Thèse de doctorat

Université de Limoges

Université de Limoges

ED 610 - Sciences et Ingénierie des Systèmes, Mathématiques, Informatique (SISMI)

Institut de recherche Xlim, UMR CNRS n°7252

Thèse pour obtenir le grade de
Docteur de l'Université de Limoges
Electronique des Hautes Fréquences

Présentée et soutenue par
Anthony DELAGE

Le 18 décembre 2019

Technologie aérosol appliquée à l'intégration 3D et aux composants hyperfréquences

Thèse dirigée par Serge VERDEYME, Nicolas DELHOTE

JURY :

Président
M. Pierre BLONDY, Professeur, XLIM – Axe Systèmes RFELITE – Equipe MINT

Rapporteurs
M. Philippe FERRARI, Professeur, TIMA, Université Grenoble-Alpes
M. Eric RIUS, Professeur, Lab-STICC, Technopole Brest-Iroise

Examinateurs
Mme. Barbara BONNET, Ingénieur, Thalès Alenia Space
M. Ludovic CARPENTIER, Ingénieur, CNES
M. Nicolas DELHOTE, Co-directeur de thèse, Maître de Conférences, XLIM – Axe Systèmes RF – Equipe MACAO
M. Serge VERDEYME, Professeur, Directeur de thèse, XLIM – Axe Systèmes RF – Equipe MACAO

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Invités
M. Olivier TANTOT, Maître de Conférences, XLIM – Axe Systèmes RF – Equipe MACAO
Mme. Malgorzata PIECHOWIAK, Ingénieur, CTTC

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Dédicace

Je dédie ce travail à mon groupe d’amis proches, ma famille et ma compagne. Je ne serais surement pas allé aussi loin sans eux.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Le manque d'argent n'est pas un obstacle. Le manque d'idées est un obstacle.
Ken Hakuta

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Remerciements

Ces travaux de thèse ont été effectués au sein de l'équipe MINACOM de l'Institut de recherche XLIM UMR CNRS 6172 de Limoges.

Je tiens tout d'abord à remercier M. Dominique Baillargeat, Directeur, à l'époque, du laboratoire XLIM, de m'avoir accueilli et permis de réaliser ces travaux.

Je remercie M. Blondy, Co-Responsible Axe RFE, d'avoir présidé ce jury. Je remercie également M. FERRARI, Professeur au TIMA, et M. RIUS, Professeur au Lab-STICC, d'avoir accepté de rapporter sur ce manuscrit.

Ce travail a été effectué sous la direction de M. Nicolas Delhote, Maitre de conférences à l'Université de Limoges, et M. Serge Verdeyme, Professeur à l'Université de Limoges, auxquels je tiens à exprimer tous mes remerciements, pour leur aide, leur expérience et leurs connaissances. Je leur exprime également ma sincère reconnaissance pour leur disponibilité et leurs qualités scientifiques et humaines.

Je remercie M. Tantôt, Maitre de conférences à l'Université de Limoges, et M. Perigaud, Ingénieur de Recherches au laboratoire Xlim, pour leur disponibilité et l'aide qu'ils m'ont apporté durant ces trois ans.

Je remercie M. Passerieux, ITA permanent Université, et M. Hallepee, Ingénieur Etude CNRS, pour leur disponibilité, leur expérience et leur aide sur l'ensemble des mesures réalisées.

Je tiens également à remercier Mme. Lerouge, Secrétaire au sein de l'équipe MACAO, pour son soutien, son professionnalisme et son efficacité qui m'ont permis de mieux maitriser les différentes phases administratives plus ou moins compliquées et plus ou moins bien organisées.

Je remercie Mme. Malgorzata PIECHOWIAK, Ingénieure au sein du Centre de Transfert de Technologiques Céramiques (CTTC) de Limoges, pour le travail réalisé dans le cadre de ces trois ans de thèse. Malgré les hauts et les bas du projet, sa bonne humeur et son professionnalisme ont permis de rendre cette expérience agréable et enrichissante. Je remercie également l'ensemble de personnel du CTTC pour l'ensemble du travail réalisé. Le mérite des différentes impressions réalisées par Aérosol leur revient principalement.

Je remercie Mme. Bonnet, Ingénieure à Thales Alenia Space de Toulouse, et M. Carpentier, Ingénieur au CNES de Toulouse, pour avoir soutenu ce travail de thèse.

Plus généralement, je tiens à remercier les copains du laboratoire (Johan, Julien, Joseph, Andres, Etienne, Chaimaa, Thibault, Clément, Alexis, Fred, Jerem et bien d'autres) pour avoir rendu ces trois années agréables à passer dans la bonne humeur et l'enthousiasme (et réciproquement).

Je tiens maintenant à remercier mon groupe d'amis proches, ma famille et ma compagne pour m'avoir soutenu et encouragé jusqu'à la fin de mes études car sans eux je ne serais surement pas arrivé aussi loin.

Pour terminer, je tiens à encourager les futurs docteurs en leur rappelant que la thèse devient une expérience intéressante une fois qu'elle est terminée. Bon courage à eux.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Cette création est mise à disposition selon le Contrat :
« **Attribution-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de modification 3.0 France** »
disponible en ligne : *http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/3.0/fr/*

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Table des matières

Remerciements 5
Table des illustrations 10
Table des tableaux 17
Introduction générale 18
Chapitre I. La technologie de fabrication additive 20
I.1. Les technologies additives et l'évolution des PCB 20
I.1.1. Des origines jusqu'à aujourd'hui 20
I.1.2. Naissance et développement des technologies d'« écriture directe » 21
I.1.3. Comparaison des performances des différentes technologies DW 31
I.1.4. Technologie DW retenue 33
I.2. L'impression 3D 39
I.2.1. L'avènement des technologies d'impression 3D 39
I.2.2. Les différentes machines conçues pour l'impression 3D 41
I.2.3. Comparaison des performances des différentes technologies d'impression 3D 42
I.2.4. Technologie d'impression 3D retenue : Conclusion et discussion 45
I.3. Conclusion du Chapitre I 46
Références bibliographiques Chapitre I 47
Chapitre II. Etude de l'impression par jet d'aérosol et ses matériaux 53
II.1. Présentation des dispositifs 54
II.1.1. Les lignes de transmissions 54
II.1.2. Les résonateurs planaires 58
II.2. Méthode de caractérisation des matériaux 59
II.2.1. Méthode de caractérisation par cavité 60
II.2.2. Méthode de caractérisation par anneau résonnant 62
II.2.3. Conclusion et discussions sur les méthodes de caractérisation 63
II.3. Impression d'encre à nanoparticules par la technologie AJP 63
II.3.1. Etude sur la résolution minimum des encres à nanoparticules métalliques 65
II.3.2. Caractérisation des dépôts d'encres à nanoparticules métalliques 72
II.3.3. Réalisation de structures fonctionnelles 82
II.3.4. Conclusion sur l'impression d'encres à nanoparticules métalliques 88
II.4. Impression d'encre diélectrique par la technologie AJP 89
II.4.1. Impression du polyimide 90
II.4.2. Caractérisation de l'encre polyimide 93
II.4.3. Conclusion et discussion sur le polyimide imprimé 96
II.5. Conclusion du Chapitre II 97
Références bibliographiques Chapitre II 99
Chapitre III. Métallisation sélective d'objets 3D par AJP 103
III.1. Impressions sur des objets 3D à formes complexes 104
III.1.1. Effets d'une impression conforme par AJP sur la résolution 105
III.1.2. Réalisation et mesure de lignes de transmissions 3D 109
III.1.3. Conclusion et discussion 114
III.2. Réalisation de filtres hyperfréquences entièrement par technologie additive 116
III.2.1. Présentation des filtres 4 pôles ATOMIQ 116
III.2.2. Métallisation et mesure des filtres 4 pôles ATOMIQ 117
III.2.3. Conclusion et discussion sur la métallisation des filtres ATOMIQ 121

Licence CC BY-NC-ND 3.0

III.3. Correction de la réponse en fréquence des filtres 123
III.3.1. Présentation des composants et de l'équipement du gravure laser utilisé 124
III.3.2. Description de la méthode 127
III.3.3. Etude sur les motifs de réglage : de la simulation à la validation expérimentale 129
III.3.4. Réglage post fabrication d'un filtre 3D céramique 138
III.3.5. Conclusion et discussion sur la méthode de réglage 142
III.4. Conclusion générale du chapitre 142
Références bibliographiques Chapitre III 144
Chapitre IV. Utilisation des caractéristiques de l'AJP afin de réaliser des composants innovant 146
IV.1. Méthode alternative de fabrication de vias: la ligne de transmission Vialess 148
IV.1.1. Présentation 148
IV.1.2. Comparaison des lignes CPWG et Vialess par simulation 149
IV.1.3. Caractéristiques de la ligne de transmission Vialess 151
IV.1.4. Fabrication des lignes de transmission Vialess 152
IV.1.5. Comparaison de la ligne Vialess avec l'état de l'art 164
IV.1.6. Conclusion et discussion 165
IV.2. Les applications du principe des lignes Vialess 166
IV.2.1. Les interconnexions de type Vialess 167
IV.2.2. Les filtres de type Vialess 172
IV.2.3. Conclusion et discussion 177
IV.3. Conclusion du chapitre et discussion 179
Références bibliographiques Chapitre IV 181
Conclusion 183
Annexes 188
Annexe 1. Impression 3D 189
I. Impression par extrusion de matière 189
II. Impression par polymérisation 189
1. La Stéréolithographie 190
2. Digital Light Processing and Daylight Polymer Printing (DLP et DPP) 190
3. Continuous Liquid Interface Production (CLIP) 191
III. Impression par fusion sur lit de poudre 192
1. Selective Laser Sintering et Selective Laser Melting (SLS et SLM) 192
2. Electron Beam Melting (EBM) 193
3. Multi Jet Fusion (MJF) 194
IV. Impression par projection de matière 194
1. PolyJet 195
2. Nano Particle Jetting (NPJ) 195
V. Impression par projection de liant 196
VI. Impression par laminage de feuille (SL) 197
1. Laminated object manufacturing (LOM) 197
2. Composite Based Additive Manufacturing et Selective Lamination Composite Object Manufacturing (CBAM et SLCOM) 198
VII. Impression par dépôt sous énergie concentrée 198
1. LENS 199
2. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) 199

Licence CC BY-NC-ND 3.0

3. Laser Deposition Welding (LDW) 200
Annexe 2. Caractérisation par anneau résonant 201
I. Caractérisation de permittivité 201
II. Caractérisation de conductivité 203
III. Caractérisation de tangente de pertes 208
Annexe 3. Dimensions mesurées 213
I. Résolution d'une impression : Tests géométriques d'impression par AJP 213
II. Caractérisation des dépôts d'encres à nanoparticules métalliques 214
1. Les anneaux résonants 214
III. Réalisation de structures fonctionnelles 215
IV. Caractérisation des dépôts d'encres à base de polyimide 216
V. Effets d'une impression conforme par AJP sur la résolution 217
VI. Réalisation et mesure de lignes de transmissions 3D 218
VII. Filtres 4 pôles ATOMIQ 219
VIII. Premier type de prototype : réalisation de Vialess par impression argent 219
IX. Deuxième type de prototype : réalisation de lignes Vialess entièrement imprimées 220
X. Fabrication et mesure des résonateurs SIW Vialess 220
Références bibliographiques Annexes 222

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Table des illustrations

Figure I-1: Ⓐ Schéma du premier concept de Hanson, Ⓑ Schéma du concept de circuit traversant de Hanson [I.5] 20

Figure I-2: Première radio utilisant un PCB en 1942 [I.6] 21

Figure I-3: DOD piézoélectrique Ⓐ et thermique Ⓑ 23

Figure I-4: Impression Jet d'encre en Jet continu (CIJ) 24

Figure I-5: principe de l'impression par Jet d'Aérosol:Ⓐ méthode ultrasonique ; Ⓑ méthode pneumatique ; Ⓒ tête d'impression AJP 25

Figure I-6: Schéma d'une tête d'impression nScrypt 26

Figure I-7: Schéma de l'impression par DPN [I.24] 27

Figure I-8: Schéma de fonctionnement de la PLD [I.29] 28

Figure I-9: Schéma de fonctionnement de la MAPLE [I.31] 29

Figure I-10: Schéma explicatif de la technologie LIFT [I.35] 30

Figure I-11: Schéma explicatif de la technologie MCS [I.39] 31

Figure I-12: Mesure et simulation d'une ligne de transmission coplanaire imprimée [I.63] 33

Figure I-13: Paramètre de transmission mesuré et simulé des lignes de transmission coplanaires imprimées sur du polyimide par AJP [I.65] 34

Figure I-14: Ligne de transmission stripline entièrement imprimée par AJP: : ⓐ Modèle simulé ; ⓑ Mesures et simulations [I.65] 34

Figure I-15: Lignes de transmission imprimées qui fonctionnent sur la bande de fréquences [110 GHz; 170 GHz] [I.66] 35

Figure I-16:Ligne de transmission sur des plans inclinés : ⓐ Interconnexion CPW imprimé par Jet d'encre [I.72] ; ⓑ Rampes imprimées en Vorex avec une interconnexion imprimée par Jet d'encre [I.73] 36

Figure I-17: Interconnexion imprimée jusqu'à 110 GHz [I.74] 37

Figure I-18: Interconnexion microruban entièrement imprimée par AJP [I.75] 37

Figure I-19: Résonateurs coupe-bande imprimés par AJP [I.76]: ⓐ Résonateur vers 230 GHz ; ⓑ Résonateurs vers 500 GHz 38

Figure I-20: Filtre passe bande imprimé par AJP fonctionnant à 90 GHz 38

Figure I-21: ① rayon ultraviolet, ② masque, ③ couche solidifiées, ④ résine photosensible, ⑤ plateforme mobile, ⑥ réceptacle, ⑦ obturateur, ⑧ fibre optique, ⑨ traceur des axes x et y et ⑩ lentille optique [I.78] 40

Figure I-22: Première impression 3D : Ⓐ Maison imprimée à l'aide de l'équipement ; Ⓑ Premier objet imprimé par stéréolithographie 40

Figure II-1 : Modèle d'une ligne de transmission 54

Figure II-2: Ⓐ Ligne micro-ruban ; Ⓑ Ligne CPW ; Ⓒ Ligne CPWG 56

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure II-3: Anneau résonant : ⓐ modèle équivalent d'un anneau résonant ; ⓑ modèle d'excitation de l'anneau pour des substrats à pertes ; ⓒ modèle d'excitation de l'anneau pour des substrats à très faible pertes [I.24] 59

Figure II-4: ⓐ Schéma de la cavité de caractérisation diélectrique [II.25] ; ⓑ Liste des cavités de caractérisation diélectrique disponibles à Xlim.....61

Figure II-5: ⓐ Schéma de la cavité de caractérisation métallique ; ⓑ Liste des cavités de caractérisation métallique disponibles à Xlim 61

Figure II-6: Schéma de présentation des différents paramètres géométrique d'un anneau résonant 62

Figure II-7: Aérosol JetⓇ 200 SERIES SYSTEMS 64

Figure II-8: Vue en coupe de différents cas de recouvrement lors d'un impression AJP: ⓐ recouvrement trop faible (<25%) ; ⓑ recouvrement trop fort (>75%) ; ⓒ bon recouvrement (50%) 65

Figure II-9: Tests géométriques d'impression : ⓐ Test de largeur ; ⓑ Test d'espacement entre lignes.....66

Figure II-10: Largeur des motifs imprimés constitués de 1 à 6 traits recouverts à 50%.....67

Figure II-11: Espacement interlignes mesurés pour des espacements théoriques de 60 à 10 µm 67

Figure II-12: Tests géométriques imprimés en argent.....68

Figure II-13: Tests géométriques imprimés en or.....68

Figure II-14: Epaisseur en 1 et 2 couches d'encre à base argent des dispositifs réalisés 69

Figure II-15: Epaisseur en 1 et 2 couches d'or des dispositif réalisés 69

Figure II-16: Exemple d'impression par AJP avec l'encre à base d'argent dans la phase Ⓑ : ⓐ Ligne de transmission coplanaire imprimée ; ⓑ Modèle CAO de recouvrement ; ⓒ Vue en coupe du recouvrement de l'encre; ⓓ Profil typique d'une impression dans la phase Ⓑ70

Figure II-17: Exemple d'impression par AJP avec l'encre à base d'or : ⓐ Ligne de transmission coplanaire imprimée ; ⓑ Modèle CAO de recouvrement ; ⓒ Vue en coupe du recouvrement de l'encre; ⓓ Profil typique d'une impression d'or.....71

Figure II-18: Exemple d'anneaux imprimés en argent: Ⓐ Grand anneau Ⓑ Petit anneau 72

Figure II-19: Dimensions des grands anneaux imprimés en argent 73

Figure II-20: Dimensions des petits anneaux imprimés en argent.....73

Figure II-21: Carré d'argent imprimé en Ⓐ 1 couche et Ⓑ 2 couches.....74

Figure II-22: Mesure de profil d'un carré en or 74

Figure II-23: Conductivité effective de l'encre à base d'argent des échantillons imprimés : ⓐ méthode des anneaux résonant ; ⓑ méthode des cavité résonantes.....76

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure II-24: Images MEB de la microstructure des dépôts imprimés en argent: ⓐ méthode de frittage $F300$; ⓑ méthode de frittage $F200$, ⓒ méthode de frittage $F180$; ⓓ méthode de frittage $F200PCTTC$ 77

Figure II-25: Comparaison profondeur de peau et épaisseur des impressions en argent.....78

Figure II-26: Mesure des facteurs de qualité des différents anneaux.....79

Figure II-27: Conductivité effective de l'encre or.....79

Figure II-28: Comparaison profondeur de peau et épaisseur des impressions en or 80

Figure II-29: : Images MEB de la microstructure des dépôts imprimés en or 80

Figure II-30: Comparaison de la conductivité de l'encre à base d'argent utilisée avec d'autres issues d'une multitude de travaux de recherches et de fiches techniques fournisseur.....81

Figure II-31: Comparaison de la conductivité de l'encre à base d'or utilisée avec d'autres issues d'une multitude de travaux de recherches et de fiches techniques fournisseur.....81

Figure II-32: Lignes coplanaires CPW imprimées en argent et en or 82

Figure II-33: Dimensions des lignes imprimées : ⓐ encre à base d'argent ; ⓑ encre à base d'or.....83

Figure II-34: Profil d'une ligne coplanaire en argent réalisée en phase ⓑ : Ⓐ 1 couche ; Ⓑ 2 couches.....84

Figure II-35: Profil d'une ligne coplanaire en or : Ⓐ 1 couche ; Ⓑ 2 couches 84

Figure II-36: Exemple de paramètres S des lignes mesurées: ⓐ encre à base d'argent ; ⓑ encre à base d'or.....85

Figure II-37: Atténuation des lignes coplanaires modèle 67 imprimées en argent.....85

Figure II-38: Atténuation des lignes coplanaires modèle 67 imprimées en or 86

Figure II-39: Différents tests d'impression du polyimide: ⓐ un trait imprimé ; ⓑ un carré 5mm x 5 mm ; ⓒ une superposition de couche de polyimide imprimé (vue en coupe) 90

Figure II-40: Différents tests d'impressions du polyimide imprimée : ⓐ ligne imprimée ; ⓑ carré imprimé ; ⓒ pente imprimée de 10°; ⓓ pente imprimée de 20° 90

Figure II-41: Epaisseur des différents carrés 5 mm x 5 mm en polyimide en fonction du nombre de couches imprimées.....91

Figure II-42: Etat de surface et rugosité des différentes impressions en fonction du nombre de couche imprimées 92

Figure II-43: Les trois anneaux résonnant pour la caractérisation du polyimide imprimé 93

Figure II-44: Dimensions des anneaux résonnants de caractérisation.....94

Figure II-45: Permittivité et tangente de pertes du polyimide imprimé caractérisé.....95

Figure II-46: Facteur de qualité à vide des anneaux résonnant pour la caractérisation du polyimide imprimé 95

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure III-1: Vues en coupe des différents plans inclinés imprimés en SLA 3D céramique d'inclinaison d'angle θ variable: ⓐ plan incliné plat ; ⓑ plan incliné concave ; ⓒ plan incliné convexe.....105

Figure III-2: Vue de dessus des tests géométriques d'impression : ⓐ Test de largeur ; ⓑ Test d'espacement entre lignes.....105

Figure III-3: Exemple de motifs géométriques imprimés sur un plan incliné: ⓐ Vue 3D des tests de largeur ; ⓑ Vue du dessus des tests de largeur ; ⓒ Vue 3D des tests d'espacement entre lignes ; ⓓ Vue du dessus des tests d'espacement entre lignes.....106

Figure III-4: Résolution des impressions sur les plans inclinés : ⓐ Largeur de lignes imprimées ; ⓑ Espacement entre deux lignes imprimées 107

Figure III-5: Zoom sur les impressions 3D : ⓐ Largeur imprimée ; ⓑ Espacement entre deux lignes imprimées 108

Figure III-6: Effet de la rugosité de surface sur l'épaisseur d'encre déposée par AJP: ⓐ Faible rugosité avec l'épaisseur de métal $emetal1$; ⓑ Forte rugosité avec l'épaisseur de métal $emetal2$ 108

Figure III-7: Formes 3D fabriquées en SLA céramique 3D: ⓐ Plan incliné ; ⓑ Forme de crête ; ⓒ Demi-sphères.....110

Figure III-8: Exemple de lignes de transmission imprimées sur des substrats alumine 3D et relevés profilométriques: ⓐ CPW sur un plan incliné ; ⓑ CPW sur une crête ; ⓒ CPW sur une demi-sphère ; ⓓ Vue du dessus de la CPW sur la demi-sphère.....110

Figure III-9: Dimensions mesurées des lignes de transmissions coplanaires 3D 111

Figure III-10: Vue schématique des mesures sous pointes des lignes de transmission réalisées sur un substrat 3D : ⓐ Bonne stratégie d'impression (demi-sphère, crête) ; ⓑ Erreur de stratégie d'impression (tous les plans inclinés) 112

Figure III-11: Exemple de paramètres S mesurés pour chaque type de ligne de transmission coplanaire 3D : ⓐ Plan incliné convexe ; ⓑ Plan incliné plat ; ⓒ Demi-sphère ; ⓓ Crête113

Figure III-12: Atténuation linéique des différentes lignes coplanaires CPW réalisées sur substrat 3D.....113

Figure III-13: Exemple de décollement des lignes coplanaires 3D.....115

Figure III-14: Filtre 4 pôles ATOMIQ : ⓐ Image 3D du filtre ; ⓑ Détail du motif d'excitation planaire utilisé ; ⓒ Vue en coupe du filtre ; ⓓ Réponse en fréquence du filtre.....117

Figure III-15: Cadre de maintien des filtres ATOMIQ 117

Figure III-16: Métallisation d'un filtre 4 pôle ATOMIQ du premier lot de fabrication.....118

Figure III-17: Comparaison mesure et simulation du filtre 4 pôles ATOMIQ.....119

Figure III-18: Nouveau modèle de métallisation des filtres 4 pôles ATOMIQ 119

Figure III-19: Métallisation d'un filtre 4 pôle ATOMIQ du deuxième lot de fabrication 120

Figure III-20: Exemple de décollement de la métallisation sur un filtre 4 pôles ATOMIQ 121

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure III-21: Différence entre le premier lot (V1) et le deuxième lot (V2).....122

Figure III-22: Pièces fabriquées pour tester la méthode de réglage par gravure laser : ⓐ Résonateur ; ⓑ Filtre 2 pôles ; ⓒ Filtre 4 pôles 124

Figure III-23: Mode $TM110$: ⓐ Champ E ; ⓑ Champ H.....124

Figure III-24: Simulation des filtres fabriqués pour tester la méthode de réglage par gravure laser : ⓐ Résonateur ; ⓑ Filtre 2 pôles ; ⓒ Filtre 4 pôles 125

Figure III-25: Graveuse laser Cerinnov.....125

Figure III-26: Exemple de gravure de la couche cuivre/or des filtres par laser 127

Figure III-27: Principe de la méthode de réglage de filtre post fabrication.....130

Figure III-28: Décalage fréquentiel maximum des différents motifs optimisés.....131

Figure III-29: Décalage fréquentiel: optimisation de la position du motif H.....131

Figure III-30: répartition des pertes pour différents motifs gravés 132

Figure III-31: Comparaison des décalage fréquentiel entre les motifs H et rectangulaire....132

Figure III-32: Champs E et H au niveau de chaque motif gravé sur le résonateur 133

Figure III-33: Effet des motifs carrés et rectangulaires sur le facteur de couplage entre deux résonateurs 134

Figure III-34: Champs E et H au niveau de chaque motif gravé sur l'iris entre deux résonateurs 134

Figure III-35: Décalage fréquentiel motif carré: comparaison simulation et mesure 135

Figure III-36: Décalage fréquentiel motifs rectangulaires parallèles: comparaison simulation et mesure 136

Figure III-37: Décalage du couplage pour le motif carré: comparaison simulation et mesure 137

Figure III-38: Décalage du couplage pour le motifs rectangulaires parallèles: comparaison simulation et mesure 137

Figure III-39: Vue schématique de la procédure expérimentale pas à pas pour le réglage d'un filtre 139

Figure III-40: Trois étapes de la méthode de réglage: ⓐ filtre métallisé ; ⓑ filtre avec accès coplanaires ; ⓒ filtre avec gravure de réglage.....140

Figure III-41: Simulation et mesure des filtre 1 et 2: ⓐ Avant le réglage ; ⓑ Après le réglage 140

Figure IV-1: Description d'une ligne de transmission CPWG recommandée en bande millimétrique: ⓐ Réalisation des vias traversant dans le substrat ; ⓑ Métallisation des vias traversant 148

Figure IV-2: Description d'une ligne de transmission Vialess : ⓐ Réalisation du substrat diélectrique avec des plans inclinés ; ⓑ Réalisation de la couche conductrice et métallisation des plans inclinés 149

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure IV-3: Modèle simulé des lignes de transmission : ⓐ CPWG ; ⓑ Vialess 149

Figure IV-4: Comparaison des lignes de transmission CPWG et Vialess : ⓐ Comparaison des atténuations linéiques ; ⓑ Comparaison des paramètres S 150

Figure IV-5: Différents niveaux de pertes des lignes CPWG et Vialess 150

Figure IV-6: dimensions importantes d'une lignes de transmission Vialess 151

Figure IV-7: Evolution des performances de la lignes Vialess en fonction de l'épaisseur du substrat 152

Figure IV-8: Etapes de fabrication du prototype de lignes de transmission Vialess sur Kapton® adhésif : ① Métallisation du substrat support ; ② Collage du Kapton® adhésif sur le plan de masse ; ③ Découpage laser du Kapton® ; ④ Impression de la couche métallique par AJP 153

Figure IV-9: Etude de précision des gravures: ⓐ Exemple des gravures réalisées sur le scotch Kapton® ; ⓑ Comparaison entre les dimensions théoriques et mesurées avant et après l'optimisation du procédé de gravure 153

Figure IV-10: Exemple de lignes de transmission Vialess sur du Kapton® adhésif : ⓐ Ligne 40 GHz; ⓑ Ligne 67 GHz 154

Figure IV-11: Première mesure de la ligne de transmission Vialess sur Kapton® adhésif : ⓐ Zoom sur le flanc de la ligne et présence de craquelure ; ⓑ Mesures des paramètres S jusqu'à 40 GHz 155

Figure IV-12: Lignes Vialess réparées à l'aide d'une colle argent epoxy : ⓐ Ligne 40 GHz; ⓑ Ligne 67 GHz 156

Figure IV-13: Mesures des lignes de transmission Vialess réparée: ⓐ Ligne 40 GHz; ⓑ Ligne 67 GHz 156

Figure IV-14: Niveau d'atténuation de chaque ligne Vialess mesurée après réparation 157

Figure IV-15: Mesure d'une ligne de transmission Vialess sur Kapton® adhésif jusqu'à 110 GHz 158

Figure IV-16: Schéma du positionnement des pointes de mesure Infinity de pitch 100 µm sur les lignes de transmission Vialess prévues pour fonctionner sur la bande de fréquences [10 MHz ; 67 GHz] 158

Figure IV-17: Atténuation mesurée de la ligne Vialess après réparation jusqu'à 110 GHz 159

Figure IV-18: Etapes de fabrication du prototype de ligne de transmission Vialess entièrement imprimée : ① Impression de l'encre à base de polyimide ; ② Impression de l'encre à base d'argent 160

Figure IV-19: Lignes de transmission Vialess entièrement imprimées : ⓐ 1 cm ; ⓑ 1.5 cm ; ⓒ 2 cm de longueur 160

Figure IV-20: Profil d'une ligne de transmission Vialess de 1 cm de longueur 161

Figure IV-21: Mesure des lignes de transmission Vialess entièrement imprimées sur la bande de fréquences [10 MHz ; 170 GHz] 162

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Figure IV-22: Atténuation linéique des différentes lignes Vialess entièrement imprimées ...163

Figure IV-23: Exemple de ligne Vialess autocollante : ⓐ Lignes de transmission imprimée par InkJet ; ⓑ Zoom d'une ligne Vialess.....168

Figure IV-24: Mesures après plusieurs décollages / collages d'une ligne Vialess sur un support cuivre.....169

Figure IV-25: Mise en œuvre de l'interconnexion à l'aide de la ligne de transmission Vialess : ① Positionnement des plans inclinés diélectriques métallisés à la laque argent ; ② Collage des lignes de transmission Vialess adhésives ; ③ Connexion métallique entre les lignes Vialess et les accès coplanaires du filtre par soudure.....169

Figure IV-26: Modèle de la connexion de la ligne autocollante sur un filtre volumique et performances simulées 170

Figure IV-27: Mise en œuvre de l'interconnexion Flip-chip à l'aide de la ligne de transmission Vialess : ① Collage d'une bande de scotch Kapton® sur une ligne Vialess existante ; ② Métallisation avec de la laque argent pour assurer le blindage de la transition Vialess ; ③ Positionnement de la transition entre deux lignes CPW.....171

Figure IV-28: Interconnexion Vialess Flip-Chip: ① ③ Lignes Vialess ; ② Ligne Vialess Flip-Chip.....171

Figure IV-29: Mesure de la ligne Vialess Flip-Chip 172

Figure IV-30: Mesure de la transition Vialess 172

Figure IV-31: Modèle simulé du filtre interdigité inspiré du Vialess 173

Figure IV-32: Impression d'un résonateur interdigité : ⓐ modèle simulé; ⓑ modèle imprimé 174

Figure IV-33: Modèle simulé du filtre Vialess inspiré de la technologie SIW 175

Figure IV-34: Résonateurs Vialess imprimés: ⓐ GR de 7 mm de côté; ⓑ MR de 4 mm de côté ; ⓒ SR de 2.4 mm de coté.....176

Figure IV-35: Facteurs de qualité mesurés des résonateur Vialess imprimés.....177

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Table des tableaux

Tableau I: Comparaison des technologies DW 32
Tableau II: Comparaison des technologies additives 3D - Partie 1 43
Tableau III: Comparaison des technologies additives 3D - Partie 2 44
Tableau IV: Epaisseur et méthode de frittage des carrés imprimés 75
Tableau V: Comparaison des résultats de nos lignes argent avec l'état de l'art de lignes imprimées en argent à 40 GHz 87
Tableau VI: résumé des résultats de l'étude sur les encres à nanoparticules métalliques 88
Tableau VII: Comparaison des performances des lignes coplanaires 3D avec l'état de l'art à 40 GHz 115
Tableau VIII: Procédure de gravure sur les filtres métallisés par electroless + électrolyse 127
Tableau IX: Effet des différents types de motifs de réglage envisagés 129
Tableau X: Motifs sélectionnés pour le réglage de filtre 135
Tableau XI: Résumé des données avant et après réglage des filtres 141
Tableau XII: Comparaison de la performance des lignes Vialess avec l'état de l'art 164

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Introduction générale

Dans un contexte général de compétitivité, la réduction des coûts liés aux lancements des satellites est un enjeu capital. Comme l'ont fait les USA avec leur lanceur réutilisable, ou la Chine avec leur main d'œuvre moins chère, les moyens de limiter les coûts ne manquent pas. L'orientation qui nous intéresse ici tout particulièrement se trouve dans les technologies additives d'impression de matière.

Ces technologies pourraient à long terme permettre d'imprimer directement à la chaine des parties des fusées Ariane et des satellites. A plus court terme et à présent, elles peuvent permettre de réaliser du prototypage de certaines parties des lanceurs ou de leur charge utile, diminuant ainsi les coûts de cette phase. En fonction des besoins visés, les technologies peuvent s'orienter selon deux axes principaux : l'impression 3D volumique et l'impression de matière planaire. Les matériaux disponibles vont également des polymères aux métaux en fonction des applications.

Dans ce cadre, Thales Alénia Space et le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) à Toulouse ont initié l'exploitation d'une technologie innovante de métallisation par aérosol pour la réalisation et la métallisation de composants hyperfréquences. L'utilisation de ce procédé, appelé Aerosol Jet Printing (AJP), permettra de métalliser toute une gamme de composants hyperfréquences que l'on ne sait pas traiter par des techniques plus classiques ainsi que l'impression de composants millimétriques planaires ou 3D. La forte résolution attendue de l'AJP pourrait également nous permettre d'atteindre les fréquences sub-millimétriques afin de permettre une montée en fréquence des composants des satellites de communication.

Cette technologie a été conçue par Optomec, dont le siège se trouve à Albuquerque au Nouveau Mexique (USA). Lors du lancement de ce travail de thèse, l'AJP était principalement présente aux Etats Unis et dans peu de pays Européen (France, Allemagne, …). L'objectif de ce travail est de déterminer le potentiel et les limites de cette technologie dans le domaine des hyperfréquences et de placer la France à l'état de l'art au niveau de sa mise en œuvre pour la réalisation de composants fonctionnant dans les fréquences millimétriques ainsi que dans la réalisation de solutions innovantes dans leur intégration.

Le **chapitre I** présente les principales technologies additives que l'on peut classer dans la catégorie « écriture directe ». Cette catégorie définit toutes celles capables de réaliser des objets ou des composants sans passer par des phases de masquage ou d'ablation. Elles concernent principalement celles capables d'imprimer complètement des objets en 3D et celles capables de déposer des matériaux sur des surfaces planaires ou semi-3D pour réaliser des composants.

Ce travail de thèse étant principalement orienté sur les technologies additives nous avons choisi de retracer leur histoire en commençant par leur origine pour terminer à l'état de l'art actuel des différentes machines disponibles sur le marché ou dans les laboratoires de recherche. Le but est de démontrer pourquoi nous avons choisi parmi toutes les technologies existantes la stéréolithographie 3D (SLA) céramique pour réaliser des composants volumiques et l'AJP pour métalliser ces mêmes composants ou en imprimer sur différents types de support.

Le **chapitre II** est dédié à la caractérisation de l'AJP et exclusivement à l'impression de composants planaires. Plus particulièrement en utilisant une encre à nanoparticules d'argent nous allons étudier la mise en œuvre nécessaire afin d'optimiser la résolution que nous

Licence CC BY-NC-ND 3.0

pouvons obtenir, la conductivité effective des dépôts et la qualité des dépôts obtenus (rugosité, épaisseur, homogénéité).

La première partie du chapitre présente les différents composants que l'on compte utiliser ainsi que les différentes méthodes d'extraction de la conductivité effective de dépôts métalliques ainsi que de la permittivité et de la tangente de pertes de dépôts diélectriques utilisés. Nous présenterons ensuite les différents résultats des tests géométriques et de conductivité obtenue avec l'AJP. La seconde partie présentera les différents tests réalisés ainsi que leurs résultats. Nous terminerons sur la réalisation de composants simples tel que des lignes de transmissions afin de pouvoir comparer leurs performances à l'état de l'art actuel.

De la même manière que pour le chapitre II, le **chapitre III** est dédié à la caractérisation des performances de l'AJP mais cette fois ci exclusivement sur des objets 3D ou à formes complexes. La première partie est consacrée à la présentation des différents tests réalisés sur l'impression d'encre à nanoparticules d'argent sur des plans inclinés et des formes complexes en alumine réalisé par SLA céramique. Des lignes de transmission sont également réalisées et leurs performances sont comparées à l'état de l'art actuel.

La seconde partie concerne l'utilisation de l'AJP pour métalliser entièrement et sélectivement des filtres en alumine réalisés par SLA céramique issues du projet ANR ATOMIQ (Technologies avancées pour les solutions de filtrage millimétriques intégrés en bande Q et V) coordonné par Thalès Alenia Space en partenariat avec l'IRCER, Xlim, 3DCeram, le Lab-sticc et le CNES, programme de 4 ans terminé début 2018. La réalisation de ces filtres amène à la présentation d'une méthode de réglage post fabrication en utilisant une graveuse laser afin de compenser les dispersions technologiques de leur réalisation. La méthode ainsi que la machine spécialement réalisée pour cette partie est présentée en détails. Plusieurs filtres fonctionnant à 8 GHz ont été réalisés par SLA céramique afin de valider une preuve de concept.

Dans le **dernier chapitre**, nous présentons une nouvelle famille de lignes de transmission, que nous avons nommée Vialess, et qui prend en compte les différents résultats que nous avons obtenus dans les chapitres précédents. Son principe de fonctionnement et ses différentes réalisations sont détaillés et ses performances sont comparées à l'état de l'art.

Ce chapitre se termine par la description et la mise en œuvre de différents composants issus du composant Vialess. Nous présentons ainsi des premiers concepts de lignes de transmission autocollantes afin de réaliser des interconnexions entre composants et plusieurs concepts de filtres multimétariaux (interdigités, SIW) entièrement imprimés.

Le manuscrit se termine par une conclusion générale sur l'ensemble des travaux effectués et sur les différentes perspectives de recherche associées plus particulièrement à l'utilisation de la technologie AJP.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Chapitre I. La fabrication additive

La technologie de fabrication additive au sens large se caractérise par le fait d'ajouter sélectivement de la matière afin de créer à partir d'un modèle numérique un véritable objet. Deux grandes familles de technologies peuvent se distinguer. La première se spécialise sur le dépôt sélectif de matériaux sur des objets 2D ou 3D existants de tandis que la seconde se spécialise dans la création d'objets 3D. Ce travail de thèse s'inscrivant entièrement dans ces familles, il est donc naturel de les présenter.

Ce premier chapitre a donc pour but de présenter l'état de l'art actuel de ces différentes technologies. Il sera séparé en deux grandes parties, une pour chaque famille. Nous souhaitons ici montrer les raisons pour lesquelles sous avons fait certains choix technologiques pour mener à bien les différents objectifs de cette thèse.

I.1. Les technologies additives et l'évolution des PCB

I.1.1. Des origines jusqu'à aujourd'hui

Les méthodes utilisées dans la réalisation de circuits imprimés modernes communément appelés PCB (Printed Circuit Board) voient leurs origines au début du XXème siècle. Afin de répondre aux besoins du secteur téléphonique, l'allemand Albert HANSON dépose un brevet en 1903 sur ce qui va être l'ancêtre du PCB (Figure I-1).

Il y décrit un procédé multicouches dans lequel des pistes métalliques sont laminées sur un panneau isolant. Il va même plus loin en ajoutant certaines innovations qui sont reprises sur les PCB actuels. En effet ayant réalisé que la taille des circuits était une problématique importante, il ajouta des trous métallisés, permettant aux deux faces d'être connectées. Il réalise de ce fait le premier circuit traversant à double face. Il fut également le premier à reconnaitre que les parties métalliques pouvaient être réalisées directement sur le plateau par dépôt électrolytique ou à l'aide d'encres conductrices constituées de poudres métalliques dans un milieu approprié [I.1] [I.2] [I.3].

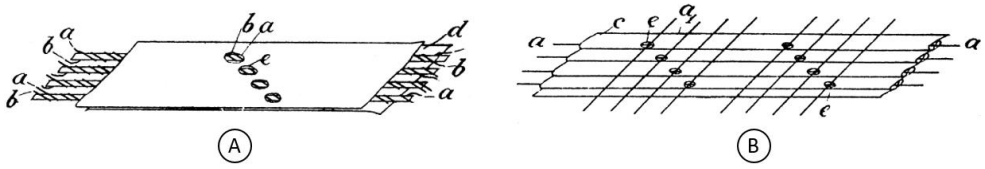


Figure I-1: Ⓐ Schéma du premier concept de Hanson, Ⓑ Schéma du concept de circuit traversant de Hanson [I.5]

Plusieurs inventeurs travaillèrent sur ces différents concepts, comme Thomas EDISON en 1904 qui proposa plusieurs méthodes de réalisation de circuits. Certaines étaient basées sur l'utilisation d'une colle polymère afin de venir coller sélectivement de la poudre conductrice (graphite ou bronze). Ces dernières pourraient aujourd'hui être apparentées à des procédés d'impression.

Nous devons cependant l'invention des PCB que nous connaissons aujourd'hui à l'ingénieur australien Paul EISLER. Il déposa un brevet en 1936 sur l'utilisation de feuille de cuivre sur des substrats de verre non conducteurs. En 1942 il réalisa le premier dispositif à utiliser un PCB, à savoir une radio (Figure I-2). Cette technologie fut réquisitionnée en 1943 afin de pouvoir réaliser notamment des fusibles de proximité (composant déclenchant un explosif quand la distance de la cible est réduite) pendant le 2ème Guerre Mondiale. A la fin de

Licence CC BY-NC-ND 3.0

la guerre, la technologie fut disponible pour le domaine civil et est devenue commune dès 1950.

Figure I-2: Première radio utilisant un PCB en 1942 [I.6]

L'évolution du PCB fut ensuite marquée au fil des années par les réductions de tailles des composants et des circuits grâce à l'augmentation de la densité des composants présents sur une seule plaque.

En 1956 un brevet est déposé par Moe ABRAMSON et STANISLAUS F. DANKO, membres de « l'United States Army Signal Corps » (unité de l'armée américaine créée en 1863 dont la fonction est de développer, tester et gérer des systèmes de communications et d'informations), sur une nouvelle méthode de fabrication de PCB. Elle consiste à supprimer les fils jusqu'à présent utilisés pour connecter les composants au circuit, en insérant directement les composants sur les pistes métalliques et en les soudant pour finir.

A partir des années 1980 et jusqu'à aujourd'hui, la miniaturisation des pièces de montage est devenue très courante ce qui a amené une diminution de la taille des PCB et donc également une baisse de leur coût.

En parallèle, l'industrialisation de l'imprimerie, à la suite des révolutions majeures du domaine (Gutenberg au XIVème siècle et l'invention de la linotype en 1880) entraina de nouveaux enjeux. La possibilité de pouvoir effectuer un très grand nombre de copies d'une image de base en déposant une encre en couche mince à des vitesses de production toujours plus importantes a intéressé certains industriels du secteur des circuits imprimés. En utilisant les matériaux adéquats (substrats et encres métalliques) ce procédé pourrait être utilisé afin de produire en masse des composants électroniques à faible coût.

I.1.2. Naissance et développement des technologies d'« écriture directe »

L'ensemble des technologies capables de réaliser des composants électroniques en masse sans l'utilisation de masques, ou d'étapes de fabrication impliquant l'utilisation d'autres outils, sont appelées technologies à « écriture directe » (Direct Write, DW). Plus précisément cela concerne celles qui sont capables de réaliser des structures fonctionnelles sur des substrats planaires ou 3D à formes complexes.

Le développement des premières technologies DW remontent aux mêmes périodes que pour les débuts des technologies additives 3D, c'est-à-dire vers les années 1960. Cependant, ce développement a été accéléré exponentiellement dans les années 1990. En effet la création de plusieurs contrats et programmes par la DARPA (Defense Advanced Research Projects Agency) fut à l'origine de la création d'un grand nombre de technologies DW afin de pouvoir répondre aux problématiques de prototypage rapide. La plupart des travaux réalisés durant

Licence CC BY-NC-ND 3.0

cette période ont été concentrés sur le développement [I.7] et l'amélioration des méthodes et techniques de réalisation [I.8] [I.9].

Basée sur la veille technologique des différentes avancées du secteur, une classification a été proposée en [I.10]. Elle permet de faire ressortir trois axes majeurs des technologies DW :

→ Dépôt basé sur la distribution de matière,
→ Dépôt basé sur l'utilisation d'un laser,
→ Dépôt à base de poudre.

Nous allons dans ce chapitre décrire les technologies principales de ces trois axes afin de pouvoir ensuite comparer leurs performances et leurs caractéristiques dans le but de mettre en évidence la raison pour laquelle nous avons choisi de réaliser ce projet de thèse avec la technologie d'impression par jet d'aérosol.

I.1.2.1. Dépôt basé sur la distribution de matière

Parmi toutes les technologies DW, celles utilisant des matériaux sous forme d'encre sont les plus répandues dans la recherche ainsi que dans l'industrie. Le principe de base repose sur le dépôt sur différents types de substrats d'encres contenant les matériaux nécessaires (résines, micro ou nano particules métalliques ou diélectriques, …). Un traitement thermique suffit en général afin de pouvoir obtenir le composant désiré, les différents composants organiques présents dans l'encre (solvants, liants, antiagglomérant, …) devant en particulier être éliminés après leur dépôt. En fonction du matériel mis à disposition, plusieurs encres sont disponibles pour un grand nombre d'applications ciblant des secteurs variés :

- Encres colloïdales [I.11],
- Encres à nanoparticules [I.12],
- Encres organiques [I.13],
- Encres polyélectrolyte [I.14],
- Encres sol-gel [I.15].

Pour l'impression de PCB, les matériaux les plus couramment utilisés qui vont nous intéresser dans ce chapitre sont les encres à base de nanoparticules métalliques, pour le dépôt de couches conductrices, ainsi que les encres organiques polymères, pour l'impression de couches isolantes. L'utilisation de ces deux types d'encres lors d'un même processus de fabrication permet de réaliser des structures multimatériaux multicouches [I.16].

Pour toutes les technologies DW de distribution de matière, la réalisation contient deux étapes : l'impression puis le recuit du matériau déposé. Le but est de faire s'évaporer les solvants présents dans les différentes encres afin de ne garder que le composant final recherché.

Pour des encres métalliques nous allons chercher à « souder » les particules entre elles, à des températures inférieures aux températures de fusion des matériaux, afin d'augmenter la cohésion du dépôt et par conséquent, d'obtenir une bonne conductivité effective de ce dépôt [I.17]. Pour les encres polymère, la cuisson va permettre de polymériser le dépôt afin d'obtenir les caractéristiques voulues, les températures utilisées étant inférieures aux températures de cristallisation des matériaux. Les problématiques liées par exemple aux pertes de masse ou aux changements chimiques du matériau lors de la cuisson à haute température sont traitées dans le travail de thèse en [I.18].

Les technologies DW de distribution de matière les plus représentées dans la littérature scientifique sont la technologie d'impression par jet d'encre (InkJet), la technologie

Licence CC BY-NC-ND 3.0

d'impression par aérosol (Aerosol Jet Printing, AJP) et enfin les technologies nScrypt et la technologie DPN (Dip-Pen Nanolithography).

I.1.2.1.1. Impression par Jet d'encre

Cette technologie est principalement utilisée pour imprimer des composants complexes sur des substrats plats. Le matériau, sous forme d'encre, est placé dans un réservoir situé sur la cartouche et est éjecté sous forme de gouttelettes par une ou plusieurs buses (jusqu'à 15 000 buses en fonction des machines) selon deux techniques différentes :

- La goutte à la demande (DOD pour Drop On Demand) :
- Le jet de goutte continu (CIJ pour Continuous Ink Jetting) :

➢ La goutte à la demande :

Cette technique est la plus couramment utilisée et est basée sur le principe que chaque gouttelette éjectée est contrôlée individuellement. En effet, l'éjection est générée par une augmentation de pression localisée au niveau de la tête d'impression et contrôlée par impulsion électrique. Deux méthodes existent pour éjecter les gouttes : l'éjection utilisant un système piézoélectrique ou l'éjection thermique Figure I-3.

