIE, que ce soit en terme de largeur de bande passante que d'adaptation dans la bande.

Comme cela l'a été montré dans le paragraphe II précédent, la fréquence centrale de la bande interdite et la largeur de celle-ci sont fixés dans un tas de bois par trois paramètres :

- La permittivité du matériau utilisé pour réaliser les tiges.
- Le taux de remplissage du cristal.
- Le rapport hauteur sur largeur de la section des tiges.

Le choix du matériau utilisé étant fixé par la technologie choisie pour la fabrication de ce cristal, nous allons étudier l'évolution des propriétés d'un guide BIE en Silicium suivant les deux autres axes cités. Comme précédemment, le but de cette étude sera en priorité de maximiser la bande passante du guide tout en assurant une très bonne adaptation dans la bande. Nous décidons de plus de faire en sorte que cette bande passante soit centrée sur 145 GHz, soit le milieu de la bande D.

Plusieurs points sont à noter :

- A partir de maintenant, la bande relative considérée sera pour un coefficient de réflexion inférieur à -20 dB et non plus -10 dB. Cette valeur du coefficient de réflexion de -20 dB est plus significative quant à la bonne adaptation du guide BIE dans sa bande passante.
- La configuration présentée par la Figure IV-13 sera conservée au cours des prochaines optimisations de la forme de ce guide BIE, et cela même si effectivement la taille du guide métallique considéré ne correspond pas tout à fait à celle au guide standard WR6 que nous voulons utiliser. Il est bien sûr entendu que le design final qui résultera de l'étude en cours sera lui adapté à l'utilisation d'un tel guide.

Nous allons maintenant étudier plus en avant l'évolution de la fréquence centrale et de la largeur de la bande relative en fonction des paramètres géométriques définissant ce guide BIE tout en conservant la configuration initiale introduite dans la Figure IV-13.

III.2.c. Optimisation des propriétés du guide BIE.

Afin de répondre au cahier des charges fixé, nous avons commencé par observer l'évolution de la fréquence centrale f_0 de la bande passante de ce guide en fonction de la taille des tiges, du rapport w/h et enfin du taux de remplissage, c'est à dire suivant les trois paramètres géométriques principaux du tas de bois.

III.2.c.i Evolution de f_0 en fonction de la taille des tiges.

La Figure IV-15 présente les résultats de cette première étude théorique réalisée par des simulations électromagnétiques 3D à l'aide du logiciel EMXD. Les tiges considérées ici sont de section carré ($h = w$) et le taux de remplissage est conservé à 25%.

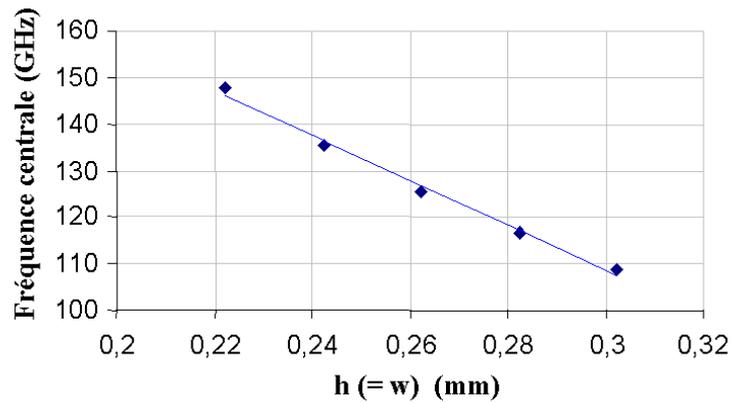


Figure IV-15. Evolution de la fréquence centrale de la bande passante du guide BIE en fonction de la taille des tiges.

Nous pouvons voir que cette fréquence centrale suit une évolution linéaire en fonction de la taille des tiges suivant l'équation : f_0 (GHz) = -485.05 w (mm) + 254.1

La même étude est réalisée avec cette fois comme variable le rapport hauteur sur largeur des tiges h/w .

III.2.c.ii Evolution de f_0 en fonction de h/w .

La Figure IV-16 présente les résultats obtenus. Le taux de remplissage est toujours de 25% et les tiges ont une largeur w de 0.2625 mm.

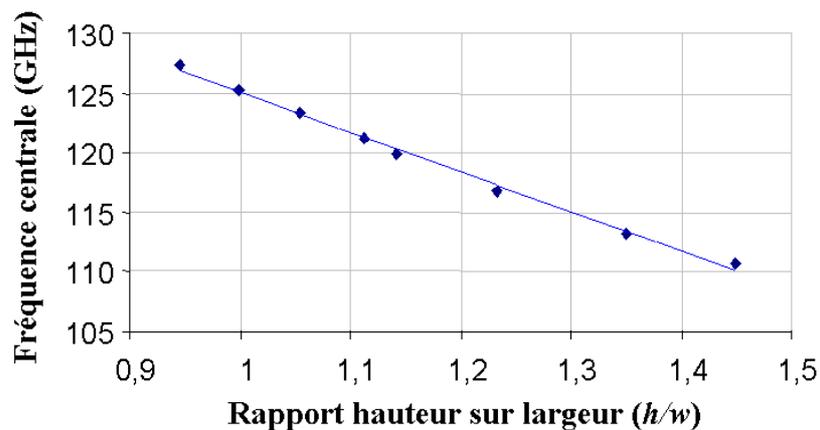


Figure IV-16. Evolution de la fréquence centrale de la bande passante du guide BIE en fonction du rapport h/w .

Ici aussi la fréquence centrale f_0 de la bande passante du guide BIE suit une évolution linéaire régie par l'équation : f_0 (GHz) = -33.234 (h/w) + 158.28

Et enfin la même étude en fonction du taux de remplissage.

III.2.c.iii Evolution de f_0 en fonction du taux de remplissage.

La Figure IV-17 présente les résultats. Les tiges ont des dimensions telles que : $h = w = 0.2625$ mm.

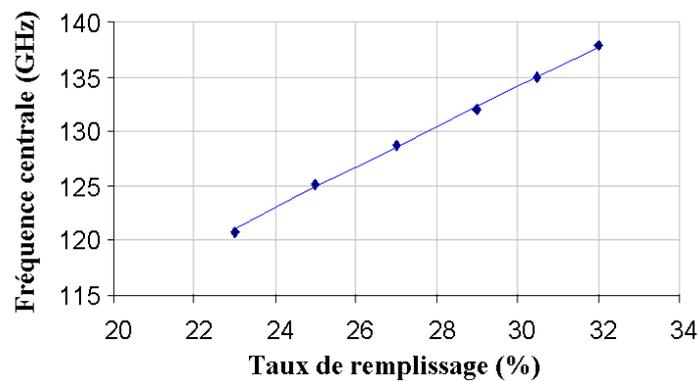


Figure IV-17. Evolution de la fréquence centrale de la bande passante du guide BIE en fonction du taux de remplissage.

La fréquence f_0 suit ici la loi : f_0 (GHz) = 1,8532 Taux (%) + 78,49

Nous allons maintenant voir comment évolue la bande passante relative de ce guide en fonction du rapport (h/w) et taux de remplissage.

III.2.c.iv Evolution de la bande passante relative en fonction de (h/w).

La Figure IV-18 présente les résultats de cette étude. Ici, nous avons étudié comment évolue la largeur de la bande passante relative définie par $S_{11} < -20$ dB ainsi que l'adaptation maximale obtenue dans cette même bande. Le taux de remplissage est de 25% et w est conservé à 0.2625 mm.

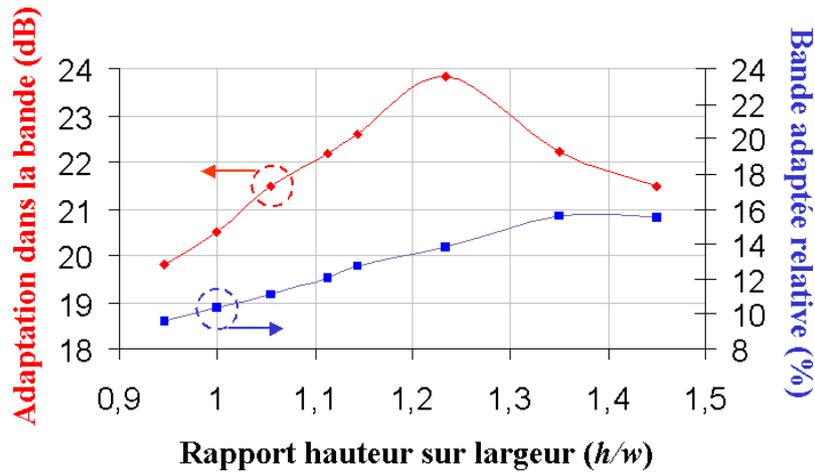


Figure IV-18. Evolution de la bande passante relative du guide BIE en fonction de h/w .

Aux vues de ce résultat, il apparaît que le choix du rapport hauteur sur largeur des tiges (h/w) composant le guide d'onde devra se faire en choisissant le meilleur compromis entre la largeur de la bande relative et l'adaptation présentée dans la bande passante.

Par exemple ici, un bon compromis est obtenu pour un rapport de 1.35 pour lequel la bande relative est de 15.5% et l'adaptation dans cette même bande reste inférieure à -22 dB.

La même étude est réalisée en fonction du taux de remplissage.

III.2.c.v Evolution de la bande passante relative en fonction du taux de remplissage.

La Figure IV-19 résume les résultats obtenus. Le rapport h/w est fixé à 1 et la largeur des tiges à 0.2625 mm.

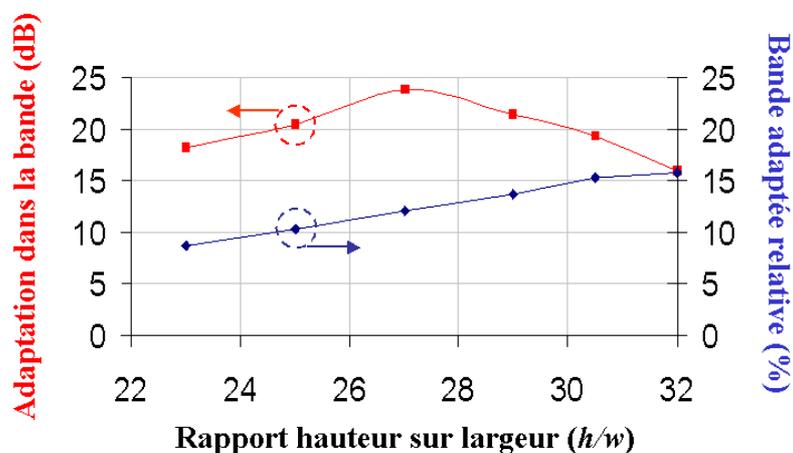


Figure IV-19. Evolution de la bande passante relative du guide BIE en fonction de taux de remplissage.

Comme précédemment, ce paramètre devra être choisi afin d'obtenir le meilleur compromis largeur de bande relative et adaptation dans cette bande.

Ici, pour un taux de remplissage de 30 %, nous obtenons le meilleur compromis avec une bande relative de 15 % pour une adaptation dans cette bande qui reste inférieure à -20 dB.

Nous connaissons maintenant comment évolue les paramètres principaux de ce guide BIE, à savoir la fréquence centrale de sa bande passante, la largeur de celle-ci et l'adaptation dans la bande en fonction des paramètres géométriques le définissant.

Il ne reste plus alors qu'à synthétiser ces résultats compte tenu du cahier des charges afin d'obtenir la structure finale correspondant à ce que l'on souhaite obtenir.

III.2.d. Choix de la structure finale.

Le guide BIE que nous souhaitons obtenir doit répondre à ces différents critères :

- Le défaut au sein du tas de bois doit présenter la configuration montrée dans la Figure IV-13.
- Ce défaut doit, tout en respectant cette configuration, présenter des dimensions compatibles avec le guide standard WR6 qui sera utilisé pour son alimentation.
- La fréquence centrale de la bande passante du guide BIE doit être autour de 145 GHz, soit le milieu de la bande D.
- Nous souhaitons obtenir le meilleur compromis entre la largeur de la bande passante du guide BIE et l'adaptation dans cette bande.
- Enfin, il faut que les tailles de tiges soient compatibles avec les moyens technologiques envisagés.

Concernant le dernier point, la fabrication envisagée pour le tas de bois consistera en un empilement de wafers de Silicium, chaque wafer possédant deux étages de tas de bois. Nous souhaitons pouvoir utiliser des wafers d'épaisseur standard sans avoir besoin de rectifier ces épaisseurs par des étapes technologiques supplémentaires (polissage, gravure, ...).

Cette décision nous a conduit à utiliser des wafers standards présentant une épaisseur de $500 \pm 25 \mu\text{m}$ polis double-face.

Ainsi, considérant les différents critères auxquels nous devons répondre, la structure retenue après de nombreuses simulations EM en oscillations forcées présentera les paramètres géométriques suivants :

- Taux de remplissage : 25%
- $h = 0.25 \text{ mm}$
- Rapport h/w : 1.15, donc $w = 0.218 \text{ mm}$

La Figure IV-20 montre la réponse en fréquence de cette configuration.

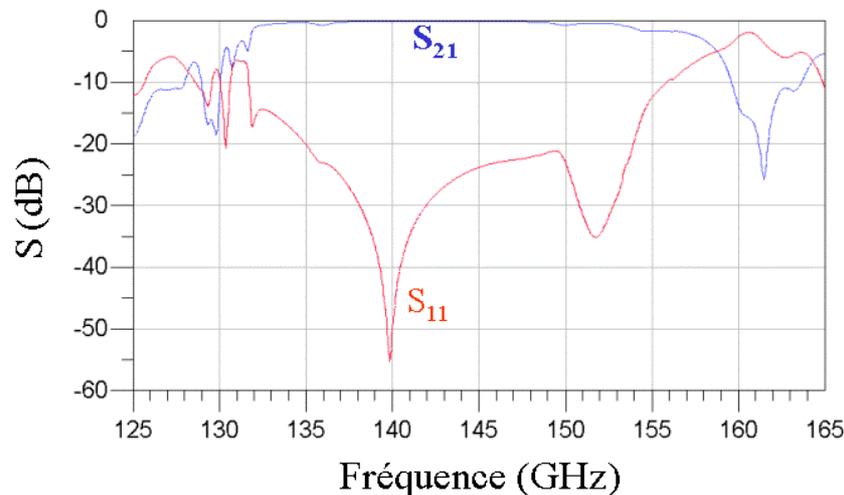


Figure IV-20. Paramètres S de la configuration finale retenue pour le guide BIE.

Les performances obtenues sont les suivantes :

- fréquence centrale de la bande passante : 144 GHz
- bande relative ($S_{11} < -20 \text{ dB}$) : 13%
- Adaptation dans la bande $< -21 \text{ dB}$
- Paramètre de transmission inférieur à 0.9 dB

La configuration proposée répond bien aux critères requis. Afin de faciliter la mesure en fréquence de ce guide une légère modification lui est apportée. Nous décidons pour limiter au maximum les problèmes d'alignement entre le guide BIE et le guide WR6 de changer le système d'excitation comme montré sur la Figure IV-21.

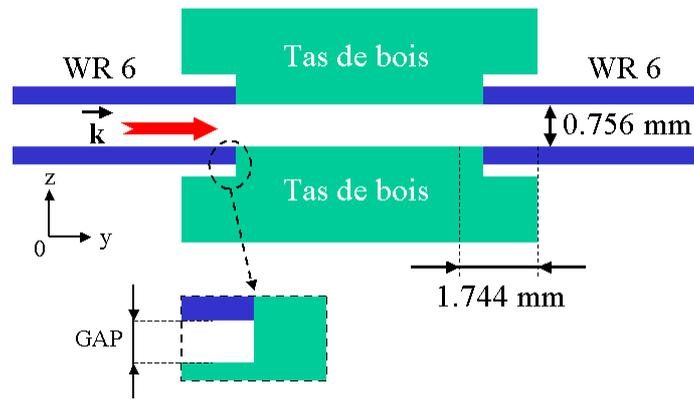


Figure IV-21. Vue en coupe de l'insertion du guide WR6 dans le tas de bois.

La profondeur d'insertion est fixée à 1.744 mm. Cette distance correspond simplement à une insertion équivalente à huit largeurs de tiges, soit deux périodes du cristal 3D. Le guide ainsi inséré se retrouve aligné face à une configuration de tiges identique à celle que l'on avait dans le précédent système d'excitation. Cette configuration se retrouvant toutes les quatre largeurs de tiges suivant l'axe de propagation, l'insertion du guide de une, deux, trois, ... périodes de tas de bois suivant cet axe produit exactement le même résultat en fréquence. Le choix de l'insertion de 1.744 mm (deux périodes) au lieu de 0.872 mm (une seule période) n'a été motivé que pour une meilleure tenue mécanique de l'ensemble guide d'onde standard + guide BIE. Cette configuration légèrement différente de celle envisagée au début de ce paragraphe ne modifie pas le comportement du guide BIE qui présente toujours les mêmes performances en terme de bande passante relative ainsi que d'adaptation dans cette bande.

Afin de faciliter l'insertion du guide d'onde WR6 dans le tas de bois, un gap d'air est laissé autour du guide WR6 (visible sur la Figure IV-22). Des simulations EM en oscillations forcées ont montré que ce gap pouvait être de plusieurs centaines de micromètres sans que cela ne modifie la réponse en fréquence de la structure complète. Il est à noter que la configuration proposée ne métallise plus aucune face du tas de bois.

La structure présente alors une longueur de 10.628 mm, une largeur de 12.862 mm et une hauteur de 6.75 mm. Afin d'optimiser le confinement du champ EM dans le guide d'onde BIE, nous considérons trois périodes verticales de tas de bois au dessus et en dessous du défaut au sein du cristal et six de chaque côté de celui-ci.

Le paragraphe suivant s'attache à la technique de fabrication retenue pour la réalisation du guide d'onde BIE en tas de bois.

III.3. Réalisation du guide BIE par gravure sèche RIE.

Après l'étude théorique complète, nous avons débuté une phase de réalisation expérimentale décrite en détail dans l'Annexe III. Le temps et les moyens financiers nous ont contraints pour l'instant à arrêter la phase de réalisation. Néanmoins nous envisageons de reprendre ces travaux ultérieurement, dès que toutes les conditions seront réunies. Les premières pièces réalisées sont présentées dans l'Annexe III ainsi que le détail des étapes technologiques de la gravure sèche RIE.

Cette technique de fabrication est actuellement l'une des plus connue, maîtrisée et utilisée. Présentant des précisions de fabrication pouvant aller aisément en dessous du micromètre, cette technique de gravure est à l'heure actuelle l'une des plus adaptées pour la réalisation de cristaux électromagnétiques fonctionnant au delà de 100 GHz.

Les différentes descriptions de cette technologie qui sont présentées dans l'Annexe III concernent le protocole suivi au cours de la fabrication de ce tas de bois au sein de la Centrale Technologique Universitaire d'Orsay. Ce travail a pu être mis en place grâce au soutien du M. André de Lustrac et de Mme. Frédérique Gadot de l'Institut d'Electronique Fondamentale (IEF) d'Orsay. La partie technologique s'est faite grâce aux efforts de Messieurs David Belier et de David Bouville, qui, grâce à leur expérience et leur encadrement, ont pu efficacement mener à bien ces premiers tests. L'auteur a de même contribué à cette réalisation lors d'un séjour à l'IEF.

Un contrat de recherche établi avec l'Agence Spatial Européenne nous a permis de concevoir ce type de guide BIE pour des applications à 90 GHz. Ce travail est actuellement en phase de réalisation expérimentale en utilisant les techniques d'assemblage présentées dans [16] qui apparaissent totalement à même de fournir la précision nécessaire au bon fonctionnement du guide.

III.4. Conclusion.

En suivant le protocole de fabrication de la RIE, une très bonne précision de fabrication de quelques micromètres est maintenue tout au long des étapes du procédé. Une fois les dernières étapes d'assemblage validées, cette technique de fabrication se révélera tout à fait satisfaisante pour la réalisation de guide BIE tas de bois fonctionnant au delà de 100

GHz. La mesure de cette structure se fera ensuite simplement en insérant les guides WR6 d'entrée et de sortie.

La structure proposée répond ici au cahier des charges fixé et apparaît en mesure, par exemple, d'assurer l'alimentation d'antennes cornet seules ou en réseau directement intégrées dans un tas de bois sur une bande de fréquence plus large que celle obtenue récemment par Weily. *et al.* [27]. Ces antennes et donc les systèmes guidants assurant leur alimentation sont en ce moment attentivement considérés afin de réaliser de l'imagerie Terahertz [28].

A partir de ce premier prototype, un design similaire est envisagé pour un fonctionnement à plus basse fréquence, notamment dans la bande Ka (26 – 40 GHz). Nous avons choisi cette nouvelle bande de fréquence car elle est représentative des applications actuelles et futures dans le domaine des télécommunications. De plus nous pourrons tester à ces fréquences l'état et la qualité de la fabrication de pièces céramiques complexes par stéréolithographie céramique 3D.

IV. Guide d'onde BIE en céramique.

Le système d'alimentation qui sera choisi pour mesurer cette structure sera le même que précédemment et reposera sur un guide WR28. Ce dernier possède un fonctionnement monomode (mode TE_{10}) sur toute la bande Ka (26 – 40 GHz) et des dimensions internes de 7.11 mm par 3.55 mm). Ce guide d'onde métallique standard sera comme dans le paragraphe III considéré parfaitement aligné avec le guide BIE.

La première étape de cette étude va consister à étudier l'impact que peut avoir le choix du matériau constituant le cristal BIE 3D.

IV.1. Configuration initiale du tas de bois en céramique.

Le choix des matériaux dans lesquels les cristaux sont fabriqués est aussi un paramètre important comme nous l'avons vu par exemple dans le Chapitre 3. Nous avons vu que le choix d'un diélectrique de forte permittivité permet d'avoir accès à de très large bande

interdite. Nous rappelons que celle-ci est définie en pourcentage comme le rapport entre la largeur de la bande interdite divisée par la fréquence centrale de cette bande. La deuxième conséquence de ce choix est qu'un cristal constitué d'un tel matériau présentera un coefficient de réflexion dans sa bande interdite plus élevé qu'avec un matériau à plus faible permittivité relative, cela à nombre de périodes constituant le cristal équivalent.

En se basant sur les conclusions du paragraphe II, l'obtention d'un guide BIE offrant une largeur de bande passante couvrant toute la bande Ka nécessiterait un cristal à bande interdite possédant une largeur de bande relative de 42%.

En se référant aux travaux initiaux de Ho *et al* et Sozuer *et al* .sur le tas de bois [8, 9], nous savons que ce cristal construit en Silicium ne présente dans sa configuration optimale qu'une bande interdite totale de 18%. Il est donc nécessaire d'avoir recours à un matériau diélectrique possédant une permittivité largement supérieur à 11.7 (celle du Silicium) afin de pouvoir atteindre la bande interdite totale visée.

Nous choisissons alors, en vue de sa réalisation en stéréolithographie céramique 3D, de travailler avec la zircone pour sa forte permittivité (31.2 dans la bande Ka comme nous l'avons caractérisé dans le Chapitre 3) et les bonnes tolérances de fabrication obtenues avec ce diélectrique pour la réalisation de structures 3D complexes.

Des travaux réalisés en collaboration avec Marc Thévenot du département Xlim – OSA ont permis d'obtenir les dimensions d'un tas de bois correspondant aux critères demandés. La détermination de la taille des tiges ainsi que du facteur de remplissage adéquat s'est faite en se basant sur les dimensions utilisées pour le guide BIE en Silicium. Un tas de bois en Silicium possédant le même taux de remplissage (25%) et un même rapport h/w (1.15) demanderait une largeur de tige par exemple de 1.045 mm pour présenter une bande interdite de fréquence autour de 30 GHz. Dans le cas présent, nous utilisons le zircone dont l'indice de réfraction est 1.63 supérieur à celui du Silicium. Nous pouvons alors penser en première approximation que des tiges en zircone présentant une largeur 1.63 fois inférieure à celles en Silicium permettraient au tas de bois construit avec de telles tiges de fournir une bande interdite autour de 30 GHz.

C'est à partir de cette valeur initiale de largeur de tige égale à $641 \mu\text{m}$ que des simulations EM successives ont permis de trouver les largeurs de tige, rapport h/w et taux de remplissage permettant à un tas de bois en zircone de donner une BIE centrée autour de 30 GHz.

Le diagramme de bande obtenu pour un tel cristal composé d'un empilement de tiges à section rectangulaire de 0.79 mm (largeur) par 0.71 mm (hauteur) et possédant un taux de remplissage de 25%, est présenté sur la Figure IV-22. La première zone de Brillouin de ce cristal est aussi présente sur cette même figure. Ce calcul a été effectué par un logiciel développé par Marc Thévenot basé sur la méthode des ondes planes.

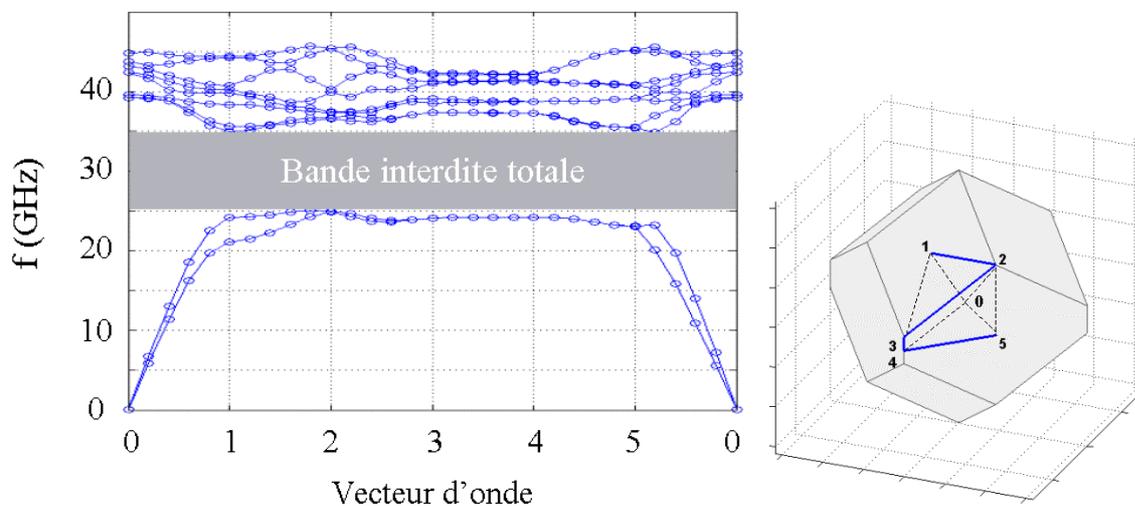


Figure IV-22. Diagramme de bande du tas de bois en zircone choisi. La première zone de Brillouin est visible.

Nous obtenons pour une telle configuration une large bande passante de 33% autour de 30GHz. Cette bande passante ne couvre certes pas entièrement la bande Ka mais se révèle être l'une des bandes interdites totales les plus larges jamais obtenues pour un tel cristal.

A ce point de l'étude, nous avons fixé à la fois les caractéristiques géométriques des tiges constituant le tas de bois ainsi que la matériau adapté à l'obtention d'une large bande interdite totale dans la bande Ka. Il nous faut maintenant étudier la forme à donner au défaut en lui-même afin d'assurer à la fois un comportement monomode dans cette bande et une adaptation maximale de ce guide avec les éléments qui serviront à son alimentation.

IV.2. Conception du guide d'onde BIE.

La première configuration testée est présentée dans la Figure IV-23. Elle consiste à retirer des portions de tiges de tas de bois dans la zone de la symétrie de ce cristal. La vue présentée est une vue de face du montage considéré, le guide WR28 étant vue de face (en pointillés sur la Figure IV-23). Le guide rectangulaire standard WR28 et le défaut au sein du tas de bois sont considérés parfaitement alignés.

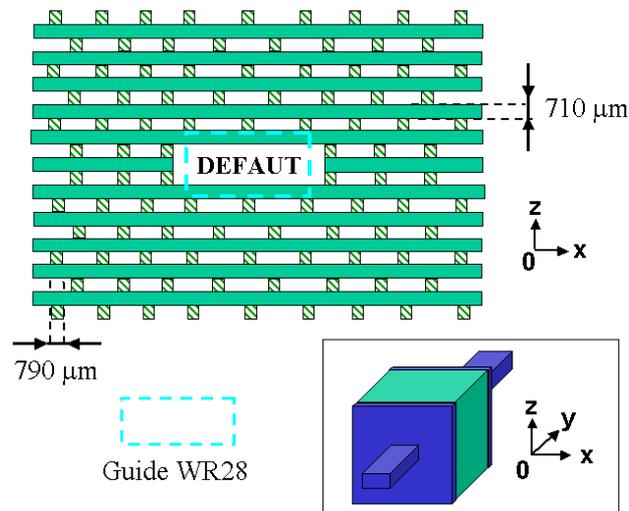


Figure IV-23. Vue de face du guide BIE inséré dans le cristal 3D. La vue 3D est rappelé dans l'encart.

La simulation de cette structure en oscillations forcées par le logiciel EMXD nous donne la réponse visible sur la Figure IV-24. Pour cette simulation et celles suivantes, les faces latérales, de dessus et de dessous du tas de bois ne reçoivent pas de métallisation.

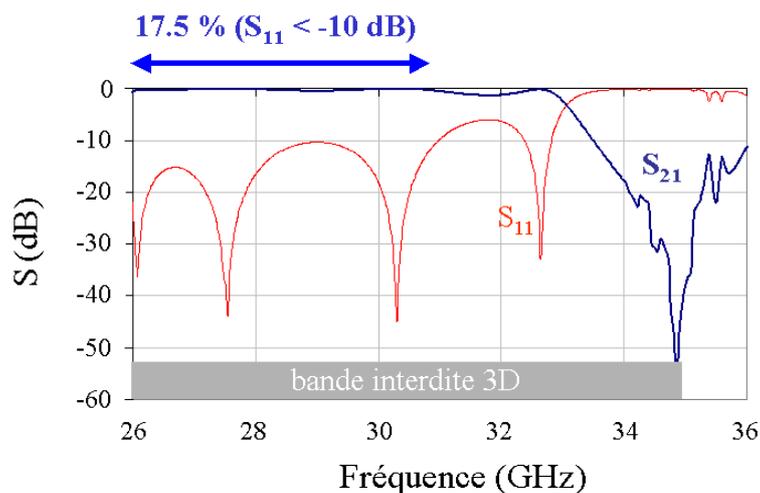


Figure IV-24. Paramètres S du défaut présenté sur la Figure IV-23.

La bande interdite 3D représentée sur la réponse en fréquence de la Figure IV-24 est celle donnée par le diagramme de bande de la Figure IV-22.

Nous obtenons pour cette configuration une bande passante de 17.5% autour de 28.5 GHz. Sur cette bande, le paramètre de réflexion reste inférieur à -10 dB et la transmission inférieure à -0.6 dB.