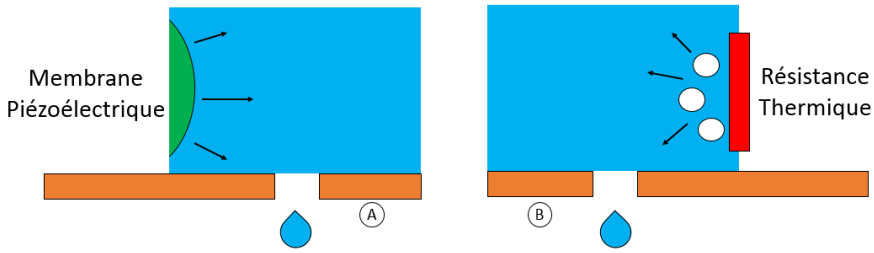


Figure I-3: DOD piézoélectrique Ⓐ et thermique Ⓑ

Dans le cas de la méthode Ⓐ, une impulsion électrique va venir déformer un cristal piézoélectrique (ou MEMS [I.19]) présent au niveau de la tête d'impression. Ceci va causer une augmentation de la pression et va donc éjecter une gouttelette d'encre. Les têtes d'impression à cristal piézoélectrique sont robustes et fiables et permettent des impressions de bonne qualité avec des encres de viscosité inférieure à 20 cP.

Dans le cas de la méthode Ⓑ, une résistance placée dans la tête d'impression chauffe entre 350 et 400 °C. Quand l'encre entre en contact avec cette résistance, elle va s'évaporer, ce qui va augmenter localement la pression et par conséquent, éjecter une gouttelette. Cette méthode permet d'obtenir une meilleure résolution que la méthode précédente. Elle permet également l'utilisation de tête d'impression à forte densité de buses. Cependant le nombre d'encres utilisables est fortement limité car elles doivent être capables de s'évaporer et de résister à de très hautes températures. Par conséquent, cette méthode ne permet pas d'imprimer des encres polymères organiques par exemple.

➢ Le jet de goutte continu (CIJ) :

Dans cette technique, l'encre est propulsée par une pompe et le débit d'éjection des gouttelettes est géré par un cristal piézoélectrique vibrant à haute fréquence (de 50 KHz à 150 KHz). Avant d'être éjectées, ces gouttelettes sont chargées par un jeu d'électrodes dans la tête d'impression (Figure I-4).

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Après éjection elles passent devant une plaque de déflection chargée électrostatiquement, dont le but est de les propulser (ou pas). Les gouttelettes non utilisées repartent dans le cycle. La forte fréquence d'éjection permet une vitesse de réalisation très élevée et la forte vélocité des gouttelettes permet d'imprimer à une hauteur de substrat plus importante que pour la technique DOD. Cependant cette technique ne permet pas d'obtenir une bonne résolution d'impression et demande une forte maintenance afin de rester dans les conditions d'utilisation optimales. Le choix des encres est également restreint étant donné qu'elles doivent pouvoir être chargées électriquement.

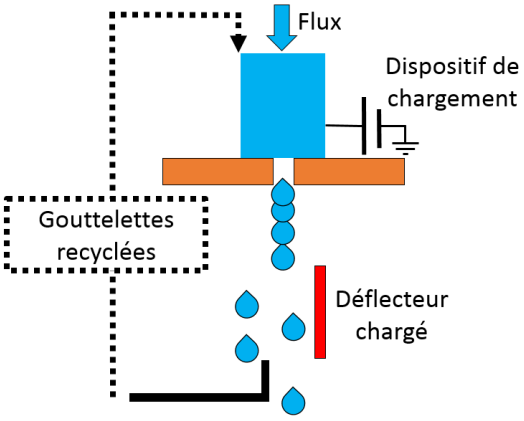


Figure I-4: Impression Jet d'encre en Jet continu (CIJ)

➢ En synthèse, dans le secteur de l'électronique imprimée, la méthode DOD piézoélectrique est principalement utilisée car elle donne accès à un plus grand choix d'encres à des résolutions plus fines que les autres méthodes d'impression. Les principaux paramètres que l'utilisateur doit vérifier et fixer pour ce type d'impression sont les suivants :

- La tension appliquée au cristal piézoélectrique,
- La température de la plateforme d'impression,
- La hauteur entre la buse et le substrat,
- L'écart entre chaque gouttelette.

La tension appliquée augmente la fréquence d'éjection des gouttelettes, sa valeur dépend du type d'encre et de sa viscosité afin de garantir une éjection optimale. La température du support d'impression a une influence sur la qualité de recouvrement de l'encre une fois déposée. Pour finir, la hauteur d'impression dépend de l'épaisseur du substrat et l'écartement entre chaque goutte dépend de l'encre utilisée, ces paramètres ayant un impact sur le temps de d'impression.

I.1.2.1.2. Impression par Jet d'Aérosol

Cette technologie est principalement utilisée pour imprimer des composants complexes sur des substrats plats et en 3D. Le matériau sous forme d'encre est placé dans un réservoir et est atomisé en un nuage de particules (de diamètre compris entre 1 et 5 µm) grâce à deux techniques dont le choix est déterminé par la viscosité de l'encre : atomisation ultrasonique (Figure I-5 Ⓐ pour des viscosités inférieurs à 10 cP) et pneumatique (Figure I-5 Ⓑ pour des viscosité jusqu'à 1000 cP).

Dans la méthode Ⓐ, le conteneur d'encre est placé dans un bain à ultrasons. Ces vibrations vont se transmettre à l'encre, ce qui va créer un nuage de particules. Pour la méthode Ⓑ

Licence CC BY-NC-ND 3.0

l'encre est pulvérisée par un gaz sous pression dans l'enceinte du conteneur ce qui va former un nuage de particules.

De manière générale, les plus grosses particules retombent dans le réservoir d'encre pour continuer le cycle et les autres sont emportées par un gaz jusqu'à la tête d'impression (Figure I-5 Ⓒ), (le gaz porteur est de même nature que celui qui pulvérise l'encre dans la méthode Ⓑ).

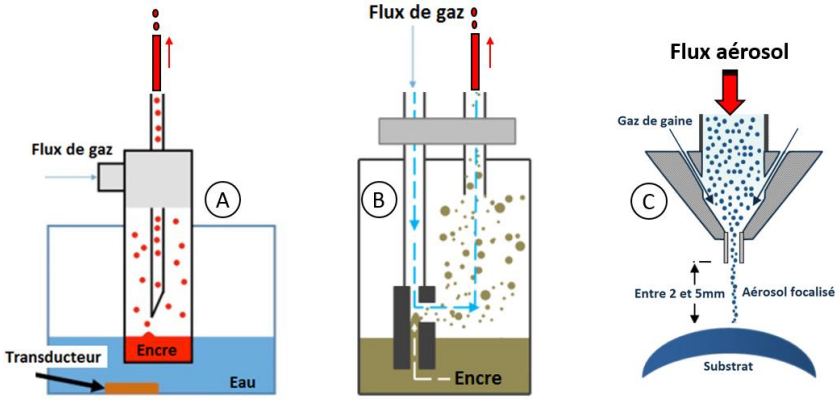


Figure I-5: principe de l'impression par Jet d'Aérosol : Ⓐ méthode ultrasonique ; Ⓑ méthode pneumatique ; Ⓒ tête d'impression AJP

Durant son cheminement, le flux de particules passe par un composant permettant de baisser la pression du gaz et filtrer les particules en retirant les plus petites et les plus grosses. Ce composant peut être complété par un nébuliseur permettant d'humidifier l'encre afin de la rendre plus stable à l'impression. La présence de cet accessoire dépend de la machine utilisée et de la stratégie d'impression employée.

Arrivé à la tête d'impression un second gaz, appelé gaz de gaine (Figure I-5 Ⓒ), va venir concentrer le flux de particules arrivant sur un diamètre inférieur à celui de la buse. Cela va permettre de créer un faisceau de particules focalisé et concentré afin de le projeter sur le substrat. Son second rôle est de protéger la buse afin d'empêcher, au maximum, qu'elle se bouche.

La forte vélocité des particules et la focalisation du faisceau permettent une très bonne résolution d'impression, typiquement de 20µm pour des hauteurs entre la buse et le substrat comprises entre 1 et 5 mm. Les principaux paramètres que l'utilisateur doit vérifier et fixer pour ce type d'impression sont les suivants :

- Pression du gaz porteur,
- Pression du gaz de gaine,
- Température de la plateforme d'impression,
- Vitesse d'impression.

La pression du premier gaz va venir gérer la quantité de matière déposée et donc l'épaisseur du dépôt ainsi que la vélocité des particules. La pression du gaz de gaine vient directement impacter le diamètre du flux des particules et donc la résolution maximum atteignable avec une encre.

La température a une influence sur le recouvrement de l'encre une fois déposée comme nous l'avons vu précédemment pour l'impression jet d'encre. Enfin la vitesse d'impression a également un impact sur la résolution ainsi que sur l'épaisseur du dépôt.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

I.1.2.1.3. Impression par technologie nScrypt

Cette technologie est principalement utilisée afin de déposer des encres métalliques, ainsi que certaines encres diélectriques [I.20], sur des substrats 2D et 3D en fonction de la machine utilisée [I.21].

Son principe de fonctionnement se rapproche beaucoup de la technologie FDM (Fused Deposition Modeling) dans la mesure où il s'agit d'extrusion de matière à travers une buse sur un substrat. La différence est que l'on ne dépose pas de filament plastique mais d'une encre dont la viscosité est comprise entre 1 et 10^6 cP. Un schéma d'une tête d'impression nScrypt est donné dans la Figure I-6.

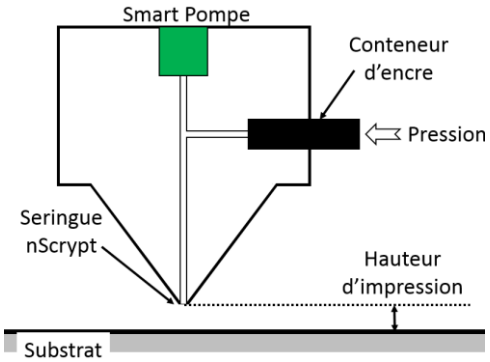


Figure I-6: Schéma d'une tête d'impression nScrypt

Les trois facteurs les plus importants de cette technologie sont les suivants :

→ La taille de la buse,
→ Le système de déplacement de la buse,
→ Le modèle de la pompe.

La taille de la buse vient directement déterminer la taille et la forme du dépôt que l'on peut obtenir en fonction de l'encre utilisée. L'un des derniers systèmes de pompage permet d'utiliser des seringues dont le diamètre intérieur varie entre 10 et 125 µm [I.22].

La précision du système de déplacement de la buse détermine la précision dimensionnelle des impressions ainsi que la répétabilité des motifs imprimés. Ce système gère également la vitesse d'impression ainsi que la taille et la forme du dépôt.

Pour finir la pompe contrôle la quantité de matière déposée ainsi que la répétabilité et la précision des volumes d'encre déposés. Ces trois caractéristiques vont déterminer les capacités de la machine, les encres utilisables ainsi que le prix (200 $ à 250 000 $).

I.1.2.1.4. Impression par technologie DPN

Nous pouvons faire une analogie entre la technologie DPN et l'écriture à la plume utilisée dans le domaine de la calligraphie. En effet, l'encre est ici un matériau que l'on souhaite déposer, la plume est la pointe d'un microscope à force atomique (AFM) et le papier est le substrat sur lequel on veut effectuer le dépôt. Cette technique est principalement utilisée dans l'impression et la réalisation de composants nanométriques.

Le fonctionnement de l'AFM repose sur l'interaction attractive ou répulsive des atomes de la pointe et de la surface du substrat à mesurer. Un laser vient mesurer la déviation de la pointe afin de pouvoir cartographier la surface à une échelle nanométrique. La technologie DPN vient utiliser cette résolution et cette flexibilité afin de pouvoir réaliser des nanofrabrications. La pointe est plongée dans un contenant d'encre, composé du matériau que l'on veut déposer, qui peut être de viscosité variable [I.23]. Ensuite, lorsque cette pointe

Licence CC BY-NC-ND 3.0

est placée sur le substrat, les molécules, ou les nanoparticules, vont venir se déposer en passant par l'intermédiaire d'un support aqueux (Figure I-7).

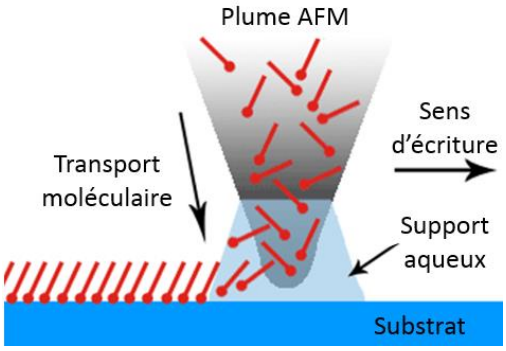


Figure I-7: Schéma de l'impression par DPN [I.24]

Le seul paramètre que l'utilisateur doit fixer pour réaliser ce type d'impression est la vitesse de dépôt, également appelée taux de transport d'encre et qui correspond à la croissance d'une surface caractéristique par seconde. Cependant ce paramètre dépend d'une multitude d'éléments dont les principaux sont :

- Le « chargement de l'encre » sur la pointe,
- La finesse de la pointe offrant une résolution inférieure à 100 nm [I.25],
- L'humidité et la température ambiante,
- La rugosité de surface du substrat,
- La dissolution cinétique et la diffusivité moléculaire.

Tous ces éléments ont un impact sur la quantité d'encre récupérée par la pointe et sur la manière dont elle est déposée sur le substrat. L'épaisseur typique d'un dépôt est typiquement inférieure à 100 nm. Une étude a été réalisée en [I.26] afin de mieux quantifier les problématiques liées au dépôt d'encre avec cette.

I.1.2.2. Procédés par laser

Le plus souvent utilisé pour des technologies basées sur l'ablation de matière ou la découpe, le laser est également utilisé dans certaines technologies DW sur le même principe.

En effet lors d'une ablation de matière, un gaz ou un plasma est formé et se dilate plus ou moins en fonction de la quantité d'énergie utilisée dans le laser. Cette rapide dilatation peut créer une onde de choc suffisante pour projeter un petit volume de matériau sur un substrat. On peut également utiliser directement le plasma et l'évaporation du matériau afin d'effectuer le dépôt.

Les principales technologies à base de laser utilisant ces deux concepts sont appelées PLD (Pulsed Laser Deposition), MAPLE (Matrix-Assisted Pulsed Laser Evaporation). Néanmoins elles permettent principalement de déposer des couches fines de particules / molécules sur un substrat. Il nous parait intéressant de présenter ces technologies afin d'introduire la technologie LIFT (Laser-Induced Forward Transfer). Son principe de fonctionnement est basé sur les deux technologies précédentes et permet quant à elle de réaliser des dépôts sélectifs d'un matériau sur un substrat.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

I.1.2.2.1. Dépôt par PLD

Cette technologie a montré sa capacité à déposer des matériaux complexes difficiles à déposer en utilisant d'autres technologies de dépôt, comme, par exemple, des oxydes à éléments multiples [I.27] ou des supraconducteurs [I.28].

Son fonctionnement repose sur l'utilisation d'un laser à impulsions de forte énergie et d'une chambre sous vide. Le laser est focalisé sur le matériau cible, qui est positionné sur sa plateforme, dans la chambre sous vide. L'énergie du laser va être absorbée par le matériau, ce qui va amener son évaporation ou ablation en créant une plume de plasma.

Cette plume, contenant les particules du matériau cible, va se dilater dans l'espace et va venir se condenser sur le substrat en couche fine (Figure I-8). Cette technique rencontre néanmoins ses limites notamment dans la surface de dépôt (quelques cm^2) ou au niveau de la préparation lourde des matériaux cibles afin d'en obtenir une excellente pureté.

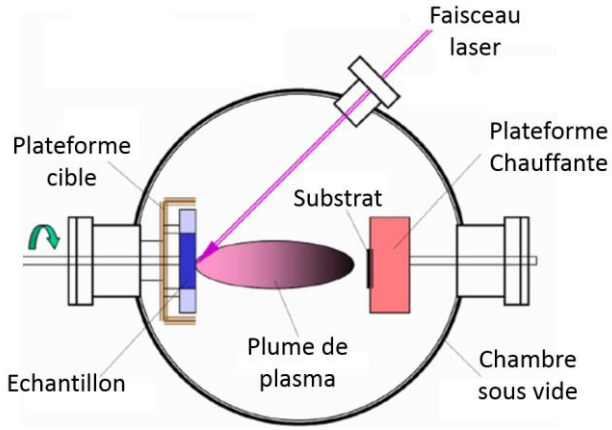


Figure I-8: Schéma de fonctionnement de la PLD [I.29]

Les paramètres à prendre en compte lors d'un dépôt de PLD sont :

- La température du substrat,
- La pression de la chambre sous vide,
- Les paramètres du laser (longueur d'onde, durée des impulsions, …),
- La distance entre le matériau cible et le substrat.

Un matériel capable de fournir une bonne maitrise de ces paramètres peut vite coûter cher. Cependant certains laboratoires ont développé leur propre machine afin de limiter le coût d'un tel équipement [I.30].

I.1.2.2.2. Dépôt par MAPLE

La technologie MAPLE est une technologie dérivée du PLD vu précédemment. En effet la technique reste similaire, cependant la différence majeure se trouve au niveau de la composition du matériau cible. Elle est principalement utilisée pour déposer des matériaux polymères ou organiques en couches fines.

Le matériau cible n'est pas le matériau brut mais une solution froide composée au maximum de 5% du matériau dilué dans un solvant très volatile et disposant d'une forte absorbance aux longueurs d'ondes utilisées. De ce fait, chaque molécule du matériau est protégée par une grande quantité de solvant, formant ainsi une matrice moléculaire.

Lorsque le laser est appliqué sur cette solution, toute l'énergie est absorbée et l'ablation a lieu, provoquant de ce fait, son évaporation en une plume de molécules. Lors de cette étape les molécules du matériau atteignent rapidement une énergie cinétique suffisante, par les

Licence CC BY-NC-ND 3.0

multiples collisions avec les molécules du solvant évaporé, pour être transmises par la plume sur le substrat (Figure I-9).

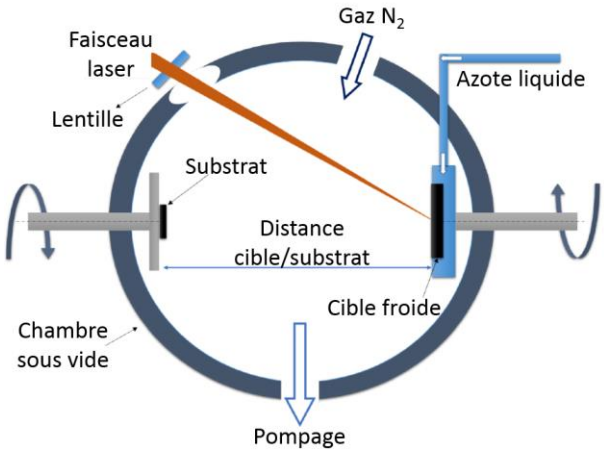


Figure I-9: Schéma de fonctionnement de la MAPLE [I.31]

Les paramètres à prendre en compte sont semblables à ceux de la technologie PLD, la seule différence se trouve au niveau du matériau cible. Nous avons de ce fait :

- La composition de la solution cible,
- La pression de la chambre,
- Les paramètres du laser (longueur d'onde, durée des impulsions, …),
- La distance entre le matériau cible et le substrat.

La technologie MAPLE est complémentaire à la technologie PLD dans la mesure où chacune dispose de sa spécialité. Elle est également capable de réaliser des dépôts en multicouches [I.32].

I.1.2.2.3. Dépôt par LIFT

La technologie LIFT est également similaire aux deux technologies précédentes et tient son originalité des changements apportés au niveau du matériau cible. Elle cumule les spécialités des technologies PLD et MAPLE dans le sens où elle est capable de déposer à la fois des matériaux polymères et organiques ainsi que des matériaux métalliques, principalement sous forme d'encre à nanoparticules [I.33]. Cette dernière solution nécessite ensuite une étape de frittage comme toutes les technologies déposant des encres métalliques.

Plus précisément, le matériau cible (voir Figure I-10) est constitué d'une couche en verre afin d'absorber un maximum d'énergie du laser incident et d'une couche fine du matériau à déposer. En fonction de la sensibilité, une feuille métallique peut être placée entre les deux afin de limiter au maximum la dégradation de la couche du matériau cible.

Contrairement aux autres technologies, la distance entre le substrat et le matériau cible est inférieure à 10 µm afin d'être dans les conditions de dépôt optimales. Le laser orienté vers la couche de verre et focalisé sur le matériau cible va causer une ablation de matière localisée au niveau de l'interface. Ce phénomène va augmenter la pression, ce qui va avoir pour effet d'éjecter un certain volume de matériau cible sur le substrat (ce phénomène est expliqué plus en détails en [I.34]). Le laser et le substrat peuvent se déplacer afin de pouvoir réaliser des formes complexes en gardant toujours un état de surface optimal du matériau cible à graver.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

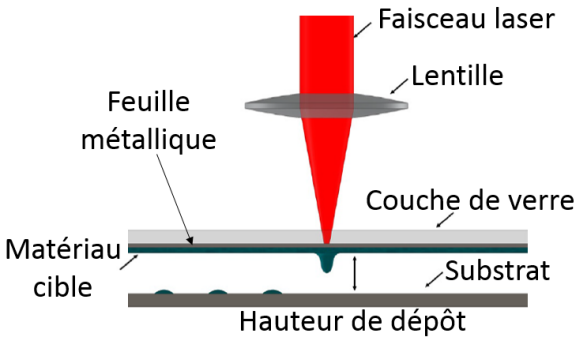


Figure I-10: Schéma explicatif de la technologie LIFT [I.35]

Les paramètres à prendre en compte sont de nouveau similaires aux technologies précédentes. Nous avons de ce fait :

- La viscosité de l'encre métallique,
- La pression de la chambre sous vide,
- Les paramètres du laser (longueur d'onde, durée des impulsions, …),
- La distance entre le matériau cible et le substrat.
- L'écartement entre chaque dépôt (ou gouttes pour les encres).

I.1.2.3. Procédé de dépôt à base de poudre

Le dépôt à base de poudre est une technologie dont le concept est proche des technologies de dépôt thermique. Cette dernière est basée sur la projection d'un matériau, accéléré par un gaz et une flamme plasma pour être transformé en gouttelettes. Cette technologie est étudiée en [I.36]. La forte cinétique des particules leur permet de s'accrocher sur le substrat voulu. Cependant l'utilisation d'une telle source de chaleur détériore la qualité du dépôt métallique ainsi obtenu. La technologie la plus repandue dans le dépôt de poudre est le Micro Cold Spray (MCS). Elle est principalement utilisée pour le dépôt des poudres métalliques, composites [I.37] ou à base de nanotubes de carbone.

Lors de son fonctionnement, un gaz d'azote ou d'hélium, selon le type de machine, est utilisé afin de porter les particules de la poudre jusqu'à la tête d'impression (voir la Figure I-11). Un flux additionnel de ce gaz va être chauffé, à des températures pouvant atteindre 800 °C, afin qu'il se dilate et donc que la pression qu'il exerce augmente. Ces deux flux de gaz se rejoignent dans la tête d'impression, elle-même chauffée afin de diminuer l'écart de température. Le flux de particules est éjecté à travers une buse à une vitesse allant jusqu'à 500 m/s. Cette très forte vélocité va amener au moment de l'impact assez d'énergie pour souder entre elles les particules avec le substrat. Une explication plus détaillée est donnée en [I.38].

Licence CC BY-NC-ND 3.0

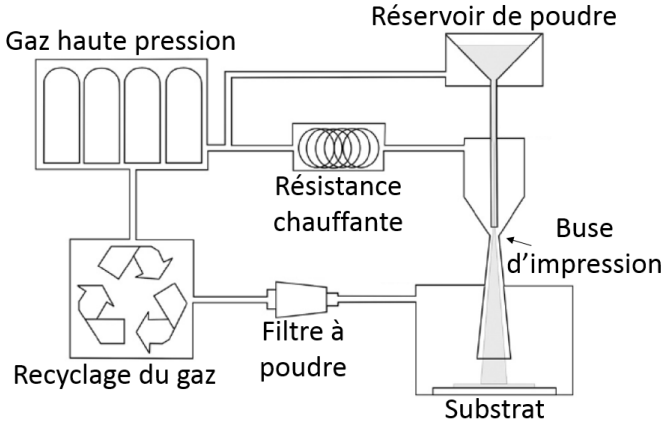


Figure I-11: Schéma explicatif de la technologie MCS [I.39]

Les principaux paramètres que l'utilisateur doit prendre en compte sont les suivants :

- Pression du gaz porteur,
- Température appliquée au gaz accélérateur,
- La distance de dépôt entre la buse et le substrat.

La pression du gaz d'accélération ainsi que la température du gaz au niveau de la buse sont mesurées en temps réel à l'aide de sondes. Le gaz sortant se refroidissant très vite, cette technologie est adaptée pour des dépôts sur des substrats ayant des températures de transition vitreuses basses [I.39].

I.1.3. Comparaison des performances des différentes technologies DW

Dans ce travail de thèse nous souhaitons métalliser toute une gamme de composants hyperfréquences que l'on ne sait pas traiter par les techniques classiques, ainsi que des composants millimétriques planaires ou 3D. Le Tableau I présente l'ensemble des technologies présentées précédemment excepté la PLD car elle n'est pas adaptée aux dépôts sélectifs et les épaisseurs des dépôts sont nanométriques.

L'ensemble de ces informations sont pour la majeure partie tirées des revues ou articles ([I.40] à [I.56]). Néanmoins l'ensemble de ces valeurs n'est pas absolu dans la mesure où elles dépendent d'un grand nombre de variables tels que l'expérimentateur, les matériaux utilisés, la machine utilisée ou encore les différentes modifications apportées. Leur rôle principal est de donner un aperçu des possibilités potentielles que laissent envisager ces technologies en fonction des applications que l'on cherche à réaliser.

Pour notre part nous souhaitons métalliser toute une gamme de composants hyperfréquences fonctionnant aux fréquences millimétriques, que ce soit sur des substrats plans ou sur des objets 3D eux-mêmes réalisés par fabrication additive. L'accès à ces gammes de fréquence demande une résolution d'impression très fine ainsi qu'une bonne précision de réalisation.

Trois technologies répondent à ce critère : l'Aérosol, le nScrypt et le LIFT. Cependant seules les deux premières sont capables de métalliser des objets en 3D et à fortiori d'y déposer aussi des matières non conductrices (diélectriques).

La capacité de l'Aérosol à pouvoir imprimer à plusieurs millimètres de hauteur lui permet de métalliser plus facilement des objets aux formes complexe contrairement au nScrypt qui lui est pratiquement en contact. La technologie Aérosol de par sa (très légèrement) plus forte résolution, est donc un choix tout à fait judicieux afin de répondre aux problématiques de ce travail de thèse.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau I: Comparaison des technologies DW

Type	Technologie		Largeur minimum de ligne(µm)	Précision (µm)	Etape de frittage	Sous vide	Dépôt sur Substrat 3D	Matériau	Epaisseur min (µm)	Distance de dépôt (mm)	Vitesse (mm/s)	Mode d'éjection
Distribution de matière	Inkjet	DOD Piézoélectrique	50	<10	Oui	Non	Difficile	Encres métalliques/diélectriques (<20 cP)	0,6	0,3	0,3	Gouttes
		DOD Thermique	50	<10	Oui	Non	Difficile	Encres métalliques	0,6	0,3	0,3	Gouttes
		CIJ	>100	N/A	Oui	Non	Oui	Encres métalliques/diélectriques (<10 cP)	1,8	100	60	Gouttes
	Aérosol Jet		14	1 à 2	Oui	Non	Oui	Encres métalliques/diélectriques (de 0,7 à $2,5.10^3$ cP)	0,2	[1 ; 5]	[0,1 ; 10]	Aérosol de gouttelettes
	nScrypt		20	1	Oui	Non	Oui	Pâte et encre (de 1 à 10^6 cP)	12,5	[0,075; 0,1]	20	Pâte extrudée
	DPN		<1	0,005	Non	Oui	Non	Nanoparticules, Molécules	0,003	Contact	5.10^{-3}	Molécules
Dépôt par laser	PLD		N/A	N/A	Non	Oui	Non	Métal	[0,01 ; 0,5]	[20 ; 80]	N/A	Particules
	MAPLE		N/A	2	Non	Oui	Non	Polymère, organique, encres à nanoparticules métalliques	14	[50 ; 100]	> 200	Particules
	LIFT		< 10	N/A	Dépend du matériau	Oui	Non	Encres nanoparticules métalliques, métal, polymère	0,49	[0,18 ; 0,25]	50	Gouttes / Particules
Dépôt par poudre	MCS		50	<10	Non	Non	Non	Poudres métalliques	1,4	50	25 [4]	Poudre

Licence CC BY-NC-ND 3.0

I.1.4. Technologie DW retenue

L'impression par jet d'aérosol, ou AJP, est l'une des technologies les plus adaptées pour la réalisation de composants micrométriques et pour la métallisation sélective de surfaces 3D. Notre étude bibliographique a montré qu'elle est capable de déposer des lignes dont la largeur minimum peut aller jusqu'à 14µm. Plus généralement, une résolution de 20 µm nous permet d'atteindre toutes les fréquences de la bande des fréquences millimétriques. Elle est également bien adaptée dans le dépôt de couches minces de quelques micromètres d'épaisseur qui sont suffisantes à ces fréquences.

Les deux matériaux les plus souvent utilisés dans la littérature sont l'encre à nanoparticules d'argent [I.56] et l'encre à molécules de polyimide [I.57]. D'autres matériaux sont également utilisables, le fabriquant Optomec proposant par exemple des encres conductrices non métalliques et un grand choix d'encres diélectriques et adhésives comme visibles dans [I.58].

Ces différentes encres, les capacités de métallisation 3D et d'impression multimatériaux et multicouches de la technologie AJP permettent de réaliser par exemple dans le domaine des hyperfréquences des lignes de transmission [I.59], des antennes [I.60], des filtres [I.61] et des interconnexions [I.62] entre deux composants.

Les composants que nous allons présenter font partie de l'état de l'art actuel pour tout ce qui concerne les impressions par technologie additive, et plus particulièrement pour l'AJP. Dans ce travail de thèse, nous comparerons systématiquement nos performances à celles de ces composants.

I.1.4.1. Etat de l'art des lignes de transmission imprimées par AJP

Les composants les plus couramment imprimés par AJP sont des lignes de transmissions. Elles permettent de caractériser de manière simple le niveau de performances typiques qu'il est possible d'atteindre en fonction des matériaux imprimés par AJP.

Dans la littérature, l'état de l'art est atteint dans le travail en [I.63] où des lignes de transmission coplanaires ont été imprimées avec de l'encre à base d'argent. Une méthode de frittage optimisée pour cette encre a été appliquée pour obtenir une conductivité supérieure à 40 S/µm. Les mesures en paramètres S de lignes de transmission coplanaires imprimées sur un substrat LCP sont données dans la Figure I-12.

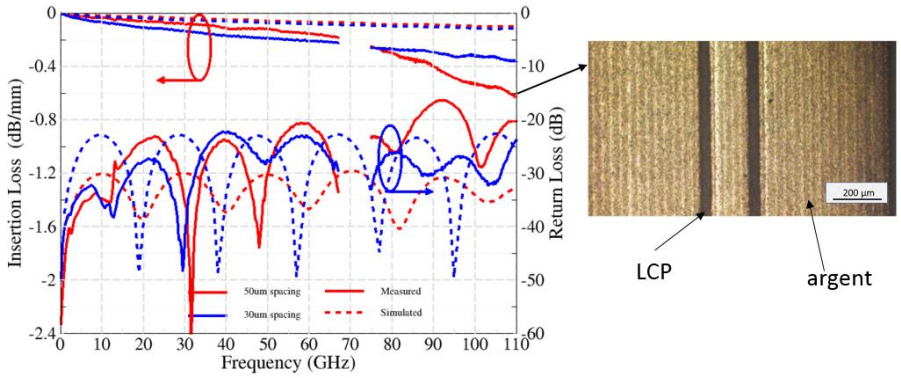


Figure I-12: Mesure et simulation d'une ligne de transmission coplanaire imprimée [I.63]

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Dans la Figure I-12 les lignes de transmission ont été imprimées avec de l'encre à base d'argent avec 16 µm d'épaisseur sur un substrat LCP d'épaisseur 50 µm. Nous pouvons observer que l'adaptation de la ligne de transmission est au mieux de -20 dB sur l'ensemble de la bande de fréquence. L'atténuation linéique de ces lignes de transmission sont au mieux à 0.11 dB/mm à 40 GHz et 0.31 dB/mm à 100 GHz.

Nous pouvons également citer le travail présenté en [I.65] dans lequel des lignes de transmission coplanaires ont été imprimées en argent sur un substrat de polyimide également imprimé par AJP (Figure I-13).

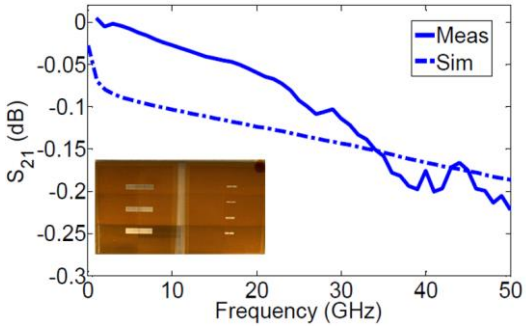


Figure I-13: Paramètre de transmission mesuré et simulé des lignes de transmission coplanaires imprimées sur du polyimide par AJP [I.65]

Dans la Figure I-13, le polyimide imprimé fait 21 µm d'épaisseur et est déposé sur un plan de masse constitué de 10 couches d'encre à base d'argent. Les lignes ont été imprimées en environs 7 couches d'encre à base d'argent pour une épaisseur totale d'environ 5 µm. L'atténuation linéique de ces lignes est d'environ 0.2 dB/mm à 40 GHz.

Ces deux derniers exemples correspondent à l'état de l'art actuel des lignes de transmission imprimées par AJP. Nous pensons cependant qu'il est intéressant de citer le travail en [I.65] dans lequel une ligne de transmission stripline est entièrement imprimée par AJP (Figure I-14).

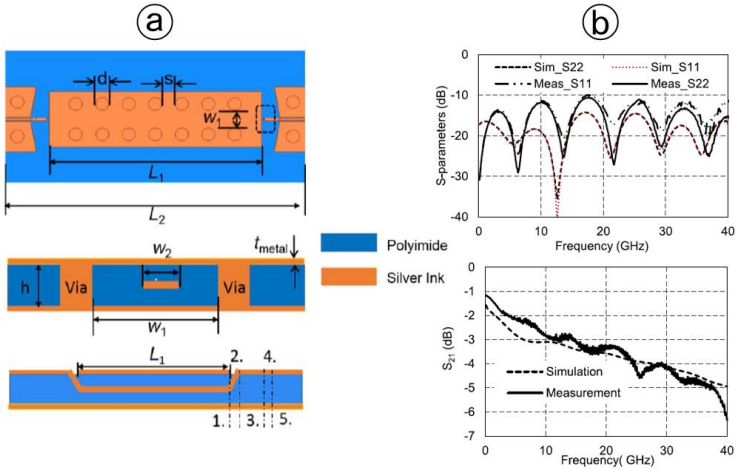


Figure I-14: Ligne de transmission stripline entièrement imprimée par AJP : ⓐ Modèle simulé ; ⓑ Mesures et simulations [I.65]

Dans la Figure I-14 ⓐ la ligne de transmission est constituée d'accès coplanaires, d'une transition de ligne coplanaire vers ligne microruban et enfin d'une transition de ligne microruban vers ligne stripline. Dans la Figure I-14 ⓑ nous pouvons constater que l'adaptation

Licence CC BY-NC-ND 3.0

de la ligne de transmission est au mieux de -10 dB sur l'ensemble de la bande de fréquences et l'atténuation linéique est d'environ 0.55 dB/mm à 40 GHz. Ce travail est le seul proposant une ligne de transmission stripline entièrement imprimée mais les pertes sont élevées.

Comme autres résultats importants, considérons également la ligne de transmission imprimée par AJP présentant la fréquence de fonctionnement la plus élevée, qui est celle montrée dans l'article [I.66]. Dans ce travail, la ligne de transmission est optimisée pour fonctionner sur la bande de fréquences [110 GHz ; 170 GHz]. Les lignes de transmission imprimées et leurs paramètres de transmission sont donnés dans la Figure I-15.

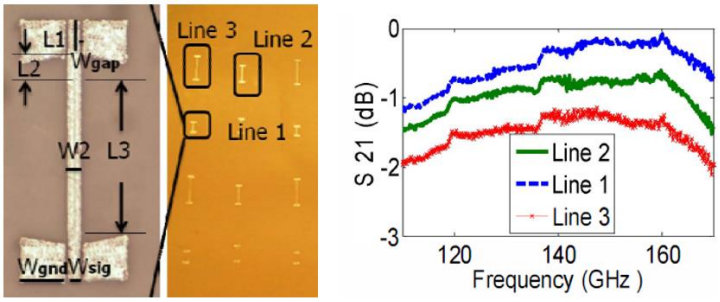


Figure I-15: Lignes de transmission imprimées qui fonctionnent sur la bande de fréquences [110 GHz; 170 GHz] [I.66]

Dans la Figure I-15, les lignes de transmission ont été imprimées en 10 couches d'encre à base d'argent pour environs 7 µm d'épaisseur sur un substrat Rogers LCP de 50 µm d'épaisseur. L'atténuation linéique de ces lignes de transmission est de 0.35 dB/mm à 110 GHz et 0.55 dB/mm à 170 GHz.

Nous pouvons cependant remarquer que le paramètre S_{21} décroit à partir de 150 GHz environ. La valeur d'atténuation linéique à 170 GHz est inférieure à celle à 110 GHz pour les lignes 2 et 3. Ces résultats non physique nous amène à nous interroger sur la pertinence de ces résultats à 170 GHz.

A ces fréquences, ce travail constitue à l'heure actuel l'état de l'art.

I.1.4.2. Etat de l'art des interconnexions 3D par AJP

Aujourd'hui il existe principalement deux techniques d'interconnexion pour des applications de packaging hyperfréquences : la technique du flip-chip et la technique du bonding par fil métallique [I.67].

Les principales problématiques de la technique Flip-chip sont le manque de résolution et la tolérance de fabrication des lignes de transmission fabriquées sur PCB ainsi que la difficulté à caractériser aux fréquences millimétriques les matériaux utilisés dans les applications de packaging [I.68]. De plus, la fabrication d'interposeurs spécifiques demande une photolithographie de haute résolution avec des techniques d'usinage de haute précision rendant ainsi le procédé de fabrication du prototype très couteux [I.69] [I.70].

Pour le bonding de fils métalliques, le principal problème vient de la désadaptation à hautes fréquences pour les applications large bande causée par l'effet d'inductance des fils [I.71]. Pour limiter cet effet, les concepteurs tendent à réduire au maximum la longueur des fils ou encore à rajouter des effets capacitifs au niveau des lignes de transmission à raccorder afin

Licence CC BY-NC-ND 3.0

de contrebalancer l'inductance amenée par les fils (qui devient cependant alors sélective en fréquence).

Avec l'arrivée des technologies d'impression additive une troisième technique d'interconnexion a vu le jour : l'impression d'un plan incliné en diélectrique puis d'une piste métallique pour connecter une puce à son substrat.

Nous pouvons trouver plusieurs exemples d'un tel procédé dans la littérature. Dans les travaux en [I.72] et [I.73] des lignes de transmission ont été imprimées sur des plans inclinés afin de connecter le sommet d'une puce à son substrat (Figure I-16).

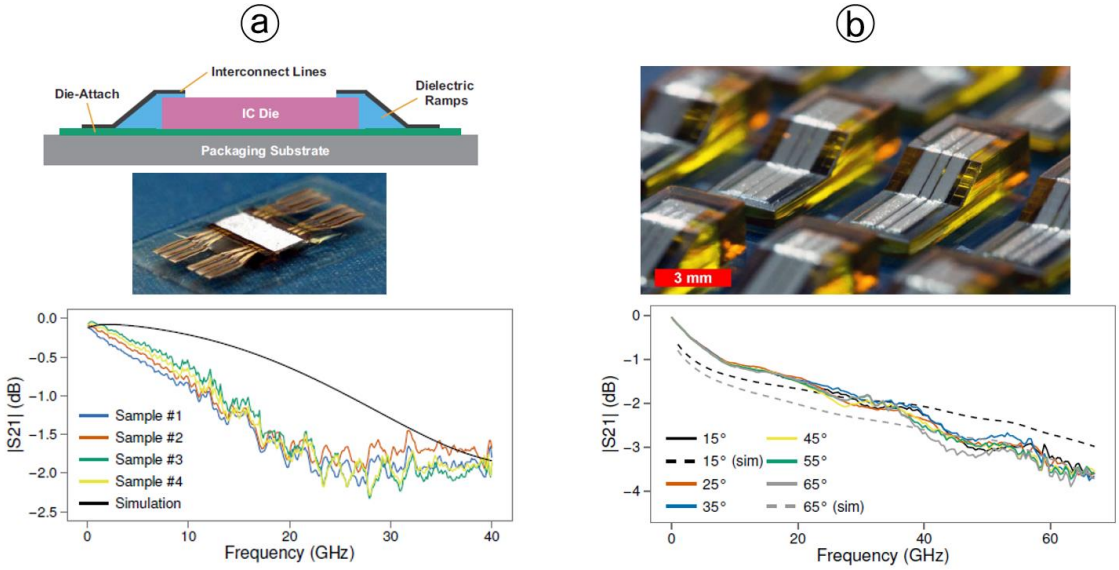


Figure I-16:Ligne de transmission sur des plans inclinés :
ⓐ Interconnexion CPW imprimé par Jet d'encre [I.72] ; ⓑ Rampes imprimées en Vorex avec une interconnexion imprimée par Jet d'encre [I.73]

Dans la Figure I-16 ⓐ une puce de 50 µm d'épaisseur est placée sur un matériau adhésif. Une dizaine de couches d'encre SU-8 ont été imprimées afin de réaliser la rampe connectant le sommet de la puce au substrat. L'atténuation linéique de ces lignes de transmission 3D est au mieux de 0.5 dB/mm à 40 GHz. Dans la Figure I-16 ⓑ, une rampe de 1 mm d'épaisseur est réalisée par stéréolithographie 3D en vorex et une fine couche d'encre SU-8 est imprimée sur sa surface afin de réduire la rugosité. L'atténuation linéique de ces lignes de transmission 3D est au mieux de 0.26 dB/mm à 40 GHz.

Ces deux derniers travaux représentent l'état de l'art atteint en utilisant la technologie d'impression par jet d'encre.

Dans les travaux utilisant la technologie AJP, nous pouvons citer en [I.74] la réalisation d'une interconnexion coplanaire 3D fonctionnant jusqu'à 110 GHz. Les lignes imprimées ainsi qu'un exemple des paramètres S mesurés sont montrés dans la Figure I-17.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

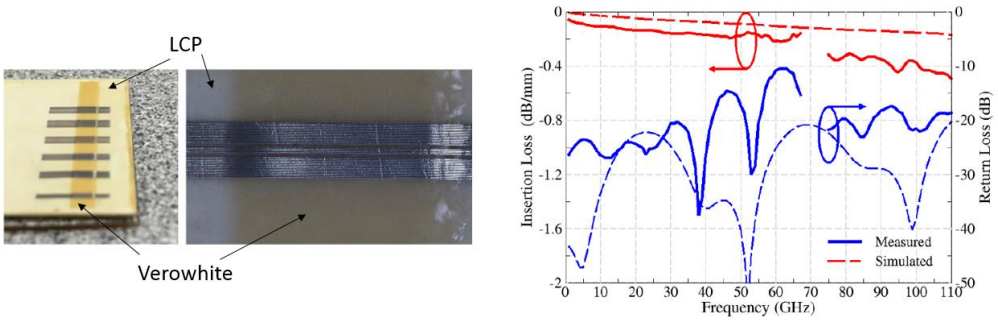


Figure I-17: Interconnexion imprimée jusqu'à 110 GHz [I.74]

Dans la Figure I-17, les lignes de transmission font 7 mm de longueur et sont imprimées en 3 couches d'encre à base d'argent pour une épaisseur de 1.37 µm. Le substrat de LCP fait 177.8 µm d'épaisseur et les plans inclinés en verowhite font 200 µm d'épaisseur. L'atténuation linéique des lignes de transmission imprimées est au mieux à 0.17 dB/mm et 0.48 dB/mm respectivement à 40 GHz et 110 GHz.

Nous avons également un autre exemple d'interconnexion entièrement imprimée par AJP en [I.75]. Une ligne de transmission microruban est entièrement imprimée pour connecter la surface d'une puce à son substrat jusqu'à 18 GHz. Un exemple de ligne de transmission imprimée ainsi que ses mesures en paramètres S sont montrées dans la Figure I-18.

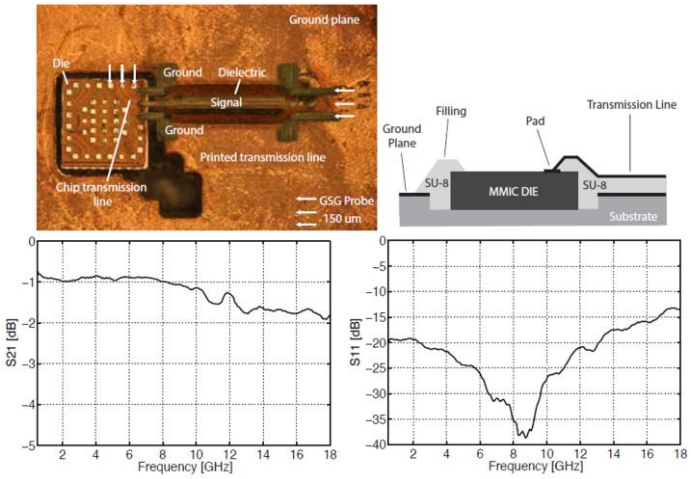


Figure I-18: Interconnexion microruban entièrement imprimée par AJP [I.75]

Dans la Figure I-18, une puce de 500 µm d'épaisseur est placée dans un trou gravé de 300 µm de profondeur. Le diélectrique est une encre SU-8 imprimées en 10 couches pour obtenir une épaisseur de 75 µm et la ligne de transmission de 2 mm de longueur est imprimée avec une encre à base d'argent pour 2 µm d'épaisseur. L'atténuation linéique de ces interconnexions microruban imprimées sont au mieux de 0.9 dB/mm à 18 GHz.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

I.1.4.3. Etat de l'art des résonateurs et filtres imprimés par AJP

Malgré un grand choix d'applications, la réalisation de composants de filtrage fonctionnant dans la bande des fréquences millimétriques est un challenge car il est nécessaire d'avoir une très grande précision de fabrication, ce qui entraine une augmentation des coûts. La technologie additive, et plus particulièrement la technologie AJP, peut permettre d'éliminer ces problématiques en proposant un procédé d'impression capable d'une très grande résolution.

Dans le travail présenté en [I.76], nous avons les premiers résonateurs coupe-bande imprimés par AJP résonnant jusqu'à 500 GHz. La Figure I-19 présente les différents résonateurs imprimés par AJP.

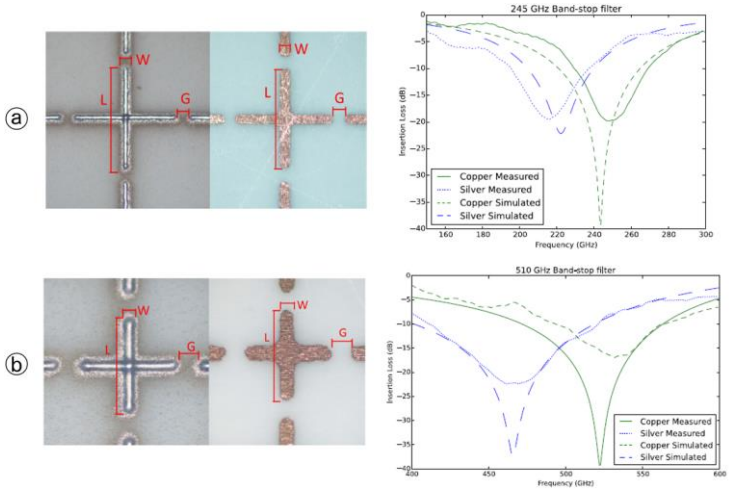


Figure I-19: Résonateurs coupe-bande imprimés par AJP [I.76]: ⓐ Résonateur vers 230 GHz ; ⓑ Résonateurs vers 500 GHz

Dans la Figure I-19 ⓐ et ⓑ, les résonateurs ont été imprimés avec une encre à base d'argent sur un substrat LCP de 25.4 µm d'épaisseur. Le résonateur imprimé fonctionnant vers 210 GHz présente des pertes d'insertion à 25 dB, et celui qui fonctionne à 465 GHz a des pertes d'insertions de 23 dB.

Un autre exemple de filtre imprimé par AJP est présenté en [I.76]. Les filtres planaires passe bande imprimés fonctionnent à des fréquences supérieures à 80 GHz et sont montrés dans la Figure I-20.

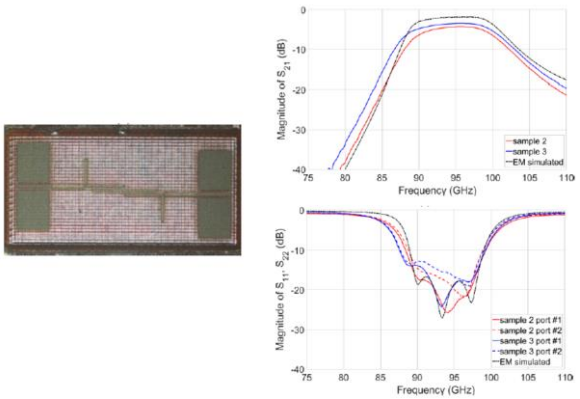


Figure I-20: Filtre passe bande imprimés par AJP fonctionnant à 90 GHz

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Dans la Figure I-20, le diélectrique est du polyimide imprimé en 10 couches et les pistes métalliques ont été imprimées avec une encre à base d'argent pour une épaisseur de 1.4 µm. Les filtres imprimés ont une fréquence centrale d'environ 94 GHz et ont une bande passante d'environ 10 GHz. L'adaptation, caractéristiques de la précision de réalisation, est supérieure à 12 dB dans la bande passante.

I.2. L'impression 3D

Maintenant que nous avons sélectionné l'AJP comme technologie de métallisation sélective, nous allons réaliser la même démarche avec les technologies de fabrications additives 3D.

Après une brève présentation historique de la technologie additive 3D, nous allons identifier les principales technologies et machines présentes dans les secteurs de la recherche et de l'industrie. Un tableau final permettra de comparer leurs principales caractéristiques et nous mettrons ainsi en évidence la technologie que nous avons utilisée dans ce travail de thèse afin de fabriquer les différents supports.

I.2.1. L'avènement des technologies d'impression 3D

Les technologies additives sont basées sur un concept simple qui permet la conversion de modèle numérique en objet solide en 3 dimensions. Au fil des années, les techniques se sont développées dans l'industrie et les laboratoires avec comme point commun la création d'un objet physique réalisé couche par couche.

Les premiers essais qui avaient pour but de créer des objets solides à partir d'une résine photosensible (inventée en 1950 par DUPONT) et d'un laser, remontent à la fin des années 1960. Cependant, l'origine de ce concept et du procédé que l'on connait aujourd'hui a été mis au point par le Docteur Hideo KODAMA en 1980. En effet, il a été parmi l'un des tous premiers à réaliser l'approche de polymérisation au laser à faisceau unique [I.78].

Durant son travail de recherche, il a fabriqué 3 types de machines (Figure I-21) :

→ La machine Ⓐ utilise une lampe à mercure (ou lampe xénon) comme source UV et un masque pour contrôler la sélectivité de l'exposition. La plateforme est immergée et la polymérisation se fait par le dessus. A chaque couche, l'objet est immergé dans le liquide par une plateforme se déplaçant sur l'axe z. Un exemple de réalisation est visible dans la Figure I-22 Ⓐ.

→ La machine Ⓑ est constituée de la même manière que la Ⓐ. La différence est que la polymérisation se fait par le dessous et la plateforme est tirée vers le haut à chaque couche.

→ Enfin la machine Ⓒ utilise une fibre montée sur une plateforme se déplaçant sur les axes x et y afin de scanner les différentes parties à polymériser. Une lentille vient contrôler le diamètre du faisceau et un obturateur permet une polymérisation sélective couche par couche.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

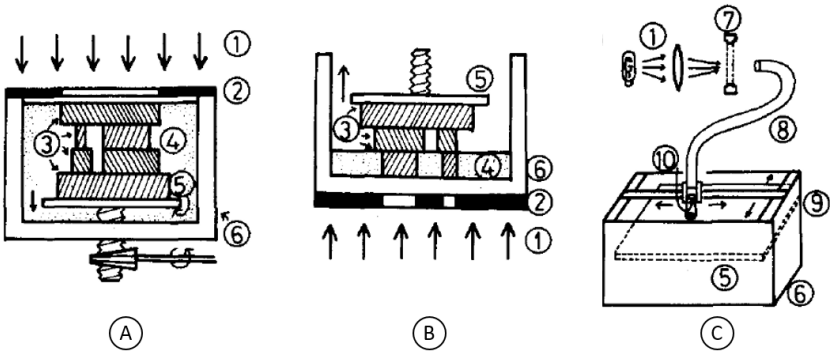


Figure I-21: ① rayon ultraviolet, ② masque, ③ couche solidifiées, ④ résine photosensible, ⑤ plateforme mobile, ⑥ réceptacle, ⑦ obturateur, ⑧ fibre optique, ⑨ traceur des axes x et y et ⑩ lentille optique [I.78]

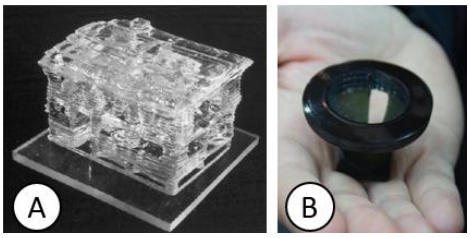


Figure I-22: Première impression 3D : Ⓐ Maison imprimée à l'aide de l'équipement ; Ⓑ Premier objet imprimé par stéréolithographie

En 1982, Alan HERBERT réalise un système qui dirige un laser d'argon sur une surface en résine à l'aide d'un système de miroirs fixés à un dispositif de traceur sur les axes x et y [I.79]. Cependant le principal but de ce travail fut de permettre de mieux comprendre les problématiques d'un tel système.

En 1984, basé sur le travail de ses prédécesseurs, une équipe de chercheurs français du CNRS a mis au point la première imprimante 3D. Un brevet fut déposé et la France chercha à rendre cette technique disponible dans le commerce sous forme de service, sans prévoir de vendre des systèmes complets. Cependant par manque de fond, le projet fut abandonné après quelques années et c'est finalement Chuck HULL, futur fondateur de 3D Systems, qui déposa le premier brevet commercial en 1986 pour une technique appelée « Stéréolithographie » (SLA) [I.80]. Cette technique utilise comme matériau d'impression une résine liquide solidifiée sous l'effet d'une lumière UV, le premier objet à avoir été imprimé est visible Figure I-22 Ⓑ.

L'avènement de cette technologie a marqué le commencement de ce que l'on considère comme étant la 4ème révolution industrielle et qui offre des possibilités d'applications extrêmement variées. A partir de cette avancée, les technologies additives ont continué leur essor avec le temps.

En 1988, le professeur Carl DECKARD dépose le brevet du frittage laser sélectif (Selective Laser Sintering ou SLS), qui repose sur la fusion d'une poudre plastique à l'aide d'un laser. Le fondateur du groupe Stratasys, Scott CRUMP, a également développé les premières imprimantes 3D par extrusion d'un filament de plastique. Brevetée sous le nom de Fused Deposition Modeling (FDM), cette technologie fait partie aujourd'hui des plus populaires, grâce à sa prise en main aisée et son faible prix d'accès.

Les années 1990 ont vu naitre d'autres technologies additives innovantes comme le liantage de poudre (Binder Jetting) inventé par ZCorp utilisant comme matériaux une poudre minérale, un liant et des encres de couleur. Le jet de matière (PolyJet ou Material Jetting), créé par la société Israélienne Objet (maintenant fusionnée avec Stratasys), utilise un procédé

Licence CC BY-NC-ND 3.0

qui est basé sur le dépôt de fines gouttelettes de polymères solidifiées sous l'effet d'un flash de lumière.

La technologie SLS a donné naissance à la fabrication dite additive métal, avec la montée de nouvelles techniques comme le frittage laser direct de métal (commercialisé par Phénix Systems, SLM Solutions ou Concept Laser). Une autre technique, la fusion par faisceau d'électrons (e-BEAM), a été mise au point par Arcam dans les années 2000.

Aujourd'hui, l'impression métallique est en plein essor avec l'arrivée de nouveaux fabricants sur le marché (XJet, AdMetalFlex, BeAM, …) qui visent à améliorer les coûts, le temps d'impression 3D et la diversité des métaux compatibles. Cependant, ce n'est pas le seul secteur en pleine croissance.

En effet, selon une étude de SmarTech Publishing [I.81], l'impression 3D céramique va connaitre un essor important avec une estimation des revenus globaux en 2028, 30 fois supérieurs à ceux de 2018. Un phénomène qui pourrait notamment être expliqué par le lancement de nouvelles imprimantes comme Ceramo One, de Kwambio, ou celle de 3D Potter.

Cette technologie est aujourd'hui principalement utilisée dans les secteurs de l'aérospatiale, de l'automobile, dans la marine, l'énergie, la médecine et l'électronique par les principaux fabricants comme par exemple 3D Systems, XJet, Kwambio ou le français 3D Ceram. C'est ce dernier secteur qui nous intéresse plus particulièrement dans le cadre de ce projet de thèse.

I.2.2. Les différentes machines conçues pour l'impression 3D

Le principe de l'impression 3D repose sur le découpage tranche par tranche d'un objet numérique par un programme informatique puis à son impression couche par couche afin de construire l'objet final en 3D.

Les domaines d'applications de ces technologies sont extrêmement variés. A ce titre, nous pouvons citer l'entreprise russe Apis Cor avec sa première impression de maison [I.82] ou encore l'entreprise française Chanel avec de nouvelles problématiques d'industrialisation pour ses technologies [I.83].

Dans notre domaine, celui des hyperfréquences, nous avons également un grand nombre de cas d'applications comme par exemple l'impression de composants en céramique en [I.84]. La norme ISO/ASTM 52900 [I.85] (réalisée en 2015 et renouvelée en 2020) classe ces technologies d'impression 3D et 7 catégories, à savoir :

- Extrusion de matière,
- Photopolymérisation,
- Fusion sur lit de poudre,
- Projection de matière,
- Projection de liant,
- Laminage sur feuille
- Dépôt sous énergie concentrée.

L'ensemble de ces technologies sont décrites en Annexe 1.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

I.2.3. Comparaison des performances des différentes technologies d'impression 3D

Dans ce travail de thèse, en plus de la métallisation sélective par aérosol, nous souhaitons également pouvoir réaliser nos prototypes d'objets 3D à l'aide des technologies d'impression 3D. L'ensemble des caractéristiques des technologies d'impression 3D présentées précédemment dans cette partie et en Annexe 1 sont données dans les Tableau II et III.

L'ensemble de ces informations sont pour la majeur partie tirées des sites internet des constructeurs, d'articles de sites spécialisés ou encore de fiches techniques de matériels spécifiques ([I.86] à [I.111]). Ces valeurs ne sont pas absolues dans la mesure où elles ne reflètent pas les véritables capacités de la machine dans un cas donné en fonction d'un utilisateur, d'un matériau et conditions d'impressions identiques. Néanmoins elles servent principalement à donner un aperçu des capacités brutes de ces technologies afin d'orienter notre choix dans les applications que l'on souhaite réaliser. Il est cependant important de prendre contact avec les fabricants, de demander des échantillons ou bien encore de simplement les tester si on en a les moyens.

Pour notre part nous souhaitons réaliser des composants millimétriques 3D et nous recherchons donc les technologies les plus précises possibles afin de respecter au mieux les cotations. La céramique ayant des caractéristiques très intéressantes comme matériaux diélectriques (pertes très faibles, caractérisées par une tangente de pertes comprise entre 10^{-4} et 10^{-5}), nous cherchons principalement les technologies capables d'utiliser ce matériau.

Les principales technologies capables d'imprimer des poudres céramiques sont la SLA, la SLS, la NJP et enfin la LENS. Néanmoins seule la SLA propose des niveaux de précision capables de réaliser des objets millimétriques le plus précisément possible tout en garantissant un bon état de surface. C'est pour ces raisons que nous avons décidé d'utiliser la stéréolithographie afin de réaliser tous les composants hyperfréquences volumiques de ce travail de thèse.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau II: Comparaison des technologies additives 3D - Partie 1

Type	Technologie	Résolution XY (µm)	Epaisseur des couches (µm)	Précision (%)	Post traitement	Matériau	Surface min (mm)	Surface max (mm)
Extrusion de matière	FDM	N.A.	[130 ; 330]	0,2	Finitions	Filaments thermoplastiques	254 x 254 x 254	355 x 254 x 355
Polymérisation	SLA	25	[25 ; 100]	[0,1 ; 0,5]	Nettoyage ; Polymérisation	Résines photosensibles : polymère, céramique	250 x 250 x 50	1500 x 750 x 550
	DLP	[30 ; 82]	[25 ; 150]	N.A.	Nettoyage ; Polymérisation	Résines photosensibles : polymère	45 x 28 x 100	140 x 79 x 100
	DPP	47	25	N.A.	Nettoyage ; Polymérisation	Résines photosensibles (Daylight)	121 x 68 x 160	N.A.
	CLIP	N.A.	75	N.A.	Nettoyage ; Polymérisation	Résines : polymère	141 x 79 x 326	189 x 118 x 326
Fusion de lit de poudre	SLS	N.A.	[80 ; 150]	0,3	Nettoyage	Poudres : polymère, verre, céramique	381 x 330 x 460	550 x 550 x 750
	SLM	40	[20 ; 90]	[0,1 ; 0,2]	Nettoyage ; Polissage ; Finition	Poudre métallique	125 x 125 x 125	500 x 280 x 850
	EBM	140	50	N.A.	Nettoyage ; Polissage ; Finition	Poudre métallique	200 x 200 x 180	200 x 200 x 380
	MJF	N.A.	[70 ; 100]	0,3	Nettoyage ; Polissage ; Finition ; Frittage ; Polymérisation	Poudre polymère ; Poudre métallique	380 x 285 x 380	N.A.

Licence CC BY-NC-ND 3.0

Tableau III: Comparaison des technologies additives 3D - Partie 2

Type	Technologie	Résolution XY (µm)	Epaisseur des couches (µm)	Précision (%)	Post traitement	Matériau	Surface min (mm)	Surface max (mm)
Projection de matière	PolyJet	[20 ; 200]	[14 ; 28]	N.A.	Nettoyage	Encres photosensibles : polymère	294 x 192 x 149	1000 x 800 x 500
	NJP	N.A.	N.A.	N.A.	Nettoyage ; Frittage	Encres nanoparticules : métallique, céramique	500 x 140 x 200	500 x 280 x 200
Projection de liant	CJP	N.A.	100	N.A.	Nettoyage ; Frittage ; Polymérisation	Poudres : métallique, céramique, silice, polymère	236 x 185 x 127	508 x 381 x 229
Laminage de feuille	LOM	12	100	N.A.	Nettoyage	Feuilles : papier, plastique	256 x 169 x 150	N.A.
	SLCOM	100	[100 ; 1000]	N.A.	Nettoyage	Feuille : matériaux composites	760 x 610 x 610	N.A.
Dépôt sous énergie concentrée	LENS	[5 ; 186]	[250 ; 750]	N.A.	Frittage ; Finitions	Poudres : métallique, céramique	150 x 150 x 150	900 x 1500 x 900
	EBAM	N.A.	N.A.	N.A.	Frittage ; Finitions	Fils : métallique	2794 x 2794 x 2794	7620 x 2743 x 3353
	LDW	N.A.	N.A.	N.A.	Frittage ; Finitions	Fils : métallique ; Poudres : métallique	735 x 650 x 560	660 x 400 x 1500

Licence CC BY-NC-ND 3.0

I.2.4. Technologie d'impression 3D retenue : Conclusion et discussion

De toutes les technologies de fabrication 3D, la technologie SLA dispose donc de la meilleure précision. Elle est particulièrement adaptée afin de réaliser de petits composants dont les dimensions leur permettent de fonctionner dans la bande des fréquences millimétriques. La catégorie qui nous intéresse tout particulièrement est la SLA céramique 3D.

Le principe de réalisation d'objet 3D est très similaire à celui des technologie SLA classique. En effet un laser UV va venir sélectivement polymériser dans un bain de résine composé de particules de céramique. La pièce finale ainsi obtenue est alors appelée pièce crue. Elle nécessite une phase de nettoyage mais également un cycle de cuisson afin d'obtenir ses dimensions et propriétés finales. Cette dernière étape est spécifique à la SLA céramique 3D et amène des contraintes mécaniques supplémentaires provoquant des retraits de plus de 25% à prendre en compte lors du dimensionnement de la pièce.

Les détails de la technologie ainsi que les études de la composition du bain de résine en fonction de la quantité de particule céramique et sur leurs différents cycles de cuisson sont donnés dans la thèse présentée en [I.112].

Le procédé utilisé au CTTC (Centre de Transfert de Technologies Céramiques) et transféré à la PME 3DCeram à Limoges (groupe Sinto) utilise un miroir galvanométrique contrôlable par ordinateur pour gérer l'orientation d'un laser UV à l'argon de longueur d'onde λ=351 nm de diamètre 120 µm.

La résolution latérale atteignable est de l'ordre de 80 µm. Le système de distribution de la pâte résineuse à la surface du bain est assuré à l'aide d'un piston. L'étalement de cette matière est effectué à l'aide d'un système bien spécifique composée d'une lame à double tranchant développé et breveté par la société française Optoform [I.113] (rachetée aujourd'hui par 3D System). Le CTTC a également déposé un brevet international sur les pates de résines céramique [I.114].

En exemple de réalisation par la technologie SLA 3D céramique du CTTC nous pouvons présenter l'étude sur la réalisation d'un nouveau bain de résine pour réaliser des objets céramiques à très faibles pertes (ε_r ≈9.8 et tanδ=2,06.10^{-5} à 13 GHz) [I.115]. D'autre travaux utilisant aussi une alumine présentant des performances similaires sont donnés en [I.116] [I.117] et [I.118].

Aujourd'hui les principales sociétés utilisant cette technologie sont 3D CERAM, Lithoz et le centre de transfert CTTC. En plus de l'alumine, d'autres matériaux ont été développés comme la silice et la zircone par exemple. Plus de détails sont donnés sur leurs sites en [I.119], [I.120] et [I.121]. A notre connaissance seule la PME 3DCeram propose une alumine dont les pertes très faibles sont en adéquation avec notre recherche de composants 3D de grandes performances. Pour donner un exemple de machine d'impression 3D en céramique nous pouvons citer la ProMaker V6000 en [I.122] capable d'utiliser des résines chargées à 95-99% d'alumine avec une résolution native de 32 µm.

I.3. Conclusion du Chapitre I

Après avoir détaillé une grande partie des technologies additives et de fabrication 3D existantes, nous avons établi une comparaison entre leurs différentes caractéristiques. Nous avons mis en évidence les technologies d'impression par Jet d'aérosol et de stéréolithographie céramique 3D afin de valider les choix technologiques établis lors de la mise en place de ce travail de thèse.

Le principal atout de ces deux technologies se situe dans leur résolution nous permettant de réaliser des composants fonctionnant dans la bande de fréquences millimétriques. Les différents travaux précédemment réalisés ou ceux trouvés dans la littérature nous ont montré des premiers résultats encourageant dans cette voie. Les capacités de l'AJP à réaliser des composants multicouches et multimatériaux nous ouvrent la porte à un grand nombre d'applications.

Malgré le fait que ce travail de thèse s'articule principalement autour de ces deux technologies nous restons ouverts aux possibilités qu'offrent les autres technologies, que ça soit au niveau de l'inspiration ou pour servir de compléments de fabrication. Il n'est d'ailleurs pas rare de trouver des machines utilisant plusieurs technologies afin d'additionner leurs points forts tout en compensant leurs points faibles.

Références bibliographiques Chapitre I

[I.1] LPE, ”Insight into the history of PCBs”, [en ligne] Consulté sur: https://www.lpe.hu/en/history-of-pcb

[I.2] Sam Sattel, “The History of PCBs”, [en ligne] Consulté sur: https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/history-of-pcbs/

[I.3] Kirstie Petherbridge, Peter Evans, David Harrison, (2005) "The origins and evolution of the PCB: a review", Circuit World, Vol. 31 Issue: 1, pp.41-45

[I.4] Ken Gilleo, Jerry Murray, “The Definitive History of the Printed Circuit”, [en ligne] Consulté sur: https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.453.2575&rank=1

[I.5] Ken Gilleo & Jerry Murray, “The Definitive History of the Printed Circuit”, 1999 PC Fab, CiteSeerX

[I.6] Hills, Jennie, “Radio with the first Printed Circuit Board by Paul Eisler, 1942.” [photographie], © Science Museum / Science & Society Picture Library. Image Ref: 10439336

[I.7] M. J. Renn and R. Pastel, "Direct writing of materials by laser guidance," in Conference on Lasers and Electro-Optics, C. Chang-Hasnain, W. Knox, J. Kafka, and K. Vahala, eds., OSA Technical Digest (Optical Society of America, 1999), paper CFC4.

[I.8] Jae-Duk Lee et al., "A monolithic thermal inkjet printhead utilizing electrochemical etching and two-step electroplating techniques," Proceedings of International Electron Devices Meeting, Washington, DC, USA, 1995, pp. 601-604.

[I.9] Jingkuang Chen and K. D. Wise, "A high-resolution silicon monolithic nozzle array for inkjet printing," in IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 44, no. 9, pp. 1401-1409, Sept. 1997.

[I.10] Mortara, L., Hughes, J., Ramsundar, P., Livesey, F. and Probert, D. (2009), "Proposed classification scheme for direct writing technologies", Rapid Prototyping Journal, Vol. 15 No. 4, pp. 299-309.

[I.11] M. McLeod and C. Tabor, "Colloidal Germanium Inks for 3D Printed Semiconductors," 2018 IEEE Research and Applications of Photonics In Defense Conference (RAPID), Miramar Beach, FL, 2018, pp. 1-2.

[I.12] Z. Wang, T. Zhao, X. Liang, P. Zhu and R. Sun, "A low cost method to synthesize silver nanoparticles for the screen printing conductive inks," 2017 18th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Harbin, 2017, pp. 1121-1124.

[I.13] V. Leblanc, J. Chen, P. Mardilovich, V. Bulovic and M. A. Schmidt, "Evaporative Printing of Organic Materials at Ambient Pressure using a Micromachined Printhead," TRANSDUCERS 2007 - 2007 International Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems Conference, Lyon, 2007, pp. 121-124.

[I.14] H. Kang, G. Lee and Y. Nam, "Inkjet-printed gold nanorods using biocompatible polyelectrolyte layer-by-layer coating for patterned photothermal applications," 2017 39th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC), Seogwipo, 2017, pp. 3545-3548.

[I.15] A. Matavž, R. C. Frunză, A. Drnovsek, V. Bobnar and B. Malič, "Inkjet printing of thin metal-oxide structures from sol-gel precursor inks," 2016 Joint IEEE International Symposium on the Applications of Ferroelectrics, European Conference on Application of Polar Dielectrics, and Piezoelectric Force Microscopy Workshop (ISAF/ECAPD/PFM), Darmstadt, 2016, pp. 1-4.

[I.16] Rim Rammal, Nicolas Delhote, Olivier Tantot, Serge Verdeyme, Jamal Rammal, et al.. Multimaterial Inkjet Technology for The Fabrication of Multilayer Components. Mediterranean Microwave Symposium (13ème MMS), Sep 2013, Saida, Lebanon.

[I.17] E. Halonen, T. Viiru, K. Ostman, A. L. Cabezas and M. Mantysalo, "Oven Sintering Process Optimization for Inkjet-Printed Ag Nanoparticle Ink," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 3, no. 2, pp. 350-356, Feb. 2013.

[I.18] Samir ZELMAT, “Etude des propriétés électriques d’un matériau polyimide à haute température : Application à la passivation des composants de puissance en carbure de silicium », thèse de doctorat en Génie électrique, sous la direction de Marie-Laure LOCATELLI, Laboratoire de Génie Electrique de Toulouse, 30 mars 2006

[I.19] FUJIFILM, « FUJIFILM Dimatix Introduces New DMP-3000 Materials Printer at the Large-area, Organic & Printed Electronics Convention (LOPE-C) in Frankfurt”, [en ligne] Consulté sur: https://www.fujifilmusa.com/press/news/display_news?newsID=880182#

[I.20] Seth York, “Microwave Characterization of Printable Dielectric Inks Using Additive Manufacturing Methods”, a thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Electrical Engineering, sous le direction de Thomas Weller, Ph.D., Department of Electrical Engineering College of Engineering University of South Florida, June 20, 2018, p 24

[I.21] Michael Molitch-Hou (April 23, 2018), “nScrypt Demonstrates Ability to 3D Print Embedded Sensors for Medical Devices”, [en ligne] Consulté sur: https://www.engineering.com/3DPrinting/3DPrintingArticles/ArticleID/16844/nScrypt-Demonstrates-Ability-to-3D-Print-Embedded-Sensors-for-Medical-Devices.aspx

[I.22] nScrypt, “Specification Sheet : SmartPump™, “January 2016, [en ligne]. Consulté sur: https://www.nscrypt.com/wp-content/uploads/2018/11/nScrypt-SmartPump-Gen2-2018.pdf

[I.23] Z. Fradkin, D. Bykhovsky, M. Zohar, A. Azulay and S. Tapuchi, "Printable grating patterns of PDMS by dip-pen nanolithography," 2016 IEEE International Conference on the Science of Electrical Engineering (ICSEE), Eilat, 2016, pp. 1-3.

[I.24] AZoNano, “Dip Pen Nanolithography – A Modern Nanolithographic Technique Combining the Atomic Force Microscope with Old Fashioned Ink Pen Writing”, 27 septembre 2006, [en ligne]. Consulté sur: https://www.azonano.com/article.aspx?ArticleID=1746

[I.25] T. Levesque, J. Jang, A. Smetana and P. Stiles, "Dip Pen Nanolithography® (DPN®) and the Deposition of Multiple Materials in Nanopatterning," 2010 Fourth International Conference on Quantum, Nano and Micro Technologies, St. Maarten, 2010, pp. 48-52.

[I.26] O'Connell, Cathal & Higgins, Michael & Sullivan, Ryan & Moulton, Simon & Wallace, Gordon. (2014). Ink-on-Probe Hydrodynamics in Atomic Force Microscope Deposition of Liquid Inks. Small. 10. 10.1002/smll.201400390.

[I.27] T. Watanabe et al., "High rate deposition by PLD of YBCO films for coated conductors," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 15, no. 2, pp. 2566-2569, June 2005.

[I.28] T. Kawai, "Pulsed laser deposition of dielectric and superconducting materials: Mechanisms and applications," Digest IEEE/Leos 1996 Summer Topical Meeting. Advanced Applications of Lasers in Materials and Processing, Keystone, CO, USA, 1996, pp. 3-4.

[I.29] InVacuo, “Pulsed Laser Depostion” [en ligne]. Consulté sur : http://invacuo.com/vacuum-equipment/pld/pulsed-laser-depostion/

[I.30] Oliva, Marcos. (2012). Development of a Low Cost Pulsed Laser Deposition System for Thin Films Growth. Modern Instrumentation. 1. 10.4236/mi.2012.14006.

[I.31] Yang, Songlin and Jin Zhang. “Matrix-Assisted Pulsed Laser Evaporation (MAPLE) technique for deposition of hybrid nanostructures.” (2017).

[I.32] Califano, Valeria & Bloisi, Francesco & Vicari, Luciano & Colombi, Paolo & Bontempi, Elza & Depero, Laura E.. (2008). MAPLE deposition of biomaterial multilayers. APPLIED SURFACE SCIENCE. 254. 7143-7148. 10.1016/j.apsusc.2008.05.295.

[I.33] Rapp, Ludovic & Diallo, Abdou & Alloncle, Anne & Videlot-Ackermann, Christine & Delaporte, Ph. (2009). Pulsed-laser printing of organic thin-film transistors. Applied Physics Letters. 95. 171109-171109. 10.1063/1.3255011.

[I.34] M. Morales, D. Munoz-Martin, A. Marquez, S. Lauzurica, C. Molpeceres, « Laser-Induced Forward Transfer Techniques and Applications », Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, 2018, Pages 339-379

[I.35] M. Morales, D. Munoz-Martin, S. Lauzurica, A. Márquez, Y. Chen, D. Canteli, C. Molpeceres, « Laser Induced Forward Transfer of High Viscosity Fluids. Application To Solar Cell Metallization and Bio-Printing », [présentattion], Centro Láser UPM. [en ligne] Consulté sur: https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcSqBCKazkvBegex2si6fLB3uO93UlhjTng8n32scL5gowYqZOWYYQ

[I.36] Fauchais P.L., Heberlein J.V.R., Boulos M.I. (2014) Overview of Thermal Spray. In: Thermal Spray Fundamentals. Springer, Boston, MA.

[I.37] Sameh Dardona, Justin Hoey, Ying She, and Wayde R. Schmidt, “Direct write of copper-graphene composite using micro-cold spray”, AIP Advances 6, 085013 (2016)

[I.38] Bhattacharya, Sourin, Lutfurakhmanov, Artur, Hoey, Justin M., Swenson, Orven F., and Sailer, Rob. "Micro Cold Spray Direct Write Process." Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 7: Fluids and Heat Transfer, Parts A, B, C, and D. Houston, Texas, USA. November 9–15, 2012. pp. 907-911.

[I.39] VRC Metal Systems, “What is Cold Spray?”, [en ligne] Consulté sur: https://vrcmetalsystems.com/technology-cold-spray/

[I.40] Mette, A. & Richter, P. & Hoerteis, Matthias & Glunz, Stefan. (2007). Metal aerosol jet printing for solar cell metallization. Progress in Photovoltaics: Research and Applications. 15. 621 - 627. 10.1002/pip.759.

[I.41] Junfeng Mei, M. R. Lovell and M. H. Mickle, "Formulation and processing of novel conductive solution inks in continuous inkjet printing of 3-D electric circuits," in IEEE Transactions on Electronics Packaging Manufacturing, vol. 28, no. 3, pp. 265-273, July 2005.

[I.42] J. M. Hoey, M. J. Robinson and R. A. Sailer, "Micro Cold Spray printed top metallization layer for solar cells," 2014 IEEE 40th Photovoltaic Specialist Conference (PVSC), Denver, CO, 2014, pp. 2491-2494.

[I.43] G. T. Carranza, U. Robles, C. L. Valle, J. J. Gutierrez and R. C. Rumpf, "Design and Hybrid Additive Manufacturing of 3-D/Volumetric Electrical Circuits," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 9, no. 6, pp. 1176-1183, June 2019.

[I.44] E. A. Rojas-Nastrucci et al., "Characterization and Modeling of K-Band Coplanar Waveguides Digitally Manufactured Using Pulsed Picosecond Laser Machining of Thick-Film Conductive Paste," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 65, no. 9, pp. 3180-3187, Sept. 2017.

[I.45] Michael N. Nguyen, Robert L. Parkhill, Robert M. Taylor, and Kenneth H. Church, "Evaluation of direct-write capacitors," Materials Research Society, Fall 2001

[I.46] C. Mihaela, P. Cristina and D. Violeta, "Direct Writing Patterns for Gold Thin Film with DPN Technique," 2018 International Semiconductor Conference (CAS), Sinaia, 2018, pp. 261-264.

[I.47] Su, Ming & Aslam, Muhammad & Fu, Lei & Wu, Nianqiang & Dravid, Vinayak. (2004). Dip-pen nanopatterning of photosensitive conducting polymer using a monomer ink. Applied Physics Letters. 84. 4200-4202. 10.1063/1.1737469.

[I.48] Smith, Michael & Choi, Yeonsik & Boughey, Chess & Kar-Narayan, Sohini. (2017). Controlling and assessing the quality of aerosol jet printed features for large area and flexible electronics. Flexible and Printed Electronics. 2. 015004. 10.1088/2058-8585/aa5af9.

[I.49] S.R.V. SivaPrasanna, K.Balaji, ShyamPandey, SravendraRana, “Metal Oxide Based Nanomaterials and Their Polymer Nanocomposites”, Nanomaterials and Polymer Nanocomposites, Raw Materials to Applications, 2019, Pages 123-144

[I.50] Oliva, Marcos. (2012). Development of a Low Cost Pulsed Laser Deposition System for Thin Films Growth. Modern Instrumentation. 1. 10.4236/mi.2012.14006.

[I.51] Hoey, Justin & Reich, Mike & Halvorsen, Aaron & Vaselaar, Dustin & Braaten, Kris & Maassel, Mike & Akhatov, Iskander & Ghandour, Osman & Drzaic, Paul & Schulz, Doug. (2009). Rapid Prototyping RFID Antennas Using Direct-Write. Advanced Packaging, IEEE Transactions on. 32. 809 - 815. 10.1109/TADVP.2009.2021768.

[I.52] Chrisey, D. & Pique, A. & Modi, Romil & Wu, H.D. & Auyeung, R.C.Y. & Young, H.D.. (2000). Direct writing of conformal mesoscopic electronic devices by MAPLE DW. Applied Surface Science. 168. 345-352. 10.1016/S0169-4332(00)00824-2.

[I.53] Serra, Pere & Fernández-Pradas, Juan & Colina, Monica & Duocastella, Martí & Domínguez, Jorge & Morenza, José. (2006). Laser-induced forward Transfer: a Direct-writing Technique for Biosensors Preparation. Journal of Laser Micro Nanoengineering - J LASER MICRO NANOENG. 1. 236-242. 10.2961/jlmn.2006.03.0017.

[I.54] Boutopoulos, Christos & Kalpyris, Ioannis & Serpetzoglou, Efthymis & Zergioti, Ioanna. (2013). Laser-induced forward transfer of silver nanoparticle ink: Time-resolved imaging of the jetting dynamics and correlation with the printing quality. Microfluidics and Nanofluidics. 10.1007/s10404-013-1248-z.

[I.55] Mandamparambil, Rajesh. (2015). Laser-induced forward transfer of high-viscosity silver precursor ink for non-contact printed electronics. RSC Advances. 5. 77942–77947. 10.1039/c5ra14119b.

[I.56] Anthony Delage, Nicolas Delhote, Serge Verdeyme, Barbara Bonnet, Ludovic Carpentier, et al.. Aerosol Jet Printing of Millimeter Wave Transmission Lines on 3D Ceramic Substrates Made by Additive Manufacturing. International Microwave Symposium (IMS 2018), Jun 2018, Philadelphia, United States.

[I.57] F. Cai, Y. Chang, K. Wang, C. Zhang, B. Wang and J. Papapolymerou, "Low-Loss 3-D Multilayer Transmission Lines and Interconnects Fabricated by Additive Manufacturing Technologies," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 10, pp. 3208-3216, Oct. 2016.

[I.58] OPTOMEC, “Aerosol Jet Materials” [en ligne]. Consulté sur: https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/

[I.59] A. A. Gupta, M. C. M. Soer, M. Taherzadeh-Sani, S. G. Cloutier and R. Izquierdo, "Aerosol-Jet Printed Transmission Lines for Microwave Packaging Applications," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology.

[I.60] He, Yuxiao, Michael Thomas Craton, Premjeet Chahal and John Papapolymerou. “A Bi-material Fully Aerosol Jet printed W-band Quasi-Yagi-Uda Antenna.” 2018 11th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) (2018): 1-3.

[I.61] C. Oakley, A. Kaur, J. A. Byford and P. Chahal, "Aerosol-Jet Printed Quasi-Optical Terahertz Filters," 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, 2017, pp. 248-253.

[I.62] J. A. Qayyum, M. Abt, A. Roch, A. C. Ulusoy and J. Papapolymerou, "Ultra wideband 3D interconnects using aerosol jet printing up to 110 GHz," 2017 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, 2017, pp. 1112-1115.

[I.63] M. Abt et al., "Aerosol-Printed Highly Conductive Ag Transmission Lines for Flexible Electronic Devices," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 8, no. 10, pp. 1838-1844, Oct. 2018.

[I.64] F. Cai et al., "Aerosol jet printing for 3-D multilayer passive microwave circuitry," 2014 44th European Microwave Conference, Rome, 2014, pp. 512-515.

[I.65] F. Cai, Y. Chang, K. Wang, C. Zhang, B. Wang and J. Papapolymerou, "Low-Loss 3-D Multilayer Transmission Lines and Interconnects Fabricated by Additive Manufacturing Technologies," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 10, pp. 3208-3216, Oct. 2016.

[I.66] F. Cai, Y. Chang, K. Wang, W. T. Khan, S. Pavlidis and J. Papapolymerou, "High resolution aerosol jet printing of D- band printed transmission lines on flexible LCP substrate," 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014), Tampa, FL, 2014, pp. 1-3.

[I.67] C. A. Palesko and E. J. Vardaman, "Cost comparison for flip chip, gold wire bond, and copper wire bond packaging," 2010 Proceedings 60th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Las Vegas, NV, 2010, pp. 10-13.

[I.68] T. Zwick, A. Chandrasekhar, C. W. Baks, U. R. Pfeiffer, S. Brebels and B. P. Gaucher, "Determination of the complex permittivity of packaging materials at millimeter-wave frequencies," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 3, pp. 1001-1010, March 2006.

[I.69] S. Koriyama, K. Kitazawa, H. Minamiue and M. Fujii, "77 GHz band surface mountable ceramic package," IEEE 8th Topical Meeting on Electrical Performance of Electronic Packaging (Cat. No.99TH8412), San Diego, CA, USA, 1999, pp. 225-228.

[I.70] N. Jain, "Designing commercially viable MM-wave modules," 2000 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (Cat. No.00CH37017), Boston, MA, USA, 2000, pp. 565-568 vol.1.

[I.71] Jin-Yang Kim, Hai-Young Lee, Jae-Hyun Lee and Dong-Pil Chang, "Wideband characterization of multiple bondwires for millimeter-wave applications," 2000 Asia-Pacific Microwave Conference. Proceedings (Cat. No.00TH8522), Sydney, NSW, Australia, 2000, pp. 1265-1268.

[I.72] B. K. Tehrani, B. S. Cook and M. M. Tentzeris, "Inkjet-printed 3D interconnects for millimeter-wave system-on-package solutions," 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), San Francisco, CA, 2016, pp. 1-4.

[I.73] B. K. Tehrani, R. A. Bahr, W. Su, B. S. Cook and M. M. Tentzeris, "E-band characterization of 3D-printed dielectrics for fully-printed millimeter-wave wireless system packaging," 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honolulu, HI, 2017, pp. 1756-1759.

[I.74] J. A. Qayyum, M. Abt, A. Roch, A. C. Ulusoy and J. Papapolymerou, "Ultra wideband 3D interconnects using aerosol jet printing up to 110 GHz," 2017 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, 2017, pp. 1112-1115.

[I.75] A. A. Gupta, M. C. M. Soer, M. Taherzadeh-Sani, S. G. Cloutier and R. Izquierdo, "Aerosol-Jet Printed Transmission Lines for Microwave Packaging Applications," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology.

[I.76] C. Oakley, A. Kaur, J. A. Byford and P. Chahal, "Aerosol-Jet Printed Quasi-Optical Terahertz Filters," 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, 2017, pp. 248-253.

[I.77] M. T. Craton, J. Sorocki, I. Piekarz, S. Gruszczynski, K. Wincza and J. Papapolymerou, "Realization of Fully 3D Printed W-Band Bandpass Filters Using Aerosol Jet Printing Technology," 2018 48th European Microwave Conference (EuMC), Madrid, 2018, pp. 1013-1016.

[I.78] Hideo Kodama, “Automatic method for fabricating a three-dimensional plastic model with photo-hardening polymer”, Review of Scientific Instruments 52, 1770 (1981)

[I.79] Alan J. Herbert, “Solid Object Generation”, Journal of applied photographic engineering 8(4):185-188 · August 1982

[I.80] Charles W. Hull, “Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography”, Patent 4,575,330. 11 March 1986

[I.81] SmarTech, “Ceramics Additive Manufacturing Markets 2017-2028”, SMP-AM-CER-092018 September 27 2018

[I.82] Mélanie R. (6 mars 2018), “#Startup3D : Apis Cor et l’impression 3D de maisons », [en ligne] Consulté sur : https://www.3dnatives.com/apis-cor-construction-06032018/

[I.83] Alexandre Moussion (16 mars 2018), « CHANEL : son nouveau mascara ouvre la voie à l’industrialisation massive de l’impression 3D », [en ligne] Consulté sur : http://www.primante3d.com/chanel-impression-3d-16032018/

[I.84] Ludovic CARPENTIER, « Filtres céramiques microondes par stéréolithographie 3D », Electronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique, Thèse dirigée par Nicolas DELHOTE et Serge VERDEYME, UNIVERSITE DE LIMOGES, ECOLE DOCTORALE : Sciences et Ingénierie pour l’Information, 2012

[I.85] ISO (2015-12), « SO/ASTM 52900:2015 (ASTM F2792) Fabrication additive -- Principes généraux – Terminologie », Comité technique: ISO/TC 261 Fabrication additive, ICS : 01.040.25 Techniques de fabrication (Vocabulaires) 25.030 Fabrication additive

[I.86] Alkaios Bournias Varotsis, 3D HUBS, “Introduction to SLA 3D Printing”, [en ligne] Consulté sur : https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-sla-3d-printing

[I.87] 3D SYSTEMS, “3D Stereolithography Printers”, [en ligne] Consulté sur : https://fr.3dsystems.com/sites/default/files/2018-11/3d-systems-sla-tech-specs-a4-us-2018-11-01-web_0.pdf

[I.88] Stratasys, “Stratasys F123 Series”, [en ligne] Consulté sur : https://www.stratasys.com/-/media/files/brochures/f120/br_fdm_f123_a4_fr_0319b_web.pdf

[I.89] 3Dnatives, “Imprimante 3D : Mcor Iris », [en ligne] Consulté sur : https://www.3dnatives.com/3D-compare/imprimante/mcor-iris

[I.90] Machines-3D, “Imprimante 3D Liquid Crystal Precision 1.5 DPP”, [en ligne] Consulté sur : https://www.machines-3d.com/imprimante-3d-liquid-crystal-precision-15-xml-351_599-2368.html

[I.91] Formlabs, “Stéréolithographie Formlabs”, [en ligne] Consulté sur : https://formlabs.com/fr/3d-printers/form-3/tech-specs/

[I.92] Les imprimante 3D.fr, “M1”, [en ligne] Consulté sur : https://www.lesimprimantes3d.fr/comparateur/imprimante3d/carbon/m1/

[I.93] Les imprimante 3D.fr, “M2”, [en ligne] Consulté sur : https://www.lesimprimantes3d.fr/comparateur/imprimante3d/carbon/m2/

[I.94] EnvisionTEC, “Advanced Desktop 3D Printers”, [en ligne] Consulté sur : https://envisiontec.com/3d-printers/desktop-3d-printers/

[I.95] EnvisionTEC, “Desktop Vida”, [en ligne] Consulté sur : https://envisiontec.com/wp-content/uploads/2016/09/2017-Vida-.pdf

[I.96] Alkaios Bournias Varotsis , 3D HUBS, “HP MJF vs. SLS: A 3D Printing Technology Comparison”, [en ligne] Consulté sur : https://www.3dhubs.com/knowledge-base/hp-mjf-vs-sls-3d-printing-technology-comparison

[I.97] Mcor, “ArkePro Office 3D Printer”, [en ligne] Consulté sur : https://www.mcortechnologies.com/wp-content/themes/genesis-child/assets/uploads/ArkeProBrochure.pdf

[I.98] 3D SYSTEMS, “Selective Laser Sintering Printers”, [en ligne] Consulté sur : https://fr.3dsystems.com/sites/default/files/2019-05/3d-systems-SLS-printers-tech-specs-usen-2019-05-03-a-web.pdf

[I.99] 3D SYSTEMS, “ColorJet Printers”, [en ligne] Consulté sur : https://fr.3dsystems.com/sites/default/files/2017-03/3D Systems_CJP_Tech_Specs_USEN_2017.02.27_WEB.pdf

[I.100] SLM SOLUTIONS, “SLM® Machines”, [en ligne] Consulté sur : https://www.slm-solutions.com/products/machines/selectivelasermeltingmachines/

[I.101] Arcam, “Welcome to Manufacturing UNBOUND”, [en ligne] Consulté sur : http://www.arcam.com/wp-content/uploads/arcamebm-corp-brochure-fnlv3.pdf

[I.102] additively, “Electron Beam Melting (EBM)”, [en ligne] Consulté sur : https://www.additively.com/en/learn-about/electron-beam-melting

[I.103] additively, “Laser Melting (LM)”, [en ligne] Consulté sur : https://www.additively.com/en/learn-about/laser-melting

[I.104] Stratasys, “PolyJet 3D Printers”, [en ligne] Consulté sur : https://www.stratasys.com/-/media/files/printer-spec-sheets/polyjet-3d-printers-systems-materials-spec-sheet.pdf

[I.105] XJET, “XJet Carmel 700”, [en ligne] Consulté sur : https://xjet3d.com/products/xjet-carmel-700/

[I.106] XJET, « Xjet Carmel 1400 », [en ligne] Consulté sur : https://xjet3d.com/products/xjet-carmel-1400/

[I.107] EnvisionTEC, “SLCOM 1”, [en ligne] Consulté sur : https://envisiontec.com/wp-content/uploads/2016/09/2017-SLCOM1.pdf

[I.108] OPTOMEC, “LENS Systems – 3D Printed Metal”, [en ligne] Consulté sur : https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-printers/

[I.109] OPTOMEC, “LENS MATERIALS FAQs”, [en ligne] Consulté sur : https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwjUsMK1ovriAhWInhQKHZBqDkoQFjAAegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.optomec.com%2Fwpcontent%2Fuploads%2F2014%2F02%2FLENS_MATERIALS_Datasheet_WEB2016.pdf&usg=AOvVaw1J_3FlNmK6Eqplgtc8AdLk

[I.110] Sciaky, “Turnkey Metal Additive Manufacturing Machines for Production Parts, Prototypes, & Part Repairs”, [en ligne] Consulté sur : https://www.sciaky.com/additive-manufacturing/metal-additive-manufacturing-systems

[I.111] DMG MORI, “Procédé de buse de pulvérisation », [en ligne] Consulté sur : https://fr.dmgmori.com/produits/machines/additive-manufacturing/procede-de-buse-de-pulverisation

[I.112] Nicolas DELHOTE, « Composants céramiques 3D par procédé de stéréolithographie : solutions de filtrage hyperfréquence innovantes », Electronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique, Thèse dirigée par Dominique BAILLARGEAT et Serge VERDEYME, UNIVERSITE DE LIMOGES, ECOLE DOCTORALE : Sciences-Technologie-Santé, 2007

[I.113] 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

[I.114] Brevets US 2005090575 et WO 0042471

[I.115] Mohamed Khalil Drissi, « Composants céramiques 3D innovants pour des applications spatiales de télécommunications millimétriques en bandes Q et V », Electronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique, Thèse dirigée par Nicolas DELHOTE et Serge VERDEYME, UNIVERSITE DE LIMOGES, ECOLE DOCTORALE : Sciences-Technologie-Santé, 20016

[I.116] N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, C. Delage and C. Chaput, "Ceramic Layer-By-Layer Stereolithography for the Manufacturing of 3-D Millimeter-Wave Filters," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 55, no. 3, pp. 548-554, March 2007.

[I.117] Delhote, Nicolas & Baillargeat, Dominique & Verdeyme, Serge & Delage, Cyrille & Chaput, Christophe. (2008). Millimeter Wave Devices Based on a 3-D Electromagnetic Band Gap Crystal Manufactured by Layer-By-Layer Ceramic Stereolithography. Proceedings of the 38th European Microwave Conference, EuMC 2008. 551 - 554. 10.1109/EUMC.2008.4751511.

[I.118] N. Delhote, D. Baillargeat, S. Verdeyme, C. Delage and C. Chaput, "Innovative Shielded High Q Dielectric Resonator Made of Alumina by Layer-by-Layer Stereolithography," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 17, no. 6, pp. 433-435, June 2007.