Nous rappelons que les plaques métalliques apposées sur les faces avant et arrière du tas de bois sont en laiton et présente une conductivité de $2.56 \cdot 10^7$ S/m. La zircone présente une permittivité de 31.2 et une tangente de pertes de $1.8 \cdot 10^{-3}$ autour de 30 GHz.

La bande obtenue ne couvre ici que 53% de la bande interdite 3D du tas de bois. Afin d'essayer d'améliorer ce pourcentage, une autre configuration présentée sur la Figure IV-25 est étudiée. Les flèches sur cette figure montrent la légère variation donnée au défaut au niveau des tiges pointées.

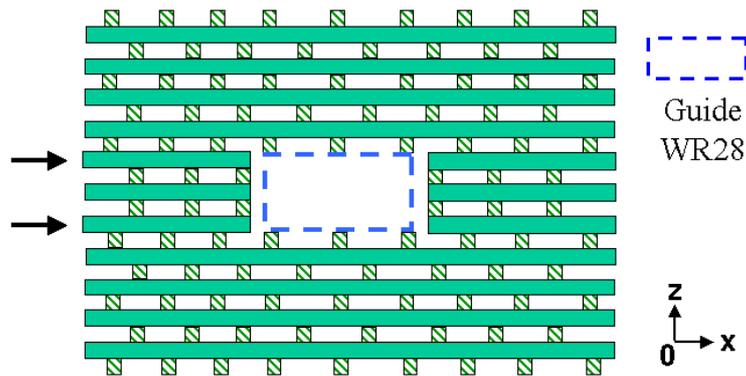


Figure IV-25. Vue de face de la deuxième configuration testée.

Les résultats en fréquence de la simulation de la structure sont décrits sur la Figure IV-26.

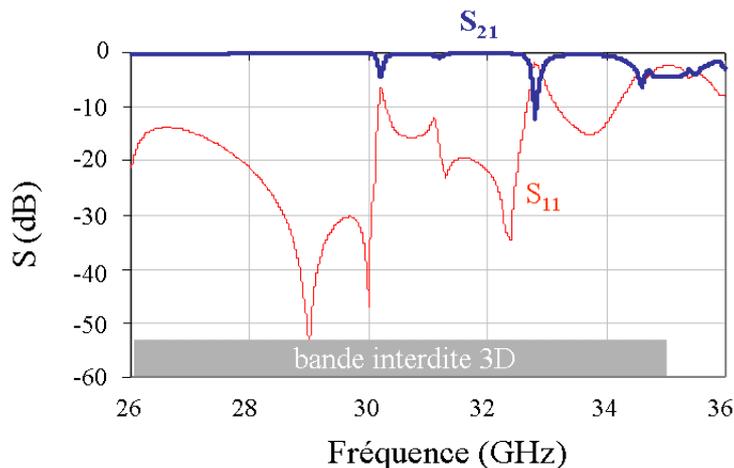


Figure IV-26. Paramètre S du défaut présenté sur la Figure IV-25.

De nombreux pics de résonances parasites apparaissent sur la réponse en fréquence. En observant sur la Figure IV-27 la configuration du champ électrique sur la résonance de 32.72 GHz, on s'aperçoit clairement que le siège de cette résonance est au niveau du contour du guide BIE. Les deux autres résonances présentes à 30.23 et 31.12 GHz sont de même principalement positionnées sur le pourtour du défaut au sein du cristal 3D.

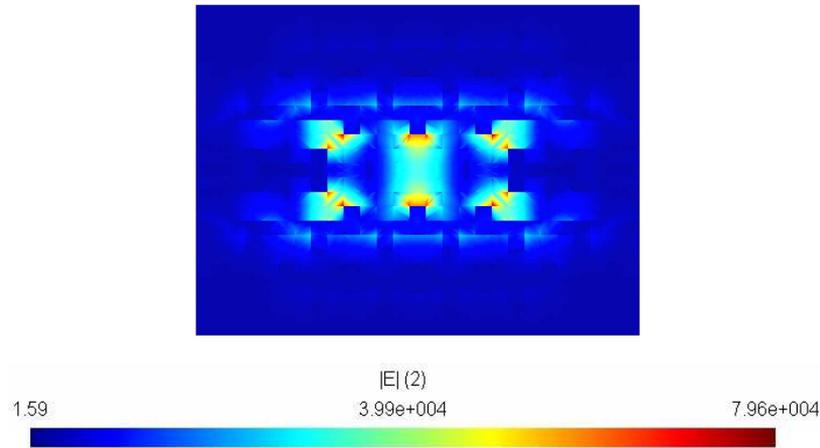


Figure IV-27. Champ électrique à 32.72 GHz dans le plan (x0z). Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Il apparaît que cette configuration doit être modifiée. Nous pouvons observer que le champ électrique au sein du défaut fuit par les coins de celui-ci. Afin de limiter ces fuites qui sont très certainement à l'origine de l'excitation des modes parasites localisés dans les coins du défaut, une légère modification est effectuée. Celle-ci est montrée sur la Figure IV-28 et consiste en une légère augmentation des tiges horizontales présentes dans les coins du défaut.

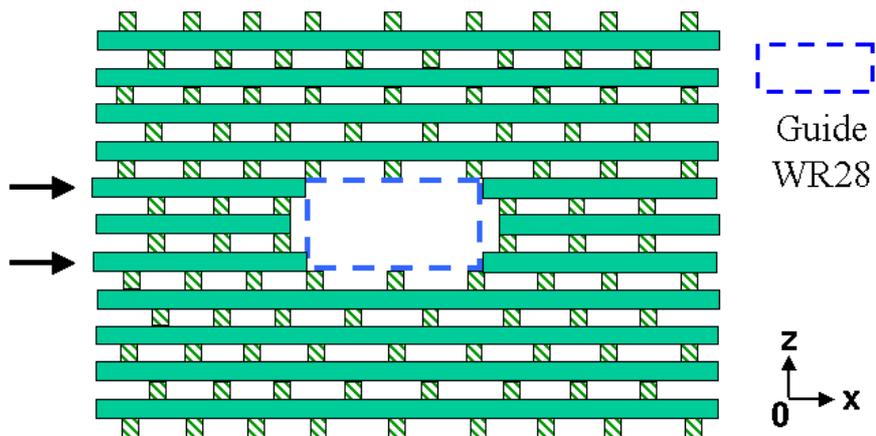


Figure IV-28. Vue de face de la deuxième configuration testée.

Les résultats en fréquence de la simulation EM de la structure sont visibles sur la Figure IV-29.

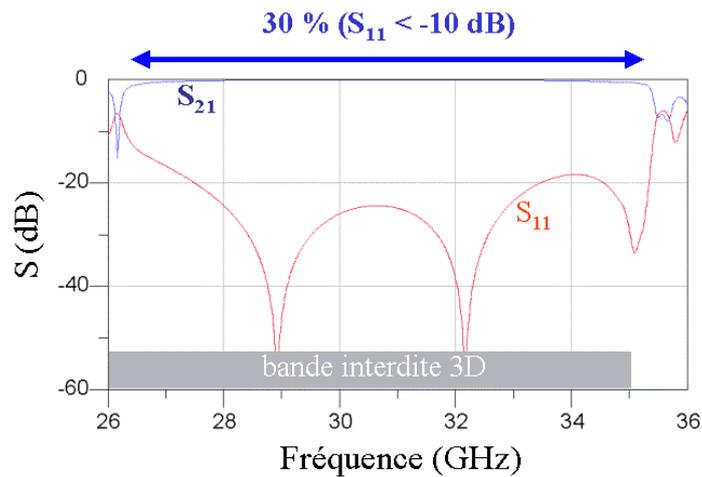


Figure IV-29. Paramètre S du défaut présenté sur la Figure IV-28.

Nous obtenons ici une large bande passante de près de 30% autour de 30.5 GHz, ce qui représente 91% de la bande interdite fournie par le cristal BIE 3D. Sur cette bande, le paramètre de réflexion reste inférieur à -10 dB et la transmission est inférieure à -1 dB.

Cette configuration permet d'obtenir une bande passante qui couvre presque entièrement la bande interdite offerte par le tas de bois disposé tout autour du défaut le traversant. Elle permet aussi d'obtenir un très faible coefficient de réflexion inférieur à -20 dB sur près de 66% de la bande passante totale. Afin de comprendre la raison d'une si bonne adaptation, le champ électrique au sein de cette structure est calculé à 31 GHz (milieu de la bande passante) et tracé sur la Figure IV-30.

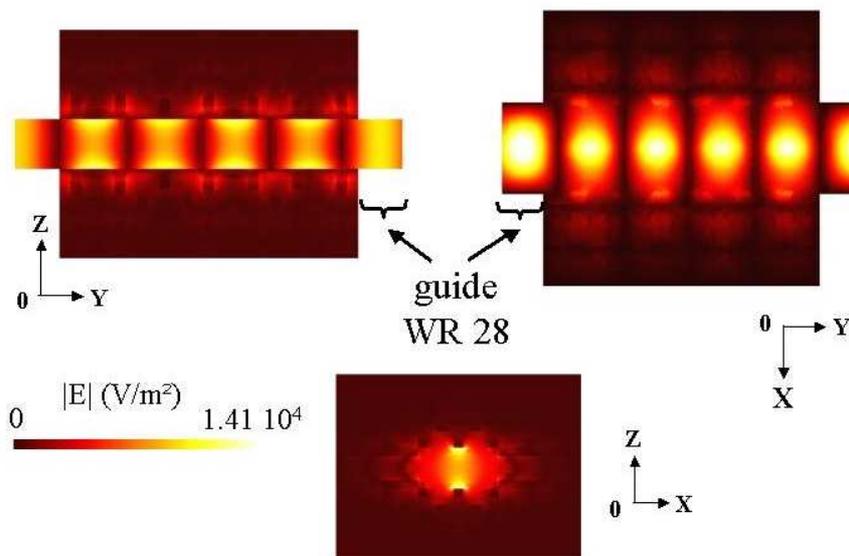


Figure IV-30. Tracé du champ électrique à 31 GHz. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Nous pouvons observer que le champ électrique reste bien confiné au sein du défaut à cette fréquence grâce au pouvoir réfléchissant du cristal 3D l'entourant. Nous avons ainsi une configuration de guide qui limite fortement les pertes par rayonnement comme le montre le bon coefficient de transmission. Les simulations nous apprennent ainsi que 99% de l'énergie injectée dans le guide est véhiculée de part et d'autre de celui-ci à 31 GHz. Les 1% manquants sont dus aux fuites au travers du cristal.

La configuration même du champ électrique dans le guide BIE est très semblable à celle présentée par celui-ci dans le guide rectangulaire standard WR28. Cette observation vient confirmer le fait qu'une très bonne adaptation à lieu entre le guide d'entrée/sortie WR28 et le guide BIE. En effet à 31 GHz, près de 100% de l'énergie amenée par le guide WR28 est injectée dans le guide BIE. Nous n'observons en définitive pas de perturbation EM à la transition.

Afin de valider cette étude théorique, nous avons procédé à sa fabrication par stéréolithographie.

IV.3. Fabrication par stéréolithographie céramique 3D.

IV.3.a. Eléments du guide d'onde BIE.

Dans un premier temps, afin de construire la structure obtenue dans le paragraphe précédent, la technique classique consistant à empiler des wafers usinés qui présentent un ou deux étages de tas de bois [15] a été reprise. Afin de limiter le nombre de pièces à assembler et donc les erreurs de positionnement amenées par cet assemblage, plusieurs étages de tas de bois seront définis par pièces. La Figure IV-31 présente les trois types de pièces différentes qui seront fabriqués.

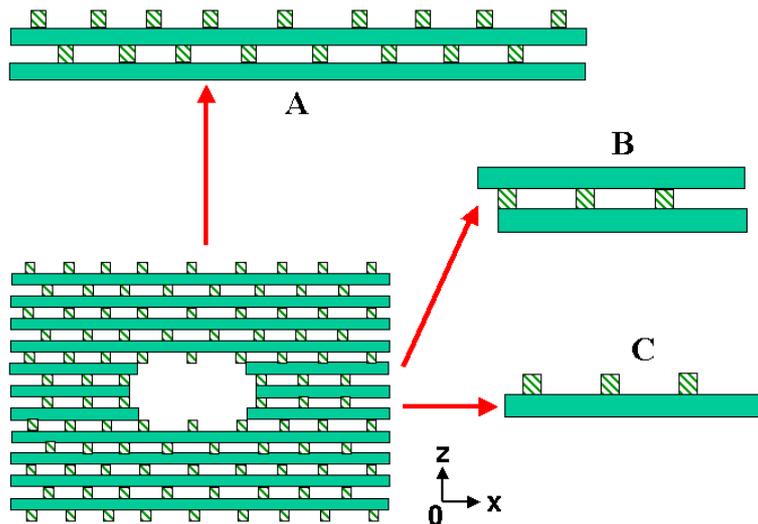


Figure IV-31. Pièces élémentaires constituant la structure guidante BIE.

Il apparaît que notre structure peut être réduite à trois types d'éléments repérés par les noms A, B et C sur la Figure IV-31. Le choix de ces éléments s'est fait en s'appuyant sur leur facilité de fabrication en stéréolithographie, chacun de ceux-ci ne présentant ici aucune difficultés pour leur réalisation. La fabrication de cette structure consistera donc à réaliser quatre éléments A, deux éléments B et enfin deux éléments C et à les assembler en les empilant.

NB : afin de maximiser l'efficacité de confinement de ce guide, il a été décidé de rajouter deux périodes supplémentaires de chaque côté du défaut par rapport au calcul théorique. De même, le nombre de périodes de tas de bois verticales (en dessus et en dessous du défaut) est passé de deux à trois. Par faute de puissance de calcul, cette configuration n'a pas été simulée. Néanmoins celle-ci a été choisie dans [22] pour un tas de bois réalisé dans un matériau de plus faible permittivité et s'est montrée tout à fait à même de confiner extrêmement bien le champ EM situé dans le guide. Nous pouvons alors, compte tenu de la plus haute permittivité présentée par la zircone, considérer que la qualité de confinement sera au moins équivalente à celle obtenue dans [22].

La Figure IV-32 montre les pièces réalisées.

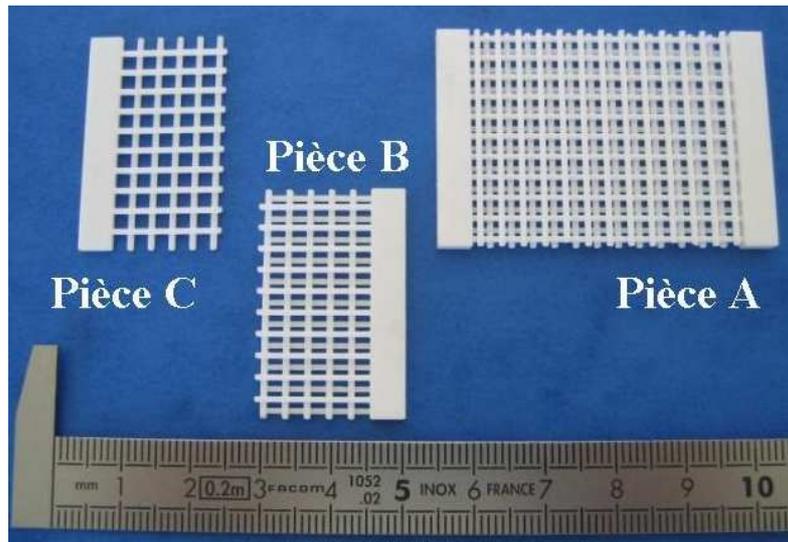


Figure IV-32. Pièces A, B et C réalisées par stéréolithographie 3D en zircone.

Les parties pleines visibles sur les flancs des pièces A, B et C ont été rajoutées afin d'assurer une bonne tenue mécanique à chacune de ces pièces pour éviter toute déformation pendant le processus de fabrication. Ces parties en excédent peuvent ensuite être enlevées en les découpant à l'aide d'une scie diamantée.

Les tolérances de fabrication relevées sont de l'ordre de 5% sur la périodicité des tiges qui est de 3.16 mm et de 9% sur les dimensions des tiges (0.79 mm de largeur, 0.77 mm de hauteur).

Avant de procéder à l'assemblage de cette structure, une vérification de la bande interdite présentée par le cristal 3D a été effectuée.

IV.3.b. Bande interdite expérimentale du cristal BIE.

Pour cela, nous avons empilé quatre pièces de type A, puis nous les avons placées entre deux guides WR28 comme montré dans la Figure IV-33. Le paramètre de transmission au travers de ce tas de bois a été mesuré.

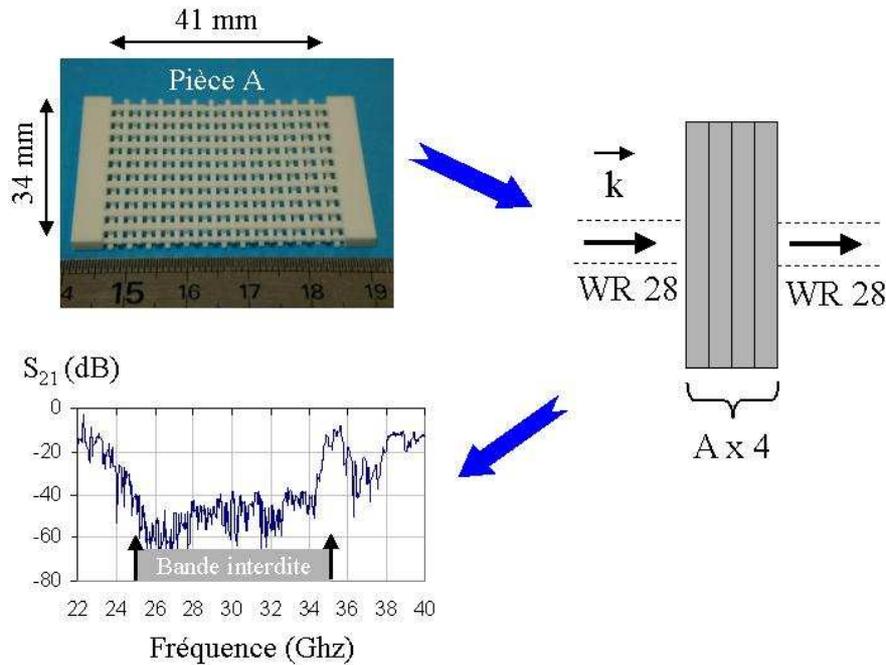


Figure IV-33. Mesure du coefficient de transmission au travers d'un tas de bois.

Nous obtenons une bande interdite là où elle était attendue par le calcul théorique, soit de 25 à 35 GHz comme montré sur la Figure IV-22. Le coefficient de transmission y est inférieur à -40dB , soit une réflexion quasi totale de l'onde incidente. Il faut cependant faire attention au fait que cette mesure ne valide la bande interdite présentée par ce tas de bois que sur la direction correspondant à son axe d'empilement (axe z), axe qui est ici l'axe de propagation de l'onde traversant le tas de bois.

Cependant ce résultat expérimental confirme le comportement théorique attendu et laisse espérer un résultat similaire pour le guide d'onde BIE.

IV.3.c. Assemblage du guide d'onde BIE et mesures.

La Figure IV-34 montre une photographie du guide en tas de bois après son assemblage. Ce dernier s'est effectué en s'appuyant sur un support en laiton recevant les guides d'entrée et de sortie WR28 pour la mesure du guide.

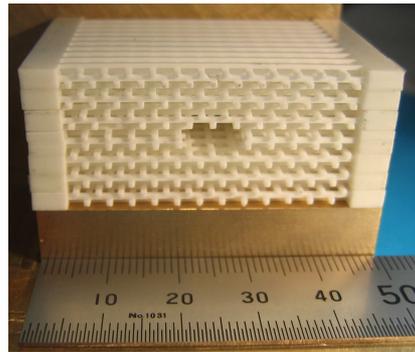


Figure IV-34. Photographie du guide d'onde BIE assemblé et placé dans son support en laiton.

Avant de mesurer le comportement en fréquence de ce guide d'ondes BIE, il convient de connaître les performances des guides d'onde métalliques standard WR28 utilisés. Leur réponse en fréquence est présentée sur la Figure IV-35.

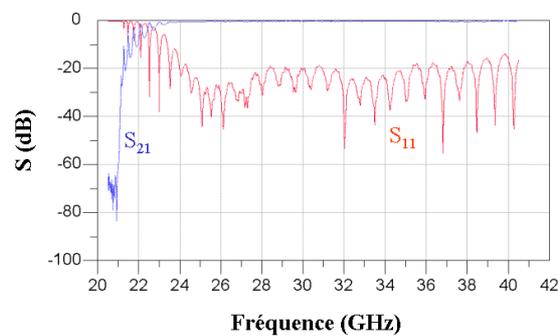


Figure IV-35. Mesure en fréquence des guides WR28 utilisés pour alimenter le guide BIE.

Nous remarquons que celui-ci présente une fréquence de coupure basse vers 22 GHz et que le paramètre de réflexion reste inférieur à -20 dB sur quasiment toute la bande Ka. Les résultats de la mesure en fréquence du guide d'ondes BIE sont montrés sur la Figure IV-36.

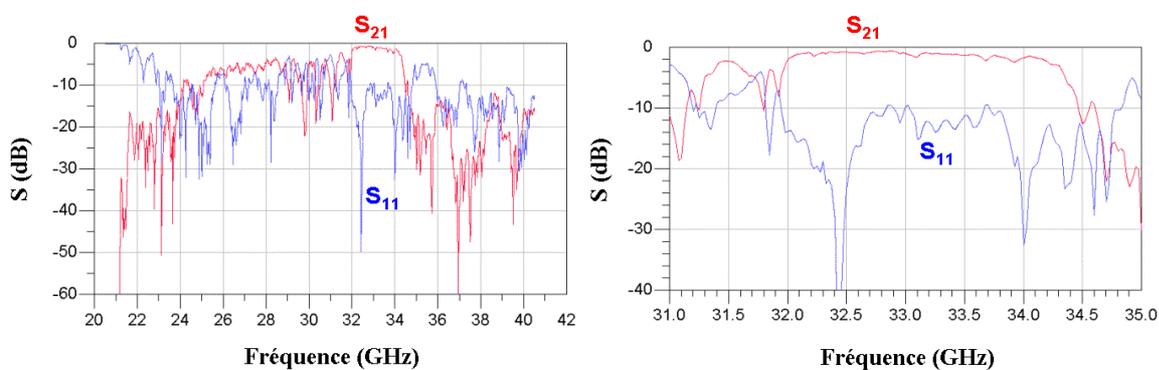


Figure IV-36. Paramètres S sur une large bande de fréquence (gauche) et autour de 33 GHz (droite). Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Le guide nous donne ici une bande passante de 7% autour de 33 GHz sur laquelle le paramètre de réflexion reste inférieur à -10 dB. Comme on peut le voir, cette bande passante est environ quatre fois inférieure à celle attendue.

Afin de comprendre la raison de cette diminution, une contre-étude est menée.

IV.3.d. Explication de la dégradation des performances.

Un contrôle attentif des différentes pièces fabriquées en céramique laisse apparaître que les pièces de type A (les plus grandes comprenant une période d'empilement de tas de bois) sont légèrement cintrées en leur milieu. Cette déformation s'est très certainement opérée lors du frittage et a pour conséquence de générer des gaps d'air dans la structure.

Une observation attentive de l'assemblage fait apparaître que ces gaps apparaissent tout particulièrement aux quatre coins du défaut d'air au sein du cristal 3D. La Figure IV-37 présente un schéma résumant cette observation ainsi que les dimensions des gaps relevés.

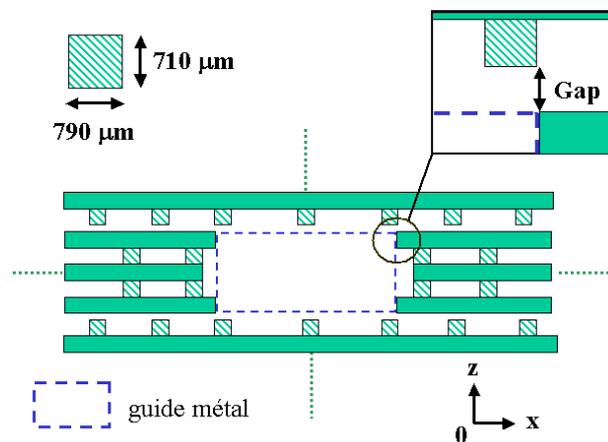


Figure IV-37. Représentation du défaut linéique obtenu expérimentalement. L'encart montre en gros plan le gap existant aux quatre coins du guide d'air dans le cristal.

La valeur de ce gap est voisine de $150 \mu m$. A partir de cette observation, une rétro-simulation par analyse EM 3D est effectuée afin de savoir quel impact ce gap a sur le comportement et si il est responsable de la diminution de la bande passante du guide. Pour ces simulations, nous n'avons pas tout à fait tenu compte de la déformation 3D des pièces céramiques. Par simplification, nous approchons les gaps observés en introduisant une épaisseur d'air entre les pièces B et A au niveau du défaut.

La Figure IV-38 résume les performances simulées du guide en fonction de la valeur associée à ce gap.

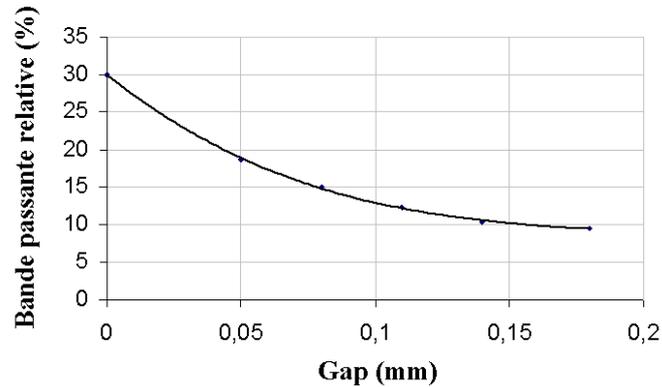


Figure IV-38. Evolution de la bande passante relative du guide BIE ($S_{11} < -10$ dB) en fonction de la valeur du gap.

Nous constatons une très forte diminution de la bande passante du guide BIE. La Figure IV-39 montre les paramètres S calculés du guide d'onde BIE pour un gap de $150 \mu m$. La position du début et de la fin de la bande passante mesurée du guide expérimental de la Figure IV-34 est aussi montrée.

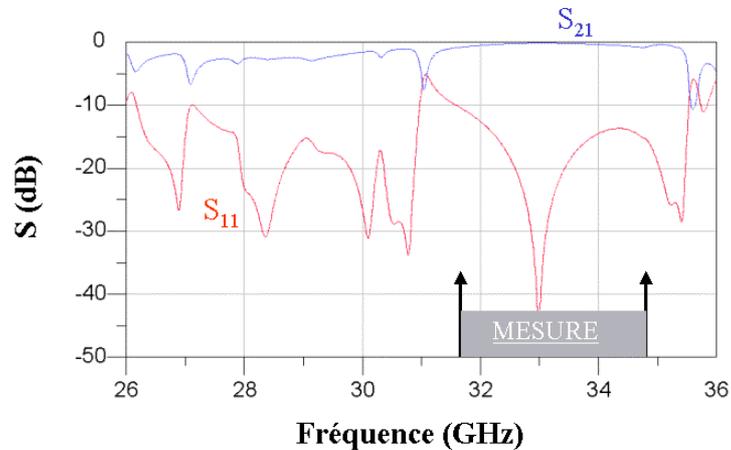


Figure IV-39. Résultat théoriques pour un gap considéré de $150 \mu m$. Les flèches verticales délimitent la bande passante expérimentalement obtenue.

A partir de ce résultat, nous pouvons alors conclure que ce gap est bien la principale raison de la diminution de la bande passante observée sur le guide expérimental.

Afin d'essayer de rectifier la courbure présente sur les pièces de type A, un recuit chargé est accompli. Ceci consiste simplement à effectuer une nouvelle cuisson de ces pièces en leur appliquant un poids afin de récupérer la déformation. Cette solution n'a

malheureusement pas permis d'améliorer les performances et une autre alternative doit être trouvée pour ramener la bande passante expérimentale à sa valeur théoriquement attendue.

La baisse des performances vient, comme nous venons de le voir, directement des gaps apparaissant lors de l'assemblage des pièces composant la structure. L'idéal serait alors de limiter encore plus le nombre de pièces à assembler, voire de complètement **se passer** de l'assemblage. C'est sur cette idée que nous avons décidé de relever le défi technologique de fabriquer le guide d'onde BIE en une seule pièce par stéréolithographie.

IV.4. Fabrication *monobloc* par stéréolithographie 3D.

La même structure que précédemment est alors réalisée en une seule pièce. Il faut noter que cette tentative est à notre connaissance une première car aucune équipe n'a jusqu'à maintenant réalisée une structure céramique de cette complexité fabriquée en une seule pièce autrement que par le soutien d'un moule [17].

La Figure IV-40 présente une photographie de la pièce obtenue.

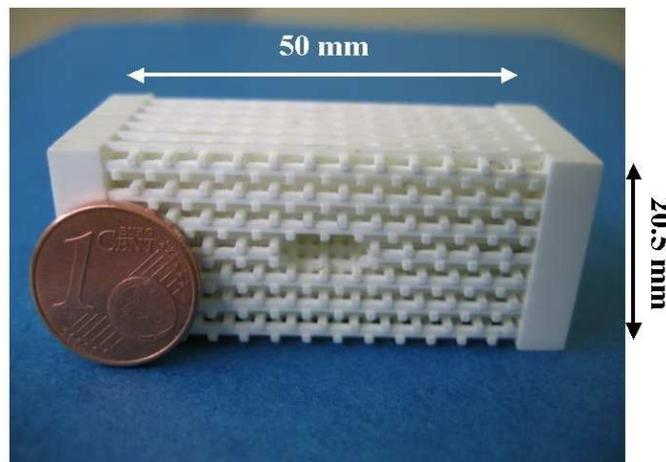


Figure IV-40. Guide BIE réalisé en une seule pièce par stéréolithographie 3D.

Sur cette pièce, aucun gap n'apparaît au niveau du défaut d'air traversant le tas de bois en zircone. Le guide d'onde BIE présente une configuration identique à celle attendue.

Ce guide est alors placé dans le même support en laiton que celui utilisé pour le guide précédent. Il est de même connecté à une paire de guide WR28 pour sa mesure en fréquence.

La mesure du guide BIE est quant à elle présentée sur la Figure IV-41.