[I.119] CTTC, “Fabrication additive des céramiques » [en ligne] Consulté sur : https://www.cttc.fr/expertises/fabrication-additive-des-ceramiques/

[I.120] 3D CERAM, “ 3DMIX, céramiques pour impression 3D » [en ligne] Consulté sur : http://3dceram.com/fr/ceramiques-pour-impression-3d/

[I.121] Lithoz, « Lithoz - manufacture the future » [en ligne] Consulté sur: https://www.lithoz.com/

[I.122] PRODWAYS tech, « ProMaker V6000 » [en ligne] Consulté sur : https://www.prodways.com/fr/imprimantes-3D-industrielles/promaker-v6000/

Chapitre II. Etude de l'impression par jet d'aérosol et ses matériaux

La mise en place de l'Aérosol Jet Printing (AJP) donne la possibilité d'un large choix de matériaux métalliques ou diélectriques imprimables sous forme d'encre. Dans ce travail de thèse, nous nous sommes intéressés tout particulièrement aux encres à nanoparticules métalliques à forte conductivité et à des matières diélectriques à relativement faibles tangentes de pertes afin de pouvoir réaliser des composants hyperfréquences aux fréquences millimétriques. Ces encres sont définies par leur composition chimique, leur viscosité et leur densité de particules. Un grand nombre de fabricants proposent un large choix d'encres mais toutes ne se valent pas. De ce fait, notre choix s'est basé sur plusieurs points fondamentaux, à savoir :

- L'imprimabilité et la résolution atteignable pour une encre donnée,
- La conductivité effective des dépôts métalliques en fonction de la fréquence d'utilisation de ces composants,
- La permittivité et la tangente de pertes des dépôts diélectriques en fonction de la fréquence d'utilisation de ces composants.

Ce chapitre est séparé en deux parties. La première est dédiée à la présentation des différents composants hyperfréquences que nous souhaitons utiliser durant nos différents tests et fabrications. Ils sont composés principalement de lignes de transmission et de résonateurs planaires en forme d'anneau. Ces composants élémentaires ont pour rôle de quantifier et de caractériser les performances typiques que l'on peut obtenir en utilisant la technologie AJP. La caractérisation des encres métalliques et diélectriques étant une grosse problématique de ce travail de thèse, nous avons également consacré une partie de ce chapitre sur les différentes techniques utilisées : caractérisation par cavité volumique et par anneau résonant.

La seconde partie de ce chapitre concerne les différents essais expérimentaux réalisés avec l'AJP. Dans celui-ci nous présenterons les différents tests réalisés afin d'optimiser la mise en œuvre et la caractérisation d'encres métalliques à nanoparticules d'argent et d'or ainsi que d'une encre diélectrique à base de polyimide.

Ces différents tests réalisés sont des expériences simples grâce auxquelles nous sommes capables de relever les valeurs de résolutions atteignables, les épaisseurs et la qualité des dépôts réalisés (rugosité et homogénéité de surface) pour chaque encre utilisée. Leurs caractéristiques électriques sont également extraites avec les techniques présentées dans la première partie de ce chapitre.

Pour terminer cette étude, nous réalisons plusieurs lignes de transmission en fonction des différents résultats obtenus dans le but d'atteindre les fréquences les plus élevées possibles. Leurs dimensions sont optimisées pour permettre l'utilisation de pointes de mesures adéquates et pour conserver nos composants adaptés à 50 Ω.

Néanmoins, n'ayant obtenu l'encre polyimide qu'en toute fin de projet, les différents composants réalisés dans cette partie seront principalement imprimés sur des substrats alumine à très faibles pertes. L'intérêt d'imprimer des lignes de transmission est de pouvoir en extraire directement la valeur d'atténuation linéique afin de pouvoir la comparer à l'état de l'art disponible dans la littérature scientifique.

II.1. Présentation des dispositifs

La caractérisation de la technologie AJP passe par deux points :

- La réalisation de tests géométriques élémentaires permettant de quantifier la résolution et la qualité de dépôt obtenue en fonction de l'encre choisie.
- La réalisation de composants élémentaires tels que des lignes de transmission afin de pouvoir comparer leurs performances à celles de l'état de l'art.

Cette première partie concerne principalement les différents composants hyperfréquences que nous avons utilisés durant notre étude.

Nous allons commencer par présenter le principe de fonctionnement des lignes de transmission micro-ruban et coplanaires en abordant leur théorie ainsi que les différentes préconisations que nous conseillons lorsque l'on souhaite les utiliser aux fréquences millimétriques. Nous allons également présenter les anneaux résonants que nous avons principalement utilisés pour caractériser les différentes encres métalliques et diélectriques que nous avons choisies.

Les différentes méthodes de caractérisation par cavité volumique et par anneau résonnant sont également décrites dans cette partie. Nous sommes rentrés plus particulièrement dans les détails de cette dernière étant donné que nous l'avons développé durant ce travail de thèse. Chaque technique permet de caractériser de deux manières différentes la conductivité des dépôts métalliques ainsi que la permittivité et la tangente de pertes des dépôts diélectriques.

II.1.1. Les lignes de transmissions

Les lignes de transmission sont des composants constitués d'un ensemble de conducteurs capables de transmettre un signal d'une source jusqu'à une charge. Les plus courantes dans le secteur de l'électronique imprimé sont les lignes micro-rubans (microstrip) et les lignes coplanaires (Co-Planar Waveguide ou CPW). Nous allons commencer cette partie par un point théorique sur les lignes de transmission puis nous verrons plus en détails ces deux types de lignes tout particulièrement intéressantes dans notre secteur de recherche.

II.1.1.1. Généralité d'une ligne de transmission

Une ligne de transmission peut être représentée par une succession de tronçons élémentaires, telle que définie par la Figure II-1, de longueur dx. Ce modèle correspond aux équations des télégraphistes élaborées par Oliver Heaviside (entre les années 1880 et 1887). Ces dernières ont été généralisées pour les guides d'ondes [II.1] et pour certaines problématiques de lignes de transmission en fonction des conditions limites [II.2].

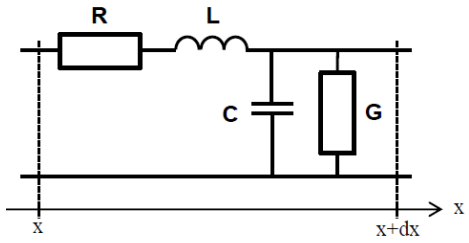


Figure II-1 : Modèle d'une ligne de transmission

Les éléments R et L correspondent respectivement à la résistance linéique (Ω/m) et à l'inductance linéique (H/m). Elles représentent les pertes résistives liées au conducteur et à

l'opposition du conducteur à une variation de courant. Les éléments C et G, quant à eux, correspondent respectivement à la capacitance linéique ($^{F}/_{m}$) et la conductance linéique ($^{S}/_{m}$). Ils représentent l'effet de couplage encre les conducteurs et les pertes liées au diélectrique.

Chaque ligne de transmission est définie par son impédance caractéristique Z_C (équation *(1)*), sa constante de propagation γ (équation *(2)*) et sa vitesse de phase $v\varphi$ (équation *(4)*).

$$Z_C = \frac{\sqrt{R + jL\omega}}{\sqrt{G + jC\omega}} \quad (1)$$

$$\gamma = \alpha + j\beta \quad (2)$$

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (3)$$

$$v_\varphi = \frac{\omega}{\beta} \quad (4)$$

L'impédance caractéristique est définie par les dimensions des lignes de transmission et du matériau utilisé comme substrat diélectrique dans le cas d'une ligne planaire par exemple. La constante de propagation peut être décomposée en deux partie : l'une réelle et l'autre imaginaire (équation *(2)*). Pour finir, α représente l'affaiblissement linéique (N_p/m) et β la constante de phase (rad/s).

II.1.1.2. Les différentes lignes de transmission

Lorsque nous parlons de lignes de transmissions dans le contexte de ce manuscrit nous évoquons généralement des lignes micro-rubans (microstrip) et des lignes coplanaires (CPW), qui transportent des ondes quasi-TEM.

Ces types de lignes sont les deux standards de propagation dans le domaine de la microélectronique imprimée de par leur géométrie compatible avec ces technologies (Figure II-2 Ⓐ et Ⓑ). Leur réalisation et leur fonctionnement sont connus depuis les années 1960 [II.3] et possèdent des performances comparables dans la bande des fréquences centimétriques [II.4]. Si l'on ajoute un plan de masse à une ligne CPW elle devient alors une ligne de transmission CPWG (Co-Planar Waveguide Grounded) (Figure II-2 Ⓒ). Cela permet de blinder le composant sans perturber la propagation du mode coplanaire si la hauteur du substrat reste importante par rapport aux gaps entre les lignes.

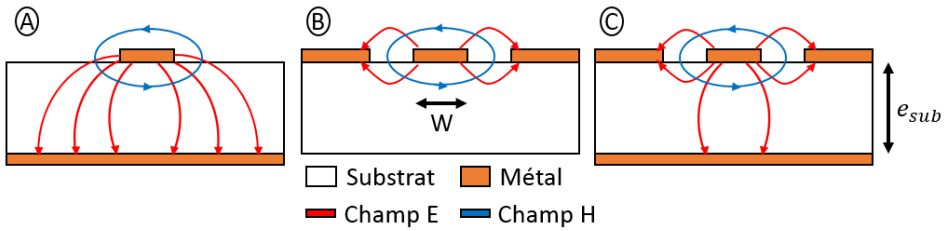


Figure II-2: Ⓐ Ligne micro-ruban ; Ⓑ Ligne CPW ; Ⓒ Ligne CPWG

Le schéma d'une ligne microstrip est donné dans la Figure II-2 Ⓐ. Cette ligne est constituée de deux conducteurs : une ligne conductrice sur la face supérieure du substrat et un plan de masse sur la face inférieure. Sa rapidité et sa simplicité de fabrication font de ce type de ligne un modèle très couramment utilisé dans toutes sortes d'applications comme, par exemple, la réalisation de transitions en [II.5] ou la réalisation d'antennes en [II.6].

Etant donné que deux milieux interviennent (le diélectrique et l'air), le mode de propagation dans une ligne micro-ruban n'est pas purement de type TEM (transverse électromagnétique). Toutefois, dans le cas où l'épaisseur du diélectrique est très inférieure à la longueur d'onde des fréquences de travail, il est possible d'obtenir approximativement un mode TEM.

Il existe également plusieurs formes de lignes micro-rubans, à savoir : les micro-rubans inversés et les micro-rubans couverts dont les différents niveaux d'atténuation linéique ont été comparés en [II.7]. Les résultats de ce travail présentent une atténuation linéique de la ligne microruban inversée 7 fois inférieur à celle de la ligne micro-ruban classique. Néanmoins ce type de ligne ne peut pas à notre connaissance être réalisée uniquement à l'aide des technologies additives tel que l'AJP ou l'InkJet.

Lorsque l'on travaille dans la bande des fréquences millimétriques, il faut veiller à limiter les épaisseurs des substrats, au détriment des pertes [II.8], pour éviter l'apparition des modes de propagation supérieurs. Le premier de ces modes, de nature TM (transverse magnétique) a une fréquence de coupure qui peut être approchée par l'équation suivante (équation *(5)*).

$$f_{TM} = \frac{c}{2\pi e_{sub}} \sqrt{\frac{2}{\varepsilon_r - 1}} tan^{-1}\varepsilon_r \qquad (5)$$

On note c la vitesse de la lumière, ε_r la permittivité relative du substrat et e_{sub} l'épaisseur du substrat. Une trop grande largeur de ligne (noté W) peut également amener des modes de résonnances transversales parasites (équation *(6)*), dont la fréquence de coupure du premier d'entre eux peut être approchée par :

$$f_{rT} \approx \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}(2w + e_{sub})} \qquad (6)$$

Afin d'éviter l'apparition de ces fréquences parasites nous recommandons simplement de travailler avec des substrats diélectriques fin (e_{sub}). Cela a pour effet de repousser les résonances aux fréquences f_{TM} vers les hautes fréquences ainsi que de diminuer la largeur W de la ligne micro-ruban pour que son impédance caractéristique Z_C soit à 50 Ω. La diminution de W va également repousser vers les hautes fréquences les résonances aux fréquences f_{rT}. Une limitation trop forte de e_{sub} entraine cependant une diminution de W, à impédance caractéristique constante, et donc comme indiqué précédemment une augmentation des pertes métalliques.

Le problème majeur de ces lignes lorsque l'on travaille dans la bande des fréquences millimétriques est leur caractère dispersif à haute fréquence. Cet effet est mis en avant dans le travail présenté en [II.9] dans lequel l'auteur réalise des composants de filtrage à base de lignes micro-rubans. Ce caractère dispersif peut néanmoins être limité de nouveau en réduisant la largeur W de la ligne et l'épaisseur du substrat, au détriment des pertes métalliques.

Afin de mesurer efficacement nos composants dans la bande des fréquences millimétriques, il est nécessaire d'utiliser des pointes de mesure GSG (Ground Signal Ground). Nos lignes micro-ruban doivent donc avoir à leurs extrémités des transitions vers des lignes coplanaires.

Le schéma d'une ligne coplanaire est représenté Figure II-2 Ⓑ et Ⓒ. Pour la version CPW nous avons le conducteur central ainsi que les deux plans de masse sur les côtés placés sur la face supérieure du substrat. Pour la version CPWG (Figure II-2 Ⓒ), nous avons en plus un plan de masse sur la face inférieure du substrat.

Le livre [II.10] présente les différentes lignes coplanaires citées ainsi que leurs différentes caractéristiques. Ces lignes coplanaires admettent deux types de modes de propagation apparentés TEM : le mode à fente et le mode coplanaire. En pratique, c'est ce dernier qui est le plus couramment utilisé le premier étant trop dispersif.

De la même manière que pour les lignes micro-rubans, des modes parasites transverses peuvent venir nuire à la propagation de l'onde [II.11] en faisant résonner les différents plans de masses dans le cas d'une ligne CPW ainsi que le plan de masse sur la face arrière du substrat dans le cas des lignes CPWG (ce mode de transmission est également appelé mode micro-ruban). L'étude des différents modes possibles pouvant être présents dans une ligne coplanaires a été réalisée en [II.12].

Afin de limiter les effets parasites, notamment la dispersion liée à la propagation sur plusieurs modes nous pouvons utiliser plusieurs règles de design lorsque l'on fabrique une ligne CPW ou CPWG. Pour limiter l'apparition du mode à fente, les plans de masses sur le même plan que la ligne de transmission doit être symétrique et au même potentiel. Pour limiter le mode micro-ruban nous pouvons appliquer différentes conditions géométriques :

- La valeur cumulée de la largeur de la ligne et des gaps de la ligne coplanaire doit être au moins inférieur à 5 fois l'épaisseur du substrat,
- La largeur des masses sur le même plan que la ligne de transmission doit être au moins 10 fois supérieur à la valeur cumulée de la largeur de la ligne et des gaps de la ligne coplanaire.

Dans le cas où ces différentes règles ne peuvent pas être appliquées il est nécessaire de relier tous les plans métalliques de la CPWG par des vias métalliques traversant. Le problème de cette technique est qu'elle ne peut pas être applicable à tous les types de substrat diélectrique en fonction de leur dureté et de leur épaisseur.

II.1.2. Les résonateurs planaires

Ces composants sont généralement réalisés sur des substrats diélectriques ayant un plan de masse sur la face inférieure et présentent l'avantage d'être facilement intégrables. Ils présentent également un faible encombrement et une facilité de réalisation.

Néanmoins leur principal inconvénient est leur très faible facteur de qualité [II.13] comparé aux résonateurs volumiques [II.14]. Il existe un grand nombre de types de résonateurs planaires. Nous en avons listé certains ci-dessous :

- Résonateur demi-ondes [II.15],
- Résonateur quart d'ondes [II.16],
- Résonateur à lignes couplées [II.17],
- Résonateurs à lignes repliées, appelé « hairpin, » [II.18],
- Résonateur en anneau [II.19].

Nous pouvons également parler des résonateurs et filtres SIW (Substrate Integrated Waveguide) qui offrent un bon compromis entre les technologies planaires et volumiques. En effet cette approche consiste à maximiser leur facteur de qualité, comparé à ceux obtenus avec les technologies planaires, tout en limitant l'encombrement. Des filtres [II.20] mais également des composants comme des guides d'ondes [II.21] ou des antennes [II.22] peuvent être réalisés avec cette technologie. Nous nous attarderons un peu plus sur cette technologie dans le chapitre IV de ce travail de thèse.

Dans ce chapitre, les composants qui vont nous intéresser plus particulièrement sont les résonateurs en anneau. Ils sont souvent utilisés dans le but de caractériser des substrats diélectriques [II.23]. Ils nous intéresseront tout particulièrement pour la caractérisation d'encre diélectrique déposée par AJP. Leur réalisation est simple et l'extraction de permittivité est précise étant donné que ce type de résonateur permet d'obtenir des facteurs de qualité relativement élevés pour une structure planaire ainsi que de faibles pertes par rayonnement.

Le résonateur en anneau est considéré comme étant une ligne micro-ruban en boucle fermée. La structure globale est donc constituée d'un anneau sur la face supérieure du substrat diélectrique, d'un plan de masse sur la face opposée et des lignes de transmissions permettant de faiblement coupler l'anneau (Figure II-3 ⓑ et ⓒ). En couplant de cette manière, et d'après l'équation *(7)*, on maximise $Q_{excitation}$ afin d'obtenir directement $Q_0 = Q_L$.

$$\frac{1}{Q_0} = \frac{1}{Q_L} + \frac{1}{Q_{excitation}} \qquad (7)$$

Q_0 représente le facteur de qualité à vide du résonateur, Q_L son facteur de qualité en charge et $Q_{excitation}$ le facteur de qualité extérieur lié au couplage du résonateur.

Les pertes par rayonnement étant très faibles dans ce cas, les pertes de ce type de composants sont réparties comme suit : les pertes métalliques R_M liées au conducteur, les pertes diélectriques R_D liées au substrat utilisé et les pertes de réflexion R_R du circuit liées à l'adaptation de celui-ci lors des mesures.

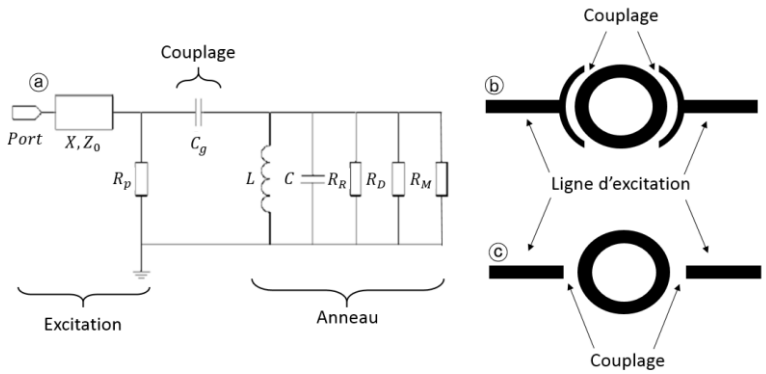


Figure II-3: Anneau résonant : ⓐ modèle équivalent d'un anneau résonant ; ⓑ modèle d'excitation de l'anneau pour des substrats à pertes ; ⓒ modèle d'excitation de l'anneau pour des substrats à très faible pertes [I.24]

Un anneau résonnant peut également être défini selon un modèle d'éléments localisés donnés dans Figure II-3 ⓐ. Ce circuit équivalent est semblable à un circuit équivalent d'un résonateur RLC autour d'un mode résonant. Les trois résistances R_M, R_D et R_R donnent les trois types de pertes de la structure précédemment cités et les valeurs des capacité et inductance, C et L respectivement, fixent la fréquence de résonance suivant l'équation *(8)*.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \qquad (8)$$

La capacité C_g correspond au couplage entre les lignes micro-rubans et le résonateur en anneau. L'impédance Z_0 correspond à l'impédance caractéristique des lignes micro-rubans et X leur longueur électrique. Enfin la résistance R_p correspond à des pertes ajoutées correspondant aux radiations du couplage entre les lignes micro-rubans et le résonateur en anneau.

Plusieurs méthodes d'excitation, principalement par lignes micro-ruban, ont été investiguées dans [II.24]. Les couplages par ligne coplanaire étant moins efficaces car faisant intervenir plusieurs modes de transmission, nous avons décidé d'utiliser principalement le couplage par ligne micro-ruban comme présenté dans la Figure II-3 ⓑ et ⓒ. Le couplage en ⓑ permet d'obtenir un couplage plus fort et plus contrôlé et est bien adapté pour les substrats à fortes pertes tel que le polyimide tandis que celui en ⓒ est suffisant pour les substrats à faible pertes comme l'alumine.

II.2. Méthode de caractérisation des matériaux

Plusieurs caractéristiques électriques des matériaux que l'on souhaite utiliser sont nécessaires afin de pouvoir simuler et fabriquer avec précision des composants hyperfréquences. La permittivité du matériau diélectrique nous permet d'optimiser les dimensions de nos composants et donc leur impédance caractéristique Z_C afin de limiter les pertes liées à une éventuelle désadaptation lors de la mesure. La conductivité du métal et la tangente de pertes du diélectrique nous permettent d'évaluer le niveau de pertes du composant réalisé.

Il existe un grand nombre de méthodes et techniques capables d'extraire ces caractéristiques. Nous avons choisi de présenter deux des plus adaptées à nos matériaux et

à notre bande de fréquences : la caractérisation de matériau par cavité résonante et par anneau résonant. Chacune des méthodes peut être adaptée pour caractériser un matériau métallique ou diélectrique.

Nous allons présenter dans cette partie ces différentes méthodes. Nous rentrerons plus dans le détail des calculs pour la méthode de caractérisation par anneau résonant étant donné qu'elle a été développée dans le laboratoire Xlim durant ce travail de thèse.

II.2.1. Méthode de caractérisation par cavité

La méthode de caractérisation par cavité englobe deux méthodes de caractérisation distinctes : la caractérisation diélectrique d'un substrat et la caractérisation de la conductivité d'un métal. Cette méthode n'ayant pas été développée pendant ce travail de thèse nous n'allons énoncer que le principe de fonctionnement propre aux deux méthodes.

II.2.1.1. Caractérisation diélectrique par cavité résonante fendue

Également appelée Split Cylinder Resonator (SCR), cette méthode a été optimisée pour la caractérisation de matériaux diélectriques à faibles pertes. Elle permet de remonter aux valeurs de la permittivité et de la tangente de pertes à des fréquences fixes liées aux dimensions de la cavité. Cette méthode analytique non destructrice nécessite l'utilisation d'échantillons diélectriques avec une planéité et un parallélisme très précis afin d'obtenir une mesure optimale.

Son fonctionnement est basé sur l'utilisation d'une cavité cylindrique métallique vide, séparée en deux sections de guide d'ondes en court-circuit (Figure II-4 ⓐ). Elle est excitée par un guide d'ondes au niveau de ces court-circuits. Ces guides d'ondes ne sont pas alignés dans le même axe afin d'empêcher un couplage direct parasite.

Les accès sont étudiés pour être sous-couplés afin de faciliter la mesure du facteur de qualité à vide du résonateur. L'échantillon diélectrique homogène et isotrope à caractériser est placé dans une fente entre ces deux sections de manière à couvrir toute la section de la cavité. Cela forme ainsi une cavité excitée sur les modes $TE_{01(2n+1)}$ avec n représentant le numéro du mode choisi. Les trois modes TE_{011}, TE_{013} ou TE_{015} dont le champ électrique ne possède qu'une composante azimutale et parallèle au plan de l'échantillon sont privilégiés ici car ce champ est pratiquement nul au niveau de la fente de la cavité et de ses parois.

De ce fait le champ magnétique peut être négligé au niveau de la fente pour des échantillons dont l'épaisseur est inférieure au millimètre. Dans le cas contraire il est nécessaire de tenir compte du champ électromagnétique qui s'étend dans l'échantillon par la fente à l'aide d'un modèle numérique approprié.

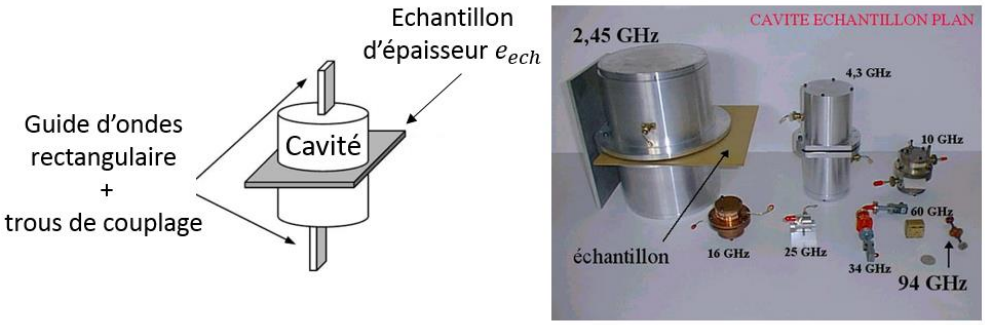


Figure II-4: ⓐ Schéma de la cavité de caractérisation diélectrique [II.25] ; ⓑ Liste des cavités de caractérisation diélectrique disponibles à Xlim

A partir d'une mesure en paramètres S de la cavité, les différentes fréquences de résonnance des modes $TE_{01(2n+1)}$ ainsi que leur facteur de qualité respectif sont aisément établis. Un processus itératif est ensuite utilisé afin de pouvoir remonter à la permittivité et aux tangentes de pertes du matériau [II.26]. Une première mesure est réalisée à vide sur chaque mode afin de pouvoir remonter aux dimensions réelles de la cavité. Les facteurs de qualité mesurés permettent de même d'appréhender les pertes métalliques de la cavité. La même chose est réalisée ensuite avec le matériau diélectrique dans la fente et permet de remonter aux données recherchées.

Le calcul d'incertitude prend en compte tous les paramètres expérimentaux mis en jeu, néanmoins l'incertitude sur l'épaisseur de l'échantillon définit en majeure partie l'incertitude de l'extraction de la permittivité et de la tangente de pertes.

La largeur et l'épaisseur de l'échantillon viennent impacter la taille de la cavité à utiliser et donc les fréquences de caractérisation possibles (Figure II-4 ⓑ).

II.2.1.2. Caractérisation de conductivité par cavité

Cette méthode utilise une cavité résonante en métal afin de remonter aux caractéristiques de conductivité de l'échantillon d'un matériau conducteur.

Cette méthode analytique non destructive nécessite l'utilisation d'un échantillon métallique dont la planéité et le parallélisme sont très précis afin d'optimiser l'extraction des valeurs. La taille de celui-ci va définir quelle cavité utiliser et donc les fréquences possibles, cependant il n'y a pas de limitation au niveau de son épaisseur.

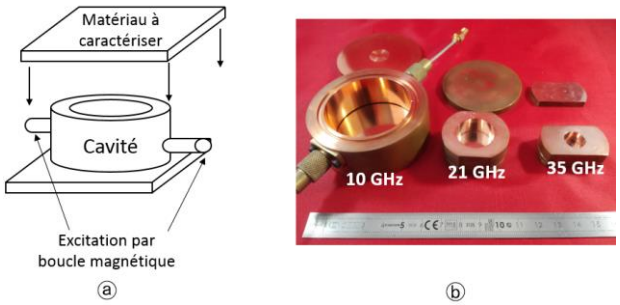


Figure II-5: ⓐ Schéma de la cavité de caractérisation métallique ; ⓑ Liste des cavités de caractérisation métallique disponibles à Xlim

Son fonctionnement est basé sur l'utilisation d'une cavité cylindrique en cuivre vide dont le capot supérieur peut être changé (Figure II-5 ⓐ et ⓑ). Les modes $TE_{01(2n+1)}$ sont sous

couplés par des guides d'ondes ou des boucles magnétiques, non alignés dans le même axe afin d'empêcher un couplage direct parasite. Le cuivre ayant une très forte conductivité il permet d'utiliser des facteurs de qualité très élevés propices à l'extraction de fortes conductivités pour les échantillons à tester.

Cependant le principal problème de ce genre de résonateur cylindrique est que le mode dégénéré TM_{013} résonne à une fréquence très proche de celle du mode TE_{011} impliquant de ce fait un échange d'énergie entre eux et donc un facteur de qualité en baisse. Il est donc nécessaire de les découpler en décalant la fréquence de ce mode dégénéré. En observant la répartition des champs électromagnétiques au niveau de la paroi inférieure de la cavité nous remarquons que contrairement au mode TE_{011}, dont le champ électrique est nul sur la paroi, tangentiel à proximité, celui du mode TM_{013} est normal et maximum. Ainsi en plaçant au bord de cette paroi un piège quart d'onde dont les dimensions correspondent à la fréquence du mode dégénéré, il est possible de fortement diminuer le couplage entre ces modes.

Le principe de l'extraction de conductivité d'un dépôt conducteur repose sur un processus itératif. Une première mesure en paramètre S de la cavité entièrement en cuivre des modes $TE_{01(2n+1)}$ permet de calculer le facteur de qualité de chaque fréquence. Cette première étape nous permet de remonter aux valeurs de la conductivité du cuivre. Une seconde mesure est réalisée en remplaçant le capot par le matériau conducteur à caractériser et permet de remonter à la valeur de sa conductivité effective par comparaison.

De ce fait, plus le métal à caractériser à une conductivité proche de celle du cuivre et donc plus le facteur de qualité Q_0 est élevé et plus l'incertitude de mesure est forte. A l'inverse, un matériau avec une conductivité plus faible que celle du cuivre donnera une extraction avec une faible incertitude.

Le calcul d'incertitude prend en compte tous les paramètres mis en jeu dans les calculs, néanmoins l'incertitude sur le facteur de qualité définit en majeure partie l'incertitude de l'extraction. Les différentes équations utilisées sont présentées dans le travail cité en [II.27].

II.2.2. Méthode de caractérisation par anneau résonnant

Le plus souvent utilisée pour caractériser des diélectriques, nous avons également utilisé cette méthode afin de pouvoir caractériser des dépôts métalliques imprimés par AJP. L'extraction des différentes données des matériaux est obtenue de manière analytique à l'aide d'équations tirées des travaux en [II.30] et [II.29] [II.30] et [II.31]. Les paramètres initiaux nécessaires pour cette méthode présentée dans la Figure II-6 sont :

- Les rayons intérieur et extérieur de l'anneau r_{Int} et r_{Ext},
- L'épaisseur du substrat e_{sub},
- L'épaisseur de métallisation du résonateur e_{metal},
- La rugosité de surface de l'anneau Δ_S (optionnelle dans le code réalisé).

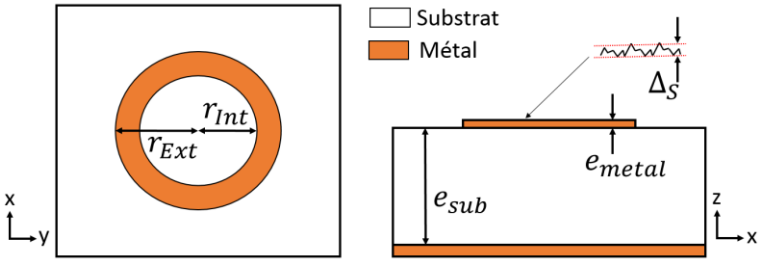


Figure II-6: Schéma de présentation des différents paramètres géométrique d'un anneau résonant

Les dimensions géométriques de l'anneau r_{Int} et r_{Ext} peuvent être mesurées à l'aide d'un microscope numérique. En fonction de la taille de l'anneau et de l'objectif du microscope, il est possible de mesurer les rayons. L'épaisseur e_{sub} peut être obtenue à l'aide d'un palpeur. Enfin l'épaisseur de métallisation e_{metal} et sa rugosité de surface Δ_S peuvent être obtenu à l'aide d'un profilomètre. Ces différentes étapes permettent d'alimenter en données les différentes équations qui permettront par la suite d'extraire les propriétés électriques des matières utilisées lors de la fabrication de l'anneau.

Les différentes équations utilisées dans l'extraction de la permittivité et de la tangente de pertes du diélectrique ainsi que pour la conductivité effective du dépôt métallique de l'anneau sont données en Annexe 2.

II.2.3. Conclusion et discussions sur les méthodes de caractérisation

Le point fort des méthodes de caractérisation par cavité est de proposer des facteurs de qualité très supérieurs à ceux des résonateurs planaires. Cette caractéristique leur permet de proposer une grande précision dans les différentes extractions. Cela les rend donc intéressants lorsque l'on considère des diélectriques avec très peu de pertes ou des matériaux très conducteurs. Cependant cette méthode se retrouve limitée lorsque l'on veut caractériser des matériaux déposés par une technologie additive. Plus particulièrement, dans notre cas, avec la technologie AJP, nous nous retrouvons confrontés à plusieurs problématiques :

- La technologie AJP n'est pas adaptée pour imprimer des surfaces supérieures à 15mm x 15mm,
- Nous ne sommes pas dans les mêmes conditions d'impression que pour nos autres structures fonctionnelles. En effet la stratégie d'impression mises en œuvre pour de grandes surfaces est différente de celle appliquée pour des lignes fines et précises,
- Nous sommes obligés d'imprimer nos matériaux sur un substrat support,
- En fonction du matériau il est parfois compliqué d'obtenir une bonne planéité du dépôt.

Ces différentes raisons nous ont donc poussé à trouver une autre méthode de caractérisation utilisant les anneaux résonants planaires. Leur faible facteur de qualité rend les différentes extractions moins sensibles. Cependant ils sont parfaitement adaptés pour des matériaux imprimés et permettent de caractériser nos matériaux dans les mêmes conditions de réalisation que nos autres structures. Le nombre de résonances visées de ces anneaux peut être facilement adapté en fonction de leur dimension pour extraire les caractéristiques des matières sur une bande de fréquences ciblée.

II.3. Impression d'encre à nanoparticules par la technologie AJP

Le principal but de ce travail de thèse est d'initier en particulier l'exploitation de la technologie AJP. La technologie utilisée au CTTC, qui a réalisé les différents dispositifs présents dans ce manuscrit, est un Aérosol Jet® 200 SERIES SYSTEMS [II.32] (Figure II-7).

Il est constitué d'une atomisation ultrasonique (viscosité des encres < 10 cP) fabriqué par Optomec. Ses caractéristiques principales sont exprimées ci-dessous :

- Une seule tête d'impression,
- Hauteur d'impression fixe (jusqu'à 5 mm),
- Plateau d'impression chauffant aspirant (60°C maximum) qui se déplace selon les axes X et Y (20 mm x 200 mm),

- Une caméra de positionnement en noir et blanc et une caméra de vision lors des impressions.

Figure II-7: Aérosol Jet® 200 SERIES SYSTEMS

Dans les différentes impressions que nous avons réalisées nous avons choisi d'utiliser la buse de diamètre 100 µm car elle fournit un bon compromis entre temps d'impression et largeur de pistes (résolution) en adéquation avec notre problématique d'impression de composants en bande de fréquences millimétriques.

Les structures élémentaires que nous avons imprimées ont pour objectif de déterminer les résolutions et précisions qu'il est possible d'atteindre ainsi que les caractéristiques électriques des encres métalliques et diélectriques. Les motifs retenus pour l'utilisation des encres à nanoparticules métalliques sont les suivants :

- Des motifs tests géométriques de largeurs et de gaps (espacement interlignes) imprimés en 1 et 2 couches,
- Des carrés imprimés pour la caractérisation en cavité de la conductivité effective du dépôt,
- Des anneaux résonants pour la caractérisation de la conductivité effective du dépôt en 1 et 2 couches,
- Des lignes coplanaires en 1 et 2 couches, sur la bande de fréquence [10 MHz ; 67 GHz],

L'intérêt de pouvoir déposer plusieurs couches d'encre à base de nanoparticules métalliques est de pouvoir monter en épaisseur afin d'être moins sensible aux pertes liées à la profondeur de peau du métal déposé (équation *(A. 36)*). En réalisant nos différentes impressions en 1 et 2 couches, nous cherchons à relever des différences au niveau de la précision d'impression ainsi qu'au niveau des performances des lignes de transmission imprimées.

Pour l'encre polyimide nous allons plus particulièrement nous intéresser à :

- Des tests élémentaires afin de quantifier la dispersion de dimensions pour l'impression de motifs de gabarits différents,
- Différents tests de montée en épaisseur et de contrôle sur des pentes imprimées,
- Des anneaux résonants pour la caractérisation de la permittivité et de la tangente de pertes du dépôt en 1 couche.

Dans cette partie du chapitre nous allons commencer par présenter les tests réalisés avec l'encre à nanoparticules métalliques. Cette étude va mettre en avant les valeurs moyennes de résolution, d'épaisseur de dépôt, de rugosité et de conductivité effective des encres argent et or une fois frittées. Ces différentes informations vont nous permettre de réaliser des lignes de transmission coplanaires aux performances optimisées afin de pouvoir nous comparer à l'état de l'art.

Nous terminerons cette étude par la présentation des différents résultats obtenus lors de la mise en œuvre de l'encre polyimide. Nous comptons mettre en valeur la capacité de l'AJP à déposer des encres diélectriques avec une épaisseur suffisante pour nous permettre d'imprimer entièrement des composants hyperfréquences multimatériaux. Ces différentes informations vont nous permettre de réaliser des anneaux résonants entièrement imprimés afin de pouvoir extraire les permittivités et tangentes de pertes du polyimide imprimé.

II.3.1. Etude sur la résolution minimum des encres à nanoparticules métalliques

II.3.1.1. Mise en œuvre d'une impression par AJP

Le principe d'une impression par AJP est basé sur le dépôt successif de lignes contiguës afin de créer le motif désiré. Les différents paramètres d'impression mis en jeu sont la pression des gaz de gaine et d'aérosol ainsi que la vitesse d'impression. Les travaux en [II.33] et [II.34] présentent des études sur l'optimisation de ces différents paramètres.

D'un point de vue CAO, la taille du motif va déterminer la largeur du trait à déposer ainsi que le nombre de passages nécessaires pour l'imprimer. Afin de simplifier cette étape de la fabrication, les dimensions doivent être un multiple de la largeur du trait déposé.

De plus chaque ligne déposée recouvre en partie la précédente. Ce paramètre permet une certaine souplesse dans les dimensions imprimables pour une largeur de trait déposé fixe ainsi que l'homogénéité de surface atteignable. Plus particulièrement un recouvrement trop faible va amener des creux entre chaque passage alors qu'un recouvrement trop fort va amener des quantités de matière trop importantes à l'endroit du chevauchement (Figure II-8).

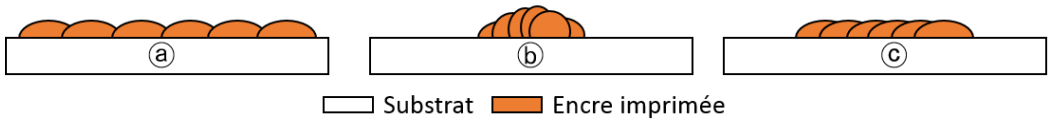


Figure II-8: Vue en coupe de différents cas de recouvrement lors d'une impression AJP : ⓐ recouvrement trop faible (<25%) ; ⓑ recouvrement trop fort (>75%) ; ⓒ bon recouvrement (50%)

Plusieurs tests réalisés par le CTTC nous ont amené à choisir un recouvrement de trait de 50 % pour l'encre à nanoparticules d'argent. Ce niveau de recouvrement nous permet d'éviter l'apparition des creux (Figure II-8 ⓐ) entre chaque ligne ainsi que trop de surépaisseur au niveau des chevauchements (Figure II-8 ⓑ). Nous avons également appliqué ce réglage par défaut dans un premier temps pour les autres encres utilisées.

La mise en œuvre de nos impressions par AJP est composée de trois étapes :

- Réglage et calibrage des différents paramètres d'impression,
- Impression complète des composants,
- Séchage et frittage au four afin de faire évaporer les solvants et d'obtenir les composants finaux.

L'impression complète des composants ne pose aucun problème pour des applications monocouches. Néanmoins pour des applications multicouches, la buse passe plusieurs fois sur les zones déjà métallisées. Le gaz sous pression expulsé par la buse va donc venir

légèrement aplatir les premières couches imprimées non frittées. De plus l'encre des couches supérieures aura tendance à couler sur les parois des couches inférieures.

Il nous est impossible avec l'équipement actuel de passer de la machine AJP au four entre chaque couche. Nous perdrions trop en précision de fabrication lors du réalignement pour l'impression d'une couche supplémentaire et les temps de réalisation seraient beaucoup plus importants. Dans les parties suivantes nous allons réaliser une multitude de tests afin de pouvoir quantifier l'impact sur la résolution lorsque l'on imprime plusieurs couches.

II.3.1.2. Résolution d'une impression

En ce qui concerne la résolution d'impression que nous pouvons envisager avec cette technologie, deux cas de figure se présentent :

- Le premier concerne la taille minimum que l'on peut obtenir en imprimant une ligne,
- Le second concerne l'écartement minimum (gap) que l'on peut obtenir entre deux lignes.

Ces deux cas ne dépendent pas des mêmes paramètres lors de l'impression. En effet, le premier cas est directement impacté par l'encre utilisée et les paramètres d'impression alors que le second dépend principalement de la précision des moteurs du plateau d'impression sur les axes X et Y. De plus, la présence d'éclaboussures autour des traits déposés peut venir impacter ces deux paramètres géométriques.

Pour pouvoir quantifier ces différentes résolutions pour les encres à nanoparticules argent et or, nous avons réalisé des tests géométriques basiques dont les modèles sont visibles sur la Figure II-9 avec des motifs de plus en plus fin (Figure II-9).

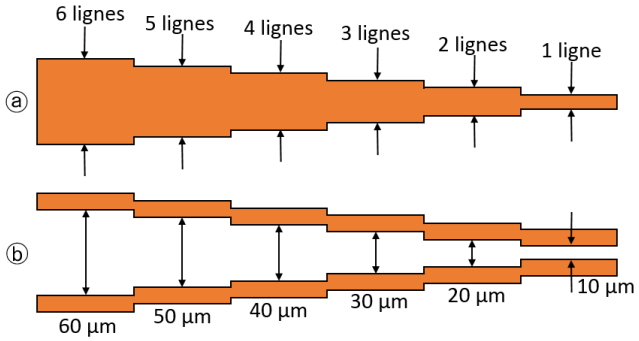


Figure II-9: Tests géométriques d'impression : ⓐ Test de largeur ; ⓑ Test d'espacement entre lignes

Le modèle Ⓐ permet de relever la largeur du motif lorsque la buse dépose de 1 à 6 traits côte à côte et le modèle Ⓑ permet de quantifier la précision lorsque l'on vise un espacement entre deux lignes bien précises. Ses valeurs théoriques vont de 60 à 10 µm par pas de 10 µm. Les différentes impressions ont été effectuées avec un recouvrement de 50 %.

Deux encres à base de nanoparticules métalliques ont été choisies avec le CTTC pour ces tests : une encre à base d'or et une encre à base d'argent. Ces tests ont été réalisés sur des substrat d'alumine de 0.15 µm de rugosité de surface. Les différents résultats obtenus sont donnés dans les Figure II-10 et Figure II-11.

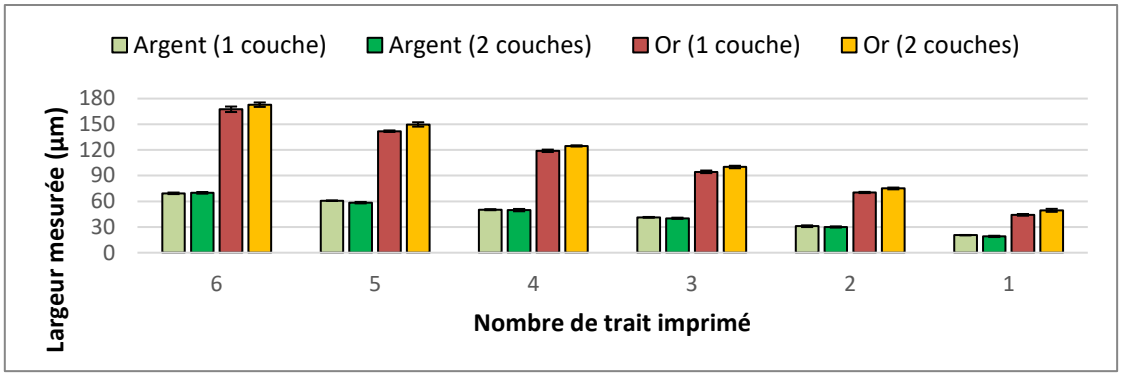


Figure II-10: Largeur des motifs imprimés constitués de 1 à 6 traits recouverts à 50%

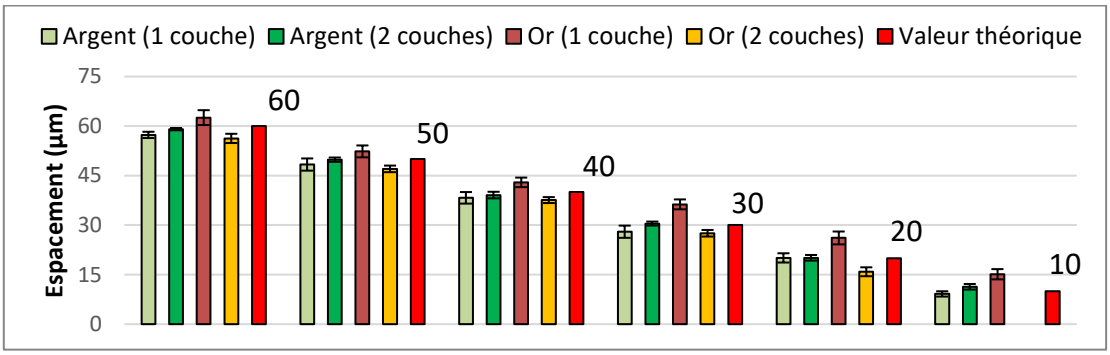


Figure II-11: Espacement interlignes mesurés pour des espacements théoriques de 60 à 10 µm

Toutes les mesures de dimensions ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence et sont données en Annexe 3.

Dans la Figure II-10, nous avons relevé les différentes dimensions des largeurs de 1 à 6 lignes déposées avec les encres à base d'argent et d'or sur les substrats d'alumine.

Nous pouvons en conclure que d'un point de vue purement géométrique les impressions en 1 et 2 couches sont très similaires. La résolution minimum que l'on peut avoir est de l'ordre de 20 µm. De plus, comme expliqué dans la Figure II-8 nous retrouvons bien notre recouvrement de 50 % à chaque passage de buse. Un exemple de ce test imprimé en argent est visible dans la Figure II-12.

Lorsque l'on imprime de l'encre à base d'or, la première chose que l'on remarque est que nous avons beaucoup moins de résolution comparée à l'encre à base d'argent. Entre 1 et 2 couches déposées, nous remarquons un décalage systématique d'au moins 5 µm. La résolution minimum obtenue avec l'encre à base d'or est comprise entre 44 et 49 µm. Le paramètre de recouvrement de 50 % est respecté et est précis à +/- 2 µm pour 1 couche déposée et +/- 1.3 µm pour 2 couches déposées. Sur la Figure II-13, nous avons un exemple de ces objets tests imprimés en or. Nous pouvons voir clairement sur ces motifs chaque passage de la buse. Cet aspect visuel traduit surement de fortes quantités de matière localisées sous le passage de la buse. Les mesures d'épaisseur et de profils que nous allons réaliser dans la partie II.3.1.3 nous donneront plus de précision afin de confirmer cette hypothèse

Dans la Figure II-11 nous avons relevé les différentes dimensions d'espacement entre deux lignes imprimées pour des dimensions théoriques allant de 60 à 10 µm par pas de 10 µm.

Les valeurs mesurées des espacements entre deux lignes imprimées en encre à base d'argent sont très proches des valeurs théoriques. Les quelques micromètres de différence

relevés correspondent à la précision de déplacement de la plateforme de la machine. Dans le meilleur cas de figure, nous sommes capables d'obtenir un espacement minimum de l'ordre de 10 µm. De plus, l'écart entre 1 et 2 couches déposées est faible et correspond à l'incertitude relevée lors de l'impression d'une ligne. Un exemple de ce tests imprimé en argent est visible dans la Figure II-12.

Les valeurs mesurées des espacements entre deux lignes imprimées en encre à base d'or sont proches les valeurs théoriques jusqu'à 40 µm. Lorsque l'on cherche à diminuer ce gap, nous perdons en précision et les décalages avec les valeurs théoriques sont supérieurs à 5 µm. L'écart entre 1 et 2 couches de 5 µm nous fait penser que l'impression de cette encre à base d'or n'est pas optimale. Plus précisément, nous aurions dû trouver le double du décalage d'une ligne imprimée dans l'espacement entre deux lignes. Or ici nous avons une impression en deux couches plus fines que l'impression en 1 couche. Les mesures d'épaisseur que nous allons réaliser dans la partie II.3.1.3 nous donnerons plus de précision. Sur la Figure II-13 nous avons un exemple de ce test imprimé en or.

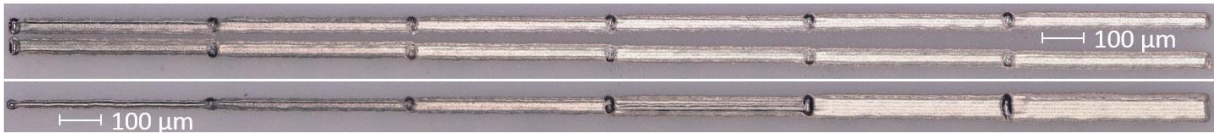


Figure II-12: Tests géométriques imprimés en argent

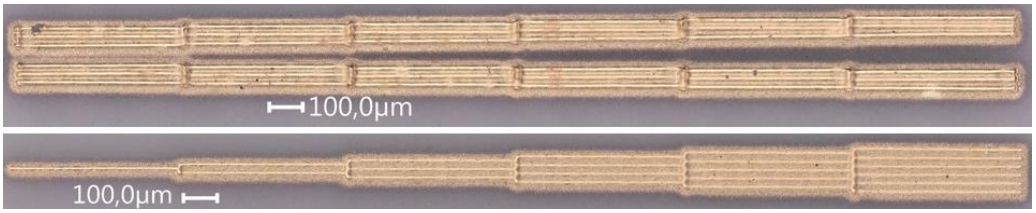


Figure II-13: Tests géométriques imprimés en or

II.3.1.3. Epaisseur des dépôts

Le respect de la profondeur de peau est un paramètre important lorsque l'on travaille avec des matériaux conducteurs dans la gamme des fréquences centimétriques et millimétriques. Elle représente la distance à laquelle l'amplitude de l'onde s'atténue (division par e) dans le matériau conducteur. Autrement dit si l'épaisseur de matériau n'est pas suffisante l'onde la traverse, ce qui implique une perte d'énergie et donc des pertes électriques supplémentaires. C'est pourquoi l'information de l'épaisseur de la couche d'encre à base de nanoparticules métallique imprimée est importante.

Nous avons utilisé un profilomètre Dektak afin de pouvoir mesurer les épaisseurs des objets réalisés avec les encres à nanoparticules d'argent et d'or. Dans les Figure II-14 et Figure II-15, nous avons mesuré et comparé tous les dispositifs que nous avons réalisés avec les encres à base de nanoparticules d'argent et d'or. L'erreur montrée est l'erreur de la mesure et non pas une erreur liée à l'impression en elle-même.

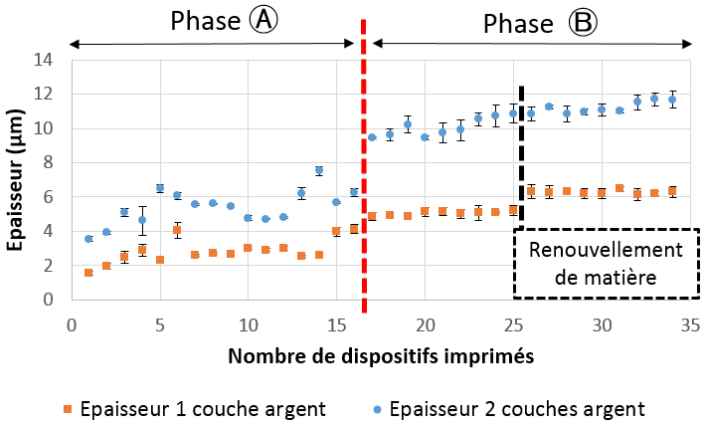


Figure II-14: Epaisseur en 1 et 2 couches d'encre à base argent des dispositifs réalisés

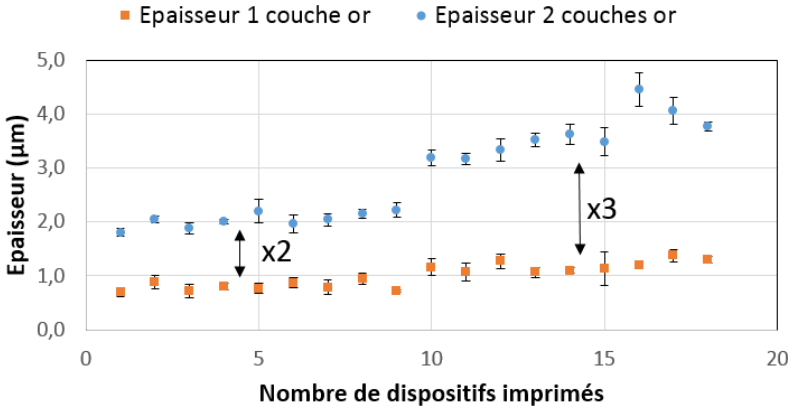


Figure II-15: Epaisseur en 1 et 2 couches d'or des dispositif réalisés

La Figure II-14 montre les épaisseurs de tous les dispositifs réalisés avec l'encre à base d'argent dans ce travail de thèse. Nous pouvons séparer toutes ces impressions en deux parties : ceux de la phase ⓐ avec une mise en œuvre initiale et ceux de la phase ⓑ pour une mise en œuvre optimisée. Cette dernière peut également être séparée en deux parties, cette séparation correspondant à un renouvellement de l'encre à base d'argent arrivant progressivement vers sa date de péremption. La constitution d'une encre n'étant jamais identique d'un lot à l'autre, cela a eu une influence sur les quantités de matière déposées pour une mise en œuvre similaire. Pour les deux phases la même encre à base d'argent a été utilisée.

Nous relevons une épaisseur moyenne pour 1 et 2 couches respectivement comprise entre [1.58 ; 4.13] µm et [3.56 ; 7.52] µm pour la phase Ⓐ. Avec la phase Ⓑ pour 1 couche déposée, l'épaisseur moyenne est comprise entre [4.88 ; 5.23] µm avant le renouvellement et [6.14 ; 6.46] µm après renouvellement de l'encre. Pour 2 couches déposées dans la phase Ⓑ elle est comprise entre [9.43 ; 10.87] µm avant le renouvellement et [10.85 ; 11.7] µm après renouvellement de l'encre. Un exemple type de profil d'une impression réalisée dans cette dernière phase est donné dans la Figure II-16.

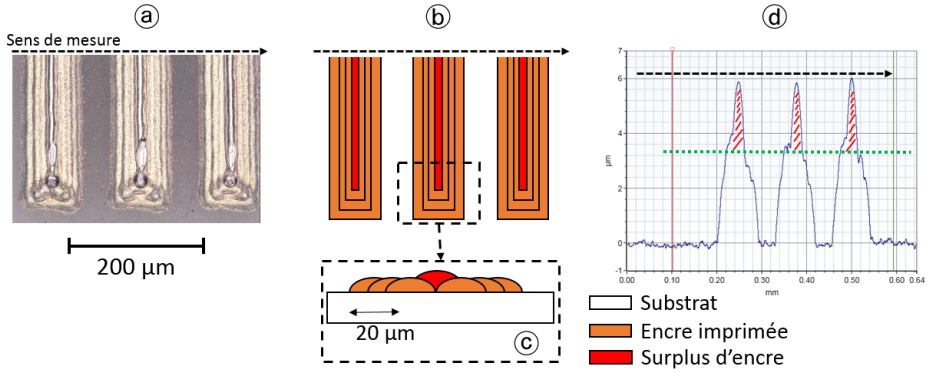


Figure II-16: Exemple d'impression par AJP avec l'encre à base d'argent dans la phase Ⓑ : ⓐ Ligne de transmission coplanaire imprimée ; ⓑ Modèle CAO de recouvrement ; ⓒ Vue en coupe du recouvrement de l'encre ; ⓓ Profil typique d'une impression dans la phase Ⓑ

Dans la Figure II-16 ⓐ, nous avons un exemple de ligne de transmission coplanaire imprimée par AJP avec l'encre à base d'argent de la phase Ⓑ. Nous pouvons légèrement remarquer les différents passages de la buse ainsi qu'une surépaisseur apparente au centre de la ligne.

Dans la Figure II-16 ⓑ nous avons le modèle CAO mettant en relief ces mêmes passages de buse. La ligne présentée fait 80 µm de largeur et est imprimée avec un trait de 20 µm en 6 passages avec un paramètre de recouvrement de 50 % (les lignes se recouvrent de 50 % lors des passages successifs).

Comme nous pouvons le constater dans la vue de coupe de la Figure II-16 ⓒ, les 6 passages de la buse laissent au centre de la ligne imprimée une zone creuse avec moins d'épaisseur (encre imprimée de couleur orange). Pour éviter cela, un 7ème passage de buse vient combler ce creux ce qui a également pour effet de causer une surépaisseur localisée.

Cette surépaisseur est observable dans la mesure du profil donnée dans la Figure II-16 ⓓ . Il est difficile de donner précisément une épaisseur d'encre à base d'argent déposée en 1 et 2 couches avec la stratégie d'impression employée. C'est donc pour cette raison que nous préférons conclure que pour 1 couche déposée l'épaisseur moyenne est au moins supérieure à 2 µm dans le cas général aux incertitudes près.

Entre 1 et 2 couches, nous relevons en moyenne un facteur 2 entre les épaisseurs. De telles conditions sont propices pour la réalisation de composants hyperfréquences. Néanmoins le renouvellement de l'encre, ou encore son vieillissement, a un impact non négligeable sur la quantité de matière déposée pour une mise en œuvre donnée. Afin d'obtenir les mêmes valeurs d'épaisseur, nous devons adapter continuellement la mise en œuvre d'impression. De plus, les impressions en forme d'obus que nous observons dans la Figure II-16 ⓓ ne sont pas propices à la mesure RF sous pointes. Nous aborderons ce dernier point plus précisément plus tard dans ce manuscrit.

La Figure II-15 montre les épaisseurs obtenues sur tous les dispositifs réalisés à partir de l'encre à base d'or. Contrairement aux impressions de l'encre à base d'argent, ici nous avons une seule phase de mise en œuvre. Pour 1 et 2 couches déposées respectivement, nous avons une épaisseur moyenne comprise entre [0.69 ; 1.37] µm et [1.8 ; 4.45] µm.

Le dépôt d'une seule couche fournit des épaisseurs moyennes relativement stables sur l'ensemble des dispositifs imprimés. Cependant pour 2 couches déposées, nous pouvons

constater un écart très important des valeurs d'épaisseurs moyennes. Cette encre à base d'or s'avère mal adaptée pour les impressions multicouches.

Les raisons de ces écarts d'épaisseur peuvent se trouver au niveau de l'impression comme au niveau de la phase de post traitement. En effet, la mise en aérosol des particules d'or est difficile car elles sont plus lourdes que celles d'argent. Le jet d'aérosol contient ainsi très peu de quantité d'or dont la majorité se situe au milieu du passage de la buse. Etant donné que pour une impression en 2 couches le gaz éjecté par la buse vient aplatir plus ou moins la première couche d'or, nous obtenons une épaisseur finale variable sur tous nos composants. Le frittage du dépôt peut également être insuffisant, provoquant de ce fait une mauvaise évaporation des solvants présents dans le dépôt et donc des épaisseurs finales mal contrôlées. Un exemple type de profil d'une impression réalisée dans cette dernière phase est donné dans la Figure II-17.

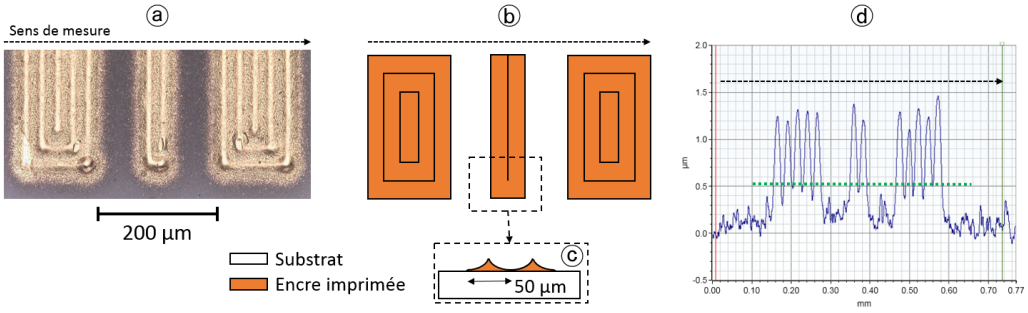


Figure II-17: Exemple d'impression par AJP avec l'encre à base d'or : ⓐ Ligne de transmission coplanaire imprimée ; ⓑ Modèle CAO de recouvrement ; ⓒ Vue en coupe du recouvrement de l'encre; ⓓ Profil typique d'une impression d'or

Dans la Figure II-17 ⓐ, nous avons un exemple de ligne de transmission coplanaire imprimée par AJP avec l'encre à base d'or. Nous pouvons facilement observer le passage de la buse sur l'impression réalisée. L'encre à base d'or étant plus dense que l'encre argent, et ses particules étant plus lourdes également, il semblerait que la majorité de la matière ait été éjectée au niveau du passage de la buse causant des surépaisseurs localisées.

Dans la Figure II-17 ⓑ nous avons le modèle CAO appliqué à l'impression de la ligne. La ligne recherchée fait 80 µm de largeur et est imprimée avec un trait de 50 µm en 2 passages avec un paramètre de recouvrement de 45 %.

La Figure II-17 ⓒ montre la vue en coupe d'une telle impression avec l'encre à base d'or et la Figure II-17 ⓓ montre le profil mesuré de la ligne imprimée. Chaque pic mesuré représente un amas de matière lié au passage de la buse d'impression de l'AJP. Dans ces conditions, il est compliqué d'obtenir l'épaisseur réelle du dépôt à base d'or. Nous préférons donc considérer que pour 1 couche déposée celle-ci est au moins supérieurs à 0.5 µm d'épaisseur dans le cas général aux incertitudes près.

II.3.2. Caractérisation des dépôts d'encres à nanoparticules métalliques

Afin de caractériser les dépôts des deux encres à base d'argent et d'or, nous avons utilisé les méthodes de caractérisation par cavité et par anneau résonant que nous avons présentées dans la partie II.2.

Pour la première méthode, des carrés de surface minimum 13 mm x 13 mm ont été imprimés afin de pouvoir caractériser les encres à 35 GHz. Pour la seconde nous avons imprimé des anneaux dont les diamètres font au plus 2 mm.

Imprimer un carré d'une telle surface est difficile par AJP. Cela demande beaucoup de temps de fabrication (supérieur à 30 min) pouvant ainsi causer des instabilités au niveau de l'impression. Plus particulièrement, durant ce type de réalisation, les pressions des gaz peuvent varier provoquant ainsi une variation dans la quantité de matière déposée. Un problème plus grave est que la buse peut également s'obstruer de particules. Cela provoque un changement de la forme du flux d'aérosol changeant ainsi les conditions de dépôts des encres. Pour limiter le temps d'impression chaque carré est imprimé avec un trait de 100 µm de diamètre.

A l'inverse l'anneau est plus adapté à l'impression par AJP et les paramètres d'impression sont les mêmes que pour nos autres composants. Il fournit néanmoins un facteur de qualité bien inférieur à celui obtenu en cavité volumique amenant de ce fait un manque de précision sur l'extraction des différents paramètres électriques des matériaux.

II.3.2.1. Présentation des structures imprimées

II.3.2.1.1. Les anneaux résonants

Nous avons choisi d'imprimer deux gabarits d'anneaux de diamètres différents, afin de pouvoir obtenir un grand nombre de points de mesure répartis entre 10 et 80 GHz. Sur la Figure II-18, nous pouvons voir un exemple de ces deux gabarits d'anneaux imprimés dont les dimensions sont représentées Figure II-19.

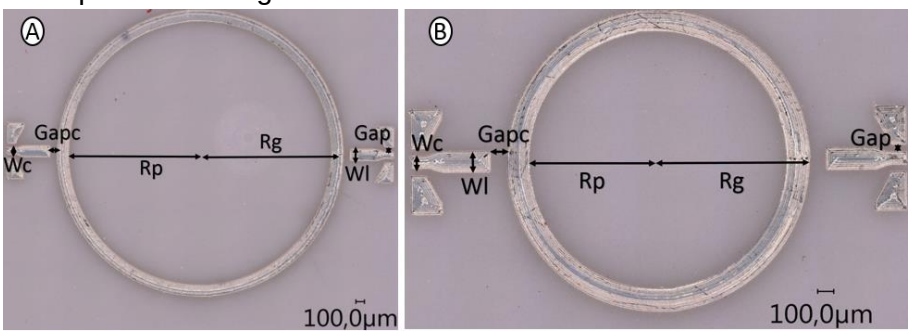


Figure II-18: Exemple d'anneaux imprimés en argent : Ⓐ Grand anneau Ⓑ Petit anneau

Chaque gabarit d'anneau a été imprimé en 1 et 2 couches avec un trait de largeur 50 µm sur un substrat d'alumine (épaisseur : 126 +/- 1 µm, ε_r=9.79 +/- 0.08, tanδ=2,93.10^{-4} et rugosité : 0.07 µm). Le processus de frittage appliqué est de 200°C pendant 1h. Les dimensions de ces anneaux ont été mesurées avec un microscope Keyence et sont données dans les Figure II-19 et Figure II-20.

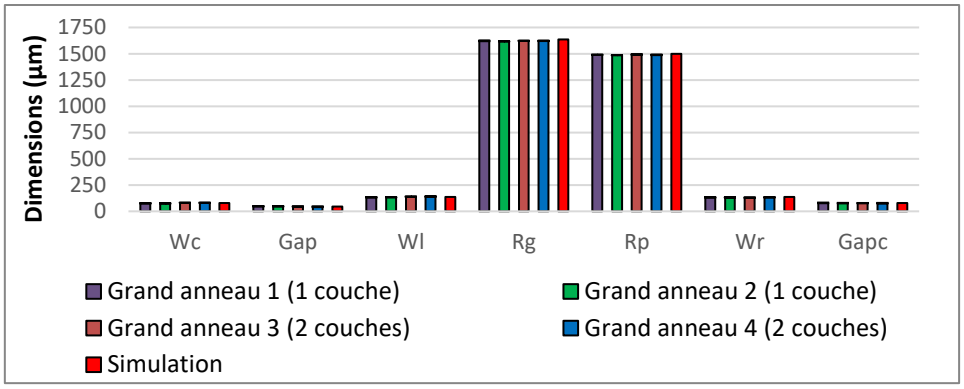


Figure II-19: Dimensions des grands anneaux imprimés en argent

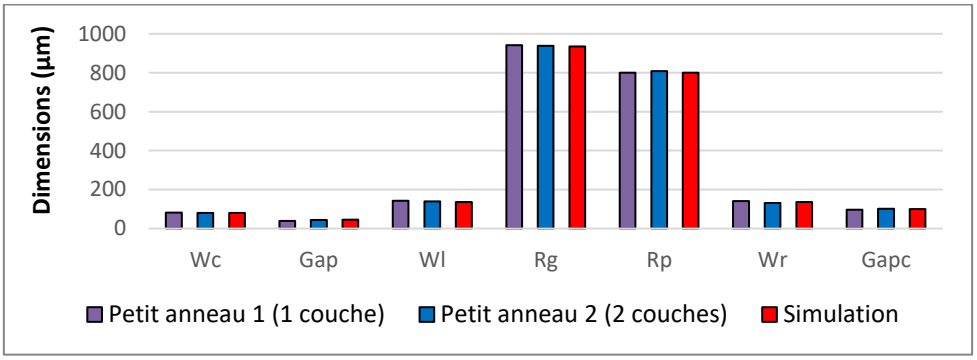


Figure II-20: Dimensions des petits anneaux imprimés en argent

Toutes les mesures de dimensions ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence et sont données en Annexe 3.

Les différentes dimensions moyennes mesurées de chaque anneau imprimé sont très proches des valeurs théoriques attendues. Pour les grands anneaux (1,2,3 et 4) nous avons respectivement une épaisseur moyenne de 2.55 +/- 0.05 µm, 2.6 +/- 0.12 µm, 6.2 +/- 034 µm et 7.52 +/- 0.27 µm.

De même pour les petits anneaux (1 et 2) nous avons respectivement une épaisseur moyenne de 3.97 +/- 0.25 µm et 6.27 +/- 0.22 µm. Ces conditions expérimentales nous permettent de réaliser nos extractions de conductivité (σ) dans de bonnes conditions.

II.3.2.1.2. Les carrés imprimés

Comme nous l'avons précisé dans la partie précédente, nous devons contrôler deux paramètres afin de pouvoir utiliser correctement la méthode de caractérisation de conductivité par cavité.

Nous devons disposer d'une bonne planéité de la couche métallique à caractériser et d'une épaisseur suffisante afin de limiter au maximum les pertes. Plus particulièrement, les champs présents dans la cavité ne peuvent détecter convenablement un échantillon non plat. Cela a pour effet de fausser énormément la valeur de conductivité effective du dépôt. Le manque d'épaisseur de dépôt va venir quant à lui impacter les pertes en fonction de la profondeur de peau et donc également fausser l'extraction de conductivité.

Nous avons imprimé plusieurs carrés en 1 et 2 couches afin de constater et de quantifier l'impact du nombre de couches déposées sur la conductivité effective du dépôt. Chacun a été

imprimé avec une largeur de trait de 100 µm afin de réduire le plus possible le temps d'impression et ainsi éviter une instabilité de l'impression dans le temps. Les paramètres et les conditions d'impressions étant différentes, nous ne pouvons pas effectuer de comparaison avec les résultats de la Figure II-14.

La Figure II-21 nous montre le relevé de profil, réalisé à l'aide d'un profilomètre Dektak, de deux carrés en 1 et 2 couches.

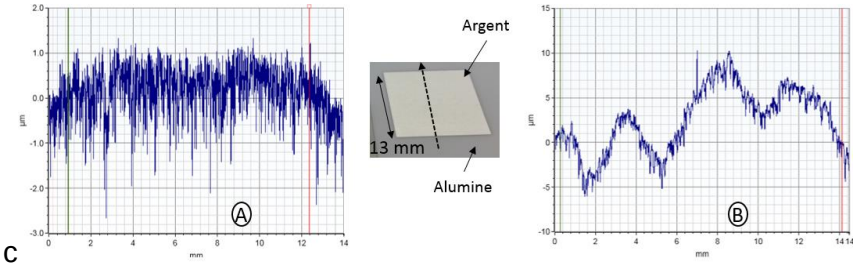


Figure II-21: Carré d'argent imprimé en Ⓐ 1 couche et Ⓑ 2 couches

Dans la Figure II-21, le carré Ⓐ dispose d'une meilleure planéité que le carré Ⓑ pour une épaisseur moyenne inférieure à 1 µm. Le carré Ⓑ ayant une épaisseur plus importante, il présente une très mauvaise planéité. Le procédé d'impression est donc trop instable pour imprimer un objet aussi grand en 2 couches. Par ailleurs, le frittage n'étant pas effectué entre chaque couche, il est possible que le traitement thermique d'une telle surface avec une telle quantité de matière ne soit pas optimal et que l'évaporation des solvants amène à une déformation de la surface. Nous avons donc choisi d'imprimer tous nos carrés d'argent en 1 couche afin de tester plusieurs méthodes de frittage.

La mise en œuvre de l'encre à base d'or étant difficile et ne déposant que très peu de matière sur une surface aussi grande (partie II.3.1.3), nous avons décidé de déposer au minimum 2 couches avec une largeur de trait de 100 µm pour l'impression de deux carrés.

La Figure II-22 nous montre le relevé de profil, réalisé à l'aide d'un profilomètre Dektak, d'un carré imprimé en 2 couches.

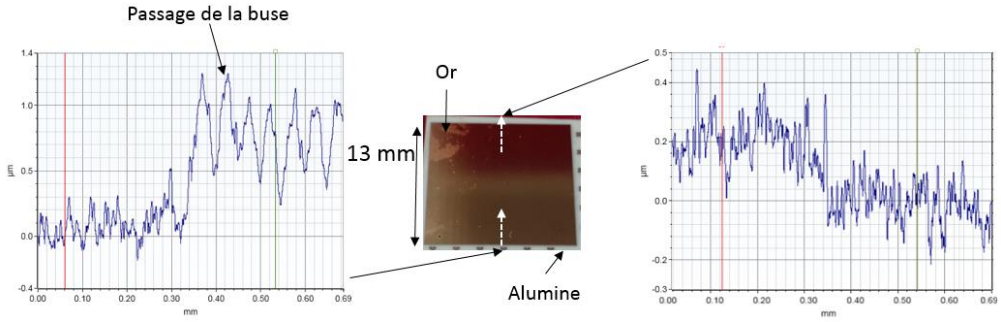


Figure II-22: Mesure de profil d'un carré en or

Nous remarquons la présence d'un gradient d'épaisseur suivant la largeur du carré imprimé de l'ordre de 0.5 µm. Plus précisément, la mesure réalisée en bas du carré nous donne une épaisseur moyenne d'environ 0.7 µm alors que pour la mesure fait en haut du carré l'épaisseur est d'environ 0.2 µm.

Il semblerait que l'AJP ne soit pas capable de déposer cette l'encre à base d'or sur une grande surface en conservant une bonne homogénéité. En prenant en compte le gradient, l'épaisseur moyenne des deux carrés imprimés est de 0.35 +/- 0.18 µm et 0.48 +/- 0.25 µm avec une rugosité de surface de 0.15 +/- 0.07 µm. Cette très faible épaisseur alliée à une forte

rugosité de surface ne nous offre pas les meilleures conditions expérimentales pour effectuer dans la partie suivante l'extraction de la conductivité (σ) du dépôt d'or.

L'épaisseur des différents carrés utilisés ainsi que leurs différentes méthodes de frittage sont résumées dans le Tableau IV.

Tableau IV: Epaisseur et méthode de frittage des carrés imprimés

Numéro du carré	Matériau	Epaisseur (µm)	Méthode de frittage
1	Argent	0,67 +/- 0,1	200 °C ; 1h
2		1,91 +/- 0,2	300°C ; 1h
3		1,89 +/- 0,24	180°C et rampe à 10°C /h
4		1,1 +/- 0,21	200°C et montée par pallier : méthode CTTC
4	Or	0,36 +/- 0,18	400 °C ; 1h
5		0,48 +/- 0,25	

La méthode de frittage optimisée par le CTTC (carré d'argent n°4) n'ayant été développée que sur la toute fin de ce travail de thèse, nous ne l'avons utilisée dans ce chapitre que sur un seul carré imprimé en argent.

II.3.2.2. Caractérisation des encres argent et or

Nous classons les différentes méthodes de frittage de la manière suivante :

- Frittage jusqu'à 180°C avec une rampe de 10°C par heure : F_{180},
- Frittage 200°C pendant 1 heure : F_{200},
- Frittage 300°C pendant 1 heure : F_{300},
- Frittage 400°C pendant 1 heure : F_{400},
- Frittage 200°C par paliers selon une méthode développée par le CTTC $F_{200P_{CTTC}}$, et inspirée de la méthode employée dans l'étude en [II.35].

La température de fusion de l'or étant plus importante que celle de l'argent, nous avons choisi une température de frittage pour la méthode F_{400} plus importante.

II.3.2.2.1. Caractérisation de l'encre argent

Les différentes extractions de conductivité effective sont visibles dans la Figure II-23 pour l'encre à base d'argent. La caractérisation par cavité a été réalisée avec les carrés imprimés. Les anneaux utilisent eux la méthode que nous avons développée dans la partie II.2.2.

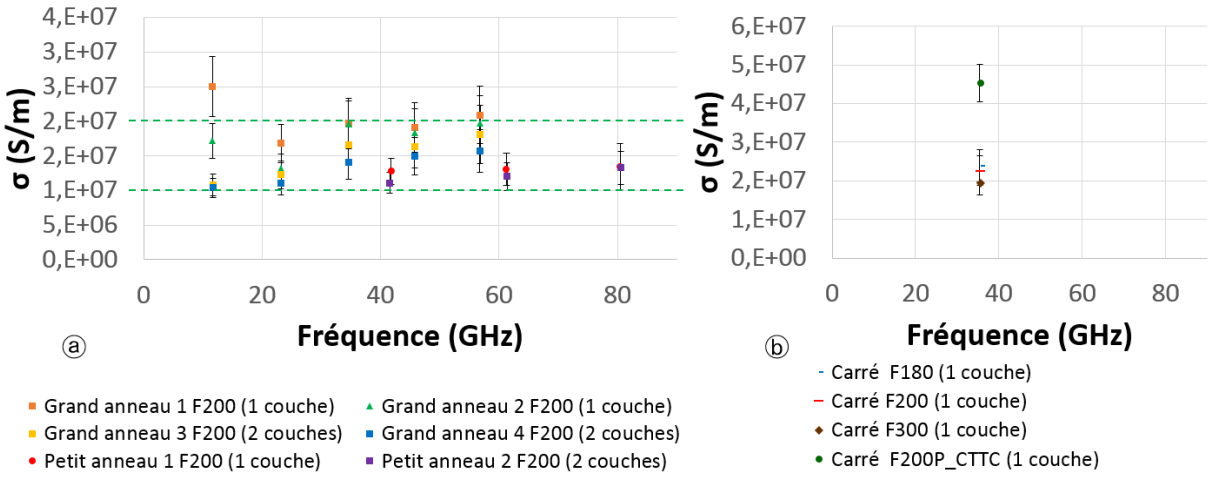


Figure II-23: Conductivité effective de l'encre à base d'argent des échantillons imprimés : ⓐ méthode des anneaux résonant ; ⓑ méthode des cavité résonantes

La Figure II-23 ⓐ présente les différentes extractions de la conductivité de l'encre à base d'argent à l'aide de la méthode de caractérisation par anneau. L'ensemble des valeurs obtenues se situe entre 10 et 20 S/µm en appliquant la méthode de frittage F_{200}. Néanmoins, les incertitudes ne se recoupant pas sur les points vers 10 GHz, nous préférons valider les résultats obtenus seulement entre 30 et 80 GHz. Nous pensons qu'en deçà de 20 GHz, l'épaisseur des grands anneaux 1 et 2 (respectivement 2.5 µm et 2.6 µm) est en particulier trop proche de la profondeur de peau estimée entre 0.8 µm et 1.125 µm à cette fréquence (pour une conductivité comprise entre 10 et 20 S/µm).

La Figure II-23 ⓑ quant à elle présente les différentes extractions de la conductivité obtenues avec la méthode par cavité résonante à 35 GHz.

Plusieurs méthodes de frittage ont été testées ici : nous relevons une conductivité de 24 +/- 0.47 S/µm pour la méthode de frittage F_{180}, 22.7 +/- 0.38 S/µm pour la F_{200}, 19.4 +/- 0.3 S/µm pour la F_{300} et enfin 45.4 +/- 0.48 S/µm pour la $F_{200P_{CTTC}}$. Cette dernière valeur nous permet d'atteindre l'état de l'art présent dans [II.35]. Des essais complémentaires seront à faire pour valider la reproductibilité de ce résultat.

Afin de pouvoir observer les microstructures des impressions réalisées en fonction des différentes méthodes de frittage employées, nous avons utilisé un MEB Quanta LEG 450 ESEM au laboratoire IRCER à Limoges.

Dans la Figure II-24 nous avons différentes vues des carrés frittés avec les méthodes de frittage F_{300}, F_{200}, F_{180} et $F_{200_{CTTC}}$. Plus la conductivité du carré est élevée et moins nous pouvons voir de porosité entre les particules. Les méthodes F_{200} et F_{180} donnent à la fois des microstructures et des conductivités proches. Les nanoparticules restent de tailles réduites mais avec une distribution homogène. La méthode F_{300} s'accompagne d'une croissance granulaire plus forte mais une importante porosité limite la conductivité effective atteinte.

Pour le dépôt à 45 S/µm (méthode $F_{200_{CTTC}}$) nous constatons que les particules ont nettement pontées entre elles produisant une croissance granulaire plus importante que dans les cas F_{200} et F_{180} pour une conductivité finale bien meilleure.

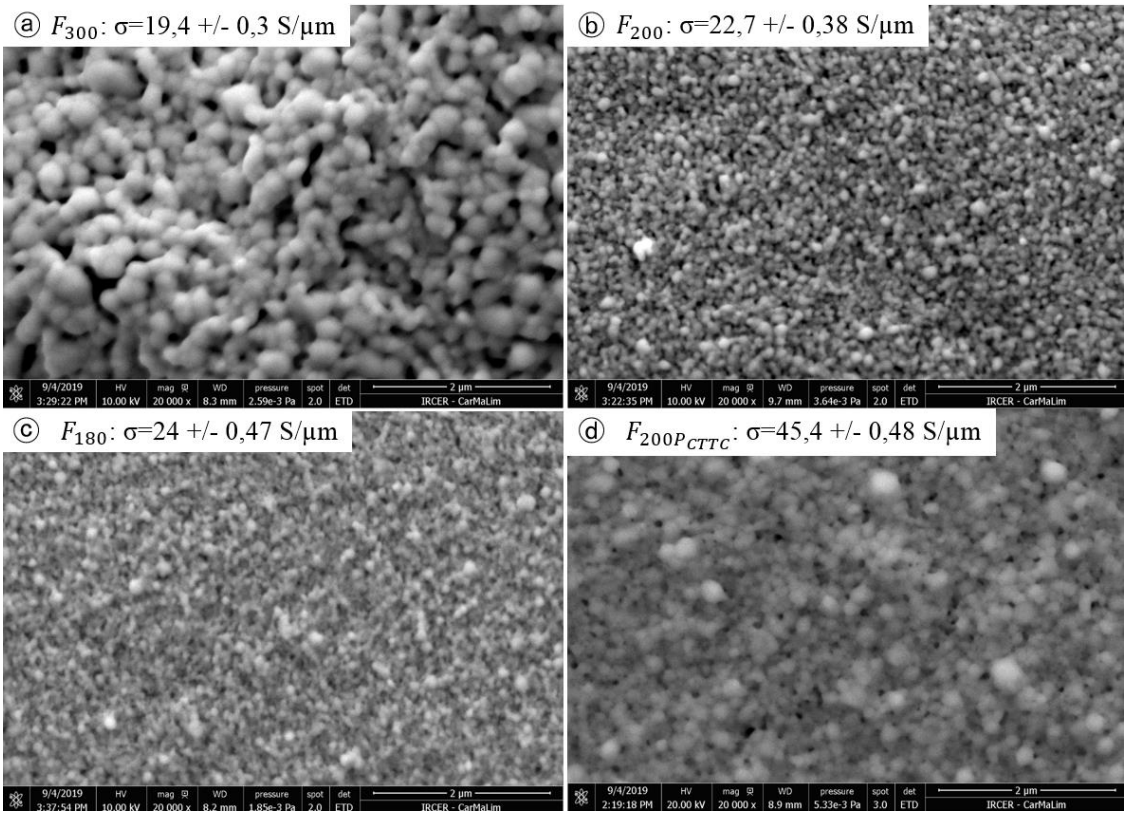


Figure II-24: Images MEB de la microstructure des dépôts imprimés en argent: ⓐ méthode de frittage F_{300} ; ⓑ méthode de frittage F_{200}, ⓒ méthode de frittage F_{180} ; ⓓ méthode de frittage $F_{200P_{CTTC}}$

Afin de limiter au maximum les pertes liées à l'épaisseur métallique, nous privilégions pour nos composants au moins 3x l'épaisseur de peau à ces fréquences millimétriques. Nous avons pris les différentes valeurs de conductivités extraites des échantillons imprimés et nous avons comparé notre épaisseur mesurée à ces valeurs (Figure II-25).

Dans le cas où la conductivité est de 45 S/µm, l'épaisseur du dépôt doit être supérieure à 2.25 µm à 10 GHz. Cette épaisseur doit être supérieure à 4.7 µm lorsque la conductivité diminue à 10 S/µm. Cependant, si nous nous basons sur les résultats présentés dans la Figure II-14, nous pouvons constater que l'AJP nous permet de réaliser des composants dont les épaisseurs sont suffisantes pour limiter les pertes métalliques liées à la profondeur de peau.

L'accès à des conductivités proches de 45 S/µm nous permet en l'état de réaliser des composants tout à fait adaptés à des fréquences d'utilisation supérieur à 10 GHz avec une seule couche imprimée. Nous cherchons cependant, dans la mesure du possible, travailler avec des dépôts de 2 couches pour maximiser les performances.

Pour les différentes conductivités extraites, nous pouvons constater que pour les anneaux en 1 couche, nous ne sommes en général pas impactés par la profondeur de peau au-delà de 30 GHz. Ceux en 2 couches ne sont pas impactés sur toute la bande de fréquence. Pour les carrés imprimés, nous remarquons néanmoins que toutes les épaisseurs mesurées sont en dessous des valeurs minimums conseillées à 35 GHz. Nous pensons donc qu'il est possible

d'obtenir une valeur de conductivité légèrement supérieure à 45 S/µm si nous réussissons à déposer plus de matière tout en garantissant une bonne homogénéité de surface.

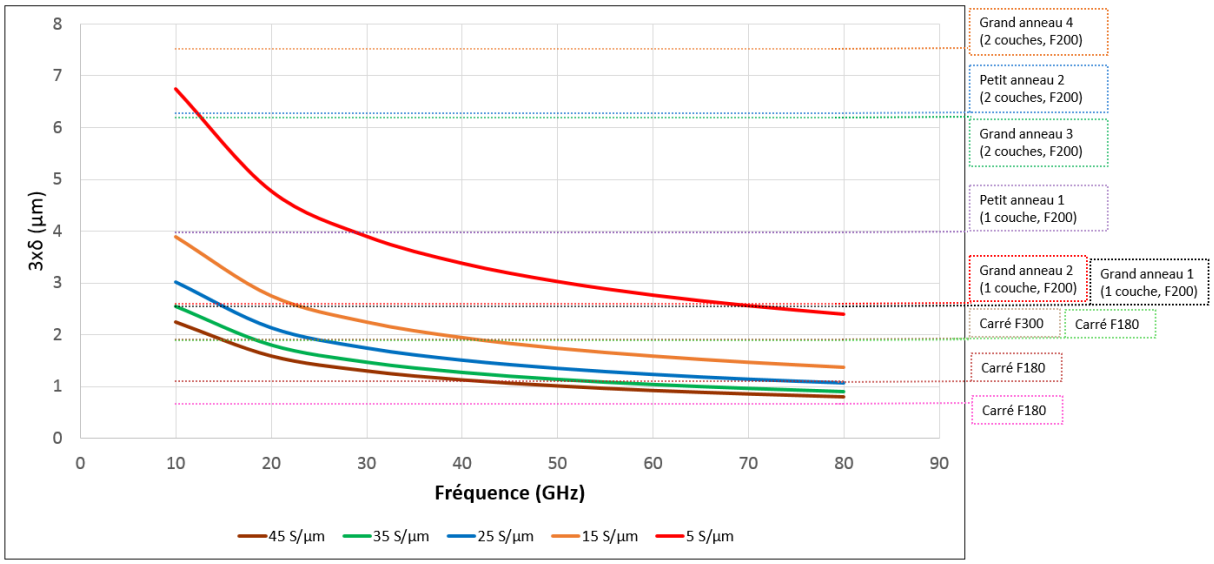


Figure II-25: Comparaison profondeur de peau et épaisseur des impressions en argent

Pour la même méthode de frittage F_{200}, les deux méthodes de caractérisation offrent des résultats proches aux incertitudes près. La méthode par cavité résonante offre plus de précision mais n'est pas adaptée pour caractériser des encres métalliques imprimées par AJP à cause des difficultés de réalisation liées au recouvrement de telles surfaces.

Les conditions d'impression ainsi que les épaisseurs obtenues sont différentes sur les carrés par rapport à ce qui est observé sur nos composants hyperfréquences (anneaux résonants). La méthode par anneaux est moins précise mais est mieux adaptée à l'utilisation de l'AJP. Les épaisseurs obtenues nous permettent d'être supérieur à la profondeur de peau afin de garantir une extraction optimale de la conductivité σ.

Nous concluons ici que ces deux méthodes sont complémentaires et que l'utilisation de la méthode de caractérisation par anneaux résonants est pertinente pour caractériser des encres à base de nanoparticules.

Lorsque l'on regarde plus en détails, nous remarquons que les anneaux de petite taille donnent des valeurs de conductivité extraites plus éloignées de celles trouvées avec la méthode par cavité par rapport aux grands anneaux.

Nous avons relevé dans la Figure II-26 le facteur de qualité à vide de chaque mode de résonance pour chaque anneau. Au niveau du premier pic à 10 GHz, la valeur du facteur de qualité varie entre 60 et 80. Cette variation cause la dispersion de la valeur de la conductivité extraite à cette fréquence comme vu précédemment. Pour le reste de la bande de fréquence sur laquelle nous avons travaillé, les facteurs de qualité des grands anneaux sont très proches. Les petits résonateurs quant à eux ont un facteur de qualité inférieur à celui des grands anneaux aux mêmes fréquences ; les pertes métalliques sont en effet d'autant plus importantes que la section du conducteur est faible.

En comparant les courbes ⓐ et ⓑ de la Figure II-23, nous remarquons qu'à 35 GHz, seules les valeurs de conductivités extraites avec les grands anneaux se recoupent avec celle extraite par la méthode de cavité résonante aux incertitudes de calculs près. Nous pouvons en

conclure que cette méthode de caractérisation nous permet d'effectuer des extractions précises à condition d'optimiser le facteur de qualité en considérant principalement des anneaux résonants de grande taille.

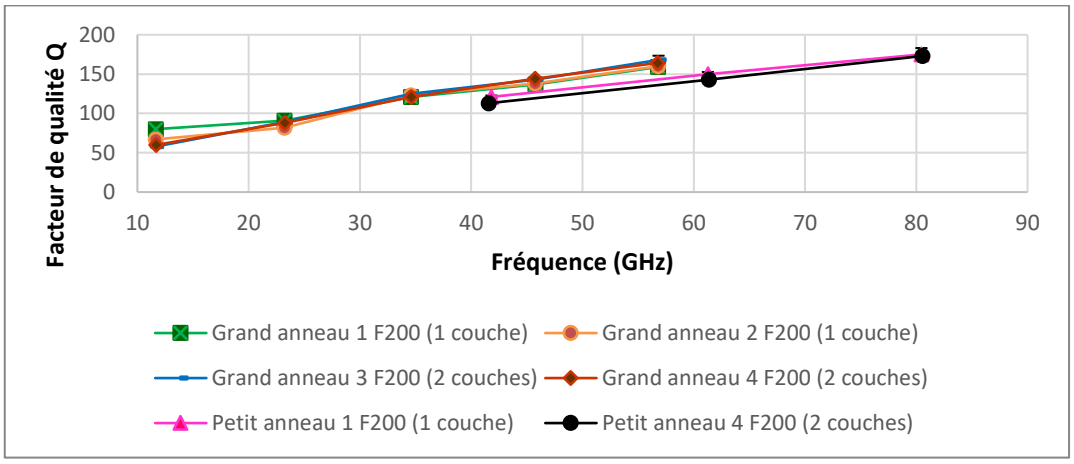


Figure II-26: Mesure des facteurs de qualité des différents anneaux

Nous conseillons donc l'utilisation d'anneaux résonants dont les dimensions permettent d'obtenir un mode fondamental de résonance vers 10 GHz pour être capables d'obtenir une évaluation de la conductivité précise sur un grand nombre de points sur la bande de fréquence [30 GHz ; 80 GHz].

D'après les Figure II-23 et Figure II-25, imprimer 2 couches permet sereinement de pouvoir limiter au maximum les pertes métalliques liées à la profondeur de peau pour les composants fonctionnant à une fréquence inférieure à 30 GHz. Le nombre de couches de nos composants dépendra de leur application, notamment de la bande de fréquence utilisée.

II.3.2.2.2. Caractérisation de l'encre or

Les différentes extractions de conductivité effective sont visibles Figure II-27 pour l'encre or. Les extractions utilisées ici sont uniquement par cavité résonante.

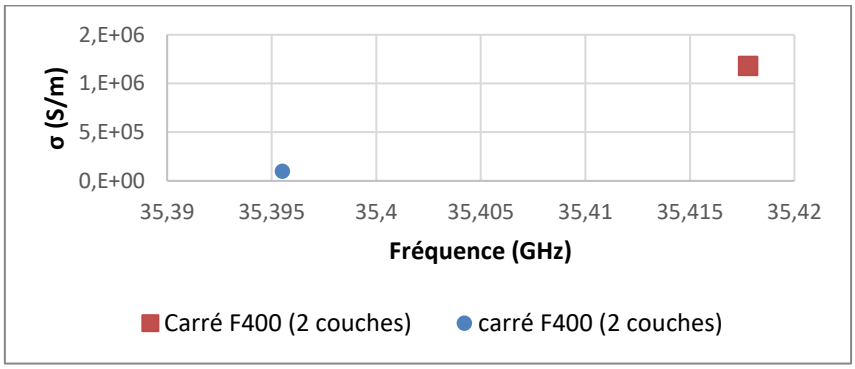


Figure II-27: Conductivité effective de l'encre or

Dans la Figure II-27, nous avons pour les deux carrés imprimés en 2 couches deux valeurs distinctes de conductivité (σ). A 35 GHz, nous relevons 1.18 +/- 0.06 S/µm pour le premier et 0.1 +/- 0.01S/µm pour le second. Pour des épaisseurs respectives très faibles de 0.48 +/- 0.25 µm et 0.36 +/- 0.18 µm, nous avons étudié l'impact de la profondeur de peau pour ces impressions (Figure II-28).

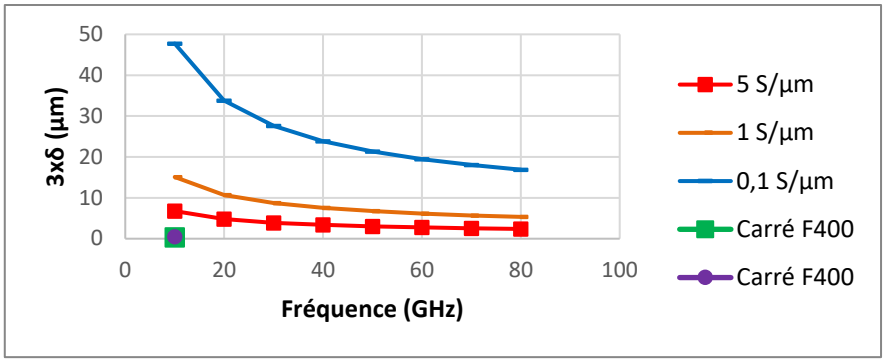


Figure II-28: Comparaison profondeur de peau et épaisseur des impressions en or

Ces épaisseurs sont très inférieures à la profondeur de peau. Le manque d'homogénéité du dépôt mentionné plus tôt (Figure II-22) amène aussi des pertes très importantes. Afin de pouvoir observer la microstructure de ces carrés en or, nous avons utilisé de nouveau le MEB Quanta LEG 450 ESEM au laboratoire IRCER à Limoges (Figure II-29). Comme nous pouvons le constater, les grains sont faiblement joints et forment des plaques de métal superposées.

Nous avons essayé de fritter nos carrés d'or à 500°C pendant 1h afin de d'améliorer leur conductivité. Les dépôts se sont alors décollés de leur substrat. Nous pensons que pour cette température de frittage, les agents organiques présents dans l'encre et qui lui permettent d'adhérer au substrat se sont évaporés, provoquant le décollement.

Dans ces conditions, la mise en œuvre très difficile de cette encre à base d'or nous amène à conclure que nous ne pouvons pas l'utiliser pour des applications hyperfréquences en l'état.

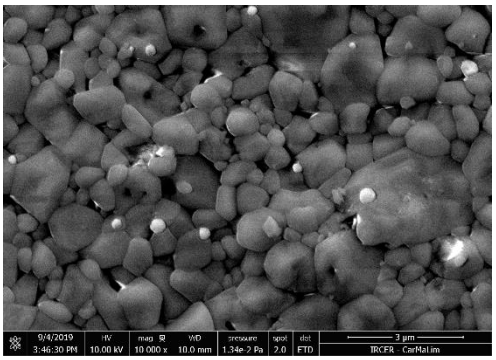


Figure II-29: : Images MEB de la microstructure des dépôts imprimés en or

Pour la suite, les prochains tests devront se concentrer sur une meilleure mise en œuvre de cette encre et sur la méthode de frittage appliquée aux dépôts en or.