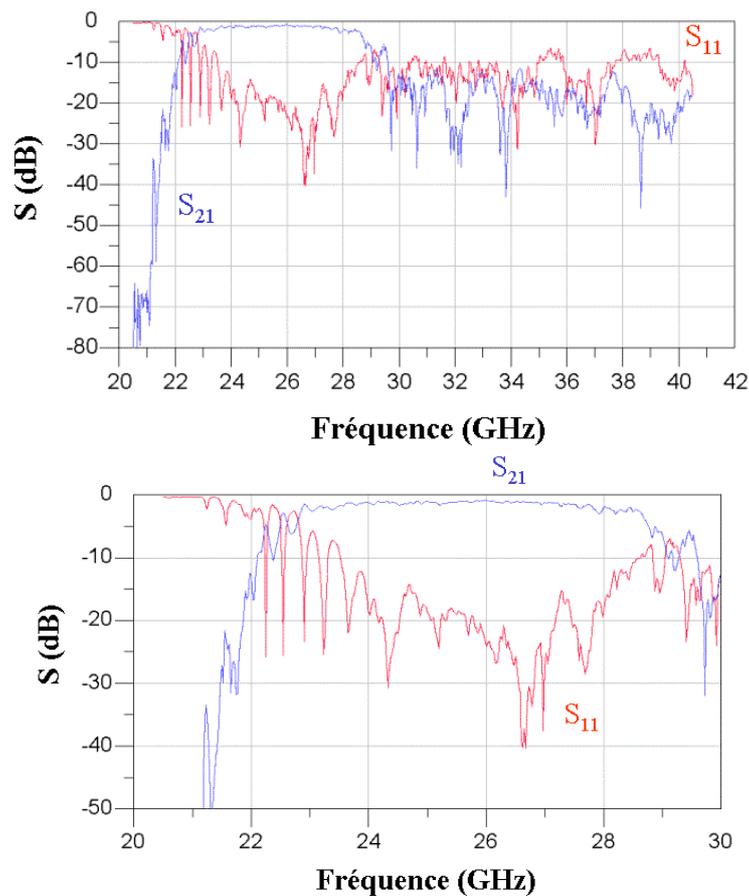


Figure IV-41. Réponse en fréquence large bande et autour de 26 GHz du guide BIE.

Nous obtenons ici une bande passante bien plus large de 20% autour de 26 GHz sur laquelle le coefficient de réflexion reste inférieur à -10 dB.

Cette bande passante est ici trois fois plus importante que celle obtenue sur le précédent guide BIE. Cependant la fréquence centrale de celle-ci est décalée de 4.5 GHz par rapport à la valeur théorique qui est de 30.5 GHz. La coupure basse du guide WR28 ne nous permet pas de connaître l'étendue expérimentale de la BIE du tas de bois (bande passante théorique de 30%).

Pour comprendre cette dégradation des performances, une observation attentive du guide est effectuée. Il apparaît que les tiges suivant la direction Oy sont « noyées » dans la tiges suivant Ox au lieu de n'être que posées sur ces dernières.

Pour tenir compte du retrait lors de la cuisson des céramiques, la pièce crue est réalisée plus grande que la pièce objective. Il y a pour cela un traitement logiciel entre les dimensions objectives et les dimensions de réalisation. Un problème logiciel est survenu lors de la

conversion et a fait que les dimensions de la pièce crue (et par conséquent celles de la pièce cuite) ne respectent pas les dimensions objectives.

Nous pouvons néanmoins penser que la variation dans la géométrie de la cellule élémentaire du tas de bois est principalement à l'origine du décalage de la fréquence centrale de la bande passante.

Par manque de temps, nous n'avons pas refait une fabrication avec les bonnes dimensions pour la structure.

Néanmoins nous pensons que le concept est validé et nous allons par la suite nous servir de nouveau de ce procédé (en tenant compte du problème de conversion logiciel).

IV.5. Conclusion

Les objectifs fixés pour cette étude ont été atteints. Nous avons en effet obtenu un guide BIE fonctionnel dans la bande Ka qui présente à notre connaissance une des bandes passantes les plus grandes jamais atteinte pour ce type de guide.

Nous avons aussi fabriqué un cristal à bande interdite électromagnétique 3D possédant l'une des plus grande bande interdite jamais mesurée à ce jour grâce à l'utilisation d'une céramique à haute permittivité.

Nous avons de même validé le choix de la stéréolithographie pour la fabrication de telles cristaux 3D et autres structures guidantes BIE. En effet, un guide BIE a été totalement fabriqué en une seule pièce par ce procédé. Ce résultat est très important car nous présentons ici une structure complexe qui ne demande aucun assemblage ou autres manipulations pour être fonctionnel.

Le guidage par l'utilisation de cristaux BIE 3D se révèle ici tout à fait viable dans le domaine des longueurs d'onde millimétriques. Il faut remarquer que nous avons ici choisi d'optimiser ces différents défauts dans le cristal 3D afin d'obtenir la bande passante la plus large possible. Aussi et comme nous l'avons vu dans les propriétés du tas de bois, il est tout à fait possible, en jouant sur les paramètres géométriques du cristal, de fixer à volonté la largeur et la position de cette bande passante en redéfinissant la position fréquentielle et la taille de la bande interdite du cristal entourant le défaut linéaire. Nous disposons donc ici d'une structure

très souple dont les propriétés fréquentielles peuvent être définies à volonté par une optimisation de la géométrie du guide, pour un matériau donné.

Les travaux entrepris dans le Chapitre 3 ont montré qu'une cavité métalldiélectrique pouvait potentiellement donner des facteurs de qualités supérieurs à ceux donnés par des cavités métalliques classiques. Ce comportement a été mis en évidence grâce à la répartition des pertes partagées entre les pertes diélectriques et métalliques.

Une question se pose alors : si l'on disposait d'un élément résonant dont les pertes provenaient *uniquement* de pertes diélectriques, serait-on capable d'obtenir des facteurs de qualités à même de rivaliser avec ceux obtenus par des cavités métalliques ? Et si oui, quelle structure serait à même de donner un tel résultat en s'affranchissant totalement de la présence de métal ?

C'est pour répondre à ces deux interrogations que la partie suivante va s'intéresser à une autre application des cristaux à bande interdite électromagnétique 3D, à savoir les cavités résonantes par défaut ponctuel.

V. Cavités à haut facteur de qualité dans un cristal 3D.

V.1. Introduction

Historiquement, la création de défaut ponctuel au sein d'un cristal 3D a été la première application des cristaux BIE 3D [29]. Les études suivantes ont mis en évidence certains comportements intéressants concernant ces cavités particulières. Tout d'abord, il apparaît que le facteur de qualité à vide de ces défauts ponctuels est directement lié au nombre de périodes du cristal l'entourant [30]. Dans le cristal 3D en tas de bois étudié dans ce papier, il apparaît théoriquement que des valeurs extrêmement élevées de Q_0 , supérieures à 1000000, peuvent être atteintes. Ce résultat théorique n'est cependant valable qu'en considérant des tailles de

tiges composant ce tas de bois de dimensions infinies. Expérimentalement des valeurs de seulement 2500 ont été obtenues pour une cavité résonante placée dans un tas de bois en alumine.

Des travaux théoriques similaires sur un même défaut au sein d'un tas de bois ont effectivement confirmé que le facteur de qualité à vide évoluait très sensiblement en fonction du nombre d'étages de tas de bois empilés au dessus et au dessous du défaut [31]. Il est ainsi montré que dans un cristal de dimensions finies, une cavité résonante prise en sandwich entre plus de quatre périodes d'empilement du cristal pouvait présenter des facteurs de qualité à vide supérieur à 10000. Une conclusion intéressante avancée par cet article est aussi donné sur le fait que la taille, la forme et la position du défaut peut modifier la fréquence de résonance de celui-ci.

La dépendance de Q_0 par rapport au nombre de périodes du cristal BIE entourant le défaut est aujourd'hui bien connu et a été liée à la qualité de confinement du cristal. Comme l'a par exemple synthétisé Chappell et Gong dans [32] dans leur étude concernant une cavité résonante créée au sein d'un réseau 2D de tiges, les sources de pertes sont de trois natures :

- Métallique
- Diélectrique
- Radiation

Le facteur de qualité à vide peu alors se décomposé comme ceci :

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_{\text{diélectrique}}} + \frac{1}{Q_{\text{métal}}} + \frac{1}{Q_{\text{fuite}}}$$

où $Q_{\text{diélectrique}}$, $Q_{\text{métal}}$ et Q_{fuite} représentent respectivement les paramètres liés aux pertes diélectriques, pertes métalliques et pertes par radiation.

NB : leur structure présente ici un facteur de qualité à vide de 760 à 20.4 GHz dans une structure périodique 2D faite de tiges de titane dans un substrat de Duroid.

De façon naturelle, il convient alors, si l'on veut obtenir un facteur de qualité à vide élevé, que le métal utilisé présente une bonne conductivité, le matériau diélectrique utilisé de faibles pertes et enfin que les fuites soient limitées, voire supprimées.

La façon de limiter les pertes par radiation repose uniquement dans une telle structure sur deux points qui sont le nombre de périodes entourant la cavité et le contraste d'indice présenté par le cristal. Comme nous l'avons vu dans le Chapitre 3, plus le contraste d'indice

et/ou le nombre de période d'un cristal BIE est élevé et plus son pouvoir réfléchissant se rapproche de 100%.

Ainsi, et comme l'a montré Lin *et al.* dans leur étude d'une cavité résonante au sein d'un cristal 2D composé de tiges d'alumine [33], si le nombre de périodes entourant ce défaut est suffisamment élevé, et donc à même de totalement supprimer les pertes par fuite, alors le facteur de qualité ne dépend *que* de la tangente de pertes du matériaux.

Pour résumer, il apparaît donc, dans le cas d'un cristal BIE uniquement composé de diélectrique, qu'un défaut en son sein présentera un coefficient de qualité à vide très élevé *si* il est entouré de suffisamment de période et *si* la tangente de pertes de ce matériau est très faible.

L'inconvénient majeur de cette configuration est que la structure résultante se retrouve beaucoup plus volumineuse que la cavité elle-même, même si le contraste d'indice élevé permettrait de limiter ces périodes à quelques unes seulement. L'idéal serait alors d'arriver à éliminer les fuites *sans* avoir à utiliser un nombre élevé de périodes autour du défaut.

Une solution consisterait, comme cela a été fait par Schuster *et al.* dans la référence [34] et Le Floch *et al.* dans la référence [35], à entourer le cristal d'une coque de métal fermée, éliminant ainsi toutes radiations. La contrepartie est bien évidemment que le métal rajouté amène des pertes et risque fortement de diminuer le facteur de qualité à vide de la cavité.

L'étude que nous allons développer dans ce chapitre repose alors sur l'idée que, dans le cas d'une cavité BIE blindée de métal, nous puissions profiter du fait que toutes pertes par radiation soit éliminées *tout en limitant* les pertes amenées par ce blindage. Pour arriver à ce compromis, nous allons étudier comment évolue la répartition des pertes métalliques et diélectriques dans une telle structure lorsque le nombre de périodes entourant le défaut est modifié. Nous pensons que, dans une configuration à déterminer, nous pourrions obtenir un pourcentage de pertes amenées par le métal suffisamment faible pour pouvoir profiter de la suppression des fuites grâce au blindage sans que le facteur de qualité à vide n'en soit diminué.

Nous cherchons donc à obtenir le meilleur compromis facteur de qualité à vide / nombre de périodes nécessaires.

La première étape consiste à faire cette investigation pour un cristal 3D BIE de type tas de bois en zircone. En effet, nous avons déjà montré que son fort contraste d'indice permet des qualités de confinement déjà très intéressantes sans avoir recours à un nombre de périodes très important.

V.2. Cavité dans un tas de bois en zircone.

La structure de test retenue s'inspire de la configuration choisie pour le guide BIE réalisé dans le tas de bois en zircone (voir paragraphe IV) et fonctionne dans la bande de fréquence Ka (26 – 40 GHz).

Nous conservons donc les mêmes paramètres géométriques qui sont :

- Taux de remplissage : 25%
- $h = 0.71$ mm
- Rapport h/w : 0.9, donc $w = 0.79$ mm

La seule différence avec le guide BIE est que maintenant le défaut ne traverse plus le cristal sur sa longueur mais est localisé au centre de celle-ci comme représenté sur la Figure IV-42.

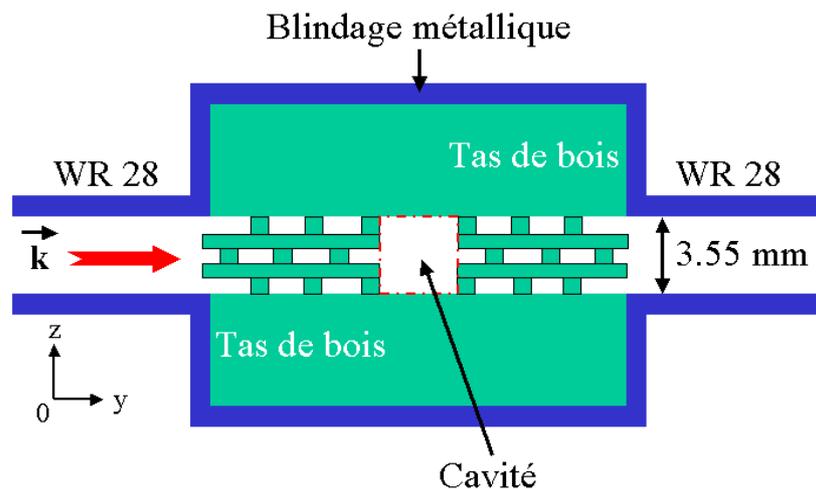


Figure IV-42. Vue de profil de la cavité insérée dans un tas de bois en zircone.

Le tas de bois en zircone est totalement entouré d'un blindage en laiton présentant une conductivité de $2.56 \cdot 10^6$ S/m. La cavité en son sein a une dimension de 8.67 mm par 2.37 mm par 3.55 mm. Cette cavité fonctionne sur son mode fondamental TM_{110} à 31.5 GHz.

NB : une cavité d'air blindée par du laiton et possédant les mêmes dimensions présente un facteur de qualité à vide égal à 2000 sur ce mode de résonance.

V.2.a. Etude théorique de la cavité.

Sur l'axe de propagation Oy , les périodes placées avant et après la cavité seront référencées comme les périodes Y . Pour cette première étude, nous fixons cette valeur à trois.

Ces tiges Y permettent de régler le coefficient de qualité extérieur. En fonction de leur nombre, la cavité sera plus ou moins excitée.

Les périodes placées sur les axes Ox et Oz seront respectivement appelées périodes X et périodes Z comme montrés sur la Figure IV-43.

Nous rappelons que pour cette simulation EM ainsi que pour les suivantes, la métallisation entourant le tas de bois présente une conductivité de $2.56 \cdot 10^7$ S/m. La céramique zircone présente une permittivité de 31.2 et une tangente de pertes de $1.8 \cdot 10^{-3}$.

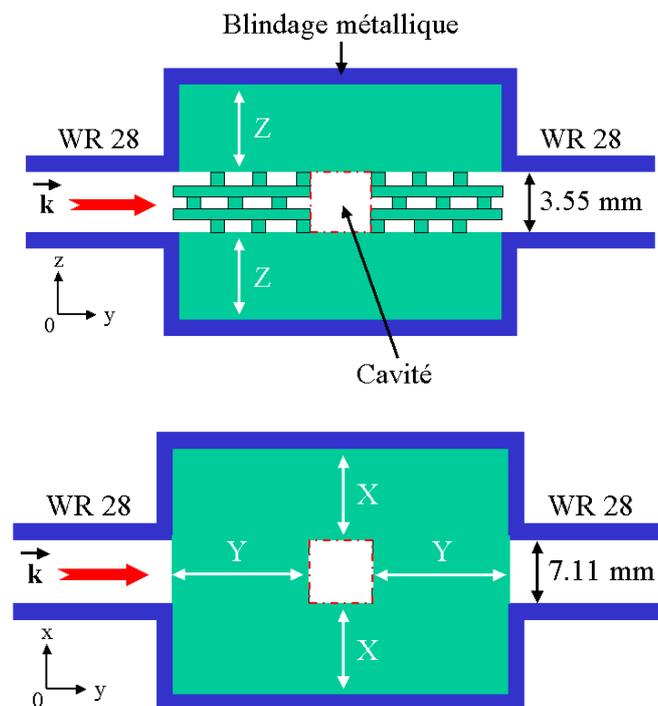


Figure IV-43. Vues en coupe de la cavité et de la définition des périodes X , Y et Z .

Ainsi les périodes Z représentent les périodes placées au-dessus et au-dessous de la cavité et les périodes X les périodes de chaque côté de la cavité.

Nous allons maintenant étudier l'évolution de Q_0 en fonction du nombre de périodes de périodes Z et X . Pour cela, une étude par simulation EM 3D en oscillations forcées est réalisée. Le facteur de qualité à vide est extrait de ce calcul. Nous établissons la répartition des pertes entre le blindage entourant le tas de bois et les pertes diélectriques présentées par la céramique zircone.

Pour définir cette répartition, nous effectuons simplement des simulations EM 3D qui ne tiennent compte que des pertes diélectriques, la conductivité du métal étant dans ce cas supposé infinie. Le facteur de qualité à vide relevé nous permet alors de connaître la répartition des pertes métalliques et diélectriques.

Les résultats sont résumés dans les tableaux I et II.

Nombre de périodes Z	Nombre de périodes X	Q_0	Pertes diélectriques (%)
1.5	2	900	81
2.5	2	950	98.7
3.5	2	950	99.9

Tableau I. Evolution du facteur de qualité à vide à 31.5 GHz et de la répartition des pertes en fonction du nombre de périodes Z .

Nombre de périodes Z	Nombre de périodes X	Q_0	Pertes diélectriques (%)
2.5	1	950	98.7
2.5	2	950	98.7
2.5	3	940	99.9

Tableau II. Evolution du facteur de qualité à vide à 31.5 GHz et de la répartition des pertes en fonction du nombre de périodes X .

Les valeurs de Q_0 obtenue grâce aux paramètres S simulés en appliquant la formule III.2 donnée dans le paragraphe II.3.a du Chapitre 3. La cavité résonne sur son mode fondamental TM_{110} à 31.7 GHz.

Sur ces deux tableaux, nous pouvons voir que plus le nombre de périodes de tas de bois est élevé et plus la réflexion opérée par ceux-ci est bien évidemment importante. Ainsi la quantité de champ arrivant sur les parois métalliques entourant le guide devient de plus en plus faible. Cela a pour conséquence de limiter, voire supprimer les pertes métalliques,

comme c'est le cas pour les configurations présentant le plus grand nombre de périodes X ou Z .

Nous pouvons aussi déduire de ces résultats que le meilleur compromis taille de la structure / facteur de qualité à vide se révèle être la configuration présentant 2 périodes Z et 1 période X .

Le rajout de périodes supplémentaires Z et/ou X n'a pour conséquence que d'augmenter la taille de la structure globale sans pour autant améliorer Q_0 .

Cette configuration est donc retenue pour la réalisation et présente une taille extérieure de 15 mm par 21.3 mm par 19.2 mm, soit un volume de près de 6.1 cm³. La Figure IV-44 présente la réponse en fréquence théorique de cette structure et une distribution du champ électrique dans la cavité à la résonance à 31.5 GHz. Les mêmes conditions de simulations qu'auparavant sont conservées.

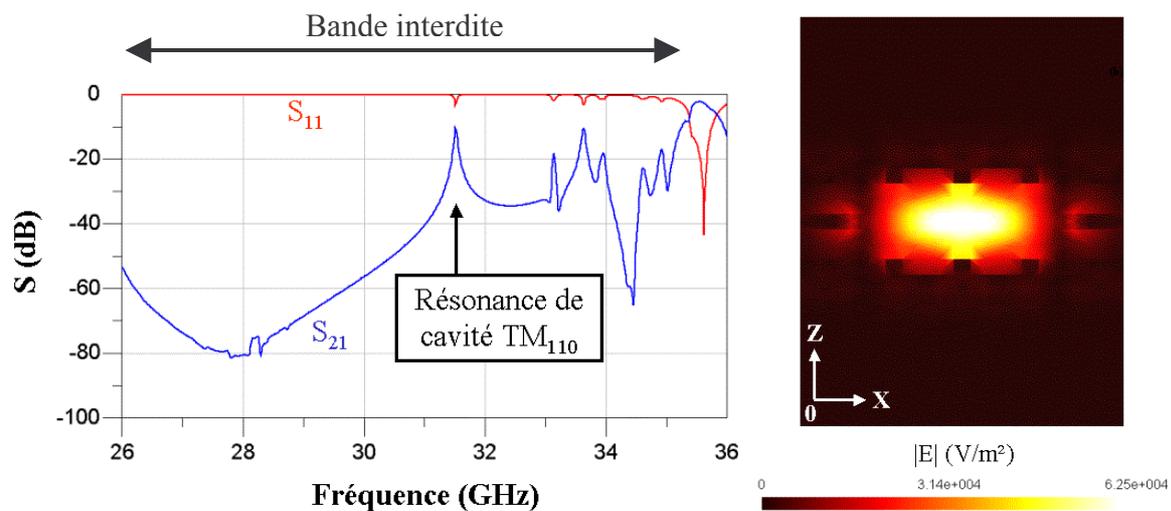


Figure IV-44. (gauche) Réponse en fréquence théorique de la cavité au sein d'un tas de bois en zircone et (droite) distribution du champ à la résonance de la cavité. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

La réponse en fréquence laisse apparaître des pics de résonance au delà de 33 GHz. Ces résonances parasites apparaissent dans la périphérie de la cavité et sont principalement dues à la géométrie particulière du cristal 3D global amenée par le positionnement de la cavité. Pour cette étude, nous n'avons pas cherché à éliminer ou repousser en fréquence ces résonances, l'objectif étant de pouvoir observer et mesurer la résonance de la cavité dans la

bande Ka. Nous avons en effet conservé le design conçu pour le guide BIE en zircon et notamment la largeur (selon l'axe x) que présentait le guide d'air au sein du tas de bois. Ce choix a été fait afin de conserver le design particulier du tas de bois que nous savions réalisable par la stéréolithographie. Une conception plus poussée concernant la géométrie et la position de la cavité résonante au sein du tas de bois permettrait de repousser en fréquence ces modes parasites.

Un faible niveau de transmission est obtenu à cause du nombre de périodes Y placées avant et après la cavité qui réduisent l'excitation de la cavité résonante.

La distribution de champ électrique fait quant à elle apparaître une forte concentration dans le défaut ponctuel au sein du cristal 3D. Comme le laissait supposer le faible pourcentage de pertes liées au blindage, peu de champ se retrouve au niveau de la métallisation.

Nous pouvons maintenant passer à la réalisation de la structure résonante par stéréolithographie.

V.2.b. Fabrication et mesure de la cavité BIE 3D.

La Figure IV-45 présente une photographie de la structure après cuisson.

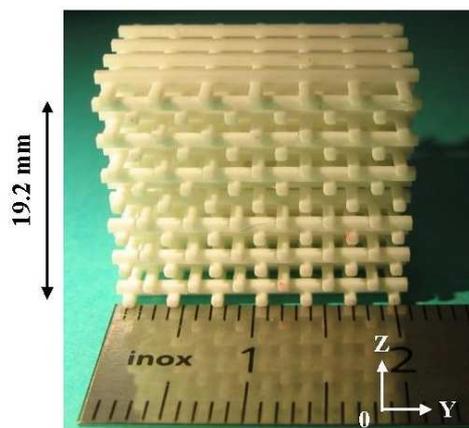


Figure IV-45. Photographie de la cavité BIE réalisée par stéréolithographie céramique.

Cet élément en céramique est ensuite placé dans un support en laiton équivalent à celui utilisé pour la mesure du guide BIE. Ce support permet la connexion des guides d'entrée et de sortie WR28 et donc sa mesure en fréquence.

Le résultat de celle-ci est présentée sur la Figure IV-46.

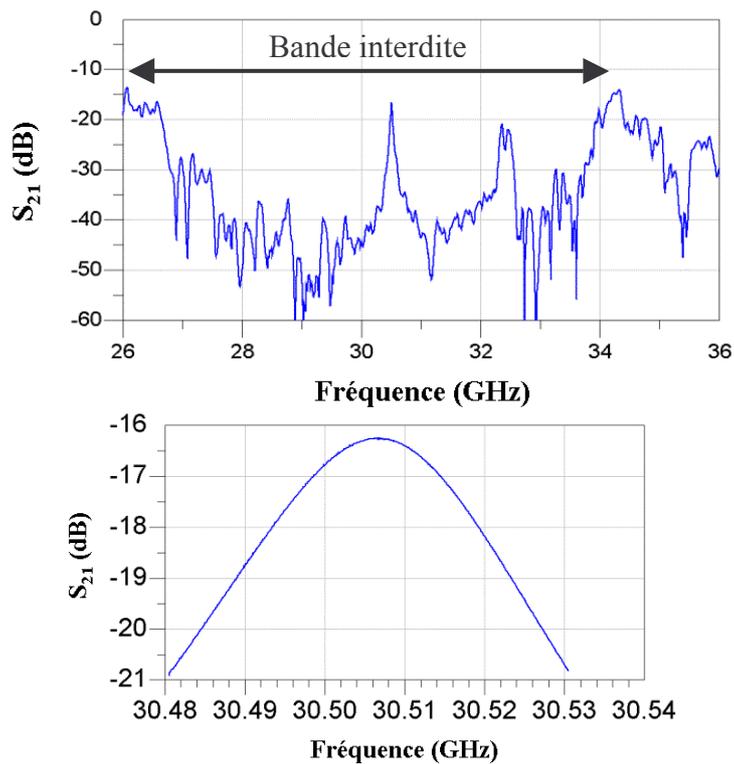


Figure IV-46. Réponse en fréquence expérimentale sur une large bande et autour de la fréquence de résonance de la cavité BIE.

La performances relevées à la résonance de cette cavité sont les suivantes :

- Fréquence de résonance : 30.507 GHz (théorie : 31.5 GHz)
- Coefficient de transmission : -16.25 dB
- Bande passante à -3 dB : 36.37 MHz
- Facteur de qualité expérimental : 990.

Le facteur de qualité est en bon accord avec la valeur attendue. Cependant, la fréquence de résonance est décalée de près de 3%. Afin de comprendre ce décalage, les dimensions des tiges sont vérifiées attentivement et nous obtenons les valeurs suivantes :

- Largeur des tiges orientées selon O_y : 0.9 mm (théorie : 0.79 mm)
- Périodicité selon O_y : 2.35 mm (théorie : 2.37 mm)
- Largeur des tiges orientées selon O_x : 0.77 mm (théorie : 0.79 mm)
- Périodicité selon O_x : 2.35 mm (théorie : 2.37 mm)
- Hauteur moyenne des tiges : 0.75 mm (théorie : 0.71 mm)

Nous relevons un très bon respect de la périodicité des tiges et une augmentation importante (+14%) de la largeur des tiges orientées selon Oy. Les tolérances de fabrication sur les dimensions des autres tiges varie de 2.5 à 5.5%.

Une caractérisation diélectrique de la zircone est de même réalisée à l'aide d'un résonateur cylindrique en zircone placé dans une cavité en Cuivre. Le protocole suivi est le même que celui décrit dans le Chapitre 2.

Cette caractérisation nous donne alors les valeurs suivantes à 30 GHz :

- Permittivité : 32.6
- Tangente de pertes : $3.2 \cdot 10^{-3}$

Les valeurs relevées ici sont légèrement différentes des valeurs de références utilisées pour la synthèse stéréolithographique qui étaient respectivement 31.2 et $1.8 \cdot 10^{-3}$.

Avec ces nouvelles données, une rétro-simulation est alors effectuée afin de confirmer la réponse en fréquence obtenue expérimentalement. Le résultat de cette simulation est visible sur la Figure IV-47.

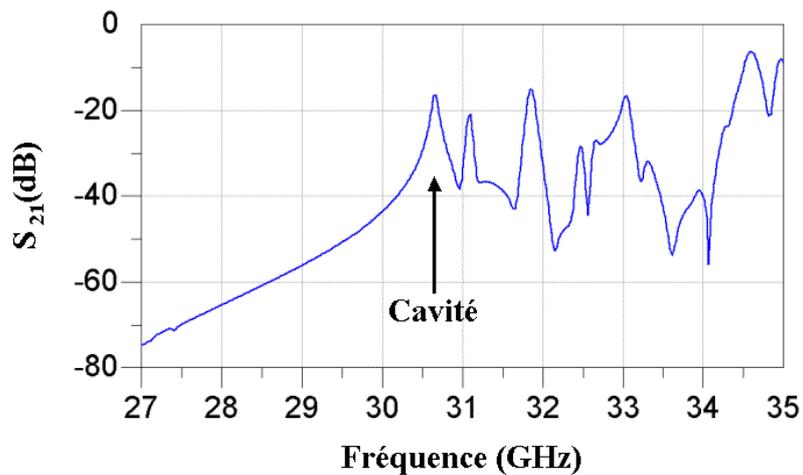


Figure IV-47. Réponse en fréquence de la cavité BIE rétro-simulée en fonction des nouvelles données expérimentales.

La cavité résonne alors à 30.67 GHz (30.507 en mesure), soit un décalage de presque 1GHz vers les basses fréquences par rapport aux précédents calculs théoriques. Le facteur de qualité à vide relevé ici reste aux alentours de 900.

Cette rétro-simulation met ici en évidence que la légère augmentation de la permittivité de la céramique et de la taille de certaines des tiges présentes dans le tas de bois est à l'origine du décalage en fréquence observé sur la mesure.

Compte tenu de ces différents résultats, nous pouvons dire que nous avons validé expérimentalement la création d'une cavité résonante au sein d'un cristal BIE 3D grâce à la stéréolithographie. Néanmoins, l'utilisation de la zircone ne permet pas d'obtenir des facteurs de qualité à vide élevés. En effet, ce matériau présente une tangente de pertes qui induit de fortes pertes diélectriques.

Puisque pour cette structure résonante nous avons montré que la grande majorité (~99%) des pertes étaient dues aux pertes diélectriques, l'utilisation de matériaux faibles pertes diélectriques devrait permettre de fortement améliorer le Q_0 . C'est ce que nous nous proposons d'étudier dans le paragraphe suivant.

V.2.c. Augmentation du facteur de qualité-Analyse théorique.

Nous avons conservé la configuration précédente à savoir une période X , trois périodes Y et deux périodes Z . Nous avons alors fait varier par simulation la tangente de pertes du matériau céramique tout en conservant une permittivité relative égale à 31. A partir des simulations EM 3D en oscillations forcées réalisées avec EMXD, nous avons relevé l'évolution du facteur de qualité à vide en fonction des pertes diélectriques. Les résultats obtenus sont présentés sur la Figure IV-48.