II.3.2.2.3. Conclusion sur la caractérisation des encres argent et or

Nous avons répertorié les meilleures valeurs de conductivité obtenues pour les encres à base d'argent et d'or respectivement ci-dessous :

→ 45.37 +/- 4.82 S/µm à 35.43 GHz avec l'encre argent pour la méthode de frittage $F_{200P_{CTTC}}$,

→ 1.18 +/- 0.006 S/µm à 35 GHz avec l'encre or pour le processus de frittage F_{400}.

Les deux méthodes présentées dans ce chapitre pour extraire la conductivité effective d'une encre à base de nanoparticules métalliques se sont révélées pertinentes et complémentaires.

En effet la méthode par cavité résonante permet une caractérisation très précise de la conductivité d'un carré imprimé de 13 x 13 mm au minimum. Néanmoins l'AJP n'est pas optimisé pour métalliser de telles surfaces et nous sommes obligé d'utiliser des conditions différentes de celles appliquées pour l'impression de nos composants hyperfréquences. Les problèmes récurrents qui ont un impact non négligeable sur l'extraction de conductivité sont une faible épaisseur de métallisation ainsi qu'un manque d'homogénéité de surface.

La méthode de caractérisation à l'aide d'anneaux résonants imprimés est quant à elle est moins précise dans ses extractions à cause des facteurs de qualité (Q) des résonateurs qui sont beaucoup plus faibles que ceux d'une cavité résonante. Néanmoins la surface à imprimer d'un anneau résonant est beaucoup plus simple de mise en œuvre par l'AJP. Les épaisseurs obtenues sont ainsi plus importantes et les états de surfaces mieux contrôlés.

A condition d'optimiser le facteur de qualité de l'anneau en fonction de la bande de fréquences qui nous intéresse, il est tout à fait pertinent d'utiliser cette méthode pour caractériser la conductivité effective des encres à base de nanoparticules métalliques.

Nous avons comparé nos valeurs de conductivité à celles que nous avons trouvé dans différents papiers, revues scientifiques et fiches techniques de fournisseurs d'encres. Les différentes valeurs pour l'encre argent sont données dans la Figure II-30 et sont issues des sources [II.35] à [II.51] . Celles pour l'encre or sont visibles Figure II-31 et proviennent des sources [II.52] à [II.55] qui sont principalement des travaux de recherches où les intéressés fabriquent eux même leur encre.

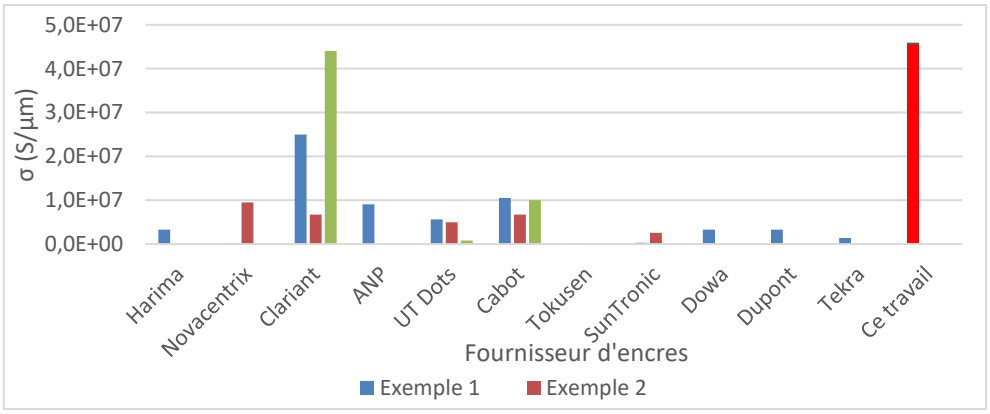


Figure II-30: Comparaison de la conductivité de l'encre à base d'argent utilisée avec d'autres issues d'une multitude de travaux de recherches et de fiches techniques fournisseur.

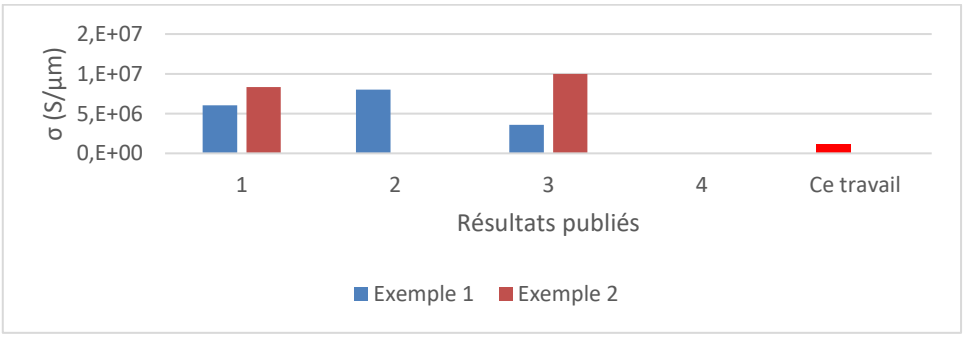


Figure II-31: Comparaison de la conductivité de l'encre à base d'or utilisée avec d'autres issues d'une multitude de travaux de recherches et de fiches techniques fournisseur.

Par conséquent, en appliquant sur l'encre à base d'argent le dernier type de traitement thermique (la méthode de frittage $F_{200P_{CTTC}}$) mis en place dans la toute dernière partie de ce travail de thèse, nous sommes capables d'obtenir une conductivité de dépôt au niveau de l'état de l'art.

En ce qui concerne l'encre à base d'or, nos valeurs de conductivité extraites sont très en dessous de celles trouvées dans d'autres travaux de recherches. Le point commun entre ces différents travaux est que la composition chimique des encres utilisées a été optimisée afin de pouvoir être imprimé par AJP. Il est donc difficile de les comparer avec nos travaux dans ces conditions.

Nous conseillons donc d'utiliser principalement l'encre à base d'argent pour réaliser des composants hyperfréquences. Que ce soit en termes de prix, de mise en œuvre ainsi que de résultats, cette dernière est beaucoup plus intéressante à utiliser que l'encre or.

II.3.3. Réalisation de structures fonctionnelles

II.3.3.1. Présentation des structures imprimées

A partir des informations obtenues dans les parties II.3.1 et II.3.2 sur la résolution atteignable et la conductivité aux fréquences millimétriques de nos encres à base d'argent et d'or, nous avons réalisé des lignes de transmission coplanaires CPW. Nous souhaitons récupérer les différentes atténuations linéiques des lignes imprimées afin de pouvoir comparer leurs performances à l'état de l'art actuel.

A ce titre, nous avons imprimé six lignes par encre, dont chaque moitié en 1 et 2 couches afin de pouvoir déterminer le niveau d'atténuation typique que nous pouvons obtenir. Les lignes font 3 mm de long, sont adaptées à 50 Ω, conçues pour fonctionner jusqu'à 67 GHz et sont imprimées avec un paramètre de recouvrement de 50 %.

Le substrat est une plaque d'alumine de permittivité ε_r=9.74 +/- 0.2 et de tangente de pertes tanδ=$2{,}68.10^{-4}$ +/- $0{,}18.10^{-4}$ à 27.6 GHz. Son épaisseur est de 257 +/- 5 µm et sa rugosité de 0.15 +/- 0.01 µm.

Un exemple de ces lignes pour les deux encres est donné dans la Figure II-32.

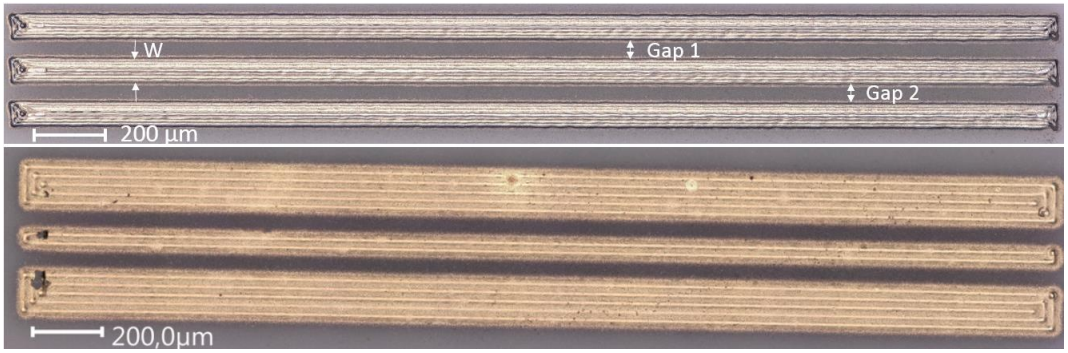


Figure II-32: Lignes coplanaires CPW imprimées en argent et en or

Les mesures des différentes dimensions ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence. Les différentes valeurs moyennes des dimensions de chaque ligne en 1 et 2 couches sont visibles dans la Figure II-33.

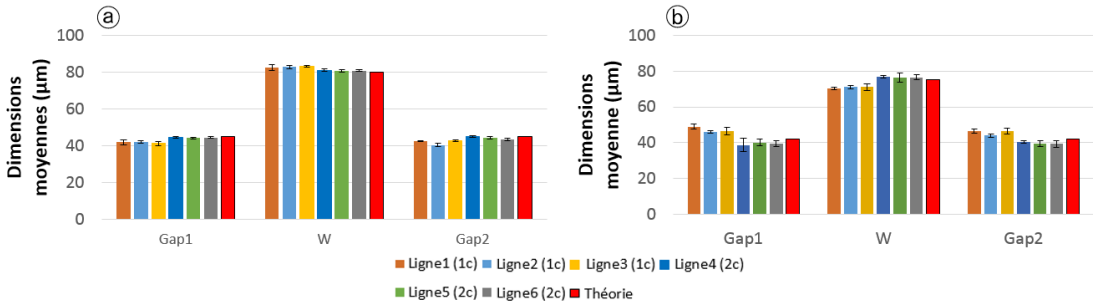


Figure II-33: Dimensions des lignes imprimées : ⓐ encre à base d'argent ; ⓑ encre à base d'or

Toutes les mesures de dimensions ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence et sont données en Annexe 3.

Dans la Figure II-33 ⓐ, les dimensions de la ligne conductrice et des gaps théoriques des lignes coplanaires imprimées avec l'encre à base d'argent sont respectivement 80 µm et 45 µm.

Sur l'ensemble des lignes réalisées, les différentes largeurs mesurées de la ligne conductrice sont comprises entre 80.67 +/- 0.8 µm et 83.17 +/- 0.6 µm. Pour les gaps de ces lignes, les valeurs sont comprises entre 40.33 +/- 0.95 µm et 44.93 +/- 0.3 µm. Ces résultats correspondent à la résolution de l'encre à base d'argent trouvée dans la partie II.3.1.2. Sur un ensemble de réalisations à partir de l'encre à base d'argent, notre dispersion de fabrication est donc typiquement inférieure à 5 µm.

Dans la Figure II-33 ⓑ, les dimensions de la ligne conductrice et des gaps théoriques des lignes coplanaires imprimées en encre à base d'or sont respectivement 75 µm et 42 µm.

Sur l'ensemble des lignes réalisées, les différentes largeurs mesurées de la ligne conductrice sont comprises entre 70.37 +/- 0.8 µm et 77 +/- 0.7 µm. Pour les gaps de ces lignes, les valeurs sont comprises entre 38.77 +/- 3.6 µm et 48.93 +/- 1.35 µm. Ces résultats correspondent à la résolution de l'encre à base d'or trouvée dans la partie II.3.1.2. Sur un ensemble de réalisation à partir de l'encre à base d'argent, notre dispersion de fabrication est inférieure à 9 µm.

Nous avons relevé les épaisseurs de chaque ligne à l'aide d'un profilomètre Dektak. Pour les lignes imprimées en argent en 1 couche, l'épaisseur moyenne est comprise entre 4.88 +/- 0.23 µm et 5.23 +/- 0.3 µm. Pour 2 couches elle est comprise entre 9.43 +/- 0.11 µm et 10.87 +/- 0.53 µm. Nous relevons donc lors de la fabrication de composants millimétriques tels que des lignes de transmission coplanaire une dispersion sur l'épaisseur inférieure à 0.5 µm pour 1 couche déposée. Pour 2 couches cette dispersion passe à 1 µm.

De la même manière pour l'encre à base d'or, l'épaisseur moyenne de 1 couche déposée est compris entre 0.69 +/- 0.08 µm et 0.96 +/- 0.1 µm. Pour 2 couches cette épaisseurs est comprises entre 1.8 +/- 0.07 µm et 2.22 +/- 0.14 µm. Sur l'ensemble des impressions la dispersion sur l'épaisseur de l'encre à base d'or est inférieure à 0.3 µm et 0.4 µm pour 1 et 2 couches respectivement.

Dans les Figure II-34 et Figure II-35, nous avons le profil d'un exemple de ligne imprimée en 1 et 2 couches pour les encres à base d'argent et d'or. La stratégie d'impression employée pour l'encre à base d'argent et d'or est expliquée dans la Figure II-16 et Figure II-17 respectivement.

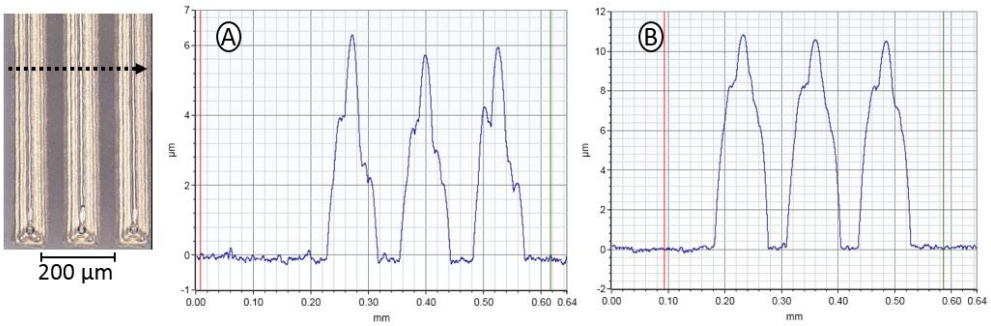


Figure II-34: Profil d'une ligne coplanaire en argent réalisée en phase ⓑ : Ⓐ 1 couche ; Ⓑ 2 couches

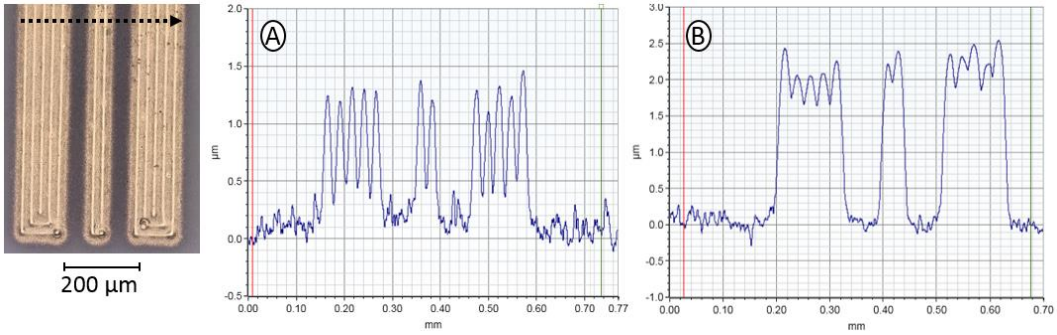


Figure II-35: Profil d'une ligne coplanaire en or : Ⓐ 1 couche ; Ⓑ 2 couches

Pour les impressions en argent, nous pouvons remarquer que le profil de l'épaisseur des lignes se présente sous la forme d'ogives. Le profil d'un dépôt dépendant directement de la méthode d'impression utilisée, il semblerait qu'il y ait pour ces lignes un passage de trop de la buse vers le milieu de chaque partie. La principale conséquence d'un tel profil est de compliquer la mesure sous pointes à venir en rendant compliquées la qualité du contact sur ces lignes.

Pour les impressions en or, la majorité de la matière est présente au niveau du passage de la buse. L'encre à base d'or étant très dense, le recouvrement utilisé de 50% n'est pas suffisant afin d'obtenir un dépôt homogène. Cet effet s'atténue, lorsque l'on dépose 2 couches, car l'encre déposée vient remplir les espaces entre les passages de buse même si ces derniers sont encore nettement visibles (Figure II-35 Ⓑ).

II.3.3.2. Mesures des lignes de transmissions

Les lignes coplanaires ont été mesurées sous pointes (pointes INFINITY de pitch 125 µm) avec un PNA-X Keysight de 10 MHz à 67 GHz. Un exemple des paramètres S mesurés pour une ligne imprimée en argent et une ligne en or est montré dans la Figure II-36.

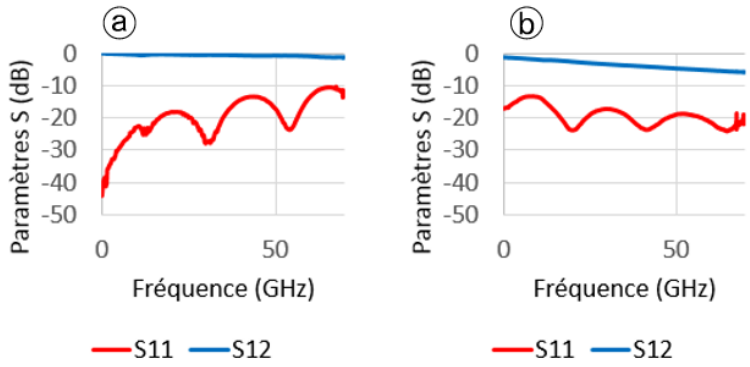


Figure II-36: Exemple de paramètres S des lignes mesurées : ⓐ encre à base d'argent ; ⓑ encre à base d'or

Nous pouvons constater que leur adaptation comprise entre -20 et -10 dB sur toute la bande de fréquence. Nous avons extrait de ces mesures de paramètres S l'atténuation linéique de chaque ligne en dB/mm. Les résultats pour les lignes imprimées en argent sont donnés dans la Figure II-37 et dans la Figure II-38 pour les lignes imprimées en or.

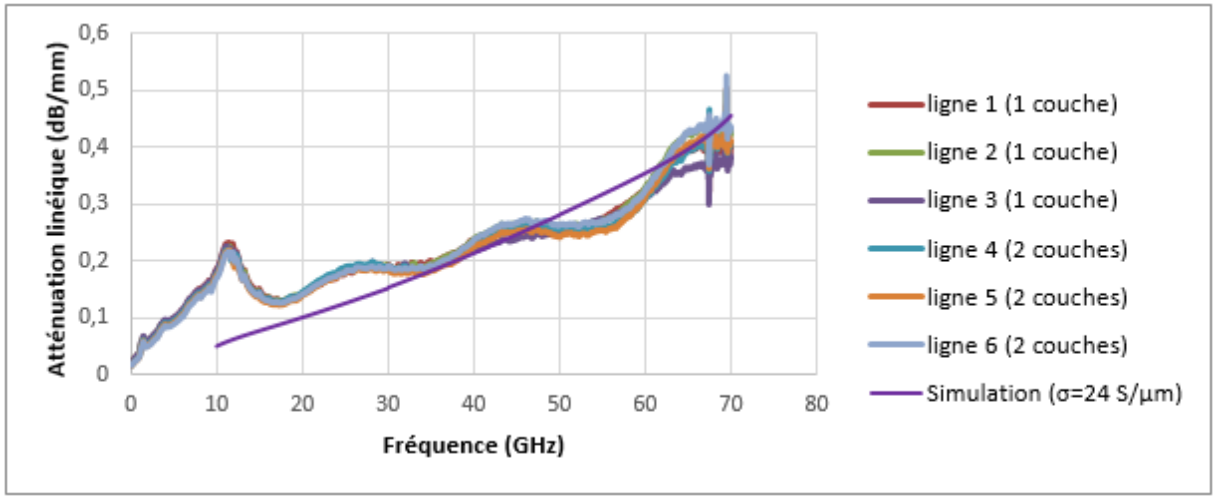


Figure II-37: Atténuation des lignes coplanaires modèle 67 imprimées en argent

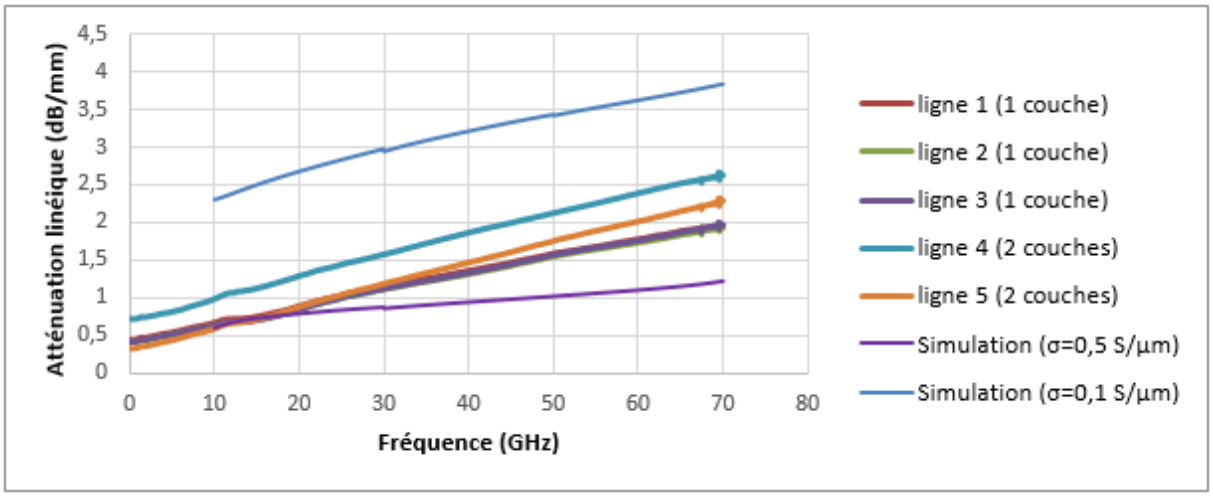


Figure II-38: Atténuation des lignes coplanaires modèle 67 imprimées en or

Dans la Figure II-37, les différentes atténuations linéiques des lignes imprimées en argent sont très similaires sur toute la bande de fréquence [10 MHz ; 67 GHz]. Nous avons en moyenne une atténuation comprise entre 0.22 et 0.24 dB/mm pour 1 et 2 couches respectivement à 40 GHz. Comme nous l'avons constaté dans la partie II.3.2.2.1, imprimer 2 couches n'améliore pas les performances des lignes. En effet, avec en moyenne 5 µm déposée pour 1 couche, nous sommes au-dessus de la profondeur de peau pour toute la bande de fréquences. Ces différentes atténuations correspondent à la simulation pour la valeur extraite de conductivité σ de 24 S/µm (partie II.3.2.2.1). Les résultats de simulation correspondent aux mesures réalisées, ce qui valide la valeur de la conductivité extraite à 35 GHz. Le pic que nous pouvons observer à environ 10 GHz sur l'ensemble des lignes mesurées vient de nos conditions de mesure (calibration, pose des pointes de mesure, problème au niveau des pointes, …).

Dans la Figure II-38 nous avons une moyenne des atténuations linéiques pour les lignes en or comprise entre 1.32 et 1.87 dB/mm pour 1 et 2 couches respectivement à 40 GHz. Pour 1 couche déposée, l'ensemble des atténuations des lignes en or sont très proches sur toute la bande de fréquence. Néanmoins, pour 2 couches imprimées on remarque que les pertes sont plus importantes et les atténuations linéiques respectent la même tendance mais ont des valeurs éloignées. Comme observé dans la partie II.3.2.2.2, le frittage de 2 couches déposées semble insuffisant. L'évaporation des solvants est peut-être incomplète et les particules n'ont pas fondu convenablement (Figure II-29).

D'après la simulation, la conductivité de ces lignes est comprise entre 0.1 et 0.5 S/µm. Ces valeurs correspondent aux valeurs de conductivité σ comprise entre 0.1 et 1 S/µm extraites dans la partie II.3.2.2.2.

Avec l'encre à base d'argent, nous sommes capables de réaliser des composants dont la géométrie est précise et les performances répétables dans l'ensemble d'un lot de fabrication.

Pour l'encre à base d'or, les impressions en 1 couche donnent des résultats répétables sur un ensemble de composants. Néanmoins avec une épaisseur de couche moyenne après frittage inférieure à 1 µm et une conductivité effective extraite de 1 S/µm à 35 GHz (partie II.3.2.2.2), nous sommes bien en dessous de la profondeur de peau (Figure II-25). Nous ne pouvons donc pas réaliser des composants hyperfréquences dans ces conditions.

II.3.3.3. Conclusion et perspectives

Sur l'ensemble de nos impressions de lignes de transmission coplanaire (CPW), nous avons relevé au mieux une atténuation linéique de 0.22 et 1.32 dB/mm à 40 GHz pour les encres à base d'argent et d'or respectivement.

Dans le but de nous positionner par rapport à l'état de l'art, nous avons comparé nos performances avec celles de lignes de transmissions trouvées dans la littérature (Tableau V).

Tableau V: Comparaison des résultats de nos lignes argent avec l'état de l'art de lignes imprimées en argent à 40 GHz

Reference / Technologie	α (dB/mm)	Longueur (mm)	Substrat / Epaisseur
Ce travail / AJP	0,22	3	Alumine/ 257 µm
	0,3	5	
[II.56] / AJP	0,55	11.4	Polyimide / N.A.
[II.57] / AJP	0,2	2.4	Polyimide / 50 µm
[II.58] / AJP	0,2	2	Polyimide / 20.7 µm
[II.35] / AJP	≈0,1-0,17	1	LCP / 50 µm
	≈0,13-0,16	1	Kapton / 25 µm
[II.59] / AJP	≈0,2	1	LCP / 175 µm
	≈0,2	1	Vero White / 200 µm
[II.44] / AJP	≈ 0,48	1	LCP / 50 µm
	≈0,67	1	LCP / 50 µm + Polyimide / 10 µm
	≈0,18	1	Polyimide / 21 µm
[II.60] / Jet d'encre	≈0,24	1	Kapton / 125 µm
[II.61] / AJP	0.23	2.4	Diamant / 300 µm

Nous pouvons constater que nous sommes au niveau de ce qui se fait à l'état de l'art en ce qui concerne les lignes de transmission imprimées par AJP et jet d'encre.

Toutes les lignes de transmission que nous avons imprimées ont été frittées avec la méthode F_{180} pour une conductivité effective de dépôt de σ=24 +/- 0.47 S/µm. En perspective de ce travail et pour améliorer les performances de nos lignes imprimées en argent, nous pourrons utiliser la méthode de frittage $F_{200P_{CTTC}}$ développée à la fin de ce travail de thèse avec le CTTC. Avec une conductivité σ=45.4 +/- 0.48 S/µm nous pourrons surement obtenir une atténuation linéique inférieure à 0.2 dB/mm.

Cependant, nous comparons nos travaux à des impressions réalisées avec des substrats différents. En effet, la plupart des impressions sont réalisées sur des couches fines de polymère la plupart du temps, afin de se placer dans des problématiques d'impression multi matériaux multicouches. Pour nous qui utilisons principalement de l'alumine pour sa faible perte mais d'épaisseur plus forte (250 µm), il est donc difficile d'effectuer une comparaison dans des conditions identiques.

Les études présentant des encres à base de nanoparticules d'or sont essentiellement concentrées autour de l'amélioration de l'imprimabilité, de la conductivité effective des dépôts et de leur composition chimique. Nous n'avons donc trouvé aucuns travaux nous permettant de comparer les performances de nos lignes de transmission coplanaires CPW. Cependant, il apparait clairement que, pour une atténuation linéique qui est au mieux de 1.32 dB/mm à 40 GHz dans notre cas, il est actuellement difficile d'envisager de véritables applications hyperfréquences en l'état.

II.3.4. Conclusion sur l'impression d'encres à nanoparticules métalliques

Afin de pouvoir quantifier les performances d'une encre à base de nanoparticules métalliques imprimée par AJP, nous avons réalisé trois études complémentaires :

- Les tests de résolution afin de quantifier l'imprimabilité d'une encre,
- La caractérisation en conductivité effective d'un dépôt aux fréquences millimétriques,
- La réalisation de structures basiques telles que des lignes de transmissions afin de quantifier le niveau de performance typique.

Nous avons listé les différents résultats saillants obtenus durant cette étude dans le Tableau VI pour les deux encres utilisées, à savoir les encres d'argent et d'or.

Tableau VI: résumé des résultats de l'étude sur les encres à nanoparticules métalliques

Encre à nanoparticules	Largeur minimum (µm)	Espacement minimum (µm)	Epaisseur 1 couche (µm)	σ(S/m) max obtenu	α (dB/mm)
Argent	19.02 +/- 0.75	9.15 +/- 0.85	>2	45.4 +/- 0.48	0.22
Or	44.2 +/- 1.75	15.12 +/- 1.55	>0.5	1.18 +/- 0.06	1.32

L'encre à base d'argent est très bien adaptée à la réalisation de nos composants hyperfréquences. Avec une largeur de trait minimum proche de 20 µm et un espacement entre deux trait minimum proche de 10 µm nous sommes capables de réaliser des composants fonctionnant dans la bande les fréquences millimétriques. De plus, la conductivité effective du dépôt ainsi que les performances des lignes que l'on imprime sont au niveau de l'état de l'art.

L'encre à base d'or est très compliquée à mettre en œuvre de par sa densité bien plus élevée et du poids plus important de ses nanoparticules métalliques. Cette caractéristique fait que la majeure partie du matériau est déposé au niveau du centre du passage de la buse causant ainsi de mauvaises qualités de surface.

Les différents tests de d'extraction de conductivité et de réalisation de lignes de transmission nous ont prouvé que l'encre à base d'or que l'on utilise dans ce travail n'est pas adaptée pour des application hyperfréquences. Il est néanmoins possible de rechercher une autre encre mieux adaptée à notre technique d'impression et d'optimiser la méthode de frittage appliquée afin de se rapprocher de l'état de l'art actuel.

A l'heure actuelle, il existe d'autres encres à nanoparticules métalliques comme le cuivre et le platine. Pour chacun de ces matériaux, nous avons deux problèmes qui rendent leur utilisation peu intéressante. L'encre cuivre est compliquée à mettre en œuvre, tant par sa difficulté d'impression que par le fait qu'elle s'oxyde vite lorsque l'on commence à l'utiliser. A

cela, nous pouvons ajouter des prix d'achat très proches de ceux des encres argent, ce qui a pour effet de baisser fortement l'intérêt pour ce type d'encre. L'encre platine, quant à elle, est aussi compliquée à utiliser que l'encre d'or. Elle dispose d'une conductivité plus faible et coute plus chère pour un nombre d'applications possibles réduites.

A partir de nos différents résultats et observations, nous avons statué que l'encre à base d'argent est l'encre la plus intéressante à utiliser pour les applications hyperfréquences qui seront présentées dans la suite de ce manuscrit.

II.4. Impression d'encre diélectrique par la technologie AJP

L'un des points les plus intéressants de la technologie AJP est de pouvoir imprimer un grand nombre de matériaux sous forme d'encre. Nous avons testé sa capacité à imprimer des matériaux conducteurs, maintenant nous allons tester sa capacité à imprimer des matériaux diélectriques.

Il existe un certain nombre d'encres diélectriques proposées par Optomec [II.62], mais l'une des principales vendues par les distributeurs est l'encre polyimide [II.63]. En effet sa tangente de pertes proche de 10^{-3} aux fréquences millimétriques ainsi que ses propriétés physicochimique (stable jusqu'à 360 °C, neutralité chimique, etc) en font un matériau très intéressant pour des applications hyperfréquence.

Dans la littérature, nous pouvons par ailleurs trouver plusieurs travaux proposant des études sur des encres à base de graphène [II.64] [II.65] [II.66], à base de SU-8 [II.67] [II.68] [II.69] ou encore à base de polyimide [II.70]. Nous avons choisi pour nos impressions une encre à base de polyimide pour les différentes raisons énumérées précédemment mais également car les différents tests préliminaires réalisés nous ont montré qu'elle est la plus simple à prendre en main.

L'intérêt de l'aspect multimatériaux de la technologie AJP est d'être capable de réaliser entièrement certains composants en une seule étape technologique. Il est possible par exemple de réaliser des lignes de transmission en [II.42] et [II.58] ou encore des antennes en [II.70]. Mais plus particulièrement, l'approche de fabrication multimatériaux et multicouches permet de considérer les problématiques d'interconnexion, aujourd'hui majoritairement assurée par des fils en or déposés par machine de bonding [II.71], avec une plus grande flexibilité. Certains travaux présentent une nouvelle manière de réaliser ces connexions en imprimant des pentes en polyimide afin de relier les deux niveaux du substrat dans [II.39] et [II.57].

L'utilisation d'une encre diélectrique demande une mise en œuvre différente comparée à celle utilisée précédemment pour les encres à base de nanoparticules métalliques. Comme nous l'avons étudié dans la partie II.3, ces dernières sont utilisées pour réaliser la couche conductrice d'un composant. Pour se faire, nous déposons principalement 1 couche en maximisant la résolution lors de l'impression du motif.

Pour les encres diélectriques, nous cherchons principalement à imprimer des couches isolantes. Dans cette optique de travail, nous allons étudier la capacité de l'AJP de déposer en 3D des couches isolantes afin de permettre une grande diversité dans les composants que nous pourrons proposer. Nos tests se concentreront principalement sur ce point ainsi que sur la résolution atteignable lors de l'impression du polyimide par AJP. Les paramètres utilisés durant ces tests sont les suivants :

- La buse utilisée à un diamètre de 300 µm,
- La largeur du trait imprimable est de 150 µm,

- La température du plateau d'impression est de 50 °C.
- Cuisson du dépôt à 300 °C pendant 30 min,
- Utilisation du module pneumatique de l'AJP car l'encre est plus visqueuse que l'encre à base d'argent ou d'or.

II.4.1. Impression du polyimide

Les différents tests effectués dans la mise en œuvre de l'encre à base de polyimide sont montrés dans la Figure II-39.

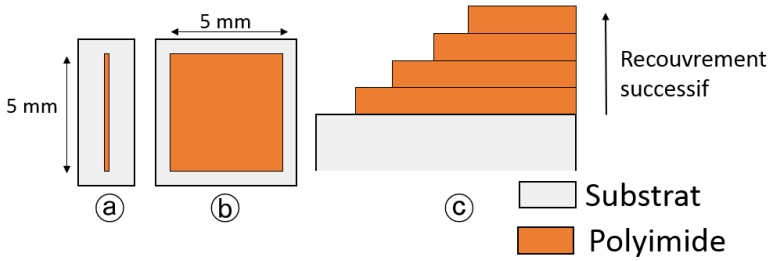


Figure II-39: Différents tests d'impression du polyimide : ⓐ un trait imprimé ; ⓑ un carré 5mm x 5 mm ; ⓒ une superposition de couche de polyimide imprimé (vue en coupe)

Le modèle ⓐ est une simple ligne de polyimide à imprimer. Nous cherchons à déterminer pour quelle largeur de trait nous pouvons réaliser une impression maitrisée de l'encre à base de polyimide.

Le modèle ⓑ est un carré imprimé en polyimide. Ce motif doit nous permettre de mettre en place la stratégie d'impression optimale pour imprimer des substrats diélectriques. Il nous permet également de quantifier l'homogénéité de surface que l'on peut obtenir lorsque l'on imprime une surface importante et l'épaisseur typique d'une couche.

Pour terminer, le modèle ⓒ est une succession de couches imprimées de polyimide. Nous nous attendons ici à ce que ces marches d'escaliers voient leur arrêtes adoucies lors des étapes d'impression et de cuisson, les faisant ainsi tendre vers une géométrie de plan incliné. Cette impression multicouche va également nous permettre de quantifier comment évolue l'épaisseur de polyimide déposée en fonction du nombre de couches. Les résultats de ces tests mettront en avant la précision d'impression sur l'axe Z.

Des images de ces différents tests sont visibles dans la Figure II-40.

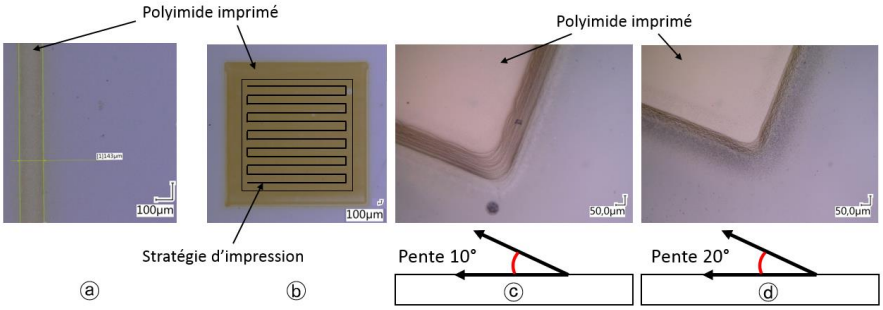


Figure II-40: Différents tests d'impressions du polyimide imprimés : ⓐ ligne imprimée ; ⓑ carré imprimé ; ⓒ pente imprimée de 10°; ⓓ pente imprimée de 20°

Nous avons mesuré à l'aide d'un microscope Keyence la largeur de la ligne imprimée en polyimide (Figure II-40 ⓐ). Pour une valeur théorique de 150 µm, nous avons une largeur

mesurée de 143 +/- 1 µm après cuisson. De la même manière pour le carré imprimé (Figure II-40 ⓑ), nous avons mesuré une largeur moyenne de 4910 +/- 1.5 µm pour une valeur théorique de 5000 µm. Nous retirons globalement de cette phase que lors de la réalisation de petits objets tels que des lignes, l'impression en polyimide est précise à 10 µm. Pour l'impression de plus grandes structures nous sommes précis à 100 µm. La tolérance de fabrication observée est principalement due au retrait que prend le polyimide pendant la cuisson. Elle dépend de la stratégie d'impression de l'encre polyimide ainsi que de la méthode de cuisson employée.

Ces différents tests nous ont permis en particulier de mettre en place une stratégie d'impression adaptée à des structures de surface importante. En effet, en imprimant une structure suivant une stratégie d'impression en serpentin (voir Figure II-40 ⓑ) nous pouvons assurer une bonne homogénéité au milieu de l'objet. Néanmoins la buse ralentissant pour changer de direction au niveau des bords, nous aurons dans ces zones des surplus de matériau imprimé (Figure II-42) pouvant aller jusqu'à 5 µm d'épaisseur en fonction du nombre de couches déposées.

Dans la Figure II-40 nous avons un exemple de plans inclinés selon deux angles théoriques différents (10° et 20°) en ⓒ et ⓓ. Leur profil a été mesuré à l'aide d'un profilomètre Dektak et nous avons calculé respectivement pour ces deux angles 61.5° et 56°. Un tel écart est dû aux problèmes liés à la fabrication multicouche mentionnée dans la partie II.3.1.1. A chaque passage de la buse, le gaz sortant vient légèrement aplatir l'encre déposée précédemment et la disperse sur l'ensemble de la surface de l'objet imprimé. Au niveau des bords de la structure, l'encre vient couler le long des plans inclinés. Nous n'avons donc à l'heure actuelle peu de contrôle sur leurs inclinaisons.

Pour quantifier l'évolution de l'épaisseur en fonction du nombre de couches de polyimide imprimées, nous avons réalisé le carré en polyimide (Figure II-40 ⓑ) en 1,3, 5 et 10 couches successives avant d'être cuit au four. La Figure II-41 présente les résultats des mesures d'épaisseurs réalisées, et la Figure II-42 présente les épaisseurs relevées et la rugosité de surface mesurée en fonction du nombre de couches imprimées.

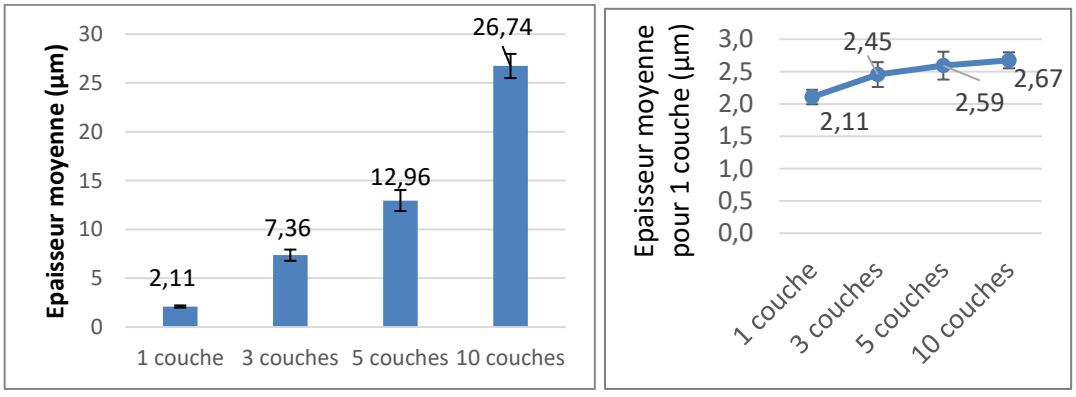


Figure II-41: Epaisseur des différents carrés 5 mm x 5 mm en polyimide en fonction du nombre de couches imprimées

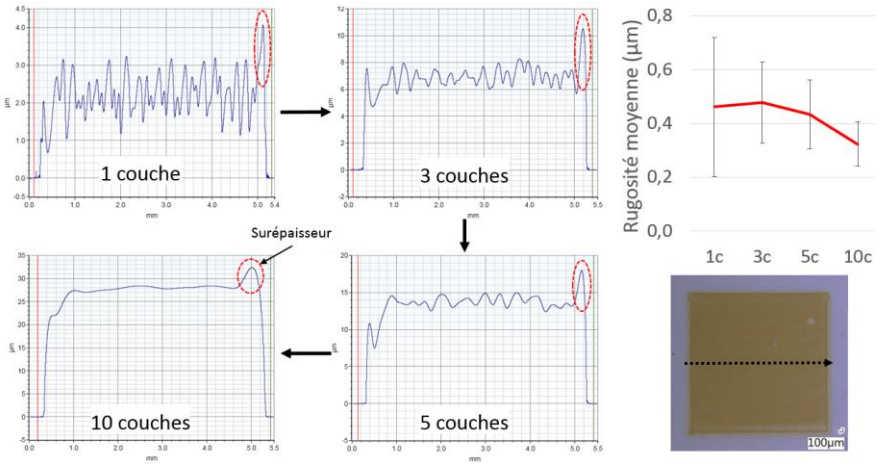


Figure II-42: Etat de surface et rugosité des différentes impressions en fonction du nombre de couche imprimées

La cuisson du polyimide étant réalisée à la fin de l'impression totale de la structure, nous pensons qu'elle ne se déroule pas de la même manière lorsque 1 à 10 couches sont déposées. En effet, les solvants ne peuvent pas s'évaporer de la même manière et le retrait pris lors de la cuisson est donc moins important que pour le carré de polyimide imprimé en 1 couche. Afin de rendre stable cette épaisseur, il serait intéressant d'optimiser la phase de cuisson.

La Figure II-42 nous présente l'état de surface des carrés de polyimide imprimés pour 1, 3, 5 et 10 couches. Nous pouvons constater que plus nous déposons de couche de polyimide et plus la surface devient lisse.

Nous avons mesuré la rugosité de surface des différents carrés avec un profilomètre Dektak et avons observé que la rugosité de surface diminue avec le nombre de couches imprimées. Pour 1 couche nous avons 0.416 +/- 0.26 µm, pour 3 couches la rugosité mesurée est de 0.48 +/- 0.15 µm, pour 5 couches elle est de 0.43 +/- 0.13 µm et enfin pour 10 couches elle est de 0.32 +/- 0.08 µm. De plus, nous remarquons la présence d'une surépaisseur au niveau des bords de la structure causée par le ralentissement de la buse dans cette zone en changeant de direction.

Sur l'ensemble de nos impressions en polyimide, nous avons constaté une incertitude de 0.5 µm sur l'épaisseur en fonction du nombre de couches imprimées. Lorsque l'on souhaite imprimer 10 couches, soit une épaisseur théorique de 20 µm, cette incertitude amène un décalage jusqu'à 4 µm. Ces différents résultats nous amènent à conclure que l'impression de l'encre à base de polyimide demande encore plus d'optimisation pour réaliser avec sérénité des composants dont les fréquences d'utilisation pourraient être très élevées (>100 GHz) et où le contrôle de l'épaisseur de couches imprimées est critique.

II.4.2. Caractérisation de l'encre polyimide

Pour caractériser cette encre à base de polyimide, nous avons choisi d'utiliser la méthode de caractérisation par anneau résonant (partie II.2.2). Nous pouvons ainsi extraire les valeurs de sa permittivité ε_r et de sa tangente de pertes tanδ sur un grand nombre de fréquences sur l'ensemble de la bande [10 MHz ; 67 GHz]. Cette méthode est également beaucoup plus simple de mise œuvre avec une encre diélectrique car nous avons seulement besoin d'imprimer un carré en polyimide puis un anneau en argent dessus.

Trois carrés d'une épaisseur théorique de 50 µm ont été imprimés sur des substrats en aluminium afin de servir de plan de masse aux structures. Sur chacun d'eux, nous avons imprimé un anneau en 1 couche d'encre à base d'argent.

La mise en œuvre de ces composants bi matériaux est séparée en deux étapes :

- Impression des carrés en polyimide de 4 x 4 mm en 30 couches et cuisson à 300°C pendant 30min,
- Impression des anneaux en argent sur le polyimide cuit, puis frittage avec la méthode $F_{200P_{CTTC}}$ (partie II.3.2.2.1).

Les trois anneaux imprimés sur le polyimide sont visibles dans la Figure II-43.

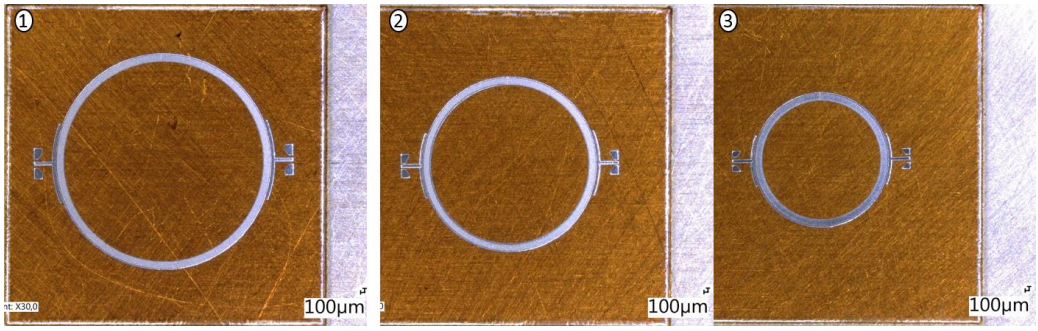


Figure II-43: Les trois anneaux résonnant pour la caractérisation du polyimide imprimé

Comme nous l'avons vu précédemment (partie II.4.1), nous n'avons pas une bonne précision sur l'épaisseur de polyimide imprimée. Nous avons mesuré les épaisseurs de chaque carré imprimé en polyimide. Dans la Figure II-43 pour le carré ① nous avons une épaisseur moyenne de 40.7 +/- 0.23 µm, pour le carré ② nous avons 37.56 +/- 0.55 µm et enfin pour le carré ③ nous avons 32.64 +/- 0.52 µm.

Ces incertitudes au niveau des épaisseurs n'ont aucun impact sur l'extraction de la permittivité ε_r et de la tangente de pertes tanδ en elle-même. Néanmoins nous avons dû adapter les dimensions des anneaux afin de pouvoir garder une adaptation des lignes d'excitation à 50 Ω. Nous avons également choisi des rayons différents pour chaque anneau afin de pouvoir extraire les valeurs à des fréquences différentes.

Au niveau de la mise en œuvre générale, cette incertitude sur l'épaisseur imprimée nous oblige à effectuer leur mesure pour chaque impression avant de déposer la couche d'encre à base d'argent.