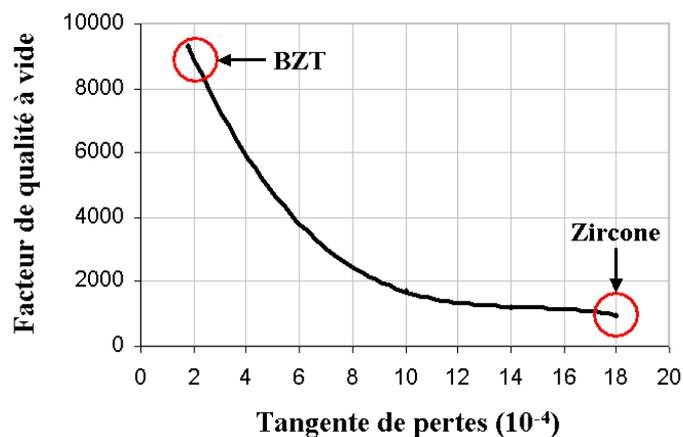


Figure IV-48. Evolution du facteur de qualité à vide en fonction de la tangente de pertes du matériau. Ce dernier présente une permittivité de 31.2

Nous pouvons remarquer que le facteur de qualité dépend directement de la tangente de pertes présentée par le matériau céramique et que de forts facteurs de qualité peuvent être atteints pour les valeurs les plus faibles de $\tan \delta$.

Sur la Figure IV-48 sont aussi mis en avant les facteurs de qualité obtenus pour le zircon et potentiellement atteignable avec la céramique BZT dont le développement pour la stéréolithographie a été présenté en détail dans le Chapitre 3.

Cette céramique, dont la compatibilité avec la stéréolithographie a été montrée, présente des propriétés qui sont une permittivité de l'ordre de 30 et une tangente de pertes de $2 \cdot 10^{-4}$ à 30 GHz. Ainsi, pour une cavité BIE de mêmes dimensions que celles fixées pour la cavité précédemment réalisée en zircon, nous pourrions potentiellement atteindre des facteurs de qualité autour de 9300. Comme le montre la Figure IV-48, des facteurs de qualité de 10 000 et au-delà peuvent être atteignables pour des valeurs de tangente de pertes inférieures ou égales à $1 \cdot 10^{-4}$.

Il est intéressant à ce moment de l'étude de regarder quelles performances peuvent être atteintes par l'utilisation de cavités résonantes métalliques cylindriques. En effet, ces dernières sont utilisées d'une façon très standard sur leur mode TE_{113} lorsque des hauts facteurs de qualité à vide sont requis. Prenons le cas classique d'une cavité de 16.5 mm de hauteur et d'un rayon de 7 mm remplie d'air et blindée avec du laiton. Pour un volume occupé de 2.54 cm^3 , un facteur de qualité de près de 10000 peut être obtenu à 30GHz.

La structure que nous proposons présente, pour un volume sensiblement plus grand (6.1 cm^3), un facteur de qualité qui, comme nous l'avons vu, dépend essentiellement de la tangente de pertes du matériau et donc peut potentiellement dépasser les 10000 si nous utilisons la céramique faibles pertes adéquates présentant une tangente de pertes inférieure à $1 \cdot 10^{-4}$. De plus et comme nous l'avons vu dans le Chapitre 3, les céramiques que nous utilisons présentent la très intéressante particularité de ne pas se déformer lors de variations de températures. Ainsi et contrairement aux cavités métalliques, les cavités BIE ne risquent pas de voir leur fréquence de résonance changer lorsque son environnement varie en température.

Nous soulignons aussi le fait que la plupart des céramiques présentées dans ce chapitre possède une excellente résistance aux chocs et autres contraintes physiques et mécaniques, rendant l'utilisation de cavité BIE à base de céramique des plus pertinentes comme alternative aux cavités métalliques cylindriques classiques. Les caractéristiques de la zircon et de l'alumine sont notamment données à la fin de la partie IV du Chapitre 3.

Ce résultat est très important et ouvre ici un axe de recherche qui encourage l'utilisation et le développement de céramiques à forte permittivité et faible tangente de pertes comme le BZT pour l'obtention de valeurs très élevées de Q_0 .

Le procédé de stéréolithographie associé à cette céramique est actuellement en cours de développement et la réalisation de telles cavités avec ce matériau céramique fera l'objet d'une prochaine étude.

A partir de ce résultat, de faibles valeurs de pertes diélectriques s'avèrent être fondamentales pour l'obtention de facteurs de qualité à vide élevés. C'est ainsi que, considérant les excellentes tangentes de pertes présentées par l'alumine développée avec le CTTC, nous avons procédé à une nouvelle étude.

V.3. Cavité résonante dans un tas de bois en alumine.

V.3.a. Introduction

Initialement une étude prospective avait été menée afin d'évaluer les potentialités d'une telle structure en alumine.

La configuration du tas de bois choisie, découlant de l'étude sur le guide d'onde BIE en Silicium, était la suivante :

- Taux de remplissage : 25%
- $h = 1.18$ mm
- Rapport h/w : 1.16, donc $w = 1.016$ mm

Cette configuration se basait alors sur la première composition d'alumine utilisée pour la stéréolithographie qui présentait alors les propriétés suivantes :

- permittivité relative : 8.3
- tangente de perte : $1.3 \cdot 10^{-4}$

La cavité d'air au sein du tas de bois présente une taille de 9.144 mm par 11.176 mm par 3.54 mm et le tas de bois en lui même se base sur la configuration développé pour le guide BIE en Silicium présenté dans la partie IV. Cette cavité fonctionne sur son mode TM_{120} et a été choisi car la configuration de tiges entourant cette cavité d'air s'intègre aisément dans le cristal 3D retenu et produit une fréquence de résonance à 33.46 GHz, au milieu de la bande Ka choisie pour cette étude.

V.3.b. Optimisation de la cavité BIE alumine

En reprenant la description $\{X, Y$ et $Z\}$ utilisée pour décrire le nombre de périodes entourant la cavité sur les axes Ox , Oy et Oz , l'évolution du facteur de qualité à vide de cette cavité a été étudiée en fonction du nombres de périodes X et Z , le nombre de périodes Y étant fixé arbitrairement à deux. Les Tableaux III et IV présentent les résultats de cette pré-étude qui mettait aussi en relief la répartition des pertes entre les pertes diélectriques liées à la céramique utilisée (alumine dont les propriétés sont décrites plus haut) et les pertes métalliques liées au blindage en laiton ($\sigma = 2.56 \cdot 10^7$ S/m) entourant le cristal BIE 3D.

Nombre de périodes Z	Nombre de périodes X	Q_0	Pertes diélectriques (%)
1	2	6800	54.5
2	2	11400	82
3	2	11600	87.5

Tableau III. Evolution du facteur de qualité à vide à 33.46 GHz et de la répartition des pertes en fonction du nombre de périodes Z .

La configuration présentant 2 périodes Z s'avère être un bon compromis entre le facteur de qualité à vide et le nombre de périodes. En effet le passage de 2 à 3 périodes n'augmente pas significativement Q_0 : +1.75% sur Q_0 pour 17.3% en volume de plus.

Nombre de périodes Z	Nombre de périodes X	Q_0	Pertes diélectriques (%)
2	1	8200	64
2	2	11400	82
2	3	11900	85.5

Tableau IV. Evolution du facteur de qualité à vide à 33.46 GHz et de la répartition des pertes en fonction du nombre de périodes X .

La configuration présentant 2 périodes X s'avère être un bon compromis entre le facteur de qualité à vide et le nombre de périodes. En effet le passage de 2 à 3 périodes n'amène pas non plus de gain remarquable sur Q_0 : +4.68% sur Q_0 pour 14.8% en volume de plus.

Ainsi, le meilleur compromis offert par cette configuration, à savoir deux périodes X et Z permet d'obtenir un facteur de qualité à vide aux alentours de 11 000 à 33.46 GHz. La Figure IV-50 présente la réponse en fréquence de cette configuration.

Il est à noter que les pertes métalliques sont assez élevées dans cette configuration (18%) comparativement à la cavité BIE en zircone où elles n'étaient que de 1.3%. A cause de la plus faible permittivité relative de l'alumine, l'énergie n'est pas complètement confinée par le diélectrique et il y a alors des réflexions sur le blindage métallique. Comme nous pouvons le voir sur la Figure IV-49, de nombreux modes parasites apparaissent sur la réponse en fréquence.

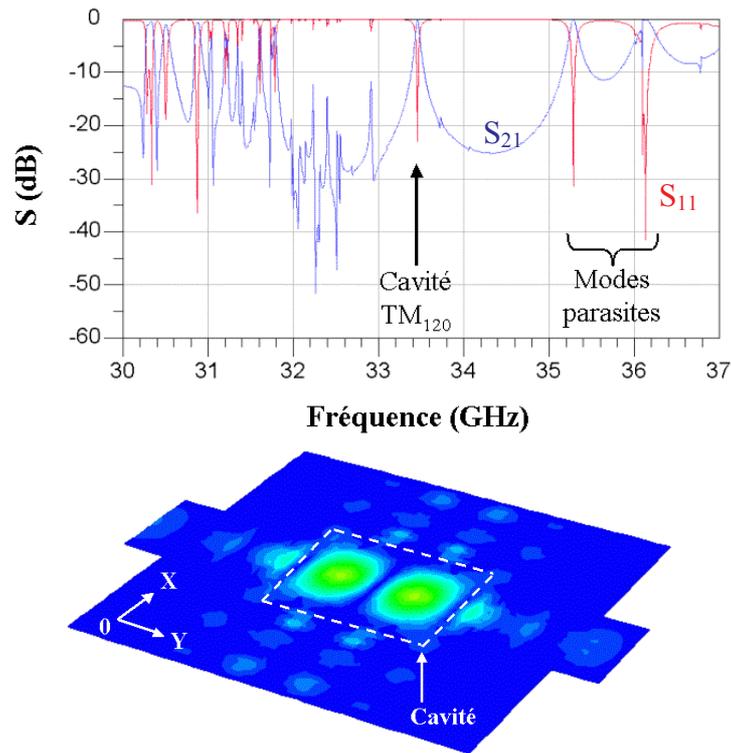


Figure IV-49. Réponse en fréquence de la cavité BIE en alumine et distribution de champ électrique à 33.46 GHz au niveau du plan de symétrie $x0z$ de la structure. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Nous pouvons voir que de nombreux modes parasites apparaissent sur la réponse en fréquence. Ces différents modes proviennent du blindage du cristal 3D et donne naissance à de nombreux modes parasites dans le tas de bois. Les deux résonances vers 35.2 et 36.1 GHz sont plus particulièrement localisées dans le plan de symétrie artificiel donné au tas de bois (dans le plan $x0y$) comme montré sur la Figure IV-50.

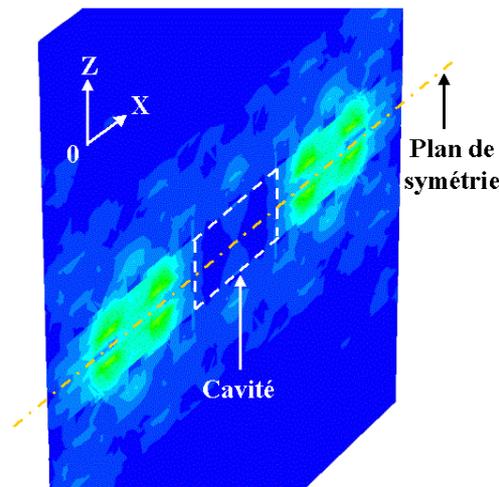


Figure IV-50. Distribution du champ électrique à 35.2 GHz pour une coupe dans le plan xOz au niveau de la cavité. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Le défaut structurel créé par cette symétrie nous a permis dans ce chapitre d'obtenir des guides BIE spécifiquement configurés pour nos besoins. Seulement en introduisant cette symétrie n'existant pas dans un tas de bois classique, il est probable que dans la zone centrale de notre structure nous ne retrouvions pas exactement le même comportement modal que dans un tas de bois homogène. Dans ce dernier, aucun mode ne peut exister dans la bande interdite ; dans notre cas par contre, nous pouvons voir qu'au moins deux modes existent, modes qui sont d'ailleurs excités et qui apparaissent sur la réponse en fréquence.

Pour cette étude prospective, étant donné que ces modes sont suffisamment loin de la résonance de la cavité, aucune retouche spécifique n'est effectuée sur la structure considérée.

NB : il faut cependant comprendre que dans le cas d'une investigation plus poussée, ces différents modes devront être très attentivement considérés car ils amènent une réduction importante de l'isolation fréquentielle autour de la résonance de la cavité BIE. Une modification de l'arrangement des tiges au niveau de la symétrie serait un moyen de repousser voire de supprimer la présence des modes parasites.

La structure entière occuperait en ordre de marche un volume égal à 43 fois le volume de la cavité, soit 18.65 cm^3 répartis comme suit et montré sur la Figure IV-51 :

- largeur : 27.43 mm
- longueur : 27.43 mm
- hauteur : 24.78 mm

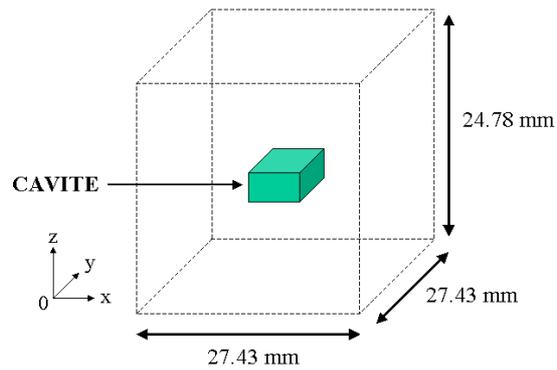


Figure IV-51. Dimensions globales du tas de bois en alumine.

Cette configuration se révèle être environ 3.5 fois plus volumineuse que la cavité BIE équivalente en BZT. Cet inconvénient peut se révéler rédhibitoire pour certaines applications.

Nous avons cependant poursuivi notre étude en considérant l'alumine décrite au paragraphe VI du Chapitre 2. Celle-ci présente des pertes diélectriques près de 2.5 fois inférieures à la précédente composition. Elle présente aussi une permittivité relative de 9 au lieu de 8.3. Aux vues des résultats de l'étude de la partie V.2.c, il s'avère évident que la diminution de la tangente de pertes ne pourra qu'améliorer le facteur de qualité.

Ainsi, pour cette nouvelle composition, le facteur de qualité à vide passe de 11400 à 12500 pour la résonance de la cavité à 33.07 GHz, soit une augmentation de près de 10% sur Q_0 . Cependant celle-ci se révèle plus faible que ce que nous espérions.

NB : la fréquence de résonance de la cavité BIE est plus faible que précédemment (33.46 GHz) à cause de la permittivité relative plus élevée de l'alumine maintenant utilisée.

La Figure IV-52 présente la répartition du champ électrique à la résonance de la cavité.

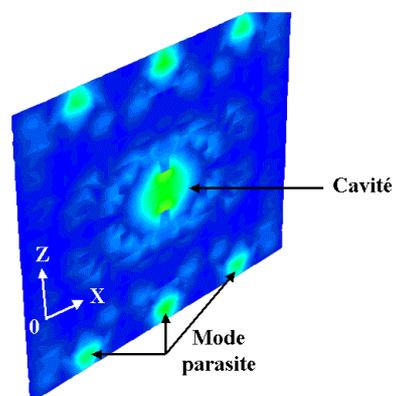


Figure IV-52. Distribution du champ électrique à 33.07 GHz pour une coupe dans le plan $x0z$ au niveau de la cavité. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Nous observons clairement une concentration de champ électrique au niveau du blindage supérieur et inférieur de la structure. Pour empêcher le champ électrique de s'installer au niveau du blindage métallique supérieur et inférieur, nous modifions légèrement la configuration présentée par le tas de bois à ces endroits. Nous supprimons ainsi un étage respectivement sur le haut et sur le bas de la structure globale.

Cette légère modification a permis d'éliminer la résonance apparaissant au niveau du blindage et le facteur de qualité à vide simulé se retrouve augmenté de 12500 à près de 31700.

Ce comportement se rapproche des conclusions amenées dans [35] pour une cavité résonante cylindrique constituée de miroirs de Bragg blindée métalliquement. Ces travaux ont montré qu'il existe une configuration géométrique optimale pour une telle structure (cavité BIE blindée) qui permet d'obtenir des facteurs de qualité à vide très élevés.

Cette augmentation extrêmement importante rend alors la réalisation de cavité BIE au sein d'un tas de bois alumine des plus pertinentes.

Cependant la résolution de ce problème en soulève un autre bien plus important. Il faut en effet maintenant comprendre que, dans le cas considéré qui consiste à blinder totalement le tas de bois, la moindre variation structurelle de la pièce céramique peut donner naissance à un ou plusieurs modes parasites qui peuvent très fortement dégrader le facteur de qualité à vide de la cavité.

Il convient alors, lors du design de telles structures, de profiter de la précision de simulation offerte par la résolution par la méthode des éléments finis pour éliminer au maximum tout mode parasite susceptible d'exister.

Du point de vue expérimental, il faudra aussi veiller à ce qu'aucune déformation structurelle majeure ne vienne modifier la configuration définie théoriquement sous peine de se retrouver très fortement pénalisé au niveau des performances mesurées.

L'utilisation de telles cavités présentant de très forts facteurs de qualité peut être des plus pertinentes pour la réalisation de fonctions de filtrage associant plusieurs de ces éléments résonants entre eux. La définition des fonctions de filtrage selon un gabarit fixé nécessite notamment que les coefficients de qualité extérieurs d'un résonateur présentent des valeurs appropriées.

Ainsi une étude supplémentaire est envisagée sur les périodes Y afin de pouvoir régler au mieux ce paramètre et ainsi prouver que l'utilisation de tels éléments résonants est compatible avec la réalisation de filtres multipôles.

V.3.c. Optimisation du coefficient de qualité extérieur de la cavité BIE.

Nous reprenons la configuration optimale définie dans le paragraphe précédent à savoir deux périodes X et Z pour la cavité d'air au sein du tas de bois en alumine.

Cette fois nous allons étudier l'évolution du facteur de qualité à vide de la cavité ainsi que du facteur de qualité extérieur pour différentes périodes Y .

Le Tableau V résume les résultats obtenus.

Nombre de périodes Y	Q_0	Q_e
3	32100	9400
2	31700	1050
1	24900	110

Tableau V. Evolution des facteurs de qualité à vide (Q_0) et de qualité extérieur Q_e en fonction du nombre de périodes Y .

Du point de vue du facteur de qualité extérieur, l'augmentation des périodes présentes avant et après la cavité sur l'axe Oy (qui correspond à l'axe de propagation) conduit à découpler la cavité en entrée / sortie comme le montre la forte augmentation de Q_e .

En se basant sur l'étude réalisée dans le Chapitre 3 sur la conception de filtres multipôles en bande Ka, il a été montré que le facteur de qualité extérieur requis pour des filtres à bande étroite ($\sim 1\%$) devait présenter une valeur proche de 100.

Dans cette optique, il apparaît alors que seule la configuration présentant une seule période Y se trouverait compatible avec un tel système de filtrage.

Cette étude amène une remarque supplémentaire : il n'existe à priori qu'un nombre discret de valeurs que peut prendre Q_e . En effet, en conservant les configurations présentes par le cristal 3D, les combinaisons possibles pour les tiges disposées avant et après la cavité se révèlent peu nombreuses. Ainsi, la souplesse sur le coefficient de qualité extérieur nécessaire pour la réalisation de fonction de filtrage se retrouve assez limitée.

C'est sur ce constat que nous avons choisi d'introduire des iris de couplage couramment utilisés lors de la conception de filtre à base de cavités classiques [36], à savoir des iris de couplage. Ainsi, nous plaçons des plaques métalliques percées d'une fente rectangulaire à l'entrée et à la sortie de la structure dans le plan de transition entre le guide

standard et le tas de bois. Nous obtenons alors un moyen simple pour pouvoir régler plus finement les valeurs de Q_e en faisant varier la taille de cette fente.

Pour vérifier cela, nous plaçons de telles fentes alignées parfaitement avec la cavité et dont nous faisons varier la largeur comme montré sur la Figure IV-53.

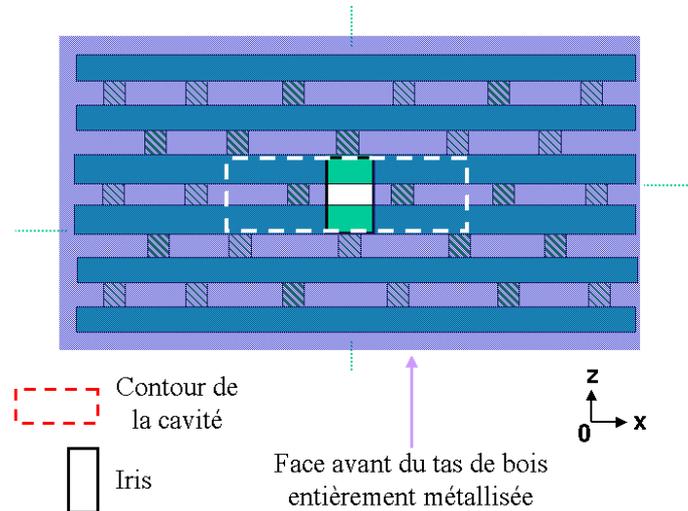


Figure IV-53. Face avant de la cavité BIE. Voir reproduction en couleur dans l'Annexe I.

Les faces avant et arrière de la cavité sont entièrement métallisées (comme les quatre autres faces du tas de bois) sauf au niveau des iris de couplage. Nous choisissons de donner à ces iris la même hauteur que celle de la cavité et de faire uniquement varier leur largeur.

La plage de variation est fixée entre 0 à 7.11 mm, cette dernière valeur correspondant à la largeur des guides WR28 dont nous nous servons pour l'excitation de la cavité. Comme sur les structures précédentes, ces guides se connectent sur les faces avant et arrières métallisées du cristal BIE 3D.

Le Tableau VI résume l'évolution des facteurs de qualité à vide et extérieur pour différentes valeurs de la largeur de l'iris.

Largeur de l'iris (mm)	Q_0	Q_e
7.1	24900	110
5	25400	80
3	17200	580

Tableau VI. Evolution du facteur de qualité à vide et facteur de qualité extérieur en fonction de la largeur de l'iris de couplage.

Nous pouvons constater que la variation de la largeur de l'iris de couplage permet d'obtenir une large gamme de facteur de qualité extérieur et donc permet potentiellement à la cavité BIE de s'adapter à un large choix de fonctions de filtrage.

Dans un premier temps, la cavité BIE présentant deux périodes X , Y et Z est choisie pour être fabriquée. Elle a été préférée à celle présentant une seule période Y afin de vérifier expérimentalement qu'un facteur de qualité à vide très élevé peut effectivement être atteint.

L'utilisation des iris de couplage permettra de plus par leur souplesse d'utilisation de relever la réponse de notre structure pour une forte et faible excitation.

V.3.d. Mesure de la cavité BIE en alumine.

La Figure IV-54 présente une photographie de la cavité BIE réalisée en alumine par stéréolithographie céramique 3D.

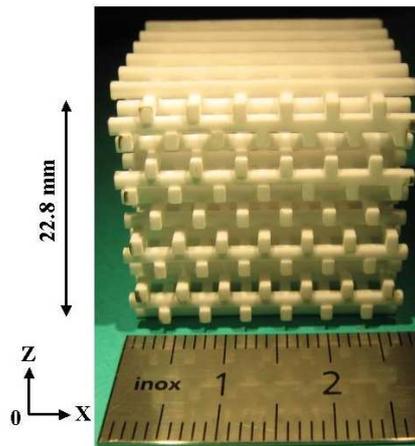


Figure IV-54. Cavité BIE en alumine réalisée par stéréolithographie 3D.

La vérification des dimensions de cette structure donne les résultats suivants :

- Tolérance de fabrication sur la périodicité des tiges : 5%
- Tolérance de fabrication sur la dimension des tiges : de 8 à 10%

La cavité BIE est ensuite insérée dans son support en laiton afin d'être connectée aux guides WR28 d'entrée et de sortie pour sa mesure avec un analyseur vectoriel de réseaux. Deux types d'iris sont placés entre le guide et le cristal 3D : l'un possédant une ouverture

correspondant à la dimension interne du guide WR28 d'excitation (7.11 mm par 3.55 mm) et l'autre ayant une largeur de 1 mm pour une hauteur de 3.55 mm. Ces deux iris permettront de mesurer la réponse en fréquence de la cavité respectivement pour une forte et faible excitation et d'établir la valeur expérimentale du facteur de qualité à vide.

Les résultats pour un iris de 7.11 mm de large sont présentés sur la Figure IV-55. Ils sont comparés aux résultats théoriques donnés par des simulations en oscillations forcées.

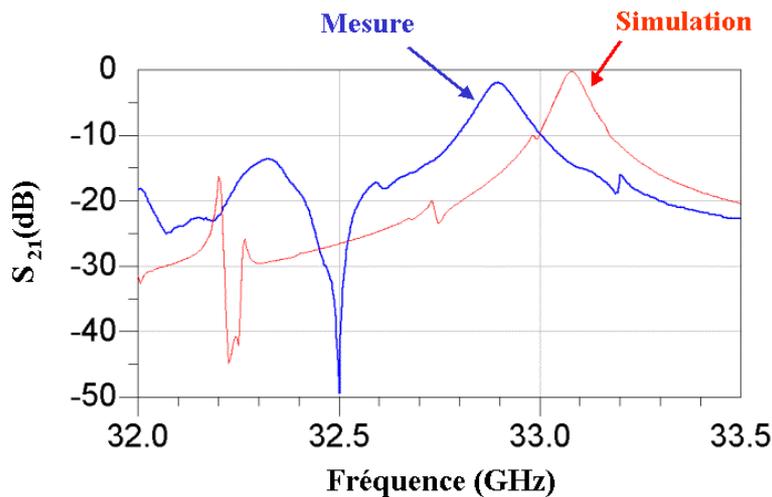


Figure IV-55. Réponses en fréquence expérimentale et simulée de la cavité BIE en alumine.

Le Tableau VII résume et compare les résultats simulés et expérimentaux.

	Fréquence centrale (GHz)	S_{12} max (dB)	Bande passante à -3 dB(MHz)
Simulation	33.07	-0.15	64
Mesure	32.89	-2.1	89

Tableau VII. Comparaison des performances théoriques et simulées de la cavité BIE fortement excitée.

Nous pouvons noter une bonne concordance entre la fréquence de résonance théorique et simulée puisque cette dernière ne présente un écart que de 0.6%. La cavité expérimentale présente des pertes d'insertions supérieures à ce qui était prévu. Elles sont attribuées à un contact non optimum des plaques métalliques avant et arrière sur le tas de bois, plaques sur lesquelles viennent se connecter les guides WR28 d'entrée et de sortie.

Le niveau des pertes d'insertion expérimental est également inférieur à la valeur théorique.

Afin d'en identifier la cause, un iris ne possédant qu'une largeur de 1 mm est utilisé. Ce dernier permettra de fortement découpler la cavité et ainsi de faciliter la mesure du facteur de qualité à vide.

Sur la Figure IV-56 est montrée la réponse en fréquence pour cette faible excitation entrée/sortie.

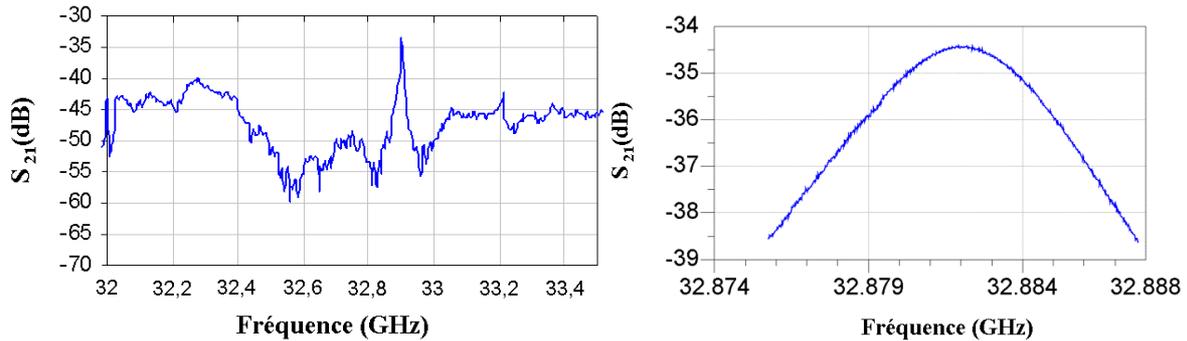


Figure IV-57. Réponse en fréquence expérimentale de la cavité BIE en alumine pour une excitation faible.

Le facteur de qualité expérimental relevé est de seulement 4000.

Nous pensons que cette nette baisse par rapport à la valeur théorique vient très certainement du contact non optimum du blindage métallique sur le cristal 3D et tout particulièrement au niveau des faces avant et arrière. Des rétro-simulations ont fait apparaître qu'un gap de seulement 100 μm entre la plaque métallique recevant le guide WR28 et le cristal 3D amène une diminution de près de 35% sur le facteur de qualité à vide.

Nous pensons alors que le système d'excitation utilisé avec les guides WR28 consistant à venir plaquer ceux-ci sur les faces d'entrée de la cavité n'est pas optimum.

La solution permettant d'améliorer cela consisterait à insérer le guide WR28 comme ce que nous avons choisi de faire pour le guide dans un tas de bois en Silicium présenté dans le paragraphe III. Nous envisageons alors la configuration présentée dans la Figure IV-57.

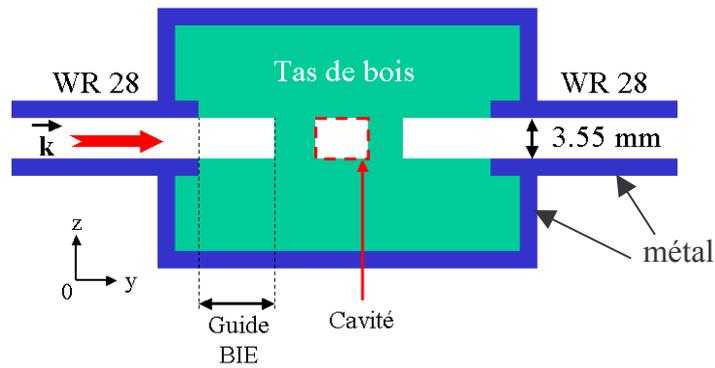


Figure IV-57. Vue en coupe de la nouvelle configuration de la cavité BIE en alumine.

La nouvelle configuration envisagée reprend l'idée de la cavité au sein du tas de bois en alumine totalement blindé. Seulement ici, les guides WR28 servant à l'excitation ne sont plus plaqués sur les faces d'entrée et de sortie du tas de bois mais rentrent légèrement dans celui-ci. Nous envisageons de même de laisser une certaine longueur de guide BIE de chaque côté de la cavité afin d'assurer au maximum un guidage correct de l'onde incidente vers la cavité. Sa réalisation est très prochainement envisagée afin de concrétiser cette idée.

V.4. Conclusion et perspectives.

Comme nous l'avons vu dans ce chapitre, l'utilisation de cavités BIE pour l'obtention de forts facteurs de qualités à vide se révèle des plus intéressantes. Le choix du matériau céramique est des plus importants et peut potentiellement donner des valeurs de Q_0 supérieure à ce que peut présenter une cavité cylindrique métallique classique, et cela pour un volume et un poids équivalent.

L'utilisation de la stéréolithographie pour la réalisation de structures complexes s'est avéré pertinent. Elle permet également un choix de céramiques aux propriétés des plus diverses. Ces céramiques présentent des propriétés thermiques et mécaniques qui devraient permettre aux structures réalisées de satisfaire à des contraintes d'utilisation strictes.

Mais il faut encore améliorer le procédé de fabrication pour améliorer les tolérances de fabrication actuelles.

Nous avons aussi vu que la configuration considérée pour la cavité résonante BIE est tout à fait à même d'être intégrée dans un environnement hyperfréquence donné, notamment par le système de connexion à base de guides standards. L'utilisation d'iris de couplage a de plus montré qu'il était possible d'obtenir les facteurs de qualités extérieurs nécessaires si l'on souhaite associer plusieurs de ces cavités entre elles pour réaliser des filtres multipoles, et cela tout en conservant des facteurs de qualités à vide potentiellement très élevés.

La dernière configuration envisagée permettra de valider définitivement le concept et ainsi de s'assurer que ces cavités BIE permettront effectivement d'obtenir de très forts facteurs de qualités à vide.

VI. Conclusion

Les différentes configurations présentées dans ce chapitre montrent diverses applications d'un cristal à bande interdite électromagnétique 3D. Que ce soit pour la création de guide sélectif en fréquence et de cavités résonantes à fort coefficient de qualité à vide, les propriétés de ces cristaux amènent des alternatives crédibles aux structures classiques pour la réalisation de fonctions hyperfréquences.

Cette première étude de faisabilité s'est attachée à développer chacun de ces éléments indépendamment afin de mieux connaître leurs propriétés et ainsi pouvoir les optimiser au mieux.

Nous avons aussi mis en avant deux techniques de fabrication, la stéréolithographie céramique 3D et la gravure sèche RIE.

La suite de nos recherches se concentrera sur divers axes dont la réalisation de fonctions de filtrage à base de cavités BIE couplées. Le principe consistera à associer plusieurs de ces cavités au sein d'un seul et unique cristal, et donc de disposer dans une structure monobloc réalisée par stéréolithographie 3D d'une solution de filtrage souple et directement intégrable dans un environnement hyperfréquence.

Nous envisageons d'associer, un guide, un filtre et même la fonction de filtrage au sein d'un seul et même cristal comme le suggère la Figure IV-58. Déjà réalisés indépendamment, ces différents éléments n'ont encore jamais été associés au sein d'un même cristal pour des

raisons de procédé technologique. La stéréolithographie peut répondre à cet objectif si les conditions de réalisation sont suffisamment maîtrisées et reproductibles.

Les évolutions du procédé au cours de ce travail de thèse, ainsi que les premiers tests réalisés nous permettent d'envisager un avenir prometteur.

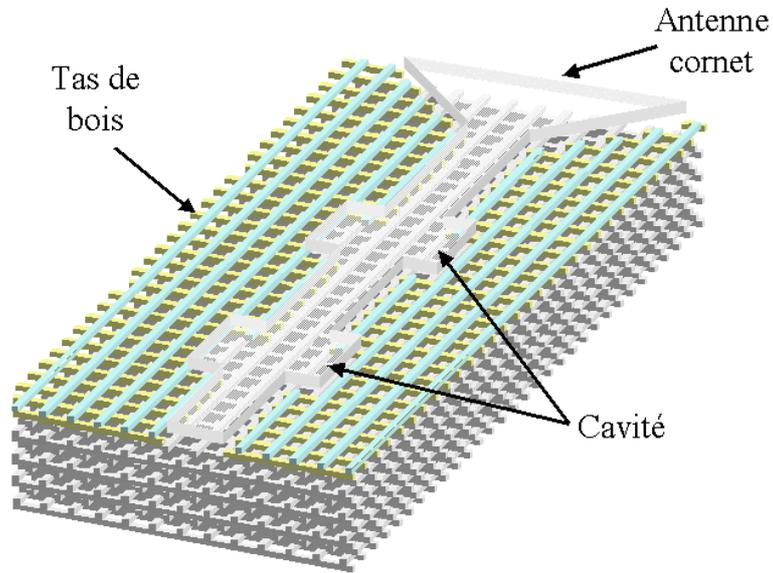


Figure IV-58. Vue en coupe d'une fonction RF complète associant la partie filtrage et antenne dans un même cristal BIE 3D.

Références :

- [1] A. Blanco, *et al.*, "Large-scale synthesis of a silicon photonic crystal with a complete three-dimensional bandgap near 1.5 micrometres," *Nature*, vol. 405, pp. 437-440, May 2000.
- [2] Y. A. Vlasov, X.Z. Bo, J. C. Sturm, and D. J. Norris, "On-chip natural assembly of silicon photonic bandgap crystals," *Nature*, vol. 414, pp. 289-293, November 2001.
- [3] M. Scharrer, X. Wu, A. Yamikov, H. Cao, and R. P. H. Chang, "Fabrication of inverted opal ZnO photonic crystals by atomic layer deposition," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 86, pp. 151113, 2005.
- [4] J. S. King, E. Graugnard, C. J. Summers, "TiO₂ Inverse Opals Fabricated Using Low-Temperature Atomic Layer Deposition," *Adv. Mat.*, vol. 17, no. 8, pp. 1010-1013, April 2005.
- [5] A. Rügge, J.-S. Park, R. G. Gordon, and S. H. Tolbert, "Tantalum(V) Nitride Inverse Opals as Photonic Structures for Visible Wavelengths," *Phys. Chem. B*, vol. 109, no. 9, pp. 3764-3771, March 2005.
- [6] Z.-Y. Li, and Z.-Q. Zhang, "Fragility of photonic band gaps in inverse-opal photonic crystals," *Phys. Rev. B*, vol. 62, no. 3, pp. 1516-1519, July 2000.
- [7] J.-H. Lee, W. Leung, J. Ahn, T. Lee, I.-S. Park, K. Constant, and K.-M. Ho, "Layer-by-layer photonic crystal fabricated by low-temperature atomic layer deposition," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 90, pp. 151101, 2007.
- [8] K. M. Ho, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, R. Biswas, and M. Sigalas, "Photonic band gaps in three dimensions: new layer-by-layer periodic structures", *Solid State Commun*, vol. 89, pp. 413-416, 1994.
- [9] H. S. Sozuer, and J. P. Dowling, "Photonic band calculations for woodpile structure," *J. Mod. Opt.*, vol. 43, pp. 231, 1994.
- [10] A. Chutinan, and S. Noda, "Effects of structural fluctuations on the photonic bandgap during fabrication of a photonic crystal : a study of a photonic crystal with a finite number of periods," *J. Opt. Am. B*, vol. 16, no. 9, pp. 1398-1402, September 1999.
- [11] S. Y. Lin, J. G. Fleming, D. L. Hetherington, B. K. Smith, R. Biswas, K. M. Ho, M. M. Sigalas, W. Zubrzycki, S. R. Kurtz, and J. Bur, "A three-dimensional photonic crystal operating at infrared wavelengths," *Nature*, vol. 394, pp. 251-253, July 1998.
- [12] S. Noda, K. Tomoda, N. Yamamoto, and A. Chutinan, "Full three-dimensional photonic bandgap crystals at near-infrared wavelengths," *Science*, vol. 289, no. 5479, pp. 604-606, July 2000.

- [13] K. Aoki, H. T. Miyazaki, H. Hirayama, K. Inoshita, T. Baba, K. Sakoda, N. Shinya, and Y. Aoyagi, *Nat. Mater.*, vol. 2, pp. 117, 2003.
- [14] E. Ozbay, A. Abeyta, G. Tuttle, M. Tringides, R. Biswas, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho, "Measurement of a three-dimensional photonic band gap in a crystal made of dielectric rods," *Phys. Rev. B*, vol. 50, no. 3, pp 1945-1948, July 1994.
- [15] E. Ozbay, "Layer-by-layer photonic crystals from microwave to far-infrared frequencies," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 13, no. 9, pp 1945-1955, September 1996.
- [16] R. Gonzalo, B. Martinez, C. M. Mann, H. Pellemans, P. H. Bolivar, and P. de Maagt, "A low-cost fabrication technique for symmetrical and asymmetrical layer-by-layer photonic crystals at submillimeter-wave frequencies," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 50, no. 10, pp. 2384-2392, October 2002.
- [17] W. J. Chappell, C. Reilly, J. Halloran, and L. P. B. Katehi, "Ceramic synthetic substrates using solid freeform fabrication," *IEEE Trans. Microwave Theory & Tech.*, vol. 51, no. 3, pp. 752-760, March 2003.
- [18] B. Gralak, M. de Dood, G. Tayeb, S. Enoch, and D. Maystre, "Theoretical study of photonic band gaps crystals," *Phys. Rev. B*, vol. 67, pp. 066601, June 2003.
- [19] A. Moroz, and C. Sommers, "Photonic band gaps of three-dimensional face-centered cubic lattices," *J. Phys. Condens. Matter.*, vol. 11, pp. 997-1008, 1999.
- [20] B. Temelkuran, and E. Ozbay, "Experimental demonstration of photonic crystal based waveguides," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 74, no. 4, pp. 486-488, January 1999.
- [21] Z. Y. Li, and K. M. Ho, "Waveguide in three-dimensional layer-by-layer photonic crystals," *J. Opt. Soc. Am. B*, vol. 20, no. 5, pp. 801-809, May 2003.
- [22] A. R. Weily, K. P. Esselle, T. P. Bird, and B. C. Sanders, "Experimental woodpile EBG waveguides bends and power dividers at microwave frequencies," *Elec. Lett.*, vol. 42, no. 1, pp 32-33, September 2005.
- [23] E. Ozbay, A. Abeyta, G. Tuttle, M. Tringides, R. Biswas, C. T. Chan, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho, "Measurement of a three-dimensional photonic band gap in a crystal made of dielectric rods," *Phys. Rev. B*, vol. 50, no. 3, pp 1945-1948, July 1994.
- [24] Chutinan, and S. Noda, "Highly confined waveguides and waveguide bends in three-dimensional photonic crystal," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 75, no. 24, pp. 3739-3741, December 1999.

- [25] M. Bayindir, E. Ozbay, B. Temelkuran, M.M. Sigalas, C. M. Soukoulis, R. Biswas, and K. M. Ho, "Guiding, bending, and splitting of electromagnetic waves in highly confined photonic crystal waveguides," *Phys. Rev. B*, vol. 63, pp 081107, 2001.
- [26] C. Sell, C. Christensen, J. Muehlmeier, G. Tuttle, Z. Y. Li, and K. M. Ho, "Waveguide networks in three-dimensional layer-by-layer photonic crystals," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 84, no. 23, pp. 4605-4607, June 2004.
- [27] A. R. Weily, K. P. Esselle, T. S. Bird, and B. C Sanders, "Linear array of woodpile EBG sectoral horn antennas," *IEEE Trans. on Ant. and Propag.*, vol. 54, no. 8, pp 2263-2273, August 2006.
- [28] P. H. Siegel, "Terahertz technology," *IEEE Trans. Microwave Theory Tech.*, vol. 50, no. 3, pp. 910-928, Mar. 2002.
- [29] E. Yablonovitch, T. J. Gmitter, R. D. Meade, A. M. Rappe, K. D. Brommer, and J. D. Joannopoulos, "Donor and acceptor modes in photonic band structure," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 67, no. 24, pp. 3380-3383, December 1991.
- [30] E. Ozbay, G. Tuttle, M. Sigalas, C. M. Soukoulis, and K. M. Ho, "Defect structures in a layer-by-layer photonic band-gap crystal," *Phys. Rev. B*, vol. 51, no. 20, pp-13961, May 1995.
- [31] M. Okano, A. Chutinan, and S. Noda, "Analysis and design of single-defect cavities in a three-dimensional photonic crystal," *Phys. Rev. B*, vol. 66, pp. 165211, October 2002.
- [32] W. J. Chappell, and X. Gong, "Wide bandgap composite EBG substrates," *Trans. Ant. Propag.* Vol. 51, no. 10, pp 2744-2750, October 2003.
- [33] S.-Y. Lin, V.M. Hietala, S. K. Lyo, and A. Zaslavsky, " Photonic band gap quantum box structures : a high-Q resonant cavity," *Appl. Phys. Lett.*, vol. 68, no. 23, pp. 3233-3235, April 1996.
- [34] M. Schuster, and N. Klein, "Excitation of line and point defect in two-dimensional electromagnetic bandgap structures for microwave frequencies," *J. Phys. D: Appl. Phys.*, vol. 37, pp. 374-378, January 2004.
- [35] Jean-Michel Le Floch, "Modélisation de nouveaux résonateurs diélectriques à forts coefficients de qualité pour des applications de métrologie", *thèse de doctorat*, 2 Février 2007, Limoges.
- [36] P.Lenoir, S.Bila, F.Seyfert, D.Baillargeat, S.Verdeyme, "Synthesis and design of assymetrical dual-band bandpass filters based on equivalent network simplification," *IEEE Trans. on MTT*, vol. 54, no.7, pp. 3090- 3097, July 2006.

**CONCLUSION
GENERALE
ET
PERSPECTIVES**

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Ces travaux de thèse ont porté sur la mise au point de structures guidantes et résonnantes à fort facteur de qualité à vide proposant des solutions alternatives aux structures classiques.

La réalisation de cet objectif s'est appuyé notamment sur l'utilisation de technologies de fabrication dédiées et spécifiques. Nous avons principalement utilisé la technologie de stéréolithographie céramique 3D (SLA). Cette dernière nous a permis de fabriquer des structures tridimensionnelles complexes monoblocs impossibles à réaliser par d'autres procédés. Elle permet aussi l'utilisation de céramiques très différentes présentant des propriétés thermiques, mécaniques et diélectriques très intéressantes. Comme nous l'avons montré, la stéréolithographie 3D est une technologie alternative aux procédés classiques pour des applications données.

Le **Chapitre 1** commence tout d'abord par présenter les propriétés de structures diélectriques périodiques et plus particulièrement les cristaux à bande interdite électromagnétique (BIE) tridimensionnels. Par cette étude s'appuyant sur les travaux théoriques et expérimentaux réalisés sur le sujet, un type de cristal BIE particulier a été choisi. Ce dernier communément appelé « tas de bois » a montré qu'il présentait un bon compromis entre performances électromagnétiques et facilité de fabrication. Sa réalisation a d'ailleurs été étudiée plus précisément en s'intéressant aux techniques expérimentales permettant la création d'objets tridimensionnels. Parmi celles-ci, deux nous ont paru les plus à même de créer les structures 3D que nous avons envisagées.

La première a été la technique de gravure par photolithographie, classiquement utilisée dans le domaine des micro-circuits, pour sa très bonne précision de fabrication sub-

micrométrique. Cette technique est tout à fait adaptée à la fabrication de systèmes millimétriques voire sub-millimétriques.

La deuxième technique retenue est la stéréolithographie (SLA) céramique 3D. Celle-ci permet de réaliser des objets 3D très complexes inenvisageables par d'autres technologies classiques de fabrication et d'usinage.

Dans le **Chapitre 2**, nous nous sommes intéressés à la technique de SLA céramique 3D développée par le Centre de Transfert de Technologies Céramiques (CTTC) de Limoges. Après avoir passé en revue les spécificités et les avantages de cette technologie, nous avons fabriqué des dispositifs microondes innovants.

Ces dispositifs tirent avantages des possibilités de la stéréolithographie céramique 3D en proposant des formes originales pour des éléments classiques comme des résonateurs diélectriques. Rassemblant en une seule pièce les éléments essentiels d'un dispositif à base de résonateurs, la SLA a prouvé ses capacités dans le domaine microondes. Le résonateur diélectrique conçu et fabriqué en alumine a montré expérimentalement qu'il présentait un fort facteur de qualité à vide de 4300 à 11.9 GHz. Nous avons aussi conçu des filtres deux pôles à bande passante étroite (~1%) à 15 GHz pouvant tirer parti de ces résonateurs.

Le dispositif ainsi créé présente des possibilités d'intégration intéressante grâce à des systèmes d'excitation coplanaires. Ces derniers donnent au dispositif la capacité, par des techniques de report industriels classiques (bumps, Flip-Chip, ...) de pouvoir être relié à des cartes mères à la manière de puce électroniques (CMS).

- Une des perspectives amenées par cette première étude va tout d'abord consister en une modification de l'assemblage réalisé pour la mesure de ce résonateur diélectrique original. Les plaques d'alumine commerciales pré-métallisées utilisées comme support des motifs d'excitations vont être remplacées par des plaques d'alumine fabriquées par SLA. Celles-ci sont tout d'abord polies puis une solution à base d'or (Heraeus KQ500) est appliquée à leur surface pendant leur rotation à la tournette. Après des cycles de cuisson appropriés de quelques heures, nous obtenons ici des couches d'or de 7 μ m. Celles-ci seront ensuite gravées par des techniques de gravure classiques afin de positionner les motifs d'excitation à leur surface (voir Figure 1).

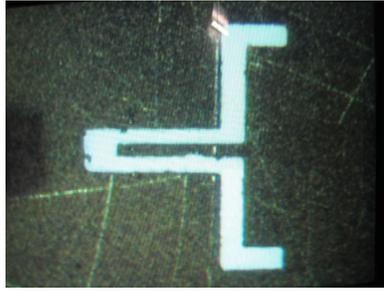


Figure 1. Photographie d'un motif coplanaire gravé par une technique mise au point au laboratoire Xlim.

Cette technique déjà testée avec succès à Xlim grâce à M. Casteignau se révèle très souple d'utilisation et permet de s'affranchir de matériel commercial supplémentaire.

L'autre axe de recherche en cours d'étude concerne l'utilisation de cette structure pour la réalisation de filtre deux ou trois pôles qui utiliserait un résonateur présentant deux (ou trois) polarisations à la même fréquence de résonance. Une telle structure permettrait d'obtenir des filtre multipôles n'utilisant qu'un seul élément résonnant très compact présentant toujours des capacités d'intégration très intéressantes.

Dans le **Chapitre 3**, nous avons étudié un cristal BIE 1D appelé « miroir de Bragg » du nom de son inventeur. Nous avons conçu une structure résonnante constituée d'une pièce céramique en Zircone de forte permittivité placée entre deux plans métalliques. La pièce céramique proposée repose sur l'utilisation d'une cavité parallélépipédique résonnante entourée de ces miroirs. Ce résonateur original métallo-diélectrique présente un facteur de qualité à vide expérimental de 2400 à 33 GHz. L'association de deux puis trois de ces cavités couplées a permis la réalisation de filtres passe bande à bande étroite (1%) autour de 33GHz. Des possibilités de réglages en fréquence ont aussi été démontrées avec ces filtres.

L'une des particularités de cette structure provient de la répartition des pertes en son sein. En effet celles-ci proviennent majoritairement du matériau diélectrique utilisé. Nous avons alors testé avec le CTTC la compatibilité de la SLA avec l'utilisation de céramiques faibles pertes afin d'augmenter le facteur de qualité à vide de notre structure résonnante. Ainsi la céramique BZT a été choisie pour la fabrication d'un résonateur diélectrique.

Conclusion générale et perspectives.

Sa compatibilité avec la technologie a été prouvée par la fabrication de pièces 3D complexes. L'utilisation de tels matériaux céramiques fournit alors au dispositif proposé la possibilité de présenter des facteurs de qualité à vide équivalents voire supérieurs à ceux d'une cavité métallique résonnante classique

- Les travaux suivant actuellement menés concernent l'optimisation des céramiques faibles pertes utilisées comme le BZT. Une attention particulière est portée à l'augmentation de la tenue mécanique de cette céramique après cuisson et à la diminution de ses pertes diélectriques.

Le recours à d'autres céramiques encore plus faibles pertes est de même envisagé afin d'obtenir des facteurs de qualité à vide dans la bande Ka qui pourraient dépasser les 10000, soient des valeurs difficilement atteignables à ces fréquences par des cavités résonnantes métalliques classiques.

Des fonctions de filtrage de type elliptiques sont aussi à l'étude ainsi que des topologies de multiplexeurs très compactes dans la bande Ka et au-delà.

Dans le **Chapitre 4**, nous avons étudié les applications potentiellement offertes par les cristaux BIE 3D et plus particulièrement celle appelée « tas de bois ».

La première application choisie a été la création de guides d'ondes placés au sein d'un tas de bois (guide BIE). Deux configurations ont été retenues, l'une à base de Si et l'autre à base de Zircon.

La configuration en Silicium a été conçue pour fournir une bande passante de près de 16% autour de 144 GHz. Pour sa réalisation, des premiers tests ont été effectués avec succès grâce à une technique de gravure sèche sur Silicium appelée DRIE (Deep Reactive Ionic Etching). Cette dernière présentant des tolérances de fabrication de près de un micromètre apparaît tout à fait adaptée pour la réalisation de guide d'ondes BIE avec la précision nécessaire pour fonctionner à des fréquences supérieures à 100 GHz.

La deuxième configuration a été conçue et fabriquée à base de Zircon par SLA. Grâce à la forte permittivité de cette céramique, une large bande passante expérimentale de 20% a été obtenue autour de 26 GHz tout en conservant un coefficient de réflexion inférieur à -10 dB. Cette structure très complexe a été fabriquée en une seule pièce céramique par le CTTC de Limoges.

Conclusion générale et perspectives.

La deuxième application retenue a été la création de cavités résonantes à forts facteurs de qualité à vide. Nous avons d'abord validé le concept grâce à un premier prototype en Zircone fabriqué par SLA en une seule pièce. Celle-ci présente un facteur de qualité à vide de 1000 à 30.5 GHz. Ensuite une céramique présentant moins de pertes a été utilisée. La cavité BIE optimisée et réalisée en Alumine a ainsi présenté un facteur de qualité expérimental de 4000 à 32.9 GHz.

- Cette étude a ainsi ouvert la voie à la création de filtres à résonateurs BIE couplés. Ces résonateurs pourront être associés dans un seul cristal BIE 3D et fabriqués en une seule pièce grâce à la stéréolithographie céramique 3D.

Il est ainsi envisagé d'associer au sein d'un seul cristal BIE, guide d'ondes, fonction de filtrage et antenne de type cornet, le tout fabriqué en une seule pièce en stéréolithographie 3D.

L'utilisation de céramiques faibles pertes comme le BZT présenté dans le Chapitre 3 permettrait de plus aux cavités résonantes placées dans le tas de bois d'atteindre des facteurs de qualité à vide aux alentours de 10 000 à 30 GHz et au-delà.

- D'autres structures périodiques tridimensionnelles comme celles présentées par le MIT (Figure 2) sont actuellement à l'étude et se révèlent, aux vues des résultats obtenus pour le tas de bois, potentiellement réalisables par la technologie du CTTC.

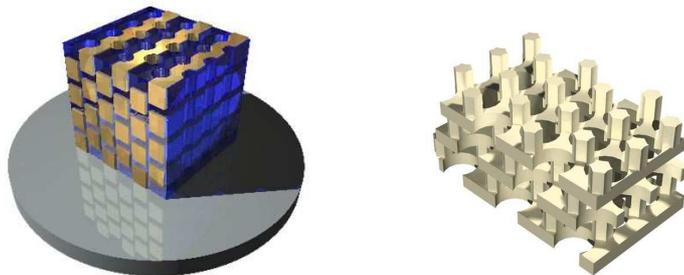


Figure 2. Cristaux tridimensionnels à bande interdite proposés par le MIT dont la fabrication est envisagée par stéréolithographie céramique 3D.

Concernant le guide BIE en Silicium présenté dans ce chapitre, une structure équivalente fonctionnant autour de 90 GHz est actuellement en cours de fabrication par l'ESA pour son utilisation dans un démonstrateur. La validité de ce démonstrateur confirmera l'utilisation de ce guide BIE particulier pour des applications futures d'imagerie Terahertz.

- Nous envisageons de poursuivre le travail effectué autour de la stéréolithographie. Pour des applications millimétriques et sub-millimétriques, il convient de s'arrêter sur le protocole de fabrication typiquement utilisé avec les technologies céramiques :

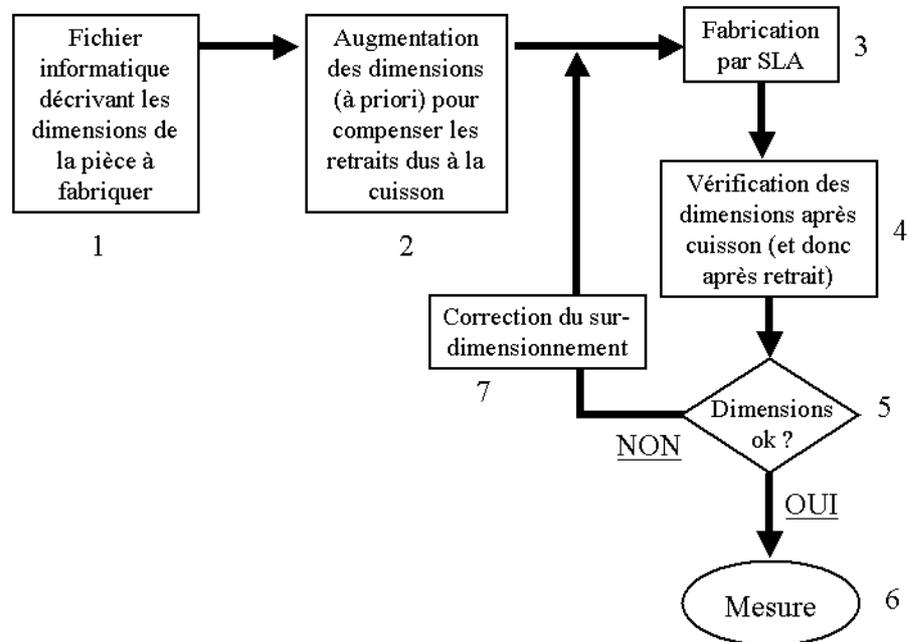


Figure 3. Synopsis de la fabrication par SLA.

Comme nous l'avons vu au début du Chapitre 2, la pièce crue fabriquée par SLA céramique est réalisée plus grande que sa taille réelle afin que, après sa cuisson et le retrait qu'elle subit, elle présente les dimensions attendues spécifiées par le fichier informatique initial (étape 1 du synopsis). Etant donné que les pièces fabriquées ne présentent pas de retraits isotropes lorsqu'elles sont de forme complexe, il est souvent nécessaire suite aux vérifications des dimensions après cuisson (étape 5), de réajuster le surdimensionnement (étape 7) avant de fabriquer à nouveau la pièce et ainsi de suite jusqu'à obtention des dimensions requises.

Aux vues du nombre important de structures testées et des matériaux étudiées, nous n'avons pas eu le temps de suivre ce protocole qui peut être relativement long puisqu'il doit être répété à chaque pièce et à chaque céramique utilisée. Nous sommes passés systématiquement de l'étape 4 à l'étape 6 sans prendre le temps de compenser les retraits non uniformes qui peuvent survenir.

Pour les prochaines structures qui seront réalisées, ce protocole sera désormais systématiquement suivi afin de valider la reproductibilité du procédé nécessaire pour chaque type de pièces et de céramiques. Ce protocole s'inscrit dans une démarche de pré-industrialisation.

- Un autre axe de développement concernant cette technique est actuellement à l'étude et s'inscrit dans le cadre du projet ANR Blanc DOPROCOF (labellisé en Janvier 2006 pour 36 mois). Au cours de ce projet une technologie de micro-stéréolithographie (μ SLA) céramique 3D est mise au point. Le système, développé actuellement en collaboration avec le SPCTS de Limoges, fait appel au même procédé que la SLA. Seul le système d'exposition de la pâte céramique est différent puisque le motif à réaliser est insolé en une seule fois au lieu d'être balayé par un laser. Cette insolation se fait grâce à l'utilisation d'un masque reconfigurable « DMD » (© Texas Instrument) composé de 1024 par 768 micro-miroirs de 14 μ m de côté.

Chacun de ces micro-miroirs est orientable et contrôlé de façon automatisée par ordinateur et c'est le faisceau UV réfléchi par cette matrice qui définit le motif insolé sur une couche de pâte comme présentée sur la figure suivante :

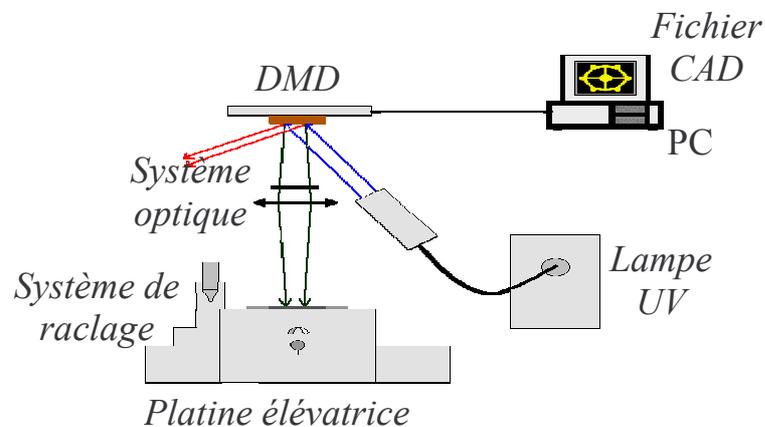


Figure 4. Principe de la micro SLA.

Un tel système amène des précisions de fabrication inférieures à 10 μ m, tolérances de fabrication qui permettront la fabrication de structures fonctionnant à 100 GHz et au delà.

Le projet en cours prévoit la fabrication d'une cavité résonante insérée au sein d'un réseau 2D de tiges cylindriques d'alumine comme présenté sur la figure suivante qui présente une vue de dessus du résonateur BIE envisagé.

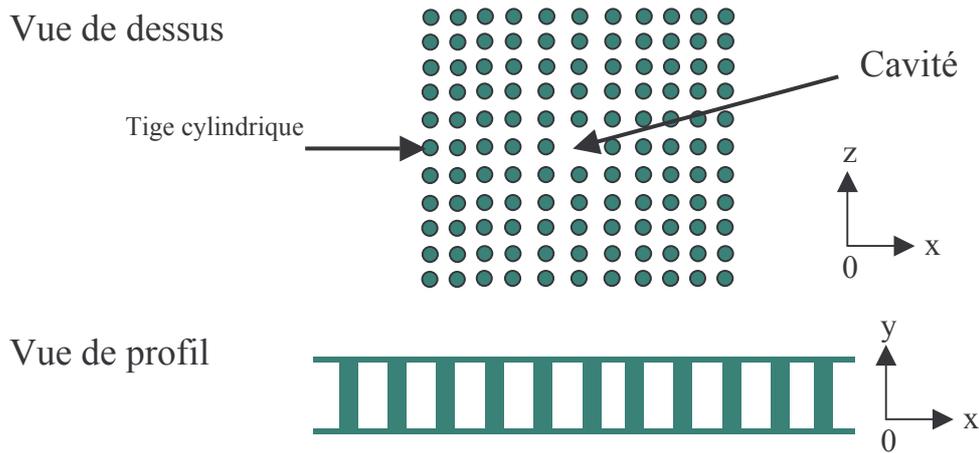


Figure 5. Vues de la structure périodique développée.