L'ensemble des dimensions pour les trois anneaux résonnants imprimés sur le polyimide est donné dans la Figure II-44

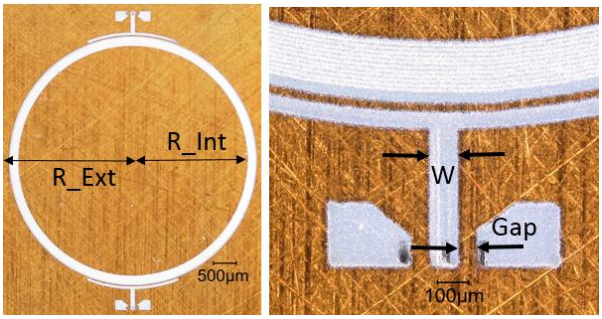


Figure II-44: Dimensions des anneaux résonnants de caractérisation

Toutes les mesures de dimensions ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence et sont données en Annexe 3.

L'ensemble des dimensions des anneaux est très proche des valeurs théoriques. L'écart de fabrication pour les lignes d'excitation correspond à celle quantifiée dans la partie II.3.1.2, soit 5 µm. Pour les grandes structures comme les anneaux, la tolérance de fabrication est inférieure à +/- 30 µm. Excepté pour la valeur du rayon extérieur R_{ext} de l'anneau 2 où l'écart est de +/- 80 µm. Nous pensons que cela correspond à une variation de la quantité de matière déposée lié à une variation d'un, ou de plusieurs, paramètres d'impression. La précision d'impression diminue proportionnellement à l'augmentation de la surface à imprimer.

Nous avons mesuré l'épaisseur de chaque anneau à l'aide d'un profilomètre Dektak. Nous avons pour l'anneau ① une épaisseur moyenne de 1.09 +/- 0.04 µm, pour l'anneau ② 1.39 +/- 0.16 µm et enfin pour l'anneau ③ 1.28 +/- 0.24 µm.

Pour ces valeurs d'épaisseurs, avec un dépôt de conductivité effective au moins supérieure à 20 S/µm, nous sommes au-dessus de 3 fois la profondeur de peau à partir de 30 GHz (partie II.3.2.2.1). De ce fait, nous pouvons considérer que nos résultats sont pertinents au moins à partir de cette fréquence et pour les fréquences plus élevées.

Nous avons recuit après impression par AJP l'encre à base de polyimide à 300 °C pendant 30 min. La couche d'encre à base d'argent est ensuite déposée et l'ensemble de la structure est frittée selon la méthode $F_{200P_{CTTC}}$ pour obtenir une conductivité (σ) au moins supérieure à 20 S/µm (partie II.3.2.2.1). L'ensemble des résultats de caractérisation du polyimide imprimé est donné dans la Figure II-45.

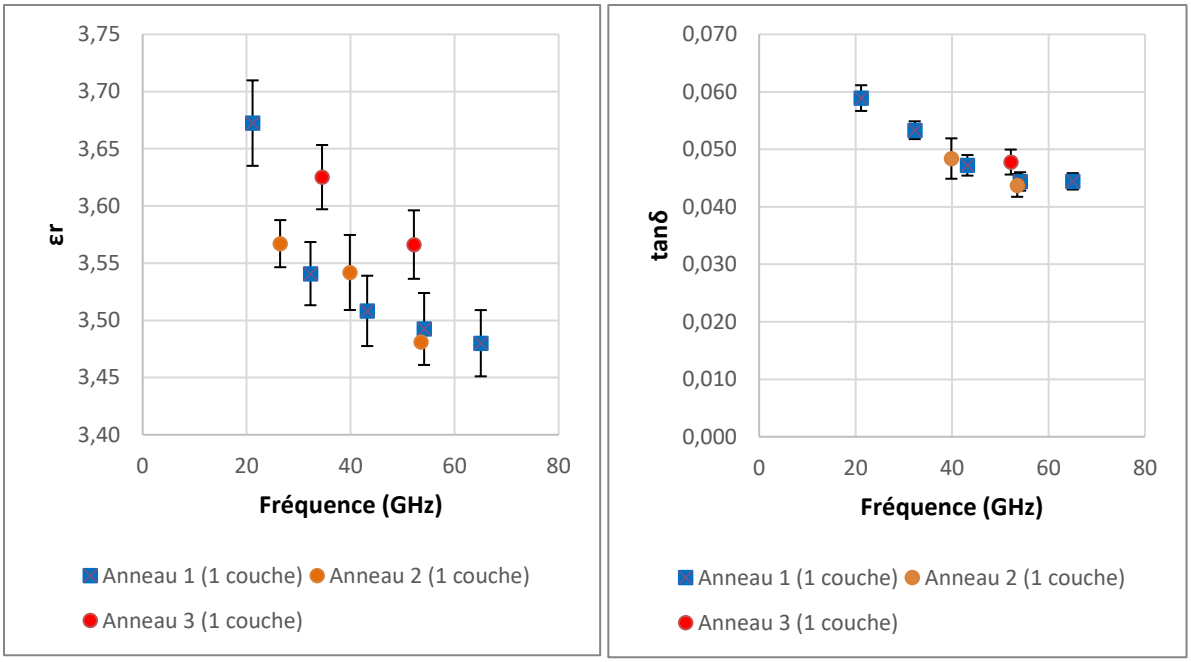


Figure II-45: Permittivité et tangente de pertes du polyimide imprimé caractérisé

Sur l'ensemble de la bande entre 30 et 70 GHz nous pouvons évaluer la valeur de la permittivité ε_r du polyimide imprimé entre 3.48 et 3.67. Pour la tangente de pertes tanδ, nous sommes compris entre 0.04 et 0.06 entre 30 et 70 GHz. Nous pensons que l'écart de valeurs que nous pouvons observer sur la courbe de la permittivité vient surement d'un manque de précision dans la mesure du rayon de l'anneau 3.

De la même manière que pour la caractérisation de la conductivité des couches métalliques réalisée dans la partie II.3.2.2, il semblerait qu'il soit nécessaire d'utiliser des anneaux de grande taille afin de maximiser le facteur de qualité et donc de gagner en précision d'extraction. Les facteurs de qualités des différents anneaux imprimés en argent sur toute la bande de fréquence sont donnés dans la Figure II-46.

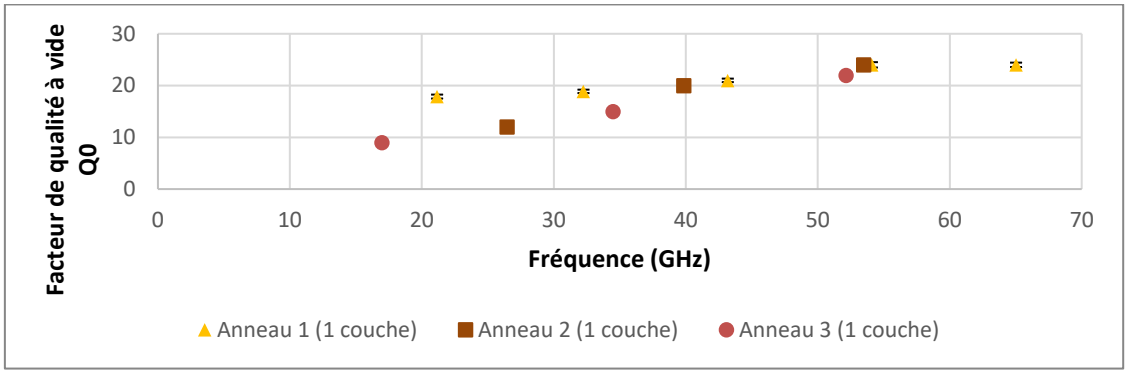


Figure II-46: Facteur de qualité à vide des anneaux résonnant pour la caractérisation du polyimide imprimé

Les anneaux imprimés en argent ont au mode de résonance fondamental un facteur de qualité compris entre 10 et 20. Pour les modes harmoniques, les facteurs de qualité se trouvent plus entre 20 et 25 sur toute la bande de fréquence. Il serait intéressant pour la suite de vérifier quel est l'impact de tels facteurs de qualité sur l'extraction de la tangente de pertes en comparant cette méthode avec celle utilisant une cavité résonante fendue (partie II.2.1.1).

II.4.3. Conclusion et discussion sur le polyimide imprimé

Imprimer une encre à base de polyimide nécessite une mise en œuvre différente de celle utilisée pour l'encre à base d'argent. En effet, nous ne cherchons plus à imprimer une couche fine métallique avec une très forte résolution. Ici nous souhaitons plutôt imprimer un substrat diélectrique de plusieurs dizaines de micromètres d'épaisseur sur des surfaces pouvant aller jusqu'à plusieurs millimètres carrés.

Pour imprimer précisément ce type de structure, les informations les plus importantes dont nous avons besoin sont généralement :

- La tolérance de fabrication selon les axes X et Y lorsque l'on imprime l'encre à base de polyimide et de quelle manière elle évolue lorsque l'on imprime une petite et une grande structure,
- La tolérance de fabrication selon l'axe Z sur l'épaisseur d'une couche déposée et comment elle évolue en fonction du nombre de couches déposées,
- Et enfin nous souhaitons déterminer si nous sommes capables de réaliser des plans inclinés aux dimensions contrôlées.

Les différents tests que nous avons réalisés avec l'encre à base de polyimide nous ont permis de répondre plus ou moins à toutes ces questions.

De façon générale, plus la structure à imprimer avec l'encre polyimide est grande et épaisse et plus la tolérance de fabrication est importante. Cela correspond sur les axes X et Y une précision de 10 µm sur des structures tel que des lignes de 150 µm de largeur, et une précision de 100 µm pour des plus grandes structures (>4mm²). Selon l'axe Z, plus l'épaisseur finale est importante et plus nous perdons en précision sur le contrôle d'épaisseur. Nous avons relevé une épaisseur qui évolue entre 2 et 2.6 µm pour 1 et 10 couches déposées respectivement. Nous pensons que ces variations sont dues à la méthode de cuisson employée qui n'est pas adaptée à des applications multicouches car les solvants sont mal évaporés sur des structures aussi épaisses.

Nous n'avons également pas réussi à imprimer de manière prédictible des plans inclinés en polyimide car l'encre coule sur les bords des impressions. Nous ne sommes à l'heure actuelle pas capables de contrôler ce phénomène même si la réalisation de plans inclinés est bel et bien possible.

Ces résultats nous amènent à la conclusion que l'impression de l'encre à base de polyimide n'est pas assez mature pour considérer des réalisation multimatériaux et multicouches de manière précise en une seule étape technologique. Nous pouvons cependant les réaliser en trois étapes.

Dans un premier temps, nous imprimons les premières couches en polyimide et les passons au four pour obtenir le dépôt final. Dans un deuxième temps nous mesurons les différentes dimensions du dépôt de polyimide afin d'adapter les dimensions du composant hyperfréquence à imprimer dessus. Dans une troisième et dernière étape, l'encre à base d'argent est imprimée sur le polyimide et toute la structure est frittée au four.

Le point positif d'une telle méthode est que nous pouvons nous adapter au manque de précision de l'impression de l'encre à base de polyimide mais celle-ci reste longue à réaliser.

Les allers-retours entre la machine AJP et les outils de mesures géométriques sont peu gênant ici, mais seront préjudiciables dans la réalisation de composants multimatériaux tels que des lignes de transmission demandant une forte précision au niveau du positionnement de la pièce.

Nous avons appliqué cette dernière méthode afin de pouvoir réaliser des anneaux résonants en argent sur des carrés de polyimide imprimé. La couche polyimide a été passée au four à 300°C pendant 30 min et l'ensemble de la structure (polyimide + argent) a été fritté selon la méthode $F_{200P_{CTTC}}$ (partie II.3.2.2.1).

En appliquant la méthode de caractérisation par anneau résonant (développé dans la partie II.2.2), nous avons extrait dans la bande de fréquence [30 GHz ; 70 GHz] pour le polyimide imprimé une permittivité ε_r entre 3.48 et 3.67 et une tangente de pertes tanδ comprise entre 0.04 et 0.06.

Nous n'avons trouvé que très peu de travaux présentant des valeurs de permittivité ε_r et de tangente de pertes tanδ dans la littérature. Dans le travail présenté en [II.72], la permittivité du polyimide est considérée à 3,5. Si l'on considère également les films de Kapton fabriqués par DUPONT, la fiche technique donnée en [II.73] présente un polyimide dont la permittivité et la tangente de pertes sont respectivement à 10 GHz d'environs 3,3 et 0.009 à température ambiante.

Les valeurs de permittivité ε_r extraire de notre encre à base de polyimide est proche de celle trouvée dans la littérature mais assez éloignée de celle proposée par DUPONT. De la même manière, nos tangentes de pertes (tanδ) sont jusqu'à 4 fois supérieures.

Dans les perspectives de ce travail, il reste des efforts importants à réaliser sur la cuisson optimale du polyimide imprimé. Les résultats attendus sont une meilleure maitrise sur le retrait des dépôts lié au recuit ainsi que des performances électriques plus intéressantes pour des applications en hyperfréquence.

II.5. Conclusion du Chapitre II

L'étude bibliographique réalisée dans le Chapitre I nous a amené à choisir la technologie AJP pour ses capacité (résolution atteignable et précision de la technologie) pour réaliser des composants hyperfréquences dans la bande des fréquences millimétriques.

Dans ce chapitre nous avons cherché à quantifier ces différentes caractéristiques avec la machine Aérosol Jet® 200 SERIES SYSTEMS utilisée par CTTC à Limoges.

La série de tests que nous avons effectuée nous a permis de choisir principalement deux matériaux pour nos applications : une encre à base argent et une encre à base de polyimide.

Pour la première nous sommes capables d'imprimer des traits d'une largeur minimum typique de 20 µm et d'espacer deux traits de 10 µm. En utilisant une méthode adaptée de frittage (méthode $F_{200P_{CTTC}}$ dans la partie II.3.2.2.1), nous avons extrait une valeur de conductivité d'un carré d'argent de 45 S/µm à 35 GHz. Ces résultats obtenus sont au niveau de l'état de l'art actuel de l'impression d'encre à base d'argent par AJP.

En réalisant des lignes de transmission sur un substrat d'alumine à l'aide de cette encre à base d'argent, nous avons obtenu une atténuation linéique de 0.22 dB/mm à 40 GHz proche de l'état de l'art pour ce type de ligne.

Pour l'encre polyimide, nous avons relevé un manque de maturité de la mise en œuvre d'impression limitant nos possibilités d'application. L'épaisseur moyenne pour 1 couche d'un dépôt augmente avec le nombre de couches déposées et passe de 2 à 3 µm selon que l'on dépose 1 seule couche ou 20 couches successives. La tolérance de fabrication selon les axes X et Y est de 10 µm pour des petites structures et passe à 100 µm pour des grands objets imprimés dont la surface est supérieure à 1 mm².

Nous avons extrait une permittivité ε_r entre 3.48 et 3.67 et une tangente de pertes (tanδ) comprise entre 0.04 et 0.06 sur la bande [30 GHz ; 70 GHz]. La permittivité obtenue est proche de celle que l'on peut trouver dans la littérature. Néanmoins la tangente de pertes est au moins 4 fois supérieure à celle que l'on peut trouver sur des films de kapton commerciaux. Une phase d'optimisation de l'étape de cuisson est nécessaire afin d'améliorer ces différents points.

La méthode de caractérisation par anneau résonant développée dans ce chapitre s'est révélée complémentaire à la méthode par cavité résonante fendue. Cette dernière nécessite d'imprimer des carrés en argent sur de grande surface (au minimum 13 x 13 mm pour 30 min d'impression) pas adapté à l'impression par AJP. Les conditions et paramètres d'impression sont différents que ceux utilisés pour imprimer des composants hyperfréquences. De plus, nous risquons de voir apparaitre des problèmes d'impression causés par l'obstruction de la buse par des gouttelettes d'encres. Un tel phénomène risque d'avoir un impact sur le flux sortant de l'aérosol et donc sur la quantité de matière déposée.

A l'inverse, les anneaux sont imprimés avec la même mise en œuvre que des composants hyperfréquences classiques. Néanmoins, les facteurs de qualité des pics de résonnance sont beaucoup plus faibles, ce qui réduit la précision d'extraction de la conductivité. Elle est adaptée pour avoir un aperçu de la conductivité effective d'une encre à base de nanoparticules métalliques. Il faut cependant faire en sorte que l'épaisseur de métal soit supérieure à trois fois la profondeur de peau sur toute la bande de fréquence afin de pouvoir extraire les valeurs de la conductivité dans de bonnes conditions.

En conclusion, à l'heure actuelle l'utilisation de l'AJP est intéressante pour la réalisation de composants hyperfréquences imprimées à l'aide de l'encre à base d'argent que nous avons caractérisée.

Les autres encres à base de nanoparticules métalliques tel que l'or, le platine ou encore le cuivre sont plus difficiles de mise en œuvre pour des résultats et performances à priori inférieures à l'encre à base d'argent. Dans le cas où il est vraiment nécessaire de travailler avec ces matériaux, il faudra effectuer un gros travail pour soit choisir une encre optimisée pour l'AJP et l'impression de composants hyperfréquences dans la bande des fréquences millimétriques, soit optimiser la composition des encres en laboratoire.

L'impression de polyimide récemment mise en œuvre à la fin de ce travail de thèse n'est pas assez mature pour nous permettre de réaliser avec une grande précision des matériaux en multicouches et multimatériaux. La méthode par étapes que nous avons choisie pour réaliser les anneaux résonants sur les substrats de polyimide imprimés est adaptée pour la fabrication de tels composants hyperfréquences mais longue. Cependant nous sommes en mesure de réaliser des composants simples comme des lignes de transmission.

Dans les perspectives de ce travail, il est nécessaire de réaliser la même étude de cuisson au four que pour l'encre à base d'argent. En effet, pour réaliser des composants hyperfréquences complexes, le retrait du polyimide pendant la cuisson doit être mieux maitrisé principalement selon l'axe Z (épaisseurs du dépôt diélectriques).

A partir des résultats obtenus avec l'encre à base d'argent, nous allons tester dans le chapitre suivant la capacité de l'AJP à imprimer sur des substrat 3D ou à formes complexes. Dans le dernier chapitre, nous présenterons des structures multicouches multimatériaux à partir des résultats obtenus avec l'encre à base de polyimide.

Références bibliographiques Chapitre II

[II.1] S. A. Schelkunoff, "Conversion of Maxwell's equations into generalized Telegraphist's equations," in The Bell System Technical Journal, vol. 34, no. 5, pp. 995-1043, Sept. 1955.)

[II.2] S. A. Schelkunoff, "Conversion of Maxwell's equations into generalized Telegraphist's equations," in The Bell System Technical Journal, vol. 34, no. 5, pp. 995-1043, Sept. 1955.

[II.3] C. P. Wen, "Coplanar Waveguide: A Surface Strip Transmission Line Suitable for Nonreciprocal Gyromagnetic Device Applications," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 17, no. 12, pp. 1087-1090, December 1969.

[II.4] Coonrod, John. (2012). Comparing Microstrip and CPW Performance. Microwave Journal. 55. 74-82.

[II.5] D. F. Monà, E. S. Sakomura and D. C. Nascimento, "Microstrip-to-Probe Fed Microstrip Antenna Transition," 2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting, Boston, MA, 2018, pp. 1521-1522.

[II.6] D. M. Elsheikh, H. A. Elsadek, E. A. Abdallah, S. Atteya and W. N. ELmazny, "Rapid detection of blood entero-viruses using microstrip antenna bio-sensor," 2013 European Microwave Conference, Nuremberg, 2013, pp. 878-880..

[II.7] J. Liu, J. Yang and A. U. Zaman, "Study of Dielectric Loss and Conductor Loss among Microstrip, covered Microstrip and inverted Microstrip Gap Waveguide utilizing variational Method in Millimeter Waves," 2018 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Busan, Korea (South), 2018, pp. 1-2..

[II.8] D. M. Pozar, Microwave Engineering, 4th Edition, John Wiley & Sons, 2011

[II.9] P. Rynkiewicz, A.-L. Franc, F. Coccetti, M. Wietstruck, M. Kaynak et G. Prigent, « Filtres intégrés en anneau à 140 GHz » chez XX èmes Journées Nationales Microondes, Saint-Malo, France, Mai 2017.

[II.10] Rainee N. Simons Ph.D., “Coplanar Waveguide Circuits, Components, and Systems”, Copyright © 2001 by John Wiley & Sons, Inc.

[II.11] M. Riaziat, R. Majidi-Ahy and I. -. Feng, "Propagation modes and dispersion characteristics of coplanar waveguides," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 38, no. 3, pp. 245-251, March 1990.

[II.12] Y annick ROELENS, “Etude et caractérisations microondes en basses températures de résonateurs coplanaires supraconducteurs et de transistors en vue de réaliser des dispositifs micro-électroniques », Spécialité : ELECTRONIQUE, sous la direction de Monsieur J.C. CARRU, L'UNIVERSITE DES SCIENCES ET TECHNOLOGIES DE LILLE

[II.13] A. Rashidian, M. T. Aligodarz and D. M. Klymyshyn, "Dielectric characterization of materials using a modified microstrip ring resonator technique," in IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, vol. 19, no. 4, pp. 1392-1399, August 2012.

[II.14] E. Laplanche et al., "Additive manufacturing of low cost and efficient proof of concepts for microwave passive components," in IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 11, no. 14, pp. 1997-2004, 19 11 2017.

[II.15] J. M. Vargas, P. Brown, T. Khan, Y. Hijazi, Y. A. Vlasov and G. L. Larkins, "Superconducting half-wave microwave resonator on YSZ buffered Si [100]," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 11, no. 1, pp. 392-394, March 2001.

[II.16] T. Yang, P. Chi and T. Itoh, "Compact Quarter-Wave Resonator and Its Applications to Miniaturized Diplexer and Triplexer," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 59, no. 2, pp. 260-269, Feb. 2011.

[II.17] K. Tanii and K. Wada, "Wideband Bandpass Filter Composed of Dual-Path Resonators Using Coupled-Line and Transmission Line With Inductive Elements," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 24, no. 1, pp. 14-16, Jan. 2014..

[II.18] J. Zhu and Z. Feng, "Microstrip Interdigital Hairpin Resonator With an Optimal Physical Length," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 16, no. 12, pp. 672-674, Dec. 2006.

[II.19] M. K. Mohd Salleh, M. T. Ali, M. K. Hamzah and G. Prigent, "Series coupled microwave ring resonators," 2011 IEEE International Conference on System Engineering and Technology, Shah Alam, 2011, pp. 125-127.

[II.20] D. Deslandes, M. Bozzi, P. Arcioni and Ke Wu, "Substrate integrated slab waveguide (SISW) for wideband microwave applications," IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest, 2003, Philadelphia, PA, USA, 2003, pp. 1103-1106 vol.2.

[II.21] H. Uchimura, T. Takenoshita and M. Fujii, "Development of a "laminated waveguide"," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, no. 12, pp. 2438-2443, Dec. 1998.

[II.22] M. Ando, J. Hirokawa, T. Yamamoto, A. Akiyama, Y. Kimura and N. Goto, "Novel single-layer waveguides for high-efficiency millimeter-wave arrays," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 46, no. 6, pp. 792-799, June 1998.

[II.23] J. -. Heinola, K. -. Latti and P. Silventoinen, "Dielectric characterization of printed wiring board materials: a comparison of ring and T-resonator based measurement methods," CEIDP '05. 2005 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, 2005., Nashville, TN, USA, 2005, pp. 629-632.

[II.24] D. Rajeswart, A. S. Ranjini and S. Thenkuzhali, "Design and optimization of various coupling micro strip ring resonators," 2017 Third International Conference on Science Technology Engineering & Management (ICONSTEM), Chennai, 2017, pp. 895-899.

[II.25] Hussain ALAAEDDINE, « CONTRIBUTION A LA CARACTERISATION DE MATERIAUX DIELECTRIQUES PAR RESONATEURS SUBMILLIMETRIQUES EN TECHNOLOGIES PLANAIRE ET LTCC», Electronique des Hautes Fréquences, Photonique et systèmes, Thèse dirigée par Olivier TANTOT et Serge VERDEYME, Faculté des Sciences et Techniques de Limoges, ECOLE DOCTORALE : Sciences et Ingénierie pour l'Information, 31 août 2011

[II.26] Guillon, P. and Yves Garault. "Complex permittivity measurement of MIC substrate." (1981).

[II.27] W. Feuray, O. Tantot, E. Sorolla, N. Delhote, " Détermination Non Destructive de la Conductivité Electrique de Dépôts Conducteurs", 14èmes Journées de Caractérisation Microondes et Matériaux (JCMM), mars 2016, Calais, France

[II.28] Kai Chang, Lung-Hwa Hsieh, "Microwave Ring Circuits and Related Structures", 2nd Edition, Wiley Series in Microwave and Optical Engineering, May 2004

[II.29] Gang Zou, H. Gronqvist, P. Starski and J. Liu, "High frequency characteristics of liquid crystal polymer for system in a package application," 2002 Proceedings. 8th International Advanced Packaging Materials Symposium (Cat. No.02TH8617), Stone Mountain, GA, USA, 2002, pp. 337-341.

[II.30] Gang Zou, H. Gronqvist, J. P. Starski and Johan Liu, "Characterization of liquid crystal polymer for high frequency system-in-a-package applications," in IEEE Transactions on Advanced Packaging, vol. 25, no. 4, pp. 503-508, Nov. 2002.

[II.31] J. -. Heinola, P. Silventoinen, K. Latti, M. Kettunen and J. -. Strom, "Determination of dielectric constant and dissipation factor of a printed circuit board material using a microstrip ring resonator structure," 15th International Conference on Microwaves, Radar and Wireless Communications (IEEE Cat. No.04EX824), Warsaw, Poland, 2004, pp. 202-205 Vol.1.

[II.32] "AEROSOL JET 200 SERIES SYSTEMS", Optomec, 02/2016, [en ligne] Consulté sur : https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=11&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiZ9ozlsNLjAhUGJhoKHQzMAJ4QFjAKegQIAhAC&url=https%3A%2F%2Fwww.optomec.com%2Fwpcontent%2Fuploads%2F2014%2F08%2FAJ_200_WEB_0216.pdf&usg=AOvVaw0DJS7r6mUxjFOthlhPJxnA

[II.33] A. A. Gupta, A. Bolduc, S. G. Cloutier and R. Izquierdo, "Aerosol Jet Printing for printed electronics rapid prototyping," 2016 IEEE International Symposium on Circuits and Systems (ISCAS), Montreal, QC, 2016, pp. 866-869.

[II.34] C. Goth, S. Putzo and J. Franke, "Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications," 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Lake Buena Vista, FL, 2011, pp. 1211-1216.

[II.35] M. Abt et al., "Aerosol-Printed Highly Conductive Ag Transmission Lines for Flexible Electronic Devices," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 8, no. 10, pp. 1838-1844, Oct. 2018.

[II.36] Khorramdel, Behnam & Mäntysalo, Matti. (2016). Fabrication and electrical characterization of partially metallized vias fabricated by inkjet. Journal of Micromechanics and Microengineering. 26. 045017. 10.1088/0960-1317/26/4/045017.

[II.37] B. Andò and S. Baglio, "All-Inkjet Printed Strain Sensors," in IEEE Sensors Journal, vol. 13, no. 12, pp. 4874-4879, Dec. 2013.

[II.38] Chaimaa EL HAJJAJI, Julien GEORGE, Souhayl LMANSOURI, Nicolas DELHOTE, Serge VERDEYME, Dominique BAILLARGEAT, Malgorzata PIECHOWIAK, Olivier DURAND, "Optimizing the Conductivity of Ink-Jet Printed Microwave Components on Polymer Substrates by Laser Sintering" EuMW 2019

[II.39] J. A. Qayyum, M. Abt, A. Roch, A. C. Ulusoy and J. Papapolymerou, "Ultra wideband 3D interconnects using aerosol jet printing up to 110 GHz," 2017 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, 2017, pp. 1112-1115.

[II.40] R. Soukup, J. Navratil, J. Reboun and T. Rericha, "A comparison of the interdigital electrodes prepared by aerosol jet printing and lift-off technique," 2015 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), Eger, 2015, pp. 30-35.

[II.41] B. K. Tehrani, J. Bito, B. S. Cook and M. M. Tentzeris, "Fully inkjet-printed multilayer microstrip and T-resonator structures for the RF characterization of printable materials and interconnects," 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014), Tampa, FL, 2014, pp. 1-4.

[II.42] F. Cai, Y. Chang, K. Wang, C. Zhang, B. Wang and J. Papapolymerou, "Low-Loss 3-D Multilayer Transmission Lines and Interconnects Fabricated by Additive Manufacturing Technologies," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 10, pp. 3208-3216, Oct. 2016.

[II.43] F. Cai, Y. Chang, K. Wang, W. T. Khan, S. Pavlidis and J. Papapolymerou, "High resolution aerosol jet printing of D- band printed transmission lines on flexible LCP substrate," 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014), Tampa, FL, 2014, pp. 1-3.
[II.44] F. Cai et al., "Aerosol jet printing for 3-D multilayer passive microwave circuitry," 2014 44th European Microwave Conference, Rome, 2014, pp. 512-515.
[II.45] J. Hoerber, C. Goth, J. Franke and M. Hedges, "Electrical functionalization of thermoplastic materials by Aerosol Jet Printing," 2011 IEEE 13th Electronics Packaging Technology Conference, Singapore, 2011, pp. 813-818.
[II.46] C. Goth, S. Putzo and J. Franke, "Aerosol Jet printing on rapid prototyping materials for fine pitch electronic applications," 2011 IEEE 61st Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Lake Buena Vista, FL, 2011, pp. 1211-1216.
[II.47] Tokusen, [en ligne] Consulté sur: tokusennano.com
[II.48] Merck, [en ligne] Consulté sur: Sigma-Aldrich.com
[II.49] Dowa, [en ligne] Consulté sur: dowa-electronics.com
[II.50] Dupont, [en ligne] Consulté sur: dupont.com
[II.51] Tekra, [en ligne] Consulté sur: tekra.com
[II.52] Bakhishev, T. & Subramanian, V. Journal of Elec Materi (2009) 38: 2720.
[II.53] Cui, Wenjuan & Lu, Wensheng & Zhang, Yakun & Lin, Guanhua & Wei, Tianxin & Jiang, Long. (2010). Gold nanoparticle ink suitable for electric-conductive pattern fabrication using in ink-jet printing technology. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects. 358. 35-41. 10.1016/j.colsurfa.2010.01.023.
[II.54] Wu, Yiliang & Li, Yuning & Liu, Ping & Gardner, Sandra & Ong, Beng. (2006). Studies of Gold Nanoparticles as Precursors to Printed Conductive Features for Thin-Film Transistors. Chemistry of Materials - CHEM MATER. 18. 10.1021/cm0611643.
[II.55] Wang, K. & Stark, John. (2010). Deposition of colloidal gold nanoparticles by fully pulsed-voltage-controlled electrohydrodynamic atomisation. Journal of Nanoparticle Research. 12. 707-711. 10.1007/s11051-009-9825-5.
[II.56] F. Cai, Y. Chang, K. Wang, C. Zhang, B. Wang and J. Papapolymerou, "Low-Loss 3-D Multilayer Transmission Lines and Interconnects Fabricated by Additive Manufacturing Technologies," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 10, pp. 3208-3216, Oct. 2016.
[II.57] M. T. Craton, J. D. Albrecht, P. Chahal and J. Papapolymerou, "A Chip-First Approach to Millimeter-Wave Circuit Packaging," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 29, no. 2, pp. 116-118, Feb. 2019.
[II.58] I. Piekarz, J. Sorocki, M. T. Craton, K. Wincza, S. Gruszczynski and J. Papapolymerou, "Application of Aerosol Jet 3-D Printing With Conductive and Nonconductive Inks for Manufacturing mm-Wave Circuits," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 9, no. 3, pp. 586-595, March 2019.
[II.59] J. A. Qayyum, M. Abt, A. Roch, A. C. Ulusoy and J. Papapolymerou, "Ultra wideband 3D interconnects using aerosol jet printing up to 110 GHz," 2017 12th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC), Nuremberg, 2017, pp. 372-375.
[II.60] M. M. Belhaj, W. Wei, E. Pallecchi, C. Mismer, I. Roch-jeune and H. Happy, "Inkjet printed flexible transmission lines for high frequency applications up to 67 GHz," 2014 9th European Microwave Integrated Circuit Conference, Rome, 2014, pp. 584-587.
[II.61] Y. He et al., "RF characterization of coplanar waveguide (CPW) transmission lines on single-crystalline diamond platform for integrated high power RF electronic systems," 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honolulu, HI, 2017, pp. 517-520.
[II.62] “Aerosol Jet Materials”, Optomec, [en ligne] Consulté sur : https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-materials/
[II.63] « Conductive & Insulating Inks for Printed Electronics », Nanodimension, 2019, [en ligne] Consulté sur : https://www.nano-di.com/materials#polymer
[II.64] M. Akbari, L. Sydänheimo, J. Juuti and L. Ukkonen, "Flash reduction of inkjet printed graphene oxide on flexible substrates for electronic applications," 2015 IEEE 15th International Conference on Nanotechnology (IEEE-NANO), Rome, 2015, pp. 93-96.
[II.65] L. T. Le, M. H. Ervin, H. Qiu, B. E. Fuchs, J. Zunino and W. Y. Lee, "Inkjet-printed graphene for flexible micro-supercapacitors," 2011 11th IEEE International Conference on Nanotechnology, Portland, OR, 2011, pp. 67-71.
[II.66] H. He, M. Akbari, L. Sydänheimo, L. Ukkonen and J. Virkki, "3D-printed graphene and stretchable antennas for wearable RFID applications," 2017 International Symposium on Antennas and Propagation (ISAP), Phuket, 2017, pp. 1-2.
[II.67] W. Jiang, Y. Jin, T. Wang, Y. Huang and G. Wang, "3-D printed X-band Yagi-Uda antenna," 2018 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Anaheim, CA, 2018, pp. 290-292.

[II.68] V. Fakhfouri et al., "Inkjet printing of SU-8 for polymer-based MEMS a case study for microlenses," 2008 IEEE 21st International Conference on Micro Electro Mechanical Systems, Wuhan, 2008, pp. 407-410.

[II.69] H. Kao and C. Cho, "Fully Inkjet-Printed Three-Dimensional Bandpass Filter on Liquid Crystal Polymer Substrate," 2018 IEEE 68th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), San Diego, CA, 2018, pp. 2218-2222.

[II.70] He, Yuxiao, Michael Thomas Craton, Premjeet Chahal and John Papapolymerou. “A Bi-material Fully Aerosol Jet printed W-band Quasi-Yagi-Uda Antenna.” 2018 11th Global Symposium on Millimeter Waves (GSMM) (2018): 1-3.

[II.71] “Machines de bonding Manuelles”, antycip, , [en ligne] Consulté sur : http://www.antycip.com/machines_de_bonding_manuelles_1893_3.html

[II.72] M. T. Craton, J. D. Albrecht, P. Chahal and J. Papapolymerou, "A Chip-First Approach to Millimeter-Wave Circuit Packaging," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 29, no. 2, pp. 116-118, Feb. 2019.

[II.73] DUPONT, “DUPONT™ KAPTON©”, (01/2017). [en ligne] Consulté sur : https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=2&ved=2ahUKEwiRw5_EtbTkAhUNWBoKHSwVB00QFjABegQICRAC&url=https%3A%2F%2Fwww.dupont.com%2Fcontent%2Fdam%2Fdupont%2Fproducts-and-services%2Fmembranes-and-films%2Fpolyimde-films%2Fdocuments%2FDEC-Kapton-summary-of-properties.pdf&usg=AOvVaw0tvrA7Yc4gJmDJhfJ25LIk

Chapitre III. Métallisation sélective d'objets 3D par AJP

Dans le Chapitre II, nous avons déterminé la résolution maximale de l'AJP avec une encre à base d'argent. Il s'avère ainsi possible d'imprimer une ligne de largeur minimum 20 µm et obtenir un espacement entre deux lignes imprimées minimum de 10 µm. Tous ces tests ont été réalisés sur des substrats d'alumine plats et ont fourni des résultats au niveau de l'état de l'art.

En plus de sa forte résolution, l'AJP permet de projeter un faisceau de minuscules gouttelettes d'encre focalisé avec une distance de tir de plusieurs millimètres. Cette capacité débloque la possibilité de faire de l'impression conforme (conformal printing), c'est-à-dire la possibilité d'imprimer des encres sur des objets présentant du relief ou des plans inclinés.

Dans ce chapitre, nous souhaitons tester cette capacité avec l'Aérosol Jet® 200 SERIES SYSTEMS. Plus particulièrement, nous allons quantifier l'impact que peut avoir une impression conforme sur la résolution que l'on obtient lors d'une impression. Comme pour le Chapitre II, nous nous sommes principalement concentrés sur la largeur minimum d'une ligne, l'espacement minimum entre deux lignes imprimées ainsi que les épaisseurs des dépôts métalliques réalisés.

Pour réaliser ces différents tests, nous avons fabriqué des objets en SLA 3D céramique (Annexe 1) de différentes formes. Ce lot de pièces 3D imprimées présentent plusieurs formes de plans inclinés (concave, convexe et droit) de plusieurs angles d'inclinaison différents (de 35 à 65° par pas de 10°) sur lesquels nous allons réaliser nos tests géométriques avec l'encre à base d'argent. Cela va nous permettre de mettre en évidence l'angle d'inclinaison minimum sur lequel nous pouvons imprimer ainsi que l'impact que peut avoir la forme d'un plan incliné sur l'impression réalisée.

Ces différents résultats vont nous permettre de réaliser des lignes de transmission sur des substrats 3D fonctionnant sur la bande des fréquences millimétriques. Leurs performances vont également être comparées à celles issues d'autres travaux de la littérature afin de pouvoir nous positionner face à l'état de l'art.

En plus de pouvoir réaliser des composants fonctionnant dans la bande de fréquences millimétriques, nous pouvons utiliser l'AJP afin de métalliser sélectivement des composants volumiques tel que des filtres. C'est dans cet état d'esprit que nous avons réalisé la deuxième partie de ce chapitre.

Dans le cadre du projet ANR ATOMIQ, nous avons fabriqué en SLA 3D céramique des filtres 4 pôles fonctionnant à 40 GHz. Notre but ici est d'aborder la métallisation de ces composants en visant à effectuer le blindage du filtre et la métallisation des motifs d'excitation planaires en une seule étape technologique. L'objectif de cette réalisation est d'explorer une voie alternative aux étapes de pulvérisation puis gravure laser appliquées dans [III.1].

La métallisation de ces filtres amène la troisième et dernière partie de ce chapitre : le développement et la mise en œuvre d'une technique de réglage post fabrication de filtre par gravure laser. L'intérêt de cette méthode est de pouvoir traiter la problématique récurrente de ce genre de filtre à savoir le décalage en fréquence de la réponse du filtre ainsi que des couplages entre ses pôles provoqués par les défauts de fabrication.

Les tests des différents motifs de réglage à graver sur les résonateurs et les iris de couplage ont été effectués sur des filtres volumiques 3D et résonateurs fonctionnant à 8 GHz également fabriqués par SLA 3D céramique. Ces filtres et résonateurs utiliseront le mode de résonance $T_{E_{101}}$. Le choix de cette fréquence relativement basse (8 GHz) par rapport aux autres objets de cette thèse a été fait pour les rendre beaucoup plus faciles à manipuler que les filtres du projet ATOMIQ (40 GHz), et ainsi nous permettre de nous focaliser dans un premier temps sur la mise en œuvre et validation expérimentale de la méthode de réglage par laser. Nous présenterons la méthode en elle-même, les différents outils et machine conçus pour réaliser ce projet ainsi que les différents tests et essais réalisés.

III.1. Impressions sur des objets 3D à formes complexes

Aujourd'hui, la métallisation de composants hyperfréquences 3D (par exemple des filtres) peut s'effectuer selon deux philosophies opposées. La première est une méthode de réalisation indirecte dans laquelle le composant est dans un premier temps entièrement métallisé (métallisation chimique [III.2], JetMetal [III.3]) avant d'avoir ses motifs d'excitation gravés par laser ou un autre moyen soustractif. La résolution dépend directement du diamètre du laser par exemple et permet de métalliser sélectivement le composant en deux étapes technologiques.

La seconde est une méthode de réalisation directe dans laquelle la métallisation est réalisée sélectivement. Elle repose en générale sur l'utilisation des technologies additives et permet de métalliser le composant en une seule étape technologique. En plus du blindage métallique, cette méthode de réalisation apporte également la capacité de structurer à la surface du composant des motifs de géométrie libre.

Plusieurs technologies additives sont capables de réaliser des impressions conformes (partie I.1.3). Nous pouvons citer comme exemple des réalisations de lignes de transmission sur des pentes inclinées par jet d'encre en [III.4] et [III.5] ou la métallisation d'objet 3D par nScrypt en [III.6]. Pour l'AJP, ses caractéristiques technologiques lui permettent d'éjecter un nuage de gouttelettes d'encres dans un flux concentré sur plusieurs millimètres de distance de tir et focalisé sur le substrat (I.1.2.1.2).

Dans cette partie du chapitre nous allons principalement chercher à quantifier l'impact que peut avoir une impression conforme sur sa résolution.

Pour ce faire, plusieurs plans inclinés d'angles et de formes différents ont été réalisés à l'aide de la technologie SLA 3D céramique de la société 3D Ceram à Limoges. Nous allons réaliser sur ces substrats les mêmes types de tests géométriques que dans le Chapitre I, à savoir des tests de largeur de lignes et d'espacement entre deux lignes imprimées. Ils nous permettront de relever la résolution atteignable sur ce type de substrat ainsi que l'impact sur celle-ci d'un changement de distance de tir. De plus, nous pourrons également déterminer l'angle minimum que doit avoir la pente inclinée pour que l'on puisse imprimer sans défaut par AJP.

Les différents résultats que l'on va obtenir vont nous permettre de réaliser des lignes de transmission à la surface de pièces 3D. Nous pourrons ainsi quantifier les niveaux de performances et les comparer à l'état de l'art pour nous positionner par rapport à lui.

Cette étude a été démarrée en tout début de ce travail de thèse, et comme nous l'avons présenté dans la partie II.3.1.3, nous ne maitrisions pas pleinement à ce moment-là la mise

en œuvre de l'impression de l'encre à base d'argent. Nous avons donc utilisé une méthode de frittage non optimisée pour nos dépôts d'argent nous permettant d'obtenir une conductivité effective de 20 S/µm (méthode de frittage F_{300} dans la partie II.3.2.2.1) qui reste malgré tout satisfaisante.

III.1.1. Effets d'une impression conforme par AJP sur la résolution

Contrairement aux tests réalisés dans le Chapitre II, ici nous ne cherchons pas à obtenir la meilleure résolution possible mais plutôt de déterminer l'impact que peut avoir une variation de distance de tir sur l'impression.

A ce titre nous avons fabriqué à l'aide de la technologie SLA 3D céramique de 3D Ceram (à Limoges), plusieurs substrats comportant des pentes de différentes formes selon des angles d'inclinaison différents. L'ensemble des modèles de ces substrats est visible dans la Figure III-1.

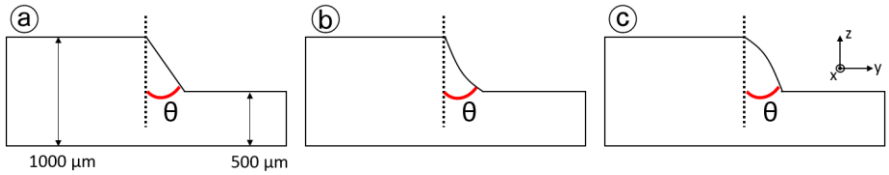


Figure III-1: Vues en coupe des différents plans inclinés imprimés en SLA 3D céramique d'inclinaison d'angle θ variable :
ⓐ plan incliné plat ; ⓑ plan incliné concave ; ⓒ plan incliné convexe

Dans la Figure III-1, nous avons le modèle des trois types de plans inclinés (ⓐ le plan incliné droit, ⓑ le plan incliné concave et ⓒ le plan incliné convexe) que nous avons fabriqués.

Chacune de ces trois pièces tests réalisée dispose de quatre pentes dont l'angle d'inclinaison θ varie entre 35 et 65° par pas de 10°. Chacun de ces plans inclinés se présente sous forme de marche de 500 µm de hauteur.

Ces objets fabriqués en SLA 3D céramique sont issus du projet ATOMIQ. Ils ont une permittivité ε_r=9.94 et une tangente de pertes tanδ=6.10^{-4} à 40GHz. La rugosité moyenne relevée sur ces objets céramiques est de 0.83 +/- 0.2 µm, soit une rugosité plus forte que celle des substrats d'alumine utilisés dans le Chapitre II.

Les tests géométriques que nous avons choisi de réaliser sur ces objets céramiques sont présentés dans la Figure III-2.

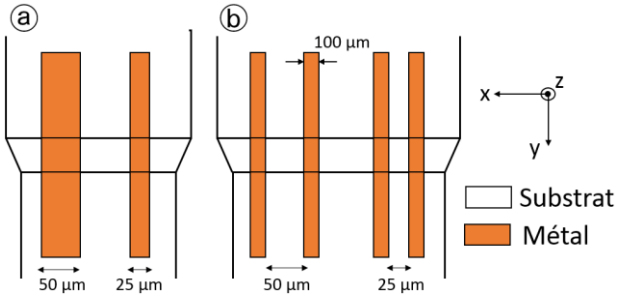


Figure III-2: Vue de dessus des tests géométriques d'impression : ⓐ Test de largeur ; ⓑ Test d'espacement entre lignes

Dans la Figure III-2, les motifs ⓐ vont nous permettre de quantifier l'impact de l'impression conforme sur une ligne imprimée de largeur théorique 50 et 25 µm. De la même manière, les

motifs ⓑ vont nous permettent de quantifier cet impact sur l'espacement entre deux impressions de lignes.

Nous avons imprimé ces motifs géométriques sur tous nos types de plans inclinés afin de mettre en évidence deux points importants :

- Déterminer l'impact que peut avoir le passage de la marche de 500 µm de hauteur au cours de l'impression de ces différents motifs géométriques,
- Déterminer l'angle minimum que doit avoir un plan incliné pour pourvoir imprimer correctement des motifs métalliques. Les différents types de pente peuvent également nous permettre de mettre en évidence des formes sur lesquelles il est plus simple d'imprimer que d'autres.

Tous les motifs ont été imprimés en 1 et 2 couches afin de déterminer comment se comporte une impression multicouches sur un plan incliné. Plusieurs exemples d'impression de ces motifs géométriques sont donnés dans la Figure III-3.

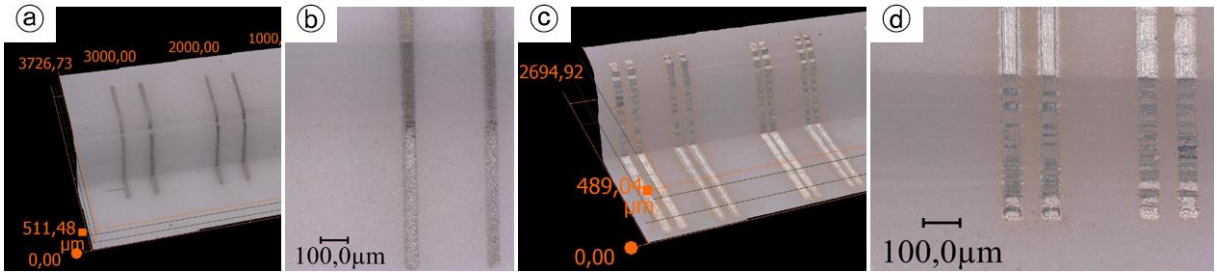


Figure III-3: Exemple de motifs géométriques imprimés sur un plan incliné : ⓐ Vue 3D des tests de largeur ; ⓑ Vue du dessus des tests de largeur ; ⓒ Vue 3D des tests d'espacement entre lignes ; ⓓ Vue du dessus des tests d'espacement entre lignes

Les Figure III-3 ⓐ et ⓒ montrent une vue 3D de l'impression de ces motifs géométriques sur un plan incliné imprimé en céramique. De droite à gauche les impressions sont en 1 et 2 couches d'encre à base d'argent. Les lignes imprimées dans la Figure III-3 ⓒ font 50 µm de largeur et ont été imprimées à l'aide d'une largeur de trait de 25 µm et d'un paramètre de recouvrement de 50%.