Ce réseau 2D est pris en sandwich entre deux plaques d'alumine dont la face extérieure est métallisée. Le pas du réseau est de $785 \mu\text{m}$, le rayon des tiges de $120 \mu\text{m}$. La pièce décrit une hauteur de $760 \mu\text{m}$. Les plaques d'alumine supérieures et inférieures ont une épaisseur de $100 \mu\text{m}$.

Nos premiers calculs EM ont montré qu'une telle configuration permettrait d'atteindre des facteurs de qualité à vide de près de 2500 vers 165 GHz alors qu'une cavité métallique en laiton ayant les mêmes dimensions ne présenterait qu'une valeur de 1800 sur le même mode de résonance TM_{110} . La céramique utilisée présente une permittivité de 9 et une tangente de pertes de $1 \cdot 10^{-4}$. La métallisation des plaques supérieure et inférieure a en simulation une conductivité égale à $2.56 \cdot 10^6 \text{ S/m}$. Cette structure peut être fabriquée entièrement en une seule pièce par μSLA comme le montre de très récents tests :

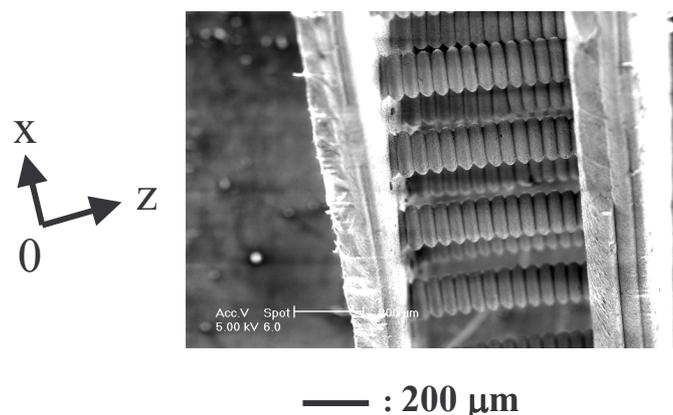


Figure 6. Vue de profil au microscope à balayage électronique de la pièce fabriquée.

ANNEXES

ANNEXE I – CAHIER COULEUR

I. Chapitre 1.

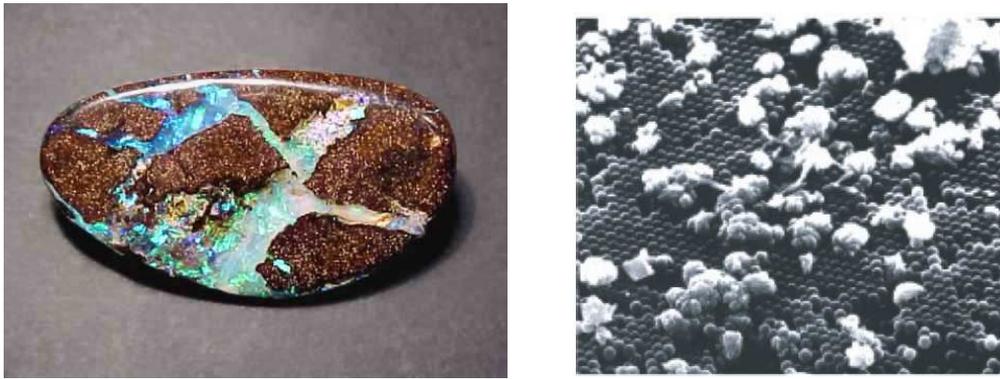


Figure I-2. Opale vue à l'échelle macro (gauche) et microscopique (droite).



Figure I-3. Pie commune (*Pica Pica*).

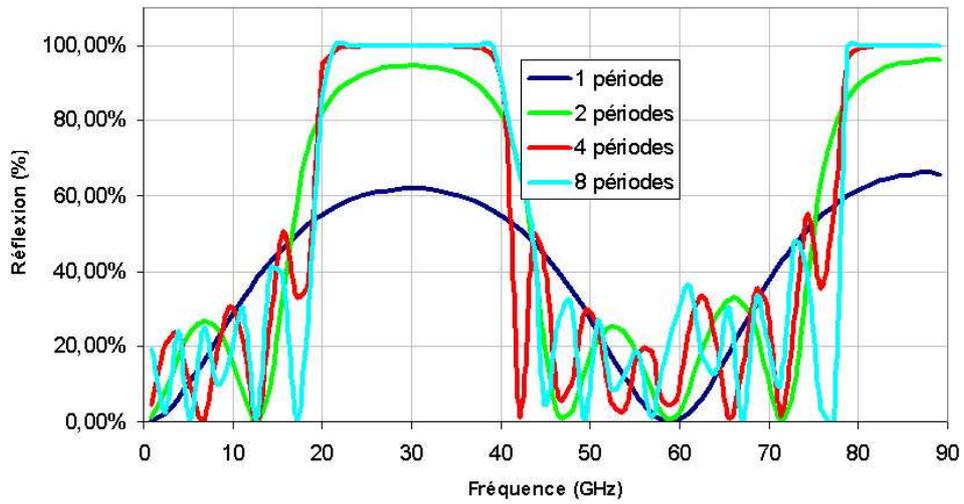


Figure I-10. Coefficient de réflexion pour un miroir de Bragg dimensionné pour donner une bande interdite autour de 30 GHz.

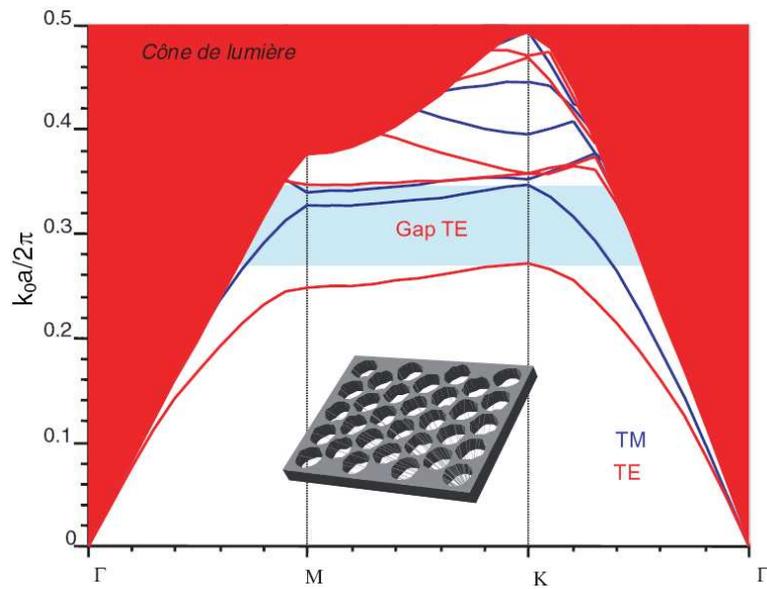


Figure I-15. Cristal 2D de hauteur finie.

II. Chapitre 2.

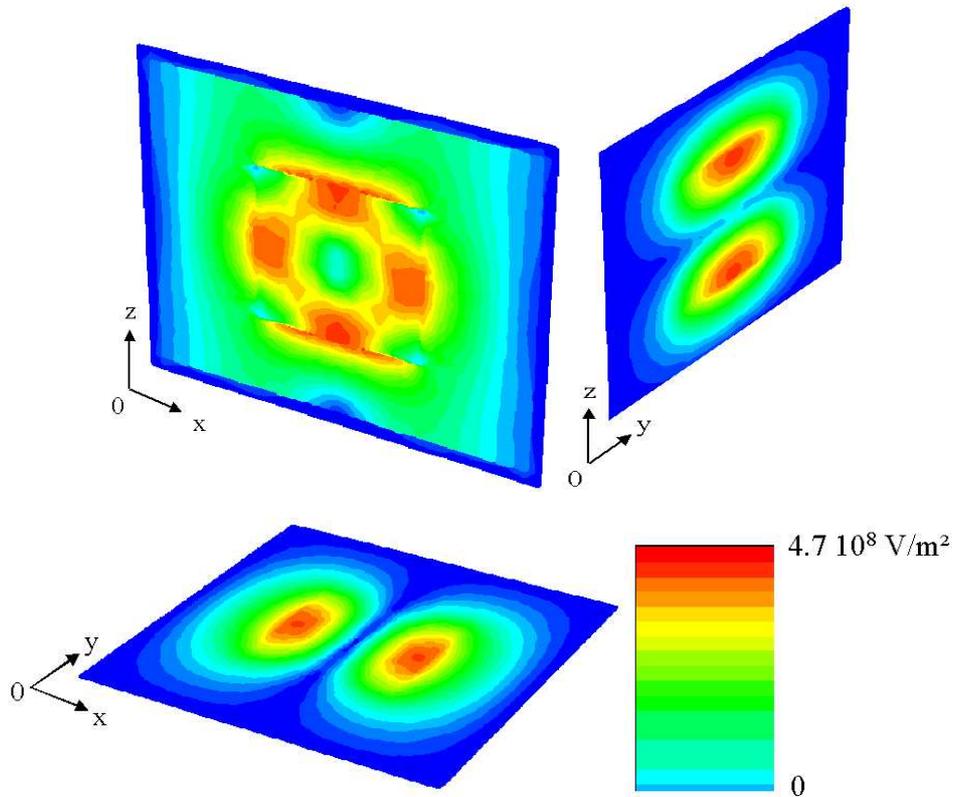


Figure II-14. Répartition du champ électrique à la résonance du résonateur diélectrique. Cette configuration ne possède pas de support par rapport à la configuration présentée Figure II-12.

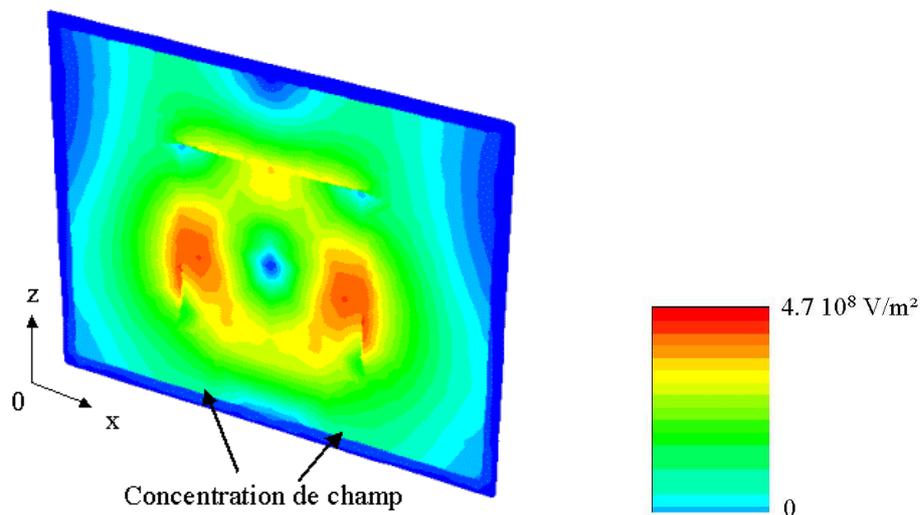


Figure II-15. Configuration de champ électrique pour la structure dans la configuration initialement choisie (avec support) à la fréquence de résonance du RD.

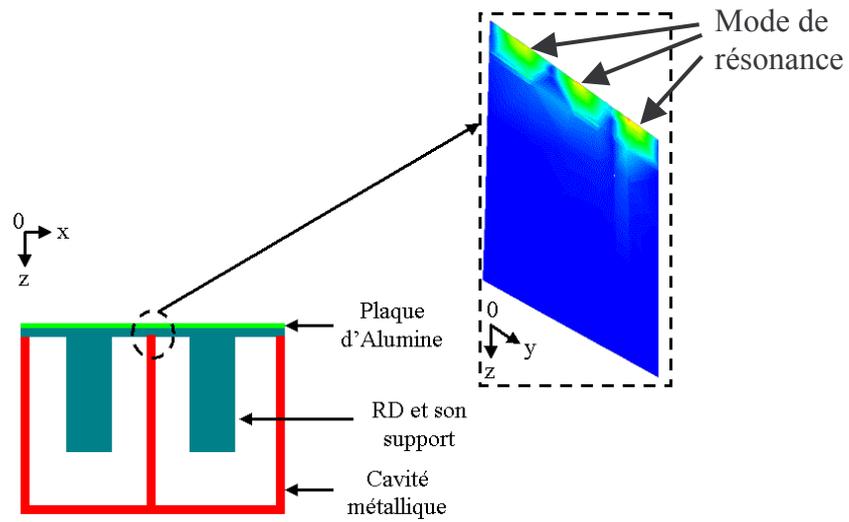


Figure II-54. Mode de résonance apparaissant dans l'épaisseur diélectrique de la structure hybride à 15.5 GHz.

III. Chapitre 3.

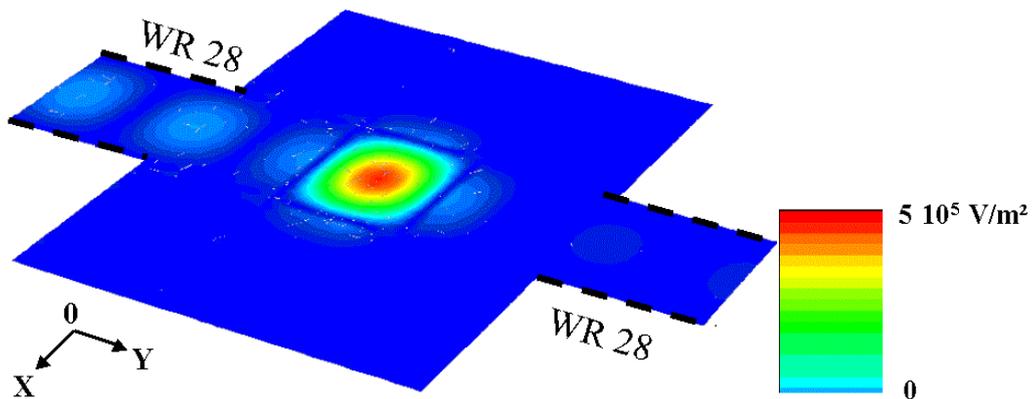


Figure III-12. Champ électrique à la fréquence de résonance de la cavité (33 GHz) sur un plan de coupe situé à mi-hauteur de la structure.

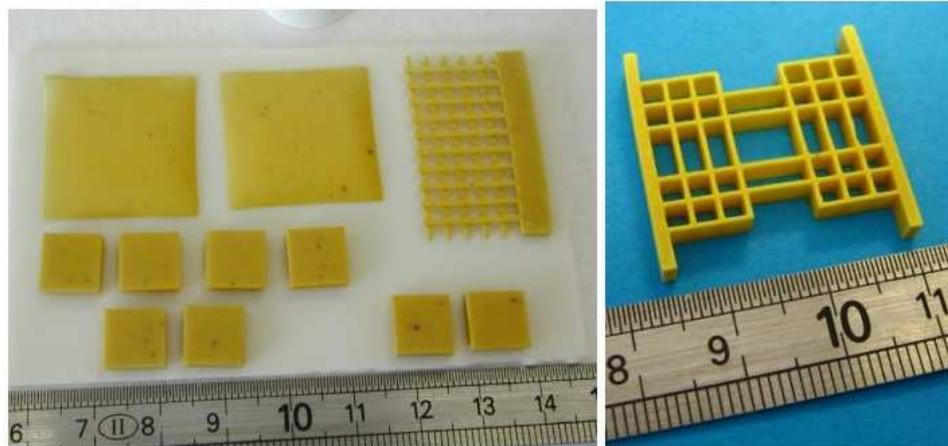


Figure III-44. (gauche) Divers objets réalisés en BZT par stéréolithographie. (droite) Cavité résonante.

IV. Chapitre 4.

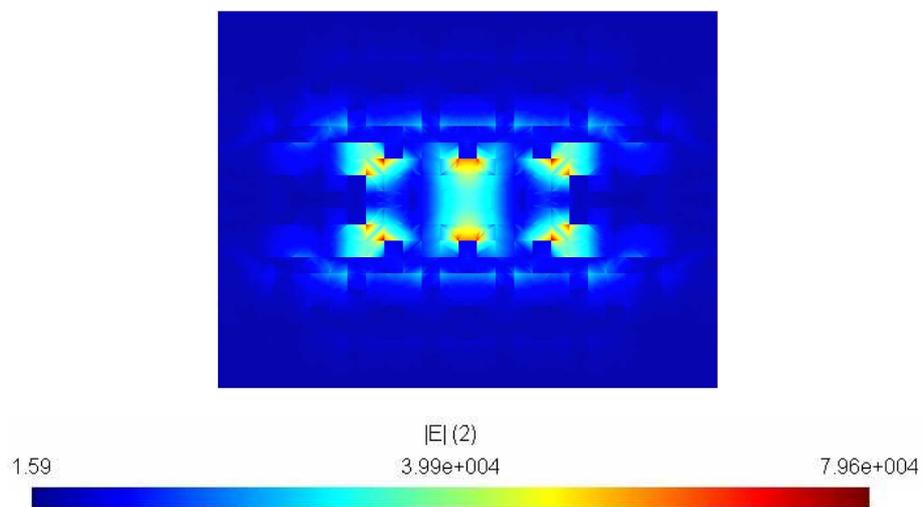


Figure IV-27. Champ électrique à 32.72 GHz dans le plan (x0z).

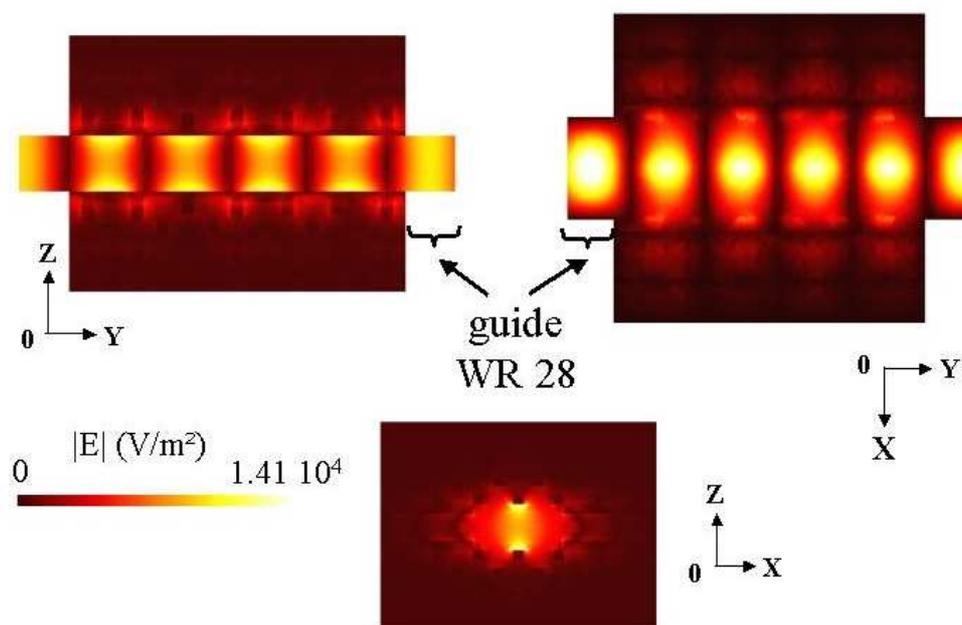


Figure IV-30. Tracé du champ électrique à 31 GHz.

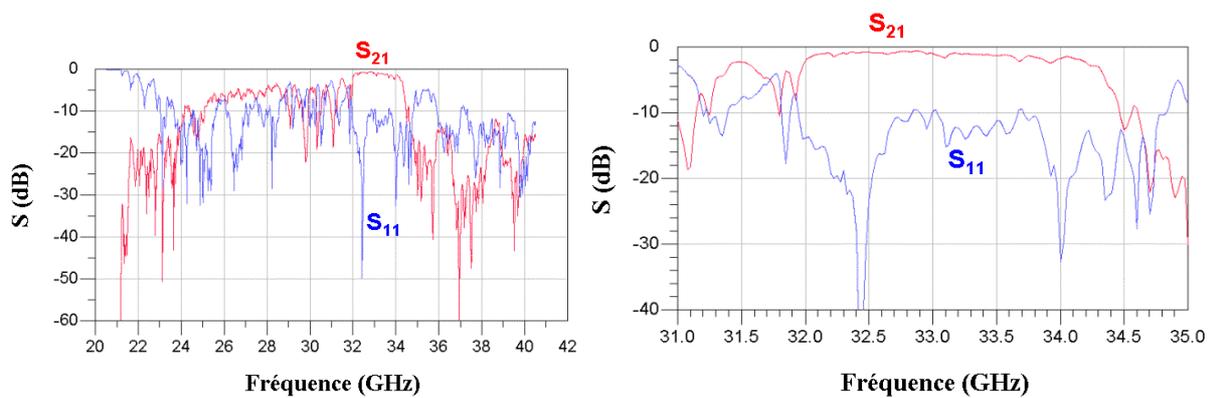


Figure IV-36. Paramètres S sur une large bande de fréquence (gauche) et autour de 33 GHz (droite).

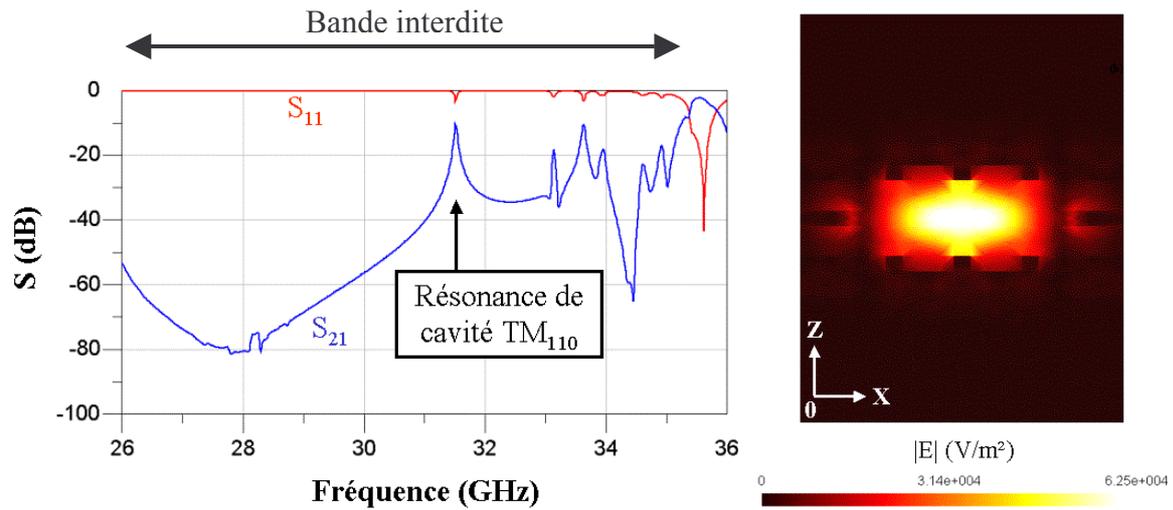


Figure IV-44. (gauche) Réponse en fréquence théorique de la cavité au sein d'un tas de bois en zircon et (droite) distribution du champ à la résonance de la cavité.

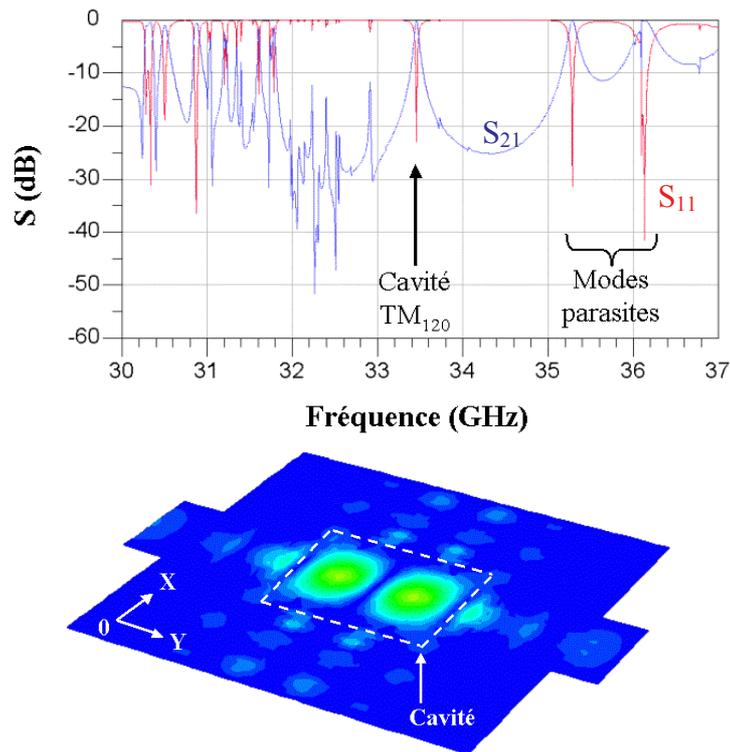


Figure IV-49. Réponse en fréquence de la cavité BIE en alumine et distribution de champ à 33.46 GHz au niveau du plan de symétrie $x0z$ de la structure.

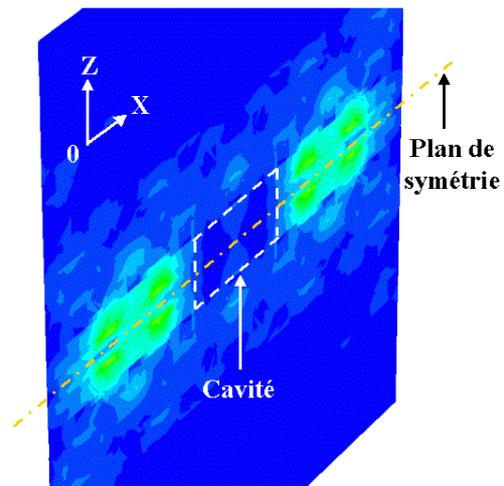


Figure IV-50. Distribution du champ électrique à 35.2 GHz pour une coupe dans le plan x0z au niveau de la cavité.

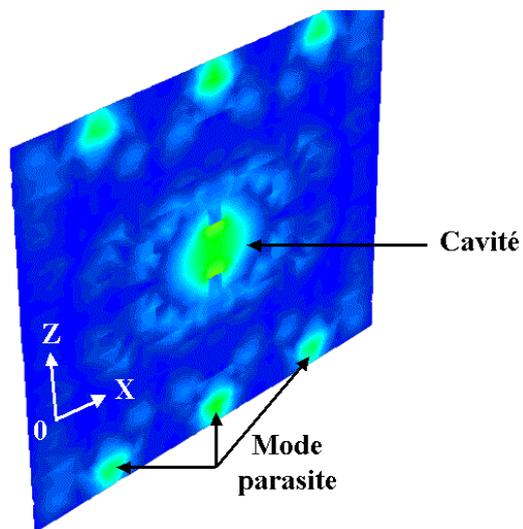


Figure IV-52. Distribution du champ électrique à 33.07 GHz pour une coupe dans le plan x0z au niveau de la cavité.

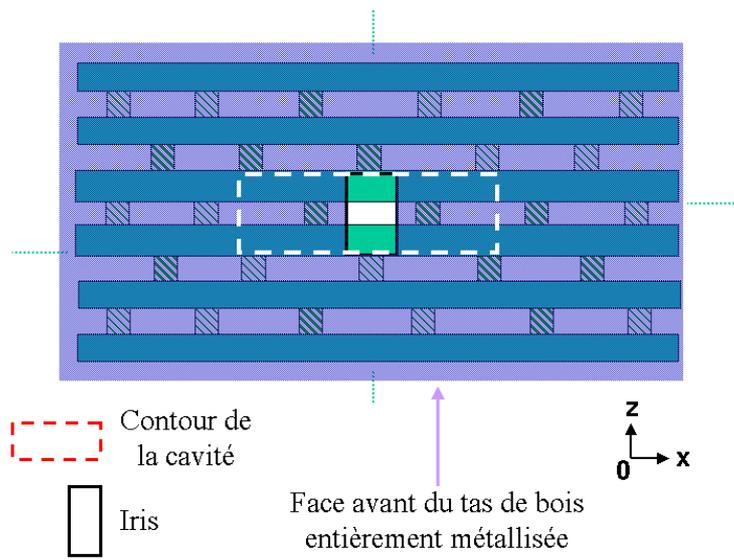


Figure IV-53. Face avant de la cavité BIE.

ANNEXE II

Les photos présentées dans cette annexe ont été réalisées au CTTC (équipe Recherche et Développement, responsable Cyrille Delage) de Limoges sur des pièces en céramiques fabriquées par stéréolithographie céramique 3D. Ces différentes pièces sont réalisées à partir d'une poudre de BZT fournie par Temex Ceramics ©.

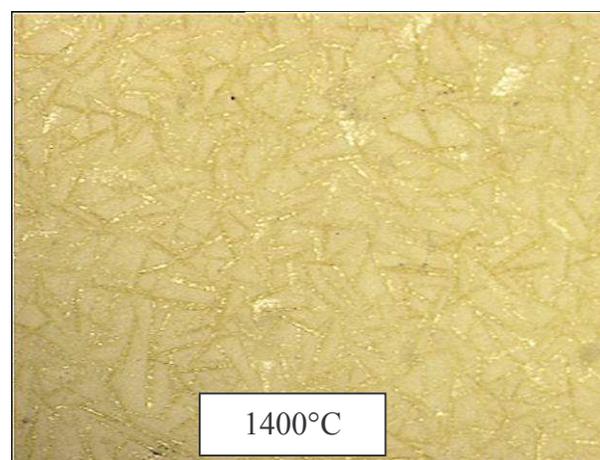
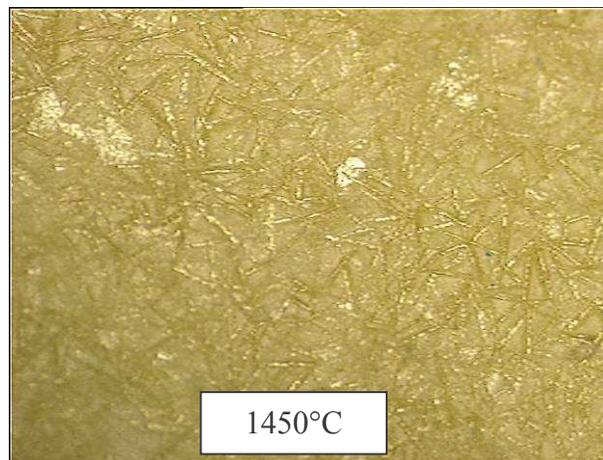
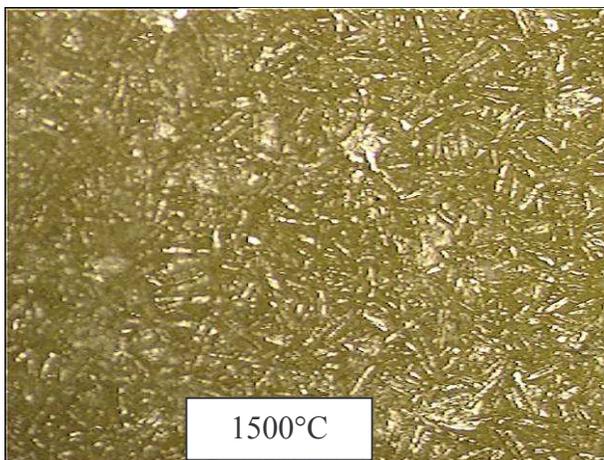
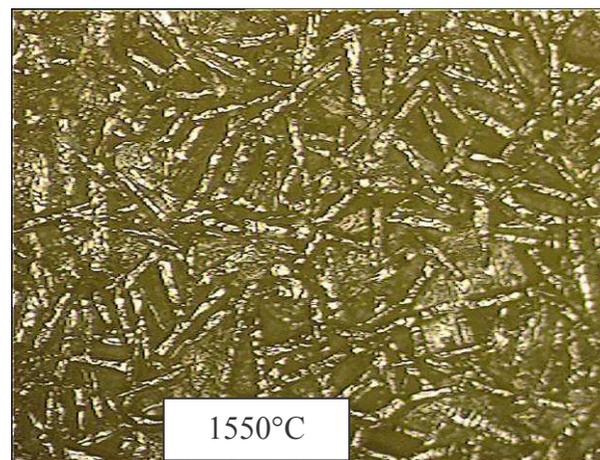
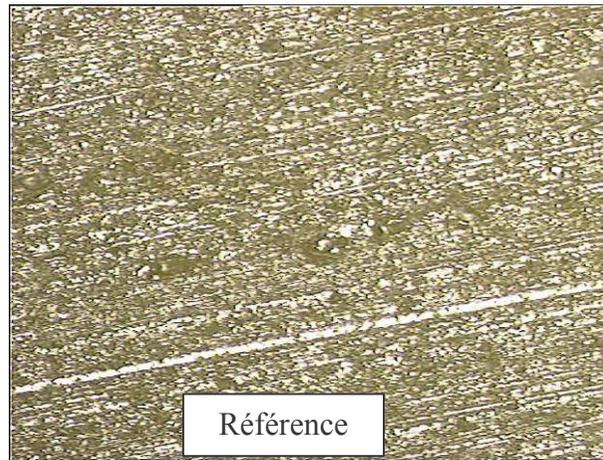
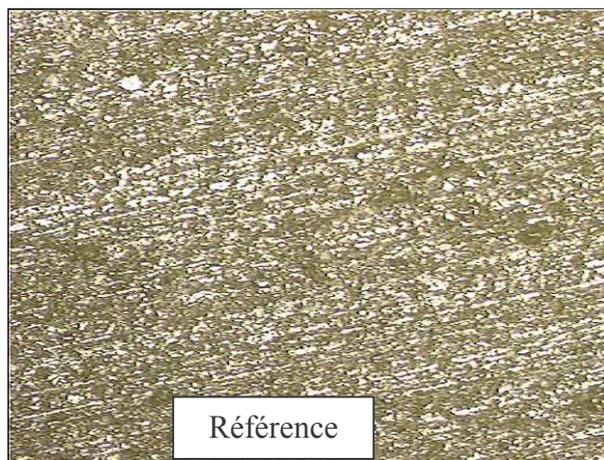
Différentes températures ont été utilisées pour leur cuisson allant de 1400 à 1550 °C.

Les différentes photographies présentes une vue à différents grossissements de leur structure cristalline comparée à une référence fournie par Temex Ceramics. Cette référence est un résonateur diélectrique fabriqué dans cette entreprise par moulage avec la même poudre céramique.

Ce travail a été effectué en collaboration avec l'institut de recherche Xlim de Limoges dans le cadre du projet OTOP.

Observations de la surface des pièces avec un microscope optique :

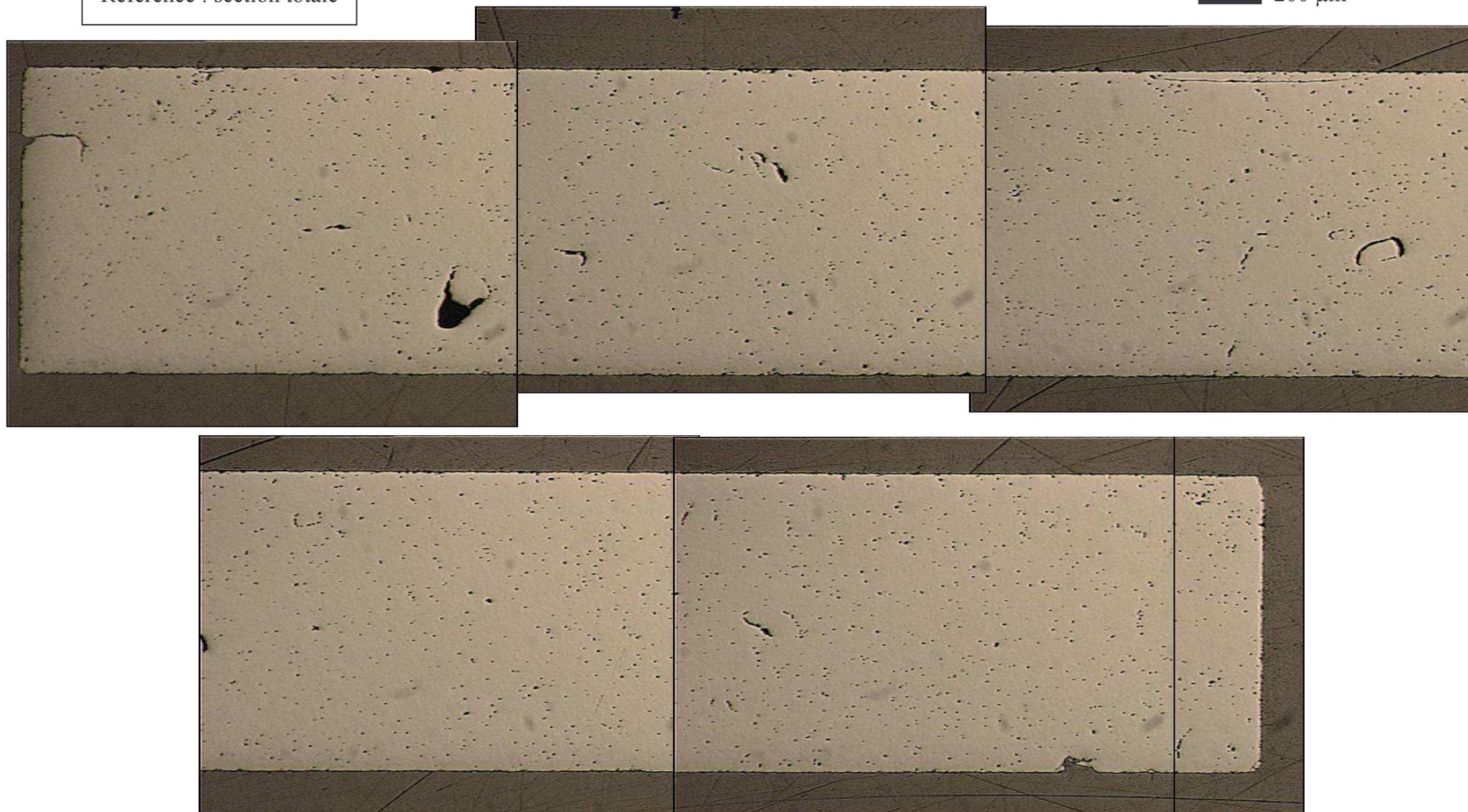
200 μm

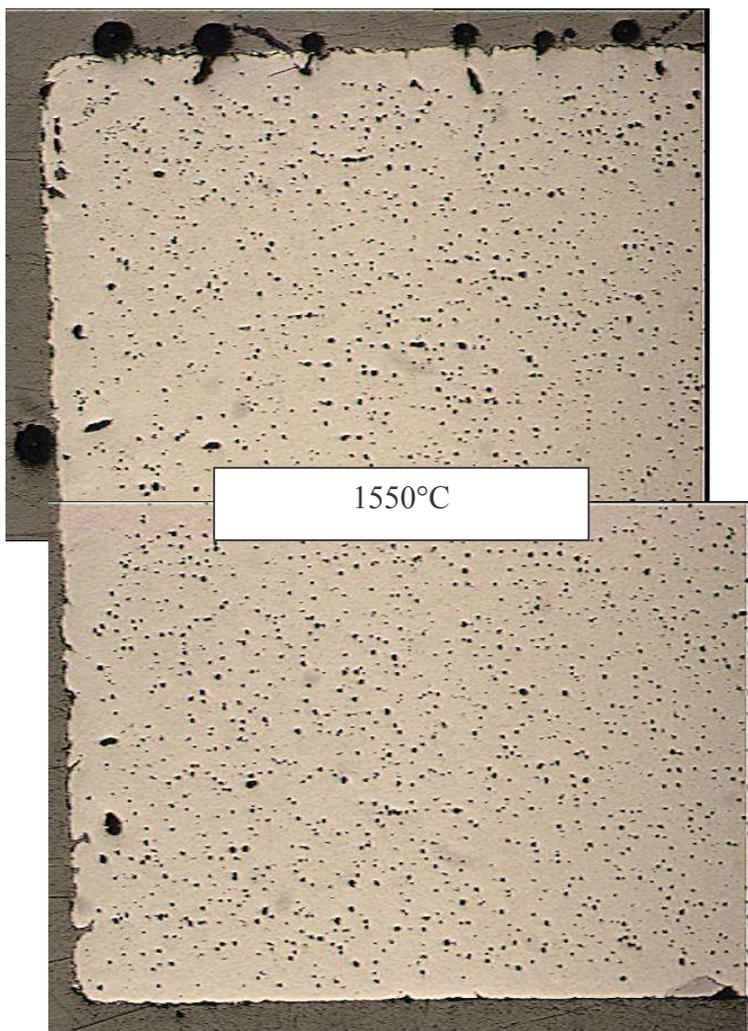


Observations d'une section après polissage avec un microscope optique :

Référence : section totale

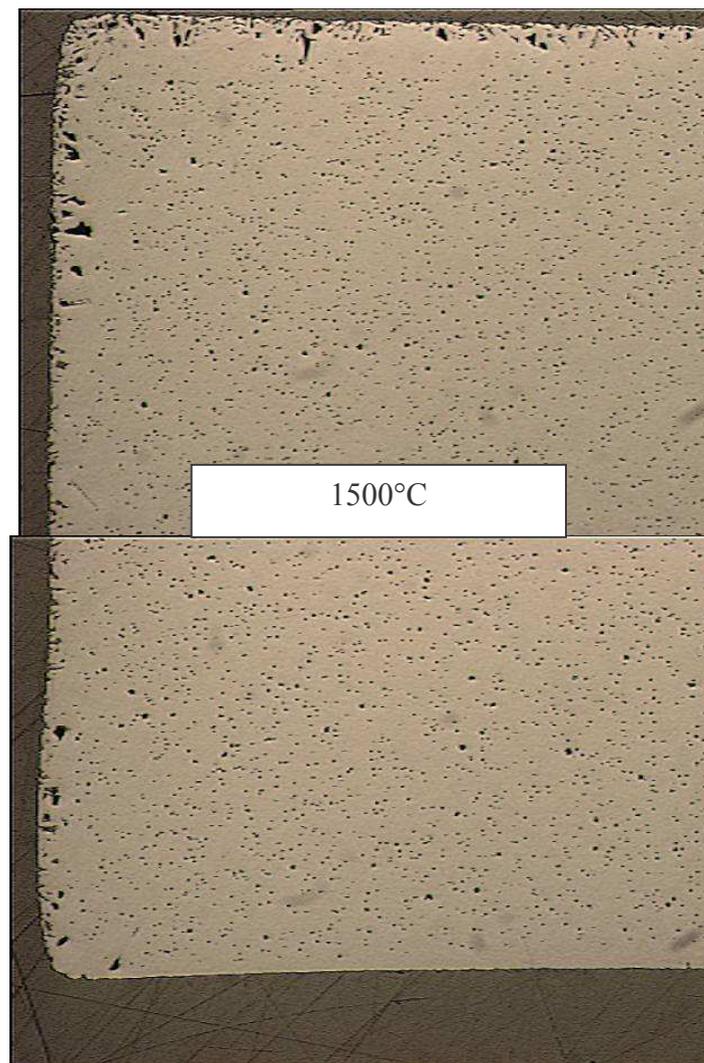
200 μm



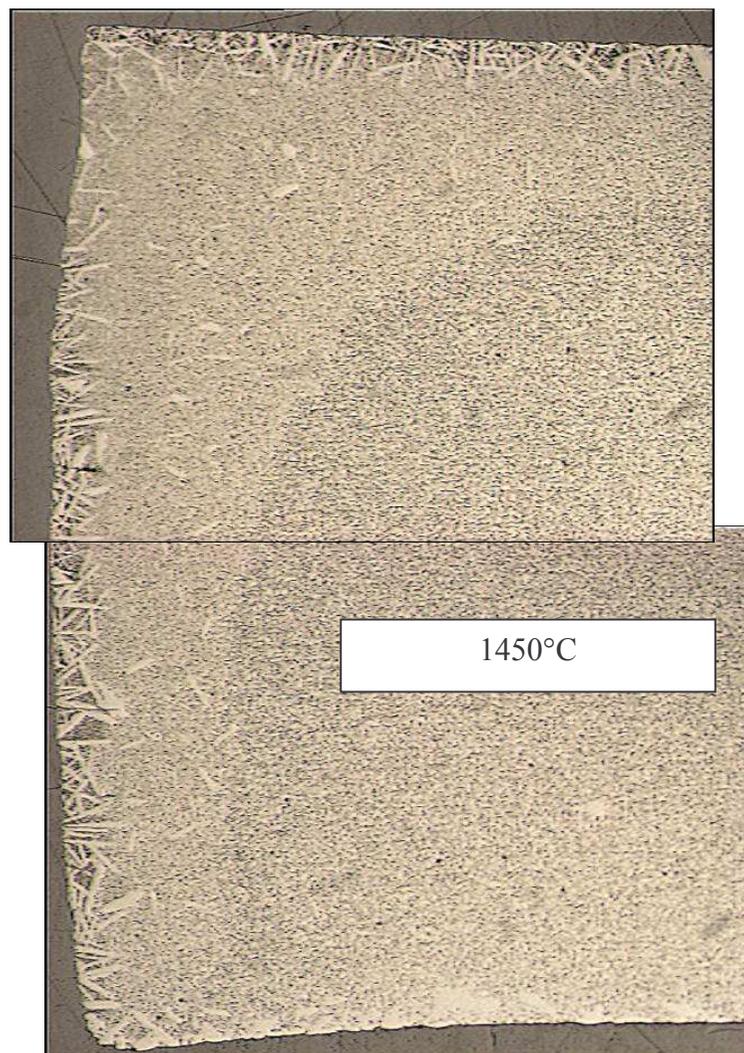


↑ côté sur support réfractaire

200 μm

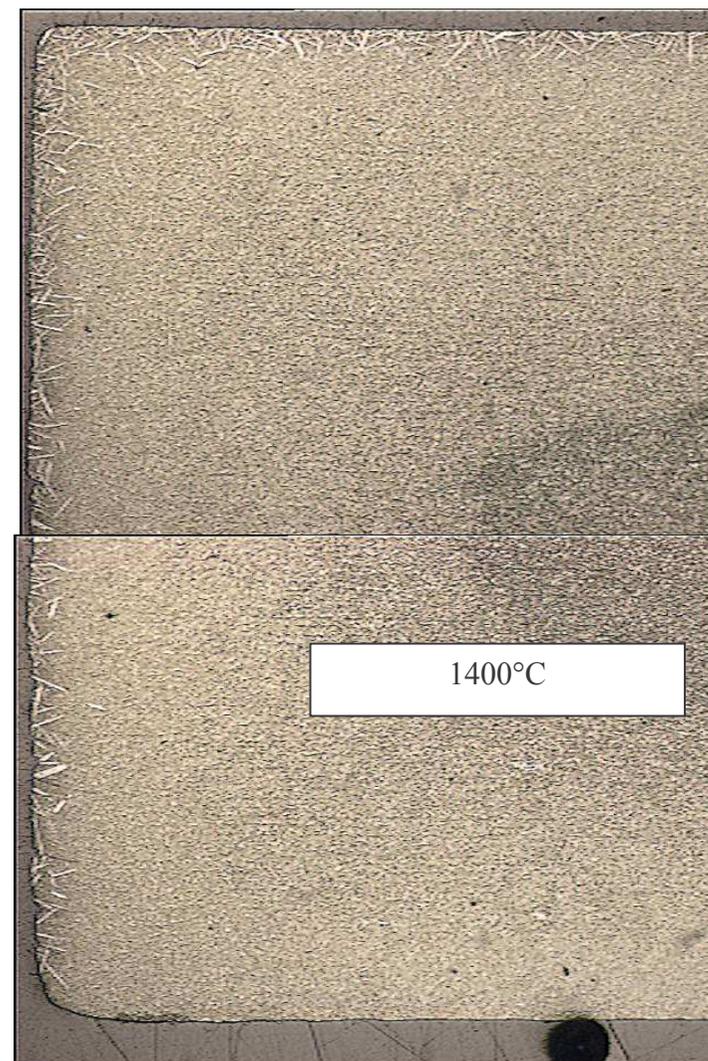


↑ côté sur support réfractaire

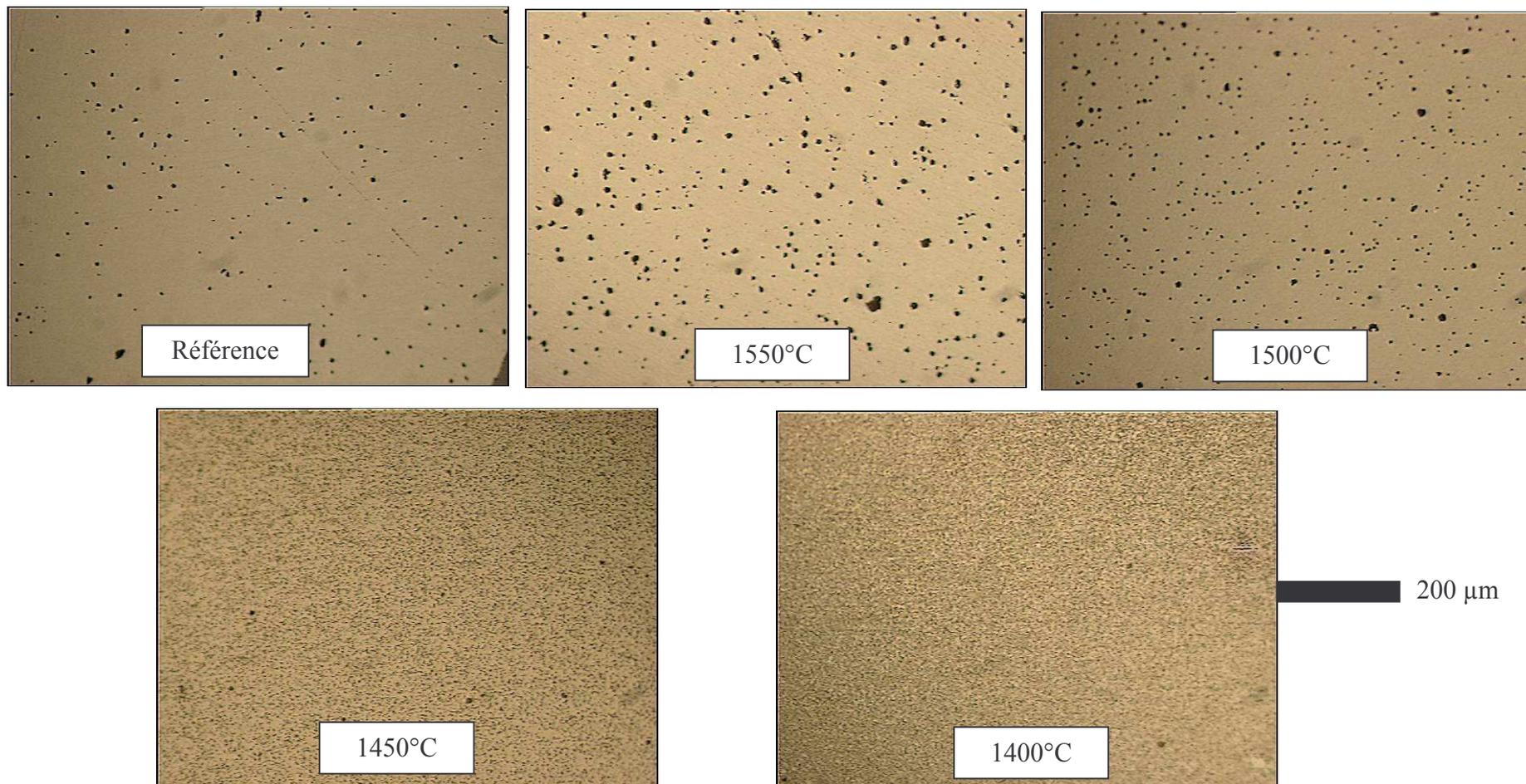


↑ côté sur support réfractaire

200 μm

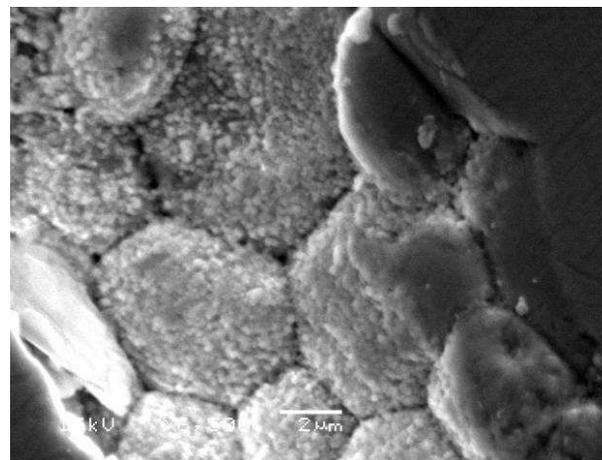
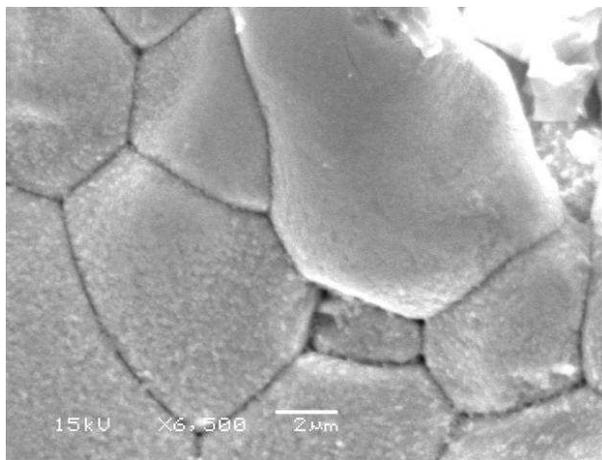
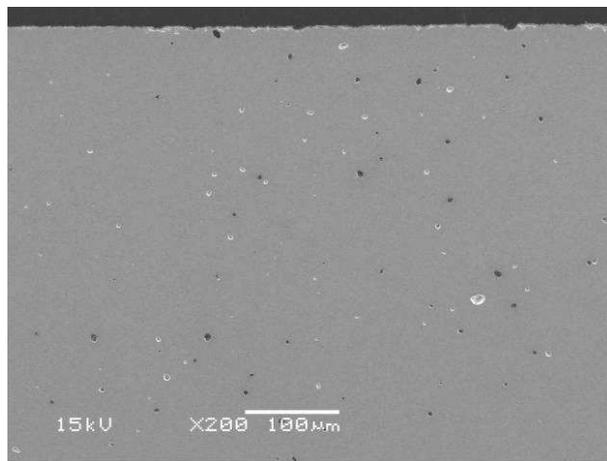


↑ côté sur support réfractaire

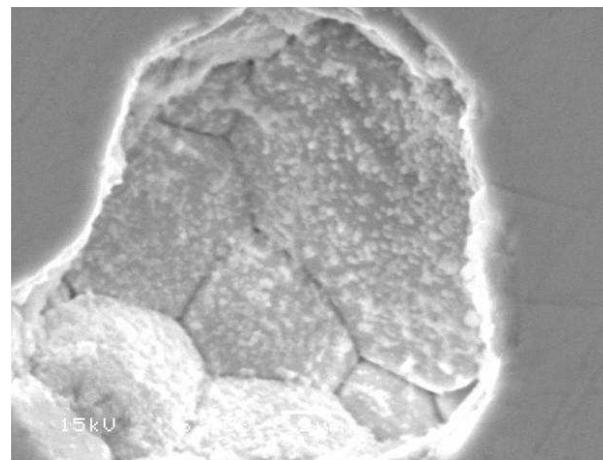
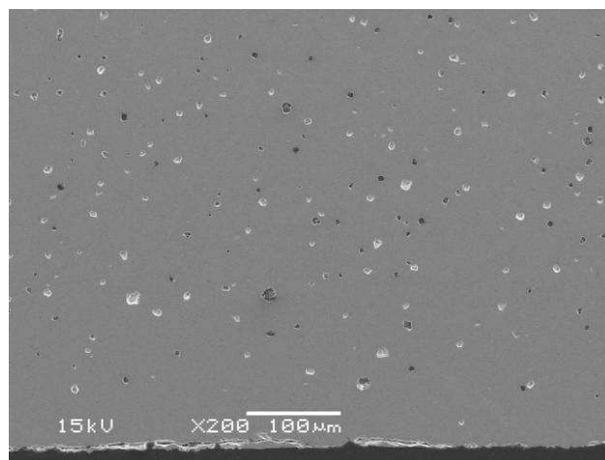
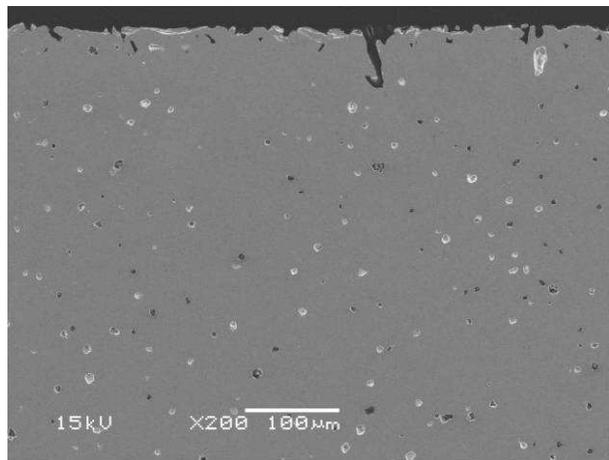


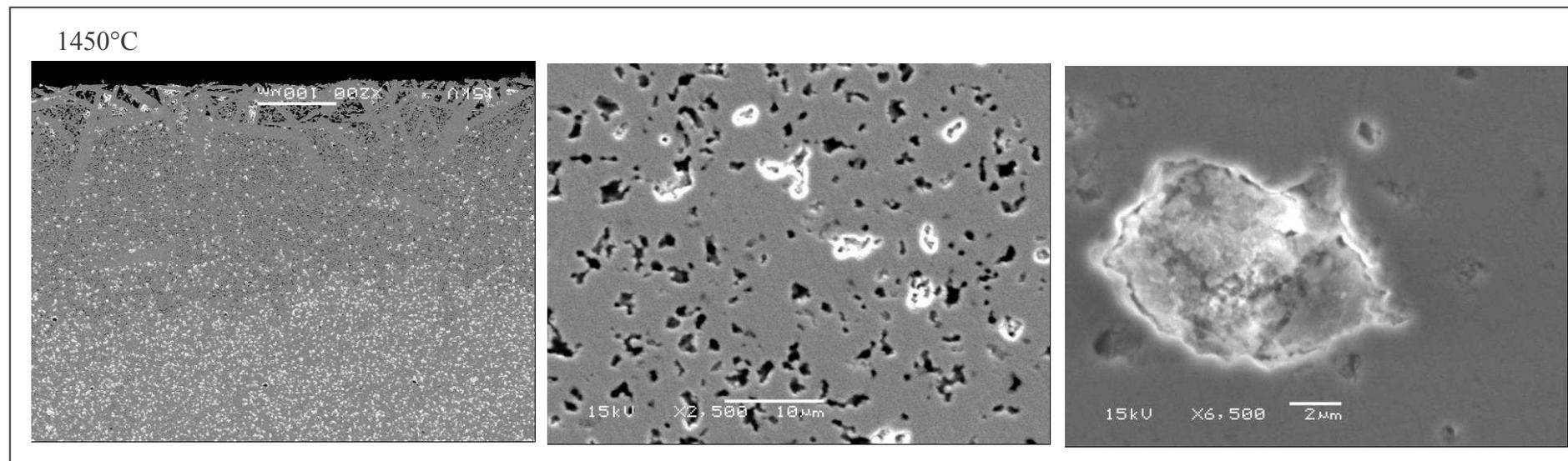
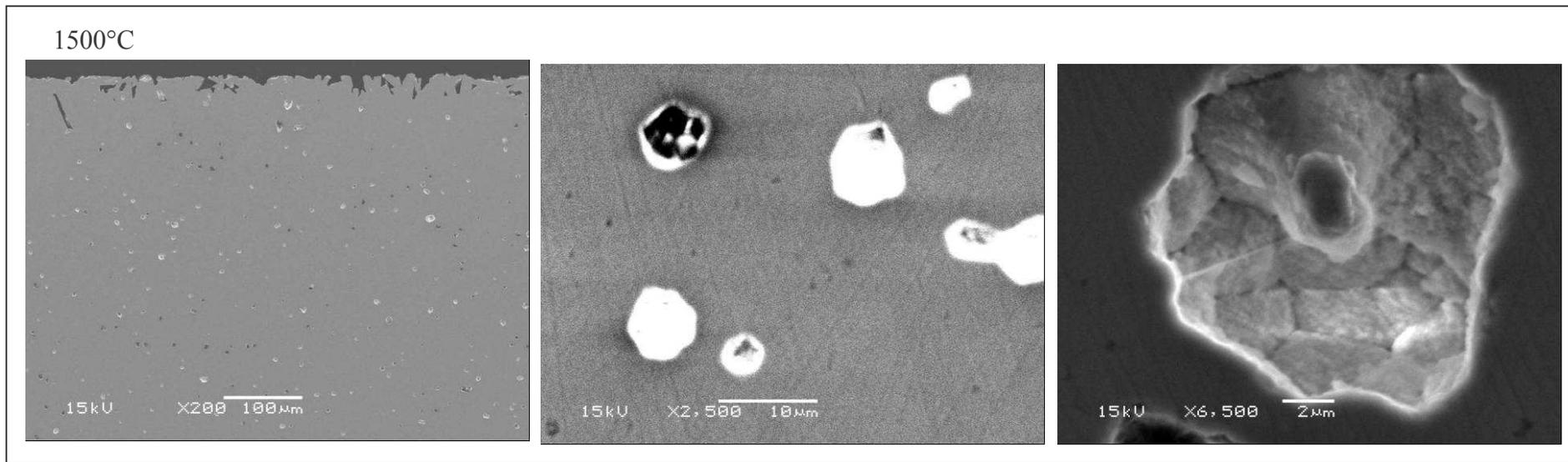
Observations d'une section après polissage au MEB :

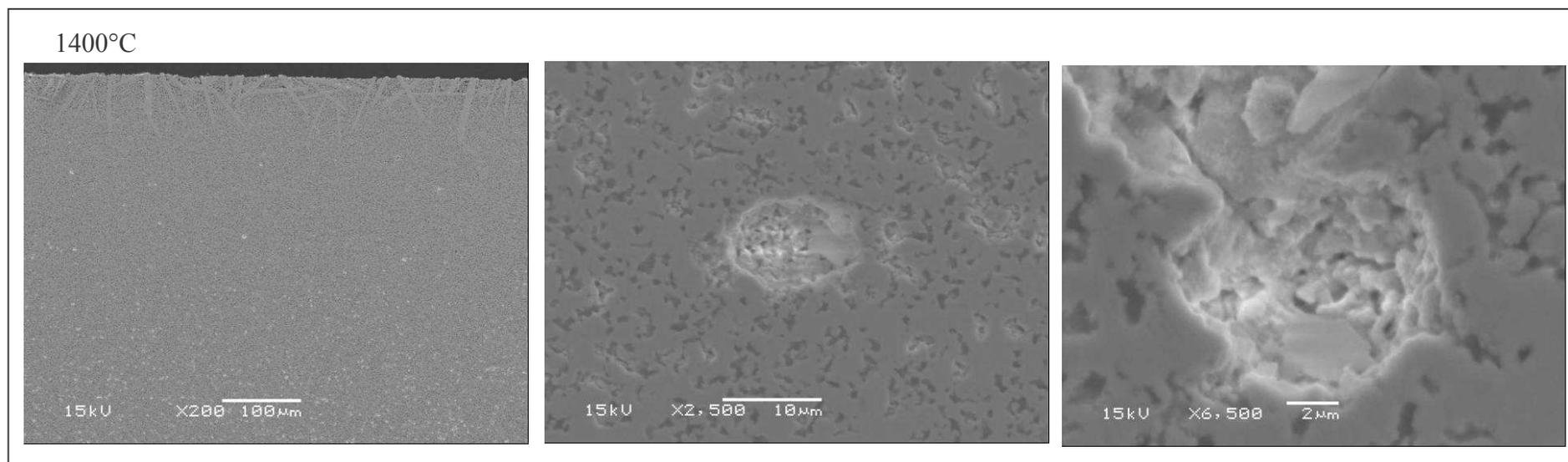
Référence



1550°C







ANNEXE III

Gravure sèche DRIE (Deep Reactive Ion Etching).

Cette annexe décrit en détail la technique de gravure sèche utilisée à l'Institut d'Electronique Fondamental (IEF) d'Orsay. Ces travaux ont été effectués au sein de la Centrale Technologique Universitaire (CTU) d'Orsay.

Le principe de base consiste à ce que chaque wafer reçoive deux étages de tas de bois, l'empilement de la totalité des wafers réalisés permettant de reconstituer le cristal 3D. Ces wafers sont choisis polis double face d'une épaisseur de $500 \pm 25 \mu\text{m}$.

En se basant sur la géométrie complète de la structure, celle-ci est éclatée en différentes configurations associées à des masques adaptés.

I.1. Etape 1 : Préparation du wafer.

Cette étape a pour but d'enlever l'humidité sur les wafers et de permettre une dépose optimale de la résine photosensible après refroidissement dans un endroit sec. Typiquement ils sont cuits à $120 \text{ }^\circ\text{C}$ et passés ensuite à l'étuve pour enlever l'eau à leur surface.

Leur épaisseur est ensuite mesurée en différents endroits du wafer afin de connaître la profondeur de gravure nécessaire pour obtenir les cotes souhaitées pour la hauteur des tiges.

NB : des promoteurs d'adhésion, typiquement du HMDS (HexaMethylDiSilizane) peuvent être utilisés. Typiquement, celui-ci est appliqué dans une certaine proportion sur un wafer en train de tourner puis est laissé sécher à l'air libre. Néanmoins le protocole qui sera utilisé ne nécessite pas systématiquement un tel promoteur.

I.2. Etape 2 : Dépôt de la résine photosensible.

La résine photosensible se présente dans un état liquide grâce à sa dissolution dans un solvant. Au cours du dépôt sur le wafer en train de tourner, plusieurs paramètres doivent être sélectionnés avec une grande attention :

- Vitesse de rotation du wafer.
- Durée de rotation.
- Accélération du wafer.

De même il faut aussi faire attention au volume de résine utilisé, à ses propriétés (viscosité, pourcentage de résine solide, composition des solvants) et au substrat (type et topographie). Un protocole standard consiste à utiliser une résine du type AZ4562 et à la déposer sur le wafer tournant à 2000 tours/min pendant 30 secondes.

Ceci permet le dépôt d'une couche de résine de l'ordre de 8 μm Figure A3-1

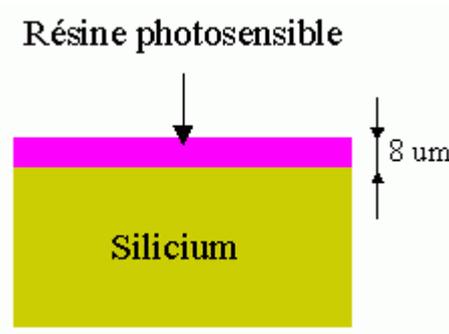


Figure A3-1. Une couche uniforme de résine est présente à la surface du wafer de silicium.

NB : l'épaisseur de résine est proportionnelle à l'inverse de la racine carrée de la vitesse de rotation et proportionnelle à la viscosité de la résine liquide.

I.3. Etape 3 : Pré-cuisson.

Après dépôt, il reste entre 20 et 40% massique de solvant dans la couche de résine déposée : cette cuisson permet d'enlever l'excès de solvant.

Ainsi, la majorité des solvants est enlevée et la couche devient stable à température ambiante.

Il est intéressant de remarquer que lorsqu'on retire ces solvants quatre principaux effets se produisent par rapport à cette couche :

- Son épaisseur est réduite.
- Les propriétés du développement à venir se trouvent changées.
- L'adhésion est améliorée.
- Elle est moins visqueuse et donc moins susceptible d'être contaminée par des particules.

Il reste après cuisson typiquement de 3 à 8% de solvant dans la couche de résine, ce qui est acceptable pour la lithographie. Classiquement, la cuisson se fait par plaque chauffante; ainsi, grâce à la haute conductivité thermique du Silicium, la résine monte rapidement à la température de la plaque. Le gros avantage de cette méthode est la forte réduction du temps de cuisson ainsi que de l'uniformité de celle-ci. Ici le wafer est chauffé 10 minutes à 90°C.

Après cuisson, on laisse le wafer redescendre à température ambiante.

I.4. Etape 4 : Alignement et exposition.

Il faut savoir que la solubilité de la résine photosensible dans un développeur change après exposition à la lumière (ici plus particulièrement aux UV) ; elle devient typiquement deux à trois fois meilleure.

Dans le cas classique de la résine positive dont le composé photoactif est du diazonaphtoquinone (DNQ), ce dernier n'est pas (ou très peu) soluble dans un développeur basique en milieu aqueux. La partie active (photosensible) du DNQ va réagir et se transformer sous l'action de la lumière UV et en présence d'eau en acide carboxylique (voir équation I).

Cet acide est une molécule polaire, ce qui a pour conséquence de nettement augmenter la solubilité de la partie insolée dans le bain de développement.



La lithographie par contact direct du masque sur le wafer peut être employée. Cette méthode permet une haute résolution (de l'ordre de la longueur d'onde employée) mais peut entraîner un endommagement du masque. Le degré et le temps d'exposition sont bien évidemment réglés en fonction de la résine utilisée et de son épaisseur et est mesurée par

l'intermédiaire d'une énergie surfacique ($J.m^{-2}$). La Figure A3-2 montre le résultat après exposition.

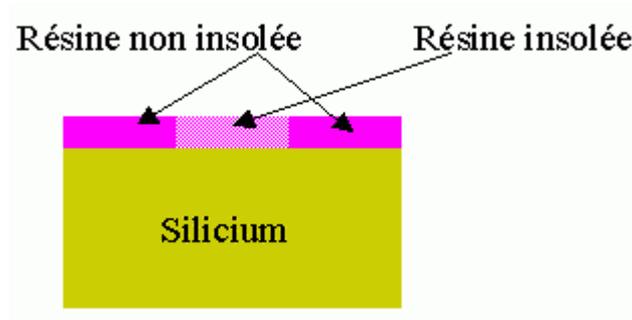


Figure A3-2. La résine surplombant les parties devant être gravées est insolée par les rayons UV.

I.5. Etape 5 : Développement.

Après exposition, la résine est typiquement développée dans des bains de solution aqueuse basique (avec quelques agitations qui lui seront appliquées). Cette étape est une des plus critiques car ce sont les caractéristiques des interactions résine-développeur qui vont déterminer en grande partie la forme du profil de la résine et le contrôle de la largeur des motifs. Ici, un bain dans une solution aqueuse de 20% de développeur AZ400K pendant approximativement 3 minutes permet un bon développement (Figure A3-3). Le wafer est ensuite rincé à l'eau dé-ionisée puis séché.

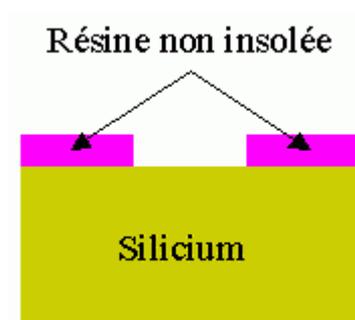


Figure A3-3. La résine insolée aux UV est enlevée suite au développement.

I.6. Etape 6 : Transfert du motif par RIE.

Après impression par lithographie des motifs dans la résine, nous devons les réaliser dans le substrat. La méthode retenue est une gravure sèche dans un environnement plasma par RIE basée sur le procédé Bosch. Pour l'exemple le bâti utilisé sera le STS Multiplex ICP AOE System dont le schéma de principe et une photographie de la machine utilisée sont visibles Figure A3-4.

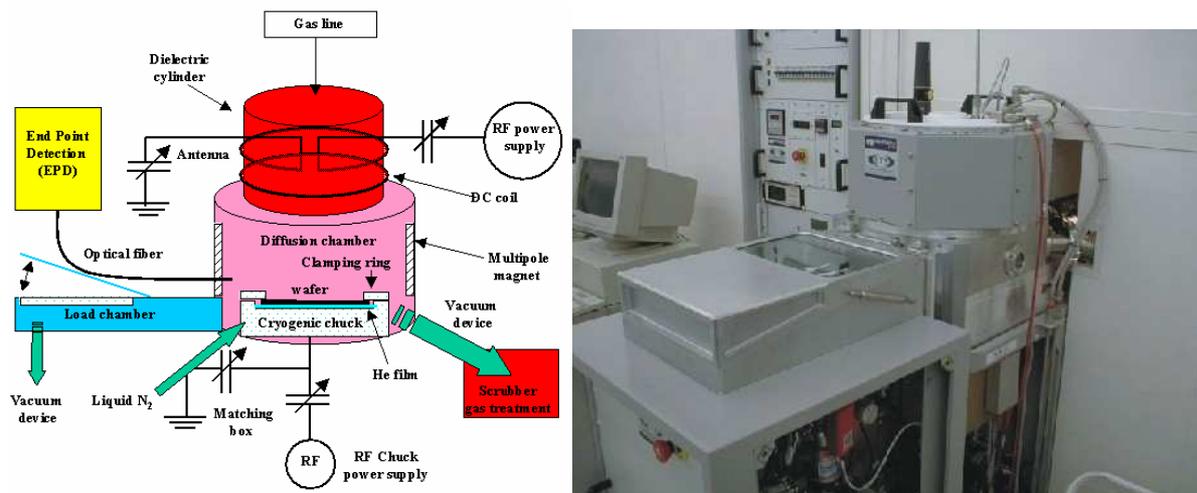


Figure A3-4. Schéma de principe et photographie du STS Multiplex ICP.

La chambre de chargement (load chamber) permet de placer le wafer dans la chambre de diffusion tout en restant dans un environnement sous vide. Le wafer, clampé mécaniquement sur un support, est refroidi par un coussin d'Hélium maintenu ici à 10°C par un refroidissement cryogénique.

Le plasma est généré par une source ICP ((Inductively Coupled Plasma) qui est composée d'une bobine connectée à un générateur RF et placé sur un tube d'Alumine. Le courant oscille à 13.56 MHz dans la bobine et induit un champ électromagnétique dans le tube d'Alumine. Des électrons primaires suffisamment mobiles acquièrent de l'énergie et vont générer des paires ions/électrons lors de collisions inélastiques avec des neutres. Le plasma est alors créé dans l'enceinte sous-vide où la pression est régulée et dans laquelle sont injectés les gaz. En appliquant un potentiel au support du wafer, les ions générés dans le plasma se dirigent alors en ligne droite vers ce dernier. Le wafer est gravé par une succession rapide d'étapes de gravure (plasma SF₆) et de passivation (plasma C₄F₈) comme expliqué la Figure A3-5.

Ce procédé permet une gravure anisotropique et d'atteindre des vitesses de gravure allant jusqu'à 10 $\mu\text{m}/\text{min}$. La sélectivité Silicium/résine photosensible est de l'ordre de 100 à 200, ce qui signifie concrètement que le Silicium sera gravé 100 à 200 fois plus vite que la couche de résine. Cela permet ainsi à cette couche d'assurer son rôle protecteur tout au long de la gravure du Silicium. Concrètement, 30 minutes suffisent pour graver 200 μm de Silicium.

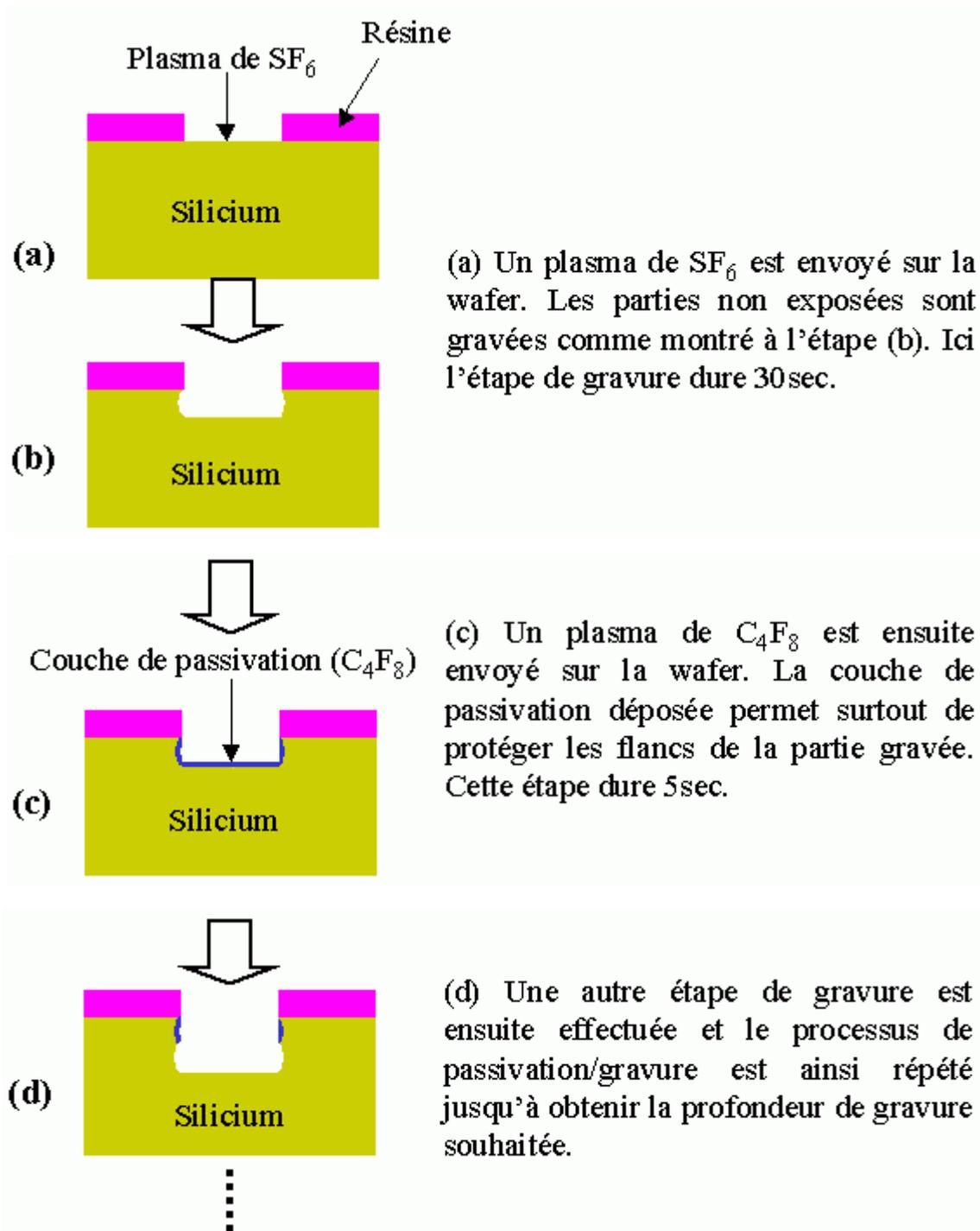


Figure A3-5. Principales étapes de la RIE basée sur le procédé Bosch.

Les gravures successives entraînent un effet dit de « scalloping » du à la légère surgravure (quelques micromètres) présente sur les flancs de gravure : voir Figure A3-6.

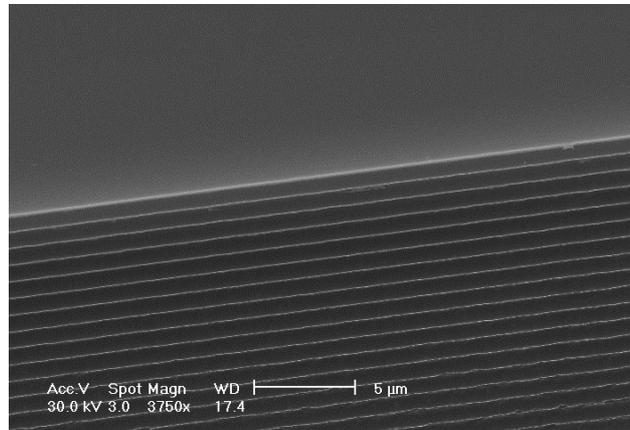


Figure A3-6. Vue rapprochée au microscope électronique du flanc des tiges gravées. L'effet de « scalloping » est nettement visible.

NB : une caméra installée sur le bâti, vérifiant in-situ la profondeur de la gravure au fur et à mesure de celle-ci, permet un contrôle optimal de ce paramètre critique.

I.7. Etape 7 : Nettoyage.

Après gravure, la résine doit être enlevée par un nettoyage humide à l'acétone pour enlever la majorité des composés organiques. Les derniers résidus sont éliminés par un bain rapide d'un mélange de H_2SO_4 (acide sulfurique) et H_2O_3 (eau oxygénée). Le wafer est ensuite rincé et séché. A la fin de cette étape, un premier motif a été gravé sur la moitié de l'épaisseur du wafer.

Ces sept étapes sont maintenant à répéter sur l'autre face avec les motifs (et donc le masque) adéquats. Néanmoins il faut faire très attention sur un point : au cours de cette seconde gravure, il ne faut absolument pas que les ions assurant la gravure et la passivation au cours du procédé Bosch ne traverse le wafer. Afin d'y remédier facilement, une solution consistant à déposer par PECVD (Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition) une couche de SiO_2 (épaisseur de $1 \mu m$ après 15 min de dépôt) sur la première face gravée est envisagée. En effet grâce à la très forte sélectivité Si/ SiO_2 du procédé Bosch (de 200 à 400), il y a très

peu de risque que les ions traversent cette membrane. Cette étape permet de s'assurer de la gravure complète de la dernière face, sans endommager la première.

I.8. Etape 8 : Découpe et observation au MEB.

Les différents motifs présents sont ensuite découpés grâce à une scie circulaire diamantée pilotée par ordinateur. Pour cela, le wafer est collé sur un film plastique lui-même fixé sur un support. Il est ensuite aligné correctement par la machine puis les coordonnées des chemins de découpe sont rentrées dans le logiciel de pilotage.

Il ne reste plus, après la découpe précise au micromètre près, qu'à récupérer les différents éléments. Ceux-ci sont alors observés au microscope électronique à balayage (MEB) afin de vérifier la qualité de la gravure (précision et tenue des dimensions). La Figure A3-7 montre les vues obtenues à différents niveaux de zoom.

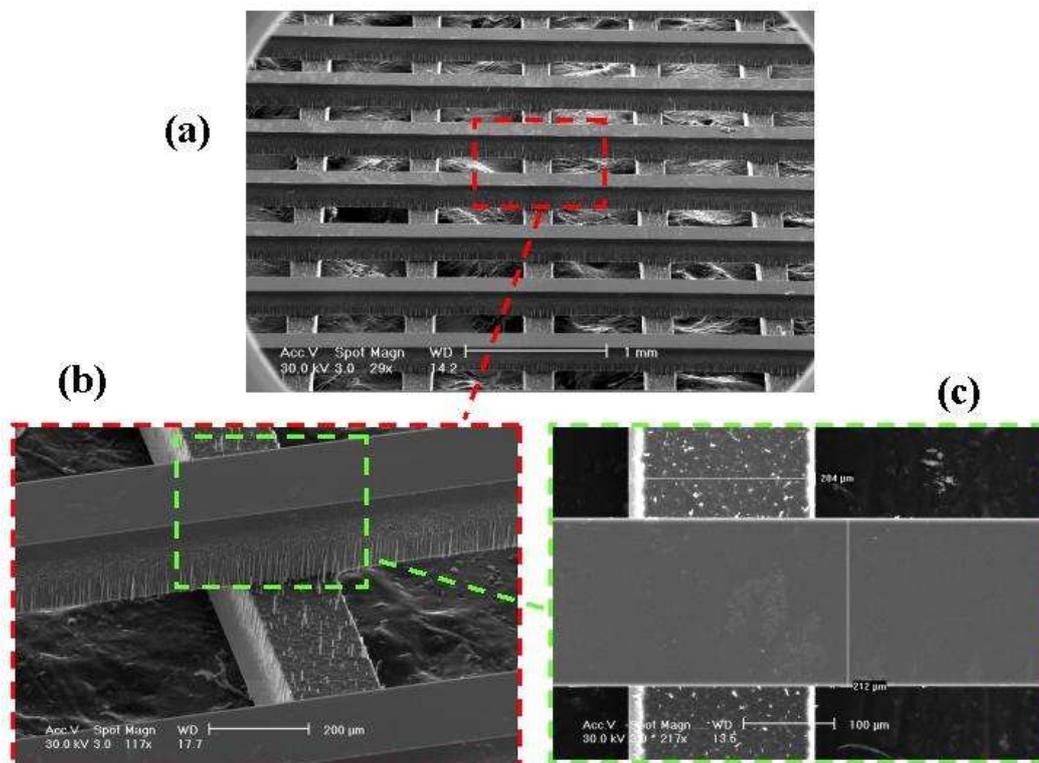


Figure A3-7. Vue au MEB des pièces après fabrication.

Commentaires sur les photographies de la Figure A3-7:

- Fig a : Vue globale : on note une excellente régularité des différentes tiges.
- Fig b : Vue rapprochée de l'intersection de deux tiges : on note surtout la présence d' « herbe ». Ce sont en fait des tiges de Silicium non gravées. Ce phénomène est bien connu et peut-être évité en affinant la température de refroidissement du wafer. Il a aussi pour conséquence de légèrement diminuer la qualité de gravure sur les flancs des tiges.
- Fig c : Vérification des dimensions latérales : celles-ci sont de 212 μm pour une valeur théorique de 218 μm (erreur relative inférieure à 3%).

I.9. Etape 9 : Assemblage.

Cette dernière étape est critique puisqu'elle conditionne « la forme cristalline définitive » qu'aura le tas de bois en Silicium. Afin de minimiser les erreurs d'alignement, une technique de type wafer-bonding par force de Van-der-Waals peut être utilisée afin d'associer les wafers un à un, voire deux à deux tout en assurant une précision de placement de l'ordre de 1 micromètre. Nous nous servons ici de la faible interaction électrique entre les atomes de Si de deux wafers pour les coller l'un à l'autre. A titre d'exemple, c'est cette force qui permet aux geckos de pouvoir grimper aux murs [1].

Cette technique est actuellement en cours d'essai afin de finaliser cette dernière étape technologique.

Référence :

[1] K. Autumn, M. Sitti, Y. A. Liang, A. M. Peattie, W. R. Hansen, S. Sponberg, T. W. Kenny, R. Fearing, J. N. Israelachvili, and R. J. Full, "Evidence for van der Waals adhesion in gecko setae, " *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, Vol. 99, No. 19 (Sep. 17, 2002), pp. 12252-12256.

BIBLIOGRAPHIE

PERSONNELLE

BIBLIOGRAPHIE PERSONNELLE

I. Publications dans des revues internationales.

N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, C. Delage, C. Chaput, "Innovative Shielded High Q Dielectric Resonator Made of Alumina By Layer-By-Layer Stereolithography," *IEEE Mic. And Wir. Comp. Lett.*, vol. 17, no. 6, Juin 2007.

N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, C. Delage, C. Chaput, "Ceramic layer-by-layer stereolithography for the manufacturing of 3D millimeter wave filters," *IEEE Trans. On MTT*, vol. 55, no. 3, pp. 548-554, Mars 2007.

II. Publications dans des congrès internationaux.

C. Duterte, N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, Y. Abouliatim, T. Chartier, "3D Ceramic Microstereolithography applied to sub-millimeter devices manufacturing, *2007 EuMW Symp. Dig.*, Octobre 2007.

N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, M. Thévenot, C. Delage, and C. Chaput, "Large experimental bandpass waveguide in 3D EBG woodpile manufactured by layer-by-layer ceramic stereolithography", *2007 IEEE MTT-S Int. Mic. Symp. Dig.*, Juin 2007.

N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, C. Delage, C. Chaput, "Bandpass three pole filter made of zirconia ceramic by 3D stereolithography", *2006 International CNES workshop*, Toulouse, Octobre 2006.

N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, C. Delage, C. Chaput, "Narrow Ka bandpass filters made of high permittivity ceramic by layer-by-layer stereolithography," *2006 EuMW Symp. Dig.*, Septembre 2006.

III. Publications dans des congrès nationaux.

N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, M. Thévenot, C. Delage, C. Chaput, "Procédé de fabrication de composants céramiques par stéréo-lithographie 3D, " *JNM*, Xème Journées Nationales Microondes, Toulouse, Mai 2007.

C. Duterte, N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, Y. Abouliatim, T. Chartier, "Micro stéréo-lithographie céramique 3D appliquée à la fabrication de composants sub-millimétriques, " *JNM*, Xème Journées Nationales Microondes, Toulouse, Mai 2007.

N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, M. Thévenot, C. Delage, C. Chaput, "Analyses théoriques de structures périodiques "Tas de bois" - applications à la conception de dispositifs millimétriques et submillimétriques", *GDR Ondes*, Orsay, Octobre 2006.

N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, A. Bessemoulin, J.-R. Bois, P. Quentin "Optimisation très large bande d'une transition Hot-Via de type microruban-coplanaire sur substrat d'accueil bas coût," *JNM*, IXème Journées Nationales Microondes, Nantes, Mai 2005.

RESUME

Ces travaux de thèse ont porté sur la conception et la réalisation de composants céramiques 3D par procédé de stéréolithographie. Ce procédé permet notamment la fabrication de formes complexes tridimensionnelles à base de matériaux céramiques variés. Ces différents composants apportent des solutions de filtrage innovantes aux solutions actuelles.

La première partie de ce manuscrit présente les propriétés des cristaux à bande interdite électromagnétique et différentes structures 1D, 2D et 3D existantes. Différentes méthodes de fabrication de ces structures sont de mêmes étudiées.

la seconde partie est dédiée à la conception et à la réalisation de résonateurs diélectriques originaux à base d'Alumine fonctionnant dans la bande de fréquence Ku. Le procédé de fabrication choisi pour leur réalisation y est tout particulièrement présenté.

La troisième partie est dédiée à la conception et la réalisation de filtres à bande interdite électromagnétique innovants fonctionnant dans la bande Ka. L'utilisation de céramiques telles que la Zircone et le BZT est aussi étudiée.

La dernière partie de ce mémoire se concentre sur l'étude de structures 3D à bande interdite électromagnétique de type « tas de bois ». Ces cristaux particuliers sont étudiés afin de proposer des solutions de guidage et de filtrage innovants tout en utilisant différentes céramiques pour leur fabrication.

This work is about the design and manufacturing of 3D components made out of ceramic material by stereolithography. This process is able to manufacture complex 3D shapes out of several ceramic materials.

These components bring new and innovative filtering solutions to the current ones.

The first part presents the particular properties of electromagnetic bandgap materials and several 1D, 2D and 3D structures. Several manufacturing process are as well studied.

The second part deals with the design and manufacturing of dielectric resonators made out of Alumina and working in the Ku band. The chosen manufacturing process is more precisely described.

The third part presents the design and manufacturing of innovative electromagnetic bandgap filters working in the Ka band. In this part the use of several ceramic materials like the Zirconia and BZT ceramic is particularly studied.

Finally the last part is focused on 3D electromagnetic structures called "woodpile". These particular crystals are studied in order to propose innovative guiding and filtering devices which are made out of several ceramic materials.

Mots clés :

Stéréolithographie céramique 3D

Analyse électromagnétique 3D

Résonateurs diélectriques

Cristaux photoniques

Filtre passe bande

Guide d'ondes

Alumine

BZT

3D ceramic stereolithography

3D Electromagnetic analysis

Dielectric resonator

Photonic crystals

Passband filter

Waveguide

Alumina

BZT