Les Figure III-3 ⓑ et ⓓ montrent ces mêmes impressions vues de dessus. En observant ces images, nous pouvons constater que l'impact de la différence de hauteur de la pièce céramique 3D sur les dimensions des différents motifs est faible. La variation dimensionnelle qu'elle implique semble plus faible que la tolérance de fabrication de l'AJP pour ce type d'objet imprimé.

Pour être plus précis dans nos analyses, nous avons utilisé un microscope numérique Keyence afin de mesurer les différentes dimensions. Les résultats sont donnés dans la Figure III-4.

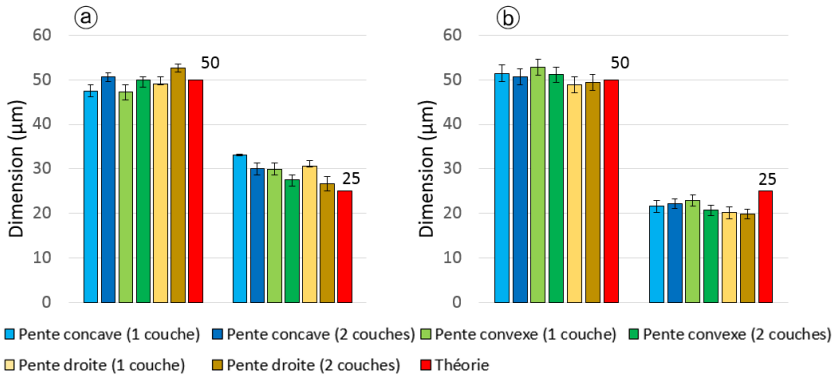


Figure III-4: Résolution des impressions sur les plans inclinés : ⓐ Largeur de lignes imprimées ; ⓑ Espacement entre deux lignes imprimées

Toutes les mesures de dimensions ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence et sont données en Annexe 3.

Dans la partie II.3.3.1, nous avons établi que la tolérance de fabrication pour imprimer l'encre à base d'argent sur des substrats plats est inférieure à 5µm.

Nous observons dans les courbes ⓐ et ⓑ de la Figure III-4 que les lignes de largeur théorique 50 µm sont imprimées avec une bonne précision. En effet, les dimensions de nos motifs sont très proches des valeurs recherchées théoriques et sur l'ensemble des impressions nous retrouvons une tolérance de fabrication d'environ 5 µm. Toutefois, pour les valeurs théoriques de 25 µm des deux autres motifs géométriques, nous constatons au contraire que la tolérance de fabrication augmente. Ce résultat n'est pas lié à la marche mais plutôt au substrat utilisé pour ces essais.

En effet, les substrats plans utilisés dans le Chapitre II ont une rugosité de surface de 0.15 +/- 0.1 µm, alors que pour les objets imprimés par SLA 3D céramique nous avons une rugosité de surface de 0.83 +/- 0.2 µm.

Il semblerait que nous perdions en résolution et précision d'impression lorsque l'on travaille avec des substrats ayant une forte rugosité de surface, plus particulièrement lorsque celle-ci est proche de l'épaisseur de métal imprimé (1 à 2 µm ici typiquement).

Ces résultats nous montrent que l'AJP est capable de réaliser des impressions conformes sans augmenter les tolérances de fabrication pour des structures simples (comme par exemple de lignes de transmission).

Ces résultats nous permettent ainsi de valider notre premier point, à savoir la capacité à réaliser des impressions conformes sans impact négatif sur la résolution des impressions réalisées.

Maintenant, pour déterminer l'inclinaison minimum du plan incliné nécessaire pour réaliser une impression correcte, nous avons observé au microscope Keyence chacune de ces pentes afin de pouvoir détecter d'éventuels défauts de métallisation. Dans la Figure III-5 nous avons un exemplaire de chaque motif imprimé sur des inclinaisons de pente entre 35° et 65°.

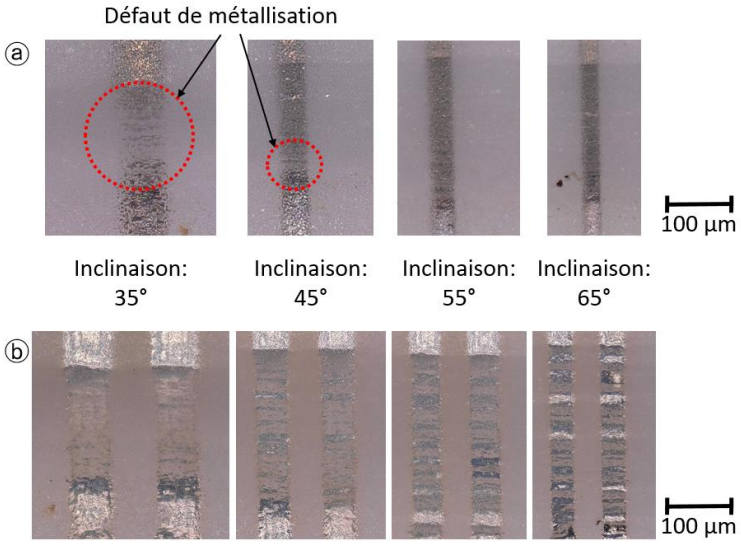


Figure III-5: Zoom sur les impressions 3D : ⓐ Largeur imprimée ; ⓑ Espacement entre deux lignes imprimées

Dans la Figure III-5 ⓐ, nous pouvons constater que pour une inclinaison de pente de 35°, lorsque nous déposons un seul trait de matière celui-ci présente des coupures aléatoires non voulues. Pour 45°, nous pouvons également observer légèrement la même chose vers le bas de la pente. En revanche, pour des angles supérieurs à 45° nous n'observons aucun problème au niveau du recouvrement de l'encre sur la pente. De manière générale, nous avons logiquement remarqué que les coupures observées sont moins importantes lorsque l'on imprime une ligne en 2 couches.

Dans la Figure III-5 ⓑ, nous pouvons constater que le paramètre de recouvrement de 50% permet d'éviter l'apparition de coupures lors de l'impression sur un plan incliné.

En regardant plus précisément et en comparant ces impressions avec celles réalisées dans le Chapitre II, nous avons l'impression que l'épaisseur de métallisation est bien plus faible. Dans la Figure III-6 nous avons comparé deux impressions par AJP réalisées pour l'une sur un substrat lisse d'alumine (0.15 +/- 0.1 µm, image ⓐ) et sur un substrat rugueux d'alumine (0.83 +/- 0.2 µm, image ⓑ).

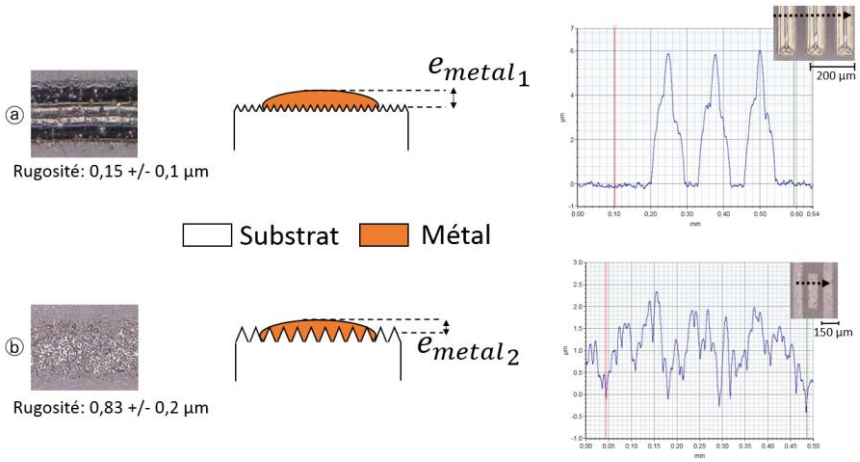


Figure III-6: Effet de la rugosité de surface sur l'épaisseur d'encre déposée par AJP : ⓐ Faible rugosité avec l'épaisseur de métal e_{metal_1} ; ⓑ Forte rugosité avec l'épaisseur de métal e_{metal_2}

Quand nous observons la Figure III-6, nous pouvons constater que l'épaisseur effective d'encre mesurée est plus élevée sur l'impression ⓐ que sur l'impression ⓑ. Pour un substrat à forte rugosité, l'encre déposée va couler dans les imperfections de surface impliquant de ce fait une épaisseur effective plus faible que sur un substrat lisse, et une couche métallique manquant d'homogénéité.

Dans notre cas de figure, si e_{metal_1} et e_{metal_2} sont respectivment les épaisseurs effectives des dépôts métallique sur les substrats lisse et rugueux, nous pouvons alors noter l'inéquation suivante : $e_{metal_1} \geq e_{metal_2}$. L'épaisseur effective de métal e_{metal_2} étant très faible (estimée au moins à 1 µm), nous avons eu des difficultés à la mesurer au profilomètre. Ce manque de contrôle sur l'épaisseur d'encre à base d'argent déposée peut impliquer l'apparition de pertes supplémentaires liées donc directement à la rugosité du support.

A partir de nos observations et analyses, nous pouvons conclure que l'Aérosol Jet® 200 SERIES SYSTEMS que nous utilisons avec le CTTC est capable d'effectuer des impressions sur des objets 3D. Nous n'avons pas relevé de tolérances de fabrication supplémentaires à prendre en compte lié au passage de la marche imprimée en SLA 3D céramique. Pour correctement métalliser un plan incliné, il est préférable de favoriser les inclinaisons de pente de 45° ou plus afin de limiter l'apparition de coupures dans la métallisation.

Toutefois ce type d'objets 3D étant de manière générale rugueux, nous conseillons d'imprimer les couches métalliques au moins en 2 couches afin d'obtenir après frittage une épaisseur effective suffisante. Il faut prendre en compte que chaque substrat demande de mettre en place une mise en œuvre de paramètres d'impression spécifiques. Cela implique d'analyser ces différents résultats non pas comme des données absolues mais obtenues pour un type de substrat particulier.

III.1.2. Réalisation et mesure de lignes de transmissions 3D

A partir des informations obtenues dans la partie III.1.1 sur les impressions conformes par AJP, nous avons réalisé des lignes de transmission coplanaires CPW sur un substrat alumine comportant de multiples formes 3D. Nous souhaitons tester la capacité de l'AJP à réaliser des composants hyperfréquences sur ces substrats et comparer leurs performances au niveau de l'état de l'art actuel.

III.1.2.1. Présentations des substrats et composants imprimés

Nous avons fabriqué les substrats à formes 3D par la technologie SLA 3D céramique de la société 3D Ceram, de la même manière que dans la partie III.1.1. L'alumine utilisée est issue du projet ATOMIQ et dispose des caractéristiques électriques suivantes : permittivité ε_r à 9.94 et la tangente de pertes tanδ à 6.10^{-4} à 40GHz.

Les formes 3D retenues comme support d'impression de ces lignes sont des demi-sphères, des crêtes et des plans inclinés. La Figure III-7 présente les différents supports d'impression de nos lignes de transmission.

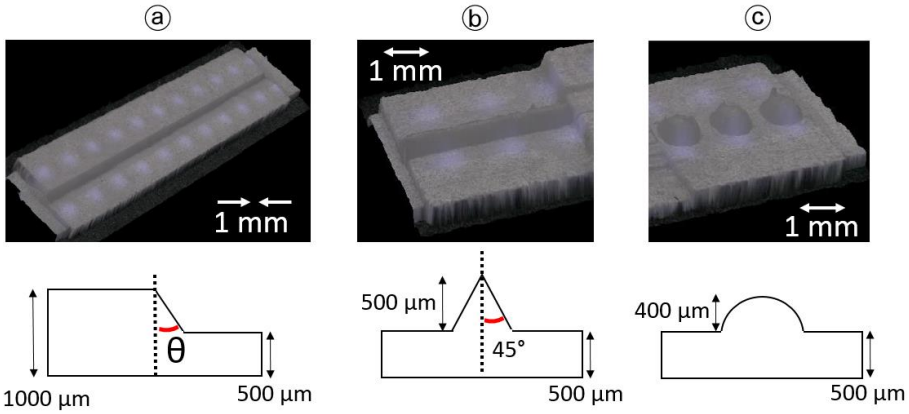


Figure III-7: Formes 3D fabriquées en SLA céramique 3D : ⓐ Plan incliné ; ⓑ Forme de crête ; ⓒ Demi-sphères

Dans la Figure III-7 ⓐ, nous avons le même objet en céramique que dans la partie III.1. Les plans inclinés sont de forme plate, concave et convexe dont les inclinaisons sont de 55° et 65°. Dans la Figure III-7 ⓑ, la base de la crête fait 1.6 mm de large et 500 µm de hauteur. Son arête présente un profil arrondi due à sa fabrication par SLA. Lors des étapes de polymérisation puis de cuisson, cette technologie a une tendance naturelle à légèrement arrondir les arêtes vives comme celles-ci.

Pour finir dans la Figure III-7 ⓒ, la demi-sphère conçue a un rayon de 500 µm et « pénètre » de 100 µm dans l'alumine afin de ne pas devoir imprimer sur des flancs trop droits. La rugosité moyenne relevée sur ces objets en céramique est de 1.09 +/- 0.3 µm.

Nous avons imprimé des lignes de transmissions coplanaires CPW sur l'ensemble des formes 3D présentées dans la Figure III-7 avec l'encre à base d'argent. Les dépôts ont été frittés à 300 °C pendant 1h (méthode de frittage F_{300} dans la partie II.3.2.2.1). Des exemples de ces impressions sont visibles dans la Figure III-8.

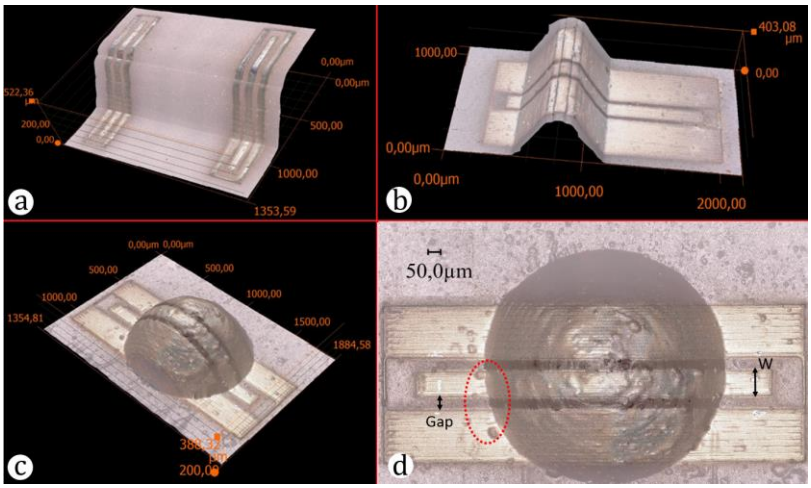


Figure III-8: Exemple de lignes de transmission imprimées sur des substrats alumine 3D et relevés profilométriques: ⓐ CPW sur un plan incliné ; ⓑ CPW sur une crête ; ⓒ CPW sur une demi-sphère ; ⓓ Vue du dessus de la CPW sur la demi-sphère

Dans la Figure III-8, nous avons respectivement un exemple de ligne de transmission coplanaire CPW imprimée sur un plan incliné (ⓐ), sur une crête (ⓑ) et enfin sur une demi-sphère (ⓒ) en alumine imprimée par SLA. Sur la Figure III-8 ⓓ, cette dernière ligne de

transmission est vue de dessus. Les bulles que nous pouvons observer sur la surface de la métallisation sont due à l'état de surface du substrat d'alumine et non pas à l'étape de frittage.

Les longueurs de ces lignes de transmission sont de 1 mm pour celles imprimées sur les plans inclinés et 1.8 mm pour celles imprimées sur la demi-sphère et sur la crête.

Nous avons utilisé un microscope numérique Keyence afin de pouvoir mesurer les différentes dimensions des lignes de transmission imprimées. Les résultats sont donnés dans la Figure III-9.

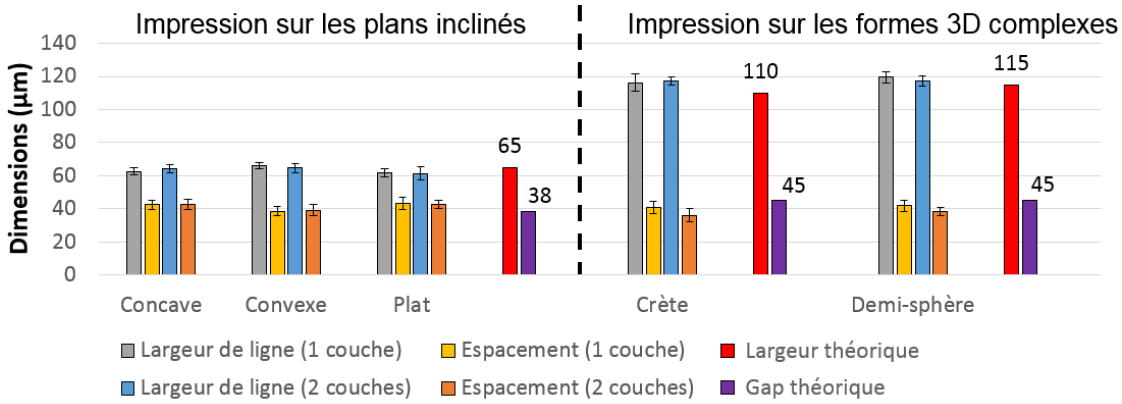


Figure III-9: Dimensions mesurées des lignes de transmissions coplanaires 3D

Toutes les mesures de dimensions ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence et sont données en Annexe 3.

Dans la Figure III-9, nous avons classé les impressions réalisées en argent dans deux groupes : les impressions réalisées sur des plans inclinés et les impressions réalisées sur des substrats 3D à formes complexes.

Pour l'ensemble de ces impressions, nous sommes proches des valeurs théoriques attendues et les différentes variations dans les dimensions correspondent aux tolérances de fabrication par AJP observées précédemment. Les impédances caractéristiques des lignes de transmission CPW sur les plans inclinés et les formes complexes en demi-sphère et en crête sont en conséquence comprises entre 55 Ω et 45 Ω.

L'épaisseur moyenne des lignes centrales de ces lignes coplanaires a été mesurée à l'aide d'un profilomètre Dektak. Pour les plans inclinés concave, convexe et plat les épaisseurs moyennes mesurées sont respectivement 1.72 +/- 0.36 µm, 2.01 +/- 0.36 µm et 1.01 +/- 0.44 µm pour 1 couche d'argent déposée. Pour 2 couches, nous avons respectivement 5.23 +/- 1.95 µm, 5.92 +/- 0.64 µm et 3.87 +/- 1.06 µm.

Toutefois nous avons remarqué que, sur l'ensemble de ces impressions les épaisseurs des plans de masse flottants latéraux sont plus importantes que celles des lignes centrales. Plus précisément pour les plans inclinés concave, convexe et plat nous avons respectivement 3.49 +/- 1.23 µm, 4.2 +/- 0.54 µm et 2.31 +/- 0.6 µm. Pour 2 couchées déposées nous avons respectivement 9.08 +/- 2.29 µm, 9.54 +/- 1.74 µm et 6.04 +/- 0.91 µm.

Ce décalage est dû à une erreur de stratégie d'impression dans laquelle la buse est passée deux fois plus sur les plans de masse que sur la ligne de transmission. Nous nous retrouvons donc dans le même cas de figure que dans la Figure III-10 ⓑ.

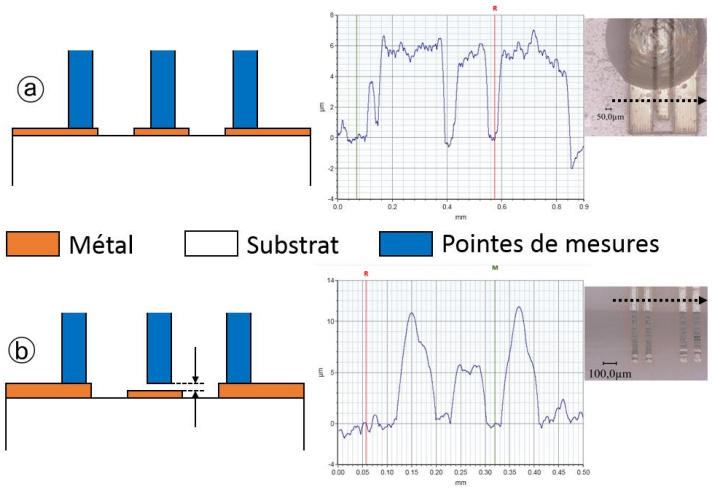


Figure III-10: Vue schématique des mesures sous pointes des lignes de transmission réalisées sur un substrat 3D : ⓐ Bonne stratégie d'impression (demi-sphère, crête) ; ⓑ Erreur de stratégie d'impression (tous les plans inclinés)

Pour les lignes centrales imprimées sur la crête nous avons pour 1 et 2 couches respectivement 2.23 +/- 0.27 µm et 3.92 +/- 0.78 µm d'épaisseur. Pour celles imprimées sur la demi-sphère nous avons pour 2 couches 5.68 +/- 0.64 µm. L'impression en 1 couche s'étant décollée nous n'avons pas pu mesurer son épaisseur. Nous n'avons relevé aucun problème d'impression particulier pour la réalisation de ces lignes de transmission, nous sommes donc dans le même cas de figure que dans la Figure III-10 ⓐ.

D'après la Figure II-25 de la partie II.3.2.2.1 de ce travail de thèse et pour une conductivité proche de 20 S/µm, nous sommes inférieurs à trois fois la profondeur de peau sur la bande de fréquence [10 MHz ; 40 GHz] pour l'ensemble des impressions en 1 couche d'argent. Cela implique que nous risquons d'avoir des pertes métalliques supplémentaires sur cette bande de fréquence. En revanche, pour 2 couches déposées, les épaisseurs de métallisation sont suffisantes.

De plus pour l'ensemble des dispositifs imprimés, les différentes mesures d'épaisseur ont été effectuées sur les parties plates des substrats. En d'autres termes nous n'avons pas été en mesure d'évaluer avec notre matériel de mesure les épaisseurs des dépôts sur les surfaces 3D. Nous pouvons toutefois évaluer la métallisation visuellement en comparant la métallisation des plans 2D et 3D afin de déterminer si elle est équivalente ou non.

Si nous regardons attentivement la Figure III-5, il nous semble que l'épaisseur finale obtenue sur les plans inclinés est plus faible que pour celle obtenue sur un substrat plat. Cet effet est cependant atténué lorsque l'on observe la ligne coplanaire imprimée sur la demi-sphère dans la Figure III-8 ⓓ. En l'absence de mesures précises, nous ne pouvons que constater visuellement au cas par cas.

III.1.2.2. Mesure des lignes de transmission réalisées sur substrat 3D

Les lignes coplanaires 3D ont été mesurées sous pointes (pointes ACP de pitch 125 µm) avec un analyseur ZVA de Rohde & Schwarz sur la bande de fréquence [10 MHz ; 67 GHz]. Un exemple de mesures de paramètres S pour chaque type de substrat sur lequel nous avons imprimé nos lignes de transmission coplanaires est donné dans la Figure III-11.

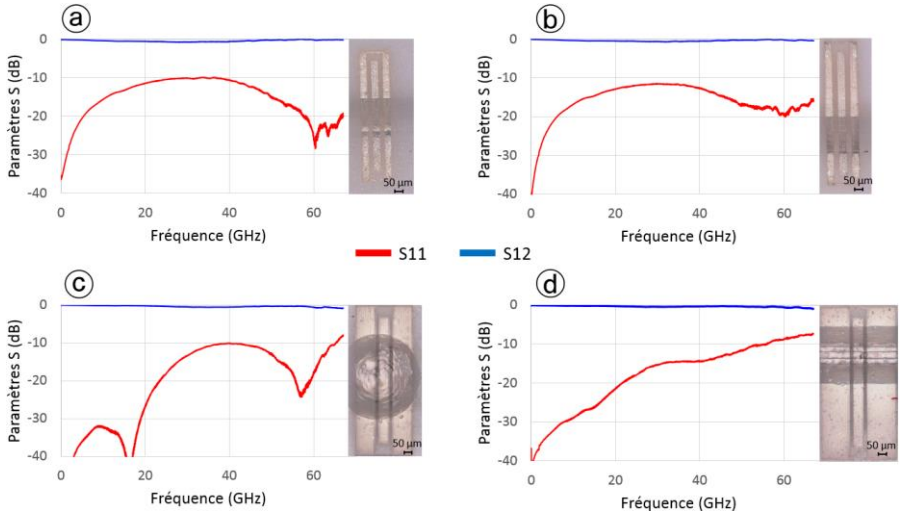


Figure III-11: Exemple de paramètres S mesurés pour chaque type de ligne de transmission coplanaire 3D : ⓐ Plan incliné convexe ; ⓑ Plan incliné plat ; ⓒ Demi-sphère ; ⓓ Crête

Nous avons respectivement dans les Figure III-11 ⓐ, ⓑ, ⓒ et ⓓ un exemple de ligne de transmission coplanaire CPW imprimée sur un plan incliné convexe, un plan incliné droit, sur la demi-sphère et enfin sur la crête. Sur l'ensemble de la bande de fréquence nous avons en général une adaptation au minimum de -10 dB.

Comme expliqué dans la partie III.1.2.1, à cause de la différence d'épaisseur entre la ligne de transmission centrale et les plans de masse latéraux, nous n'avons pas réussi à mesurer une grande partie des lignes de transmissions sur les plans inclinés. De plus, un problème de positionnement de la ligne de transmission imprimée en 1 couche sur la forme complexe en demi-sphère nous a empêché de la mesurer. Les différentes atténuations linéiques que nous avons obtenues sont données dans la Figure III-12.

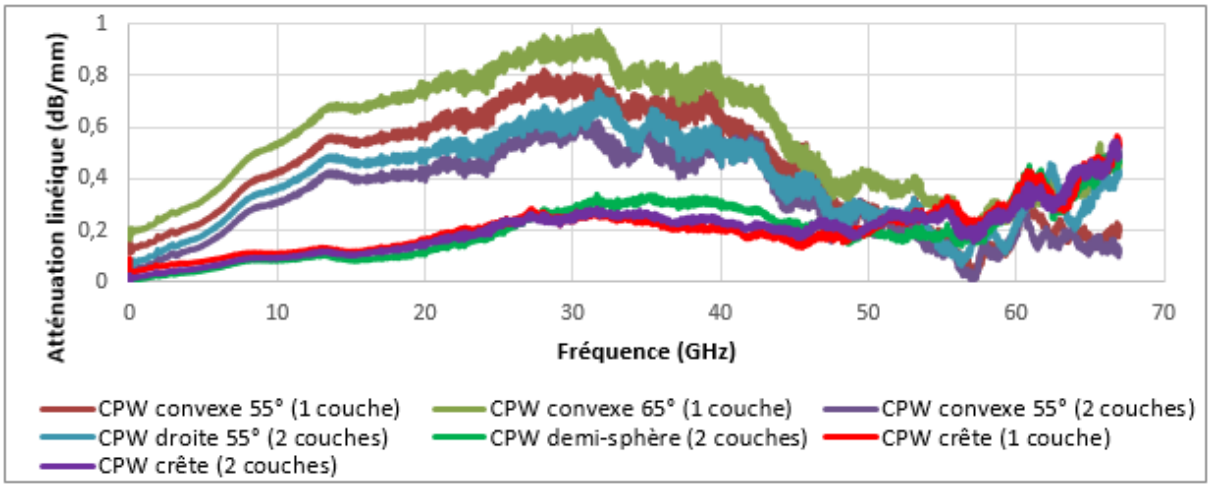


Figure III-12: Atténuation linéique des différentes lignes coplanaires CPW réalisées sur substrat 3D

Les lignes de transmission réalisées sur les substrats à plans inclinés sont celles ayant le plus de pertes sur la bande de fréquences [10 MHz ; 40 GHz]. En plus des pertes liées à l'adaptation de la ligne ainsi que les pertes métalliques liées à la profondeur de peau (partie II.3.2.2.1), nous pensons que la majorité de ces pertes viennent d'un mauvais positionnement des pointes de mesures. Comme dans le cas de la figure de la Figure III-10 ⓑ, la pointe du milieu ne peu pas toucher correctement la ligne de transmission centrale. Même en forçant plus ou moins pour améliorer le contact, la déformation des pointes de mesures amène une dégradation sur les performances des lignes de transmission mesurée. Les atténuations linéiques relevées sont comprises entre 0.45 et 0.95 dB/mm à 40 GHz.

Pour les lignes de transmissions imprimées sur les formes complexes en demi-sphère et en forme de crête nous sommes dans le cas de la Figure III-10 ⓐ. Le positionnement des pointes de mesures étant optimal, nous ne relevons pas de pertes supplémentaires comme dans le cas précédent. Sur la bande de fréquences [10 MHz ; 40 GHz] nous relevons néanmoins les pertes liées à l'adaptation de la ligne de transmission ainsi que les pertes métalliques liées à la profondeur de peau à ces fréquences. Sur l'ensemble des lignes mesurées, nous avons une bonne répétitivité des performances sur les trois lignes de transmission mesurées et leur atténuation linéique est évaluée entre 0.2 et 0.3 dB/mm à 40 GHz.

III.1.3. Conclusion et discussion

Dans cette partie, nous avons cherché à quantifier la capacité de l'AJP à réaliser des impressions conformes avec l'encre à base d'argent. A ce titre, nous avons réalisé une multitude de substrats d'alumine à l'aide de la technologie SLA céramique 3D de la société 3D Ceram à Limoges pour réaliser nos tests. Les différents cas de figure que nous avons pris en compte sont les suivants :

- Nous avons quantifié l'impact d'un changement de distance de tir lors d'une impression sur la tolérance de fabrication,
- Nous avons déterminé l'inclinaison minimum que doit avoir un plan incliné pour pouvoir imprimer dessus en limitant les problèmes de coupure liées à un recouvrement insuffisant lors de l'impression.

Sur l'ensemble des impressions réalisées sur des plans 3D, nous n'avons pas relevé de variations supplémentaires dans les dimensions des motifs imprimés par rapport aux observations précédentes sur substrat 2D. Pour des petits objets à imprimer tels que des lignes de transmission, la tolérance de fabrication reste d'environ 5 µm comme pour les impressions sur les substrats plats.

Nous avons également observé que pour obtenir un bon recouvrement de l'encre sur un plan incliné, nous conseillons de choisir un angle d'inclinaison au minimum de 45° afin de limiter d'éventuelle problèmes de coupures de la ligne imprimée.

D'autre part nous avons mis en évidence le problème récurrent des pièces céramique imprimées par SLA 3D. Leur rugosité de surface moyenne de 1 µm rend la mise en œuvre des impressions par AJP plus compliquée. Etant donné que l'encre à base d'argent coule dans les imperfections de surface, nous avons moins de résolution d'impression contrairement à l'utilisation précédente des substrats plats dont la rugosité de surface est en moyenne de 0.15 µm. Nous conseillons donc sur ce type de substrat d'imprimer des lignes de transmission dont la largeur ne soit pas inférieure à 40 µm avec un paramètre de recouvrement de 50% afin

d'obtenir, d'une part, une épaisseur de métal adéquate de plusieurs micromètres et d'autre part, des dimensions respectées sans risque de court-circuit.

De plus, nous avons relevé plusieurs cas de décollement de la métallisation sur ces pièces 3D en alumine, comme montré dans la Figure III-13. Ce décollement a été observé sur plusieurs structures pour plusieurs méthodes de frittage employées.

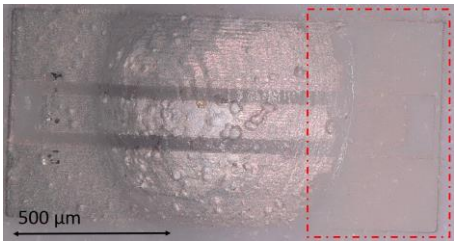


Figure III-13: Exemple de décollement des lignes coplanaires 3D

Le choix du substrat a donc une grande importance lorsque l'on imprime de l'encre à base d'argent avec la technologie AJP. Nous ne sommes cependant pas en mesure d'expliquer précisément pourquoi l'encre se décolle sur ces substrats. Il serait intéressant d'étudier des nouvelles façons de favoriser l'accroche (prétraitement de surface) de l'encre à base d'argent si l'on cherche par la suite à réaliser d'autres composants sur ce type de substrat.

Grace aux différentes informations obtenues sur l'impression conforme avec l'AJP, nous avons imprimé des lignes de transmission CPW sur des substrats 3D céramique comportant des plans inclinés et des formes complexes en demi-sphère et en forme de crête. Nous avons référencé les meilleures valeurs d'atténuation linéiques des lignes de transmission imprimées que nous avons obtenues dans le Tableau VII et nous les avons comparées avec l'état de l'art actuel.

Tableau VII: Comparaison des performances des lignes coplanaires 3D avec l'état de l'art à 40 GHz

	Structure	α (dB/mm)	Substrat
Ce travail	CPW pente	0,45	Alumine 3D
	CPW crête	0,2	
	CPW demi-sphère	0,3	
Chapitre II	CPW	0,22	Alumine 2D
[III.7]	CPW	0,5	SU-8
[III.5]	CPW	≈0,26	Vorex + SU8
[III.8]	MS	0,53	Polyimide
[III.9]	CPWG	≈0,2	LCP+ Vero White

Dans le Tableau VII, nos lignes de transmission imprimées sur les formes complexes en crête et en demi-sphère (partie III.1.2.1) donnent au mieux des atténuations linéiques respectives de 0.2 et 0.3 dB/mm. Ces deux valeurs sont au niveau de l'état de l'art actuel pour l'impression conforme par AJP.

Nous pourrions améliorer nos performances en utilisant la méthode de frittage $F_{200P_{CTTC}}$ (partie II.3.2.2.1) que nous avons mis en place avec le CTTC à la fin de ce travail de thèse. Nous pourrions avec une conductivité effective de dépôt à 45 S/µm obtenir une atténuation linéique calculée à 0.15 dB/mm à 40 GHz.

III.2. Réalisation de filtres hyperfréquences entièrement par technologie additive

Dans cette partie de notre travail, nous avons pour objectif de réaliser des filtres 3D de formes complexes, pour les bandes Q et V, entièrement réalisés en technologie additive. Notre mission s'implique directement dans la suite du projet ATOMIQ. Ce projet avait pour but d'explorer des composants en bande millimétrique réalisés par des technologies de fabrication 3D comme la SLA céramique ou d'autres technologies de fabrication 2.5D ou 3D.

La conception et la réalisation des filtres céramiques 3D ont été traités dans la thèse présentée en [III.10]. Ces filtres sont constitués de 4 résonateurs, ont une fréquence centrale de 40 GHz et une bande passante de 950 MHz. Ils sont constitués de 4 cavités couplées entre elles par des guides évanescents. Les couplages d'entrée et de sortie sont réalisés au moyen de lignes coplanaires court-circuitées (couplage par champ magnétique). En considérant le référentiel proposé dans la Figure III-14, le mode sur lequel le filtre fonctionne est le TM_{110}. Ces filtres ont été fabriqués avec la technologie SLA céramique 3D de la société 3D Ceram.

Dans ce cadre, et grâce aux résultats obtenus dans la partie III.1.1 sur les impressions conformes, nous avons utilisé la technologie AJP pour métalliser sélectivement ces filtres 3D et ainsi explorer une voie alternative aux étapes de pulvérisation puis gravure laser appliquées dans [III.11].

Dans cette partie de ce chapitre, nous allons commencer par présenter les filtres que nous avons fabriqués et utilisés. Nous aborderons ensuite l'étape de métallisation de ces filtres en visant à effectuer le blindage du filtre et la réalisation des motifs d'excitation planaires en une seule étape technologique.

Nous pourrons mettre ainsi en évidence les différentes problématiques que peut impliquer la métallisation conforme d'un tel objet.

III.2.1. Présentation des filtres 4 pôles ATOMIQ

La particularité des filtres issus du projet ATOMIQ est qu'ils sont réalisés avec une alumine spécialement conçue afin de proposer de faibles pertes. En effet l'alumine retenue propose une permittivité ε_r à 9.94 tangentes de pertes tanδ à 6.10^{-4} à 40GHz.

La réponse en fréquence de ces filtres est centrée à 40 GHz avec une bande passante de 950 MHz, des pertes d'insertions de 1.36 dB et une ondulation dans la bande de 0.3 dB La réflexion dans la bande est également toujours inférieure à -18 dB (Figure III-14 ⓓ). Ces caractéristiques doivent assurer à ce genre de filtre un facteur de qualité de l'ordre de 800. Un des filtres fabriqués dans ce projet est visible dans la Figure III-14 ⓐ.

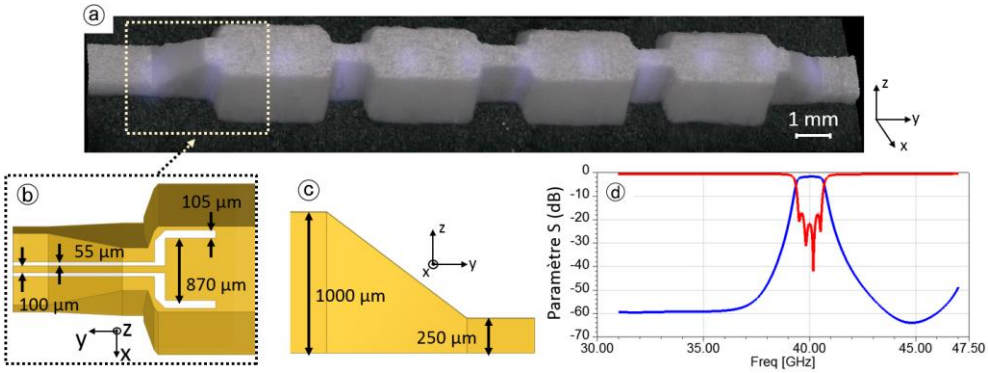


Figure III-14: Filtre 4 pôles ATOMIQ : ⓐ Image 3D du filtre ; ⓑ Détail du motif d'excitation planaire utilisée ; ⓒ Vue en coupe du filtre ; ⓓ Réponse en fréquence du filtre

Toutes les mesures des largeurs des résonateurs et des iris de couplage des filtres ATOMIQ ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence et sont données en Annexe 3.

Dans la Figure III-14 ⓐ, le filtre issu du projet ATOMIQ fait 17 mm de longueur, 2.4 mm de largeur et 1 mm d'épaisseur (Figure III-14 ⓒ). Ce filtre est excité avec deux motifs coplanaires positionnés à chaque extrémité en bas des plans inclinés. Un modèle CAO du motif d'excitation est donné dans la Figure III-14 ⓑ. Sur le bas de la pente, d'une épaisseur de 250 µm, les largeurs théoriques de la ligne coplanaire et des gaps sont respectivement 100 µm et 55 µm. Sur le dessus du filtre, ces dimensions sont respectivement de 870 µm et 105 µm.

Ces pentes, où se situent les motifs d'excitation, ont pour objectif de permettre de monter ce type de filtre à la surface d'un PCB (de manière similaire aux MMIC) et de les connecter par fil de bonding ou par une méthode innovante utilisant la technologie AJP. Les différents plans inclinés sur l'ensemble des filtres ont une inclinaison d'environs 45° afin de faciliter la mise en œuvre de l'AJP sur ces surfaces (partie III.1.1).

Tous les filtres issus du projet ATOMIQ ont été fabriqués sur un cadre comme présenté dans la Figure III-15. Par conséquent ils sont beaucoup plus simples à manipuler lors de la mise en œuvre de l'impression de l'encre à base d'argent avec l'AJP et lors de la phase finale de mesures.

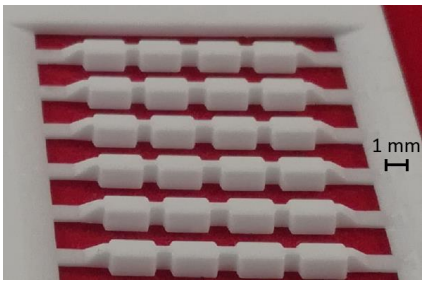


Figure III-15: Cadre de maintien des filtres ATOMIQ

III.2.2. Métallisation et mesure des filtres 4 pôles ATOMIQ

Un premier lot de filtres a été métallisé par AJP avec l'encre à base d'argent. Ce type de composants demande beaucoup de précision non seulement sur la position des motifs d'excitation mais également au niveau de leurs dimensions. Nous avons donc choisi de déposer 1 seule couche d'argent pour favoriser la précision au détriment de l'épaisseur de métallisation dans un premier temps.

Chaque filtre a été métallisé en 2 étapes : la première concerne la métallisation de toute la face du dessus du filtre, des plans inclinés ainsi que des motifs d'excitation en une seule fois. La deuxième concerne la métallisation de la face du dessous du filtre.

Les motifs d'excitation sont visibles dans la Figure III-16.

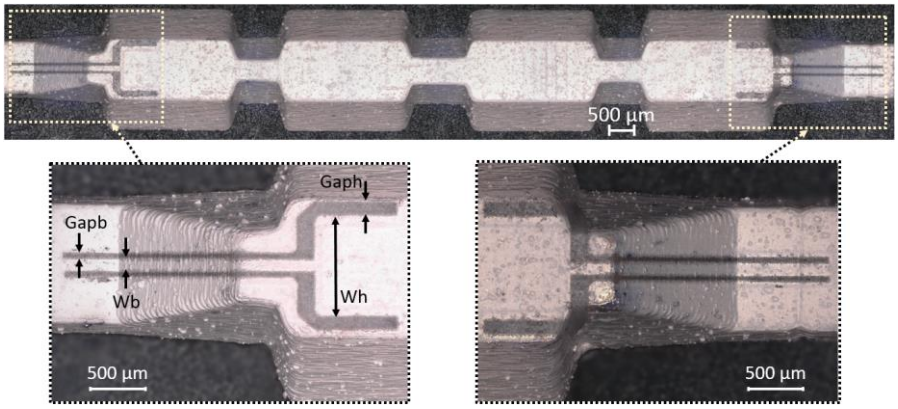


Figure III-16: Métallisation d'un filtre 4 pôle ATOMIQ du premier lot de fabrication

Dans la Figure III-16, nous pouvons observer les accès situés aux extrémités d'un filtre 4 pôles issu du projet ATOMIQ. Pour l'accès à gauche les dimensions mesurées moyennes sont Gapb=41.57 +/- 2.15 µm, Wb=114.2 +/- 2.2 µm, Gaph=121.17 +/- 2.75 µm et Wh=856 .33 +/- 4 µm.

Pour le second accès à droite nous avons respectivement Gapb=43.93 +/- 2.45 µm, Wb=114.23 +/- 2.4 µm, Gaph=120 +/- 2.75 µm et Wh=864.33 +/- 3 µm.

Sur l'ensemble de ces dimensions mesurées, nous avons une tolérance de fabrication d'environs 15 µm par rapport à leur valeur théorique (Figure III-14 ⓑ). Cela implique une désadaptation des motifs coplanaires d'excitation avec une impédance caractéristique de 45 Ω. Comme indiqué dans la partie III.1.1, la forte rugosité de surface de ces filtres mesurée à 1.34 +/- 0.19 µm a un impact sur la précision d'impression par AJP.

Le problème majeur de ce premier lot de filtres métallisés est que les motifs d'excitation sont mal positionnés. En effet, comme nous pouvons le constater dans la Figure III-16, l'un des motifs se situe en partie sur les plans inclinés de l'extrémité du filtre.

Ce décalage est dû au fait que nous avons considéré les dimensions du modèle CAO pour imprimer les deux motifs d'excitation en une seule fois sur le filtre fabriqué. Ces dimensions ne prenant pas en compte les tolérances de fabrication du filtre en lui-même nous avons subi un décalage d'environs 300 µm sur la longueur filtre.

Ce décalage de positionnement et de dimensions induit un mauvais couplage des filtres comme nous pouvons le voir sur les mesures dans la Figure III-17.

Les filtres 4 pôles issus du projet ATOMIQ ont été mesurés sous pointes (pointes ACP de pitch 125 µm) avec un analyseur ZVA de Rohde & Schwarz sur la bande de fréquence

[10 MHz ;67 GHz]. Sur les six filtres métallisés, seulement un seul a fonctionné. La mesure de ses paramètres S est donnée dans la Figure III-17.

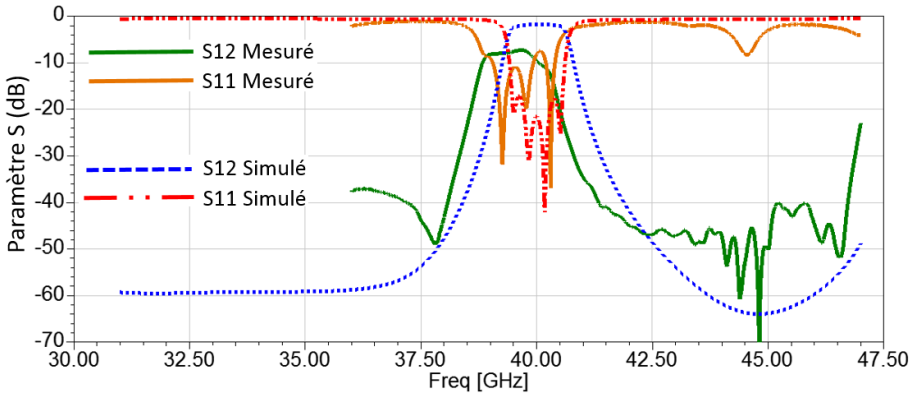


Figure III-17: Comparaison mesure et simulation du filtre 4 pôles ATOMIQ

L'épaisseur moyenne de métallisation du filtre 4 pôle mesuré est évaluée à 1.32 +/- 0.2 µm. Pour une conductivité d'environs 20 S/µm, nous sommes inférieurs à trois fois la profondeur de peau à 40 GHz. Par conséquent nous avons à la fréquence de fonctionnement du filtre des pertes métalliques supplémentaires en plus de celles causées par la désadaptation des excitations coplanaires.

Dans la Figure III-17 nous avons la réponse en fréquence du filtre 4 pôle métallisé en 1 couche d'encre à base d'argent dont la conductivité effective est évaluée ici à 20 S/µm (méthode de frittage F_{300} dans la partie II.3.2.2.1). Le filtre est centré à 39.64 GHz avec une bande passante de 1.63 GHz à -7.63 dB et des pertes d'insertion à -7.38 dB. Cela correspond à un décalage de 0.36 GHz par rapport à la fréquence centrale cible.

Les faibles performances de ce filtre sont principalement dues au mauvais positionnement des motifs d'excitation impliquant de ce fait un couplage trop faible de ces motifs avec le filtre. Pour simplifier la mise en œuvre d'impression de ces filtres, nous avons choisi d'imprimer la face du dessus en plusieurs parties indépendantes. En effet il est plus pertinent de réaliser l'impression par parties et non pas en une seule fois afin de mieux tenir compte des écarts dimensionnels causés par les tolérances de fabrication des filtres.

Nous envisageons ainsi pour la suite d'imprimer les deux accès coplanaires de ces filtres séparément comme montré dans la Figure III-18.

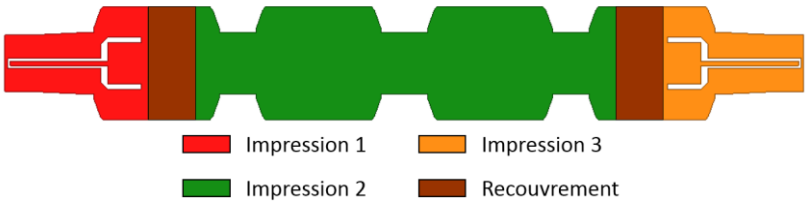


Figure III-18: Nouveau modèle de métallisation des filtres 4 pôles ATOMIQ

Dans la Figure III-18, nous pouvons voir les trois zones du filtre à métalliser indépendamment. Afin de ne pas laisser d'endroits non métallisés sur la surface supérieure du filtre, nous avons pris en compte des zones de recouvrement entre deux impressions. Les surépaisseurs ainsi crées n'auront aucune incidences négatives sur la réponse en fréquence du filtre. Une étape de recuit a lieu après chaque impression

Cette méthode implique d'être très précis sur les dimensions de chaque fichier CAO correspondant à chaque zone d'impression.

Un deuxième lot de filtres a été métallisé par AJP avec l'encre à base d'argent en appliquant la stratégie d'impression présentée dans la Figure III-18. Les motifs d'excitation sont visibles dans la Figure III-16.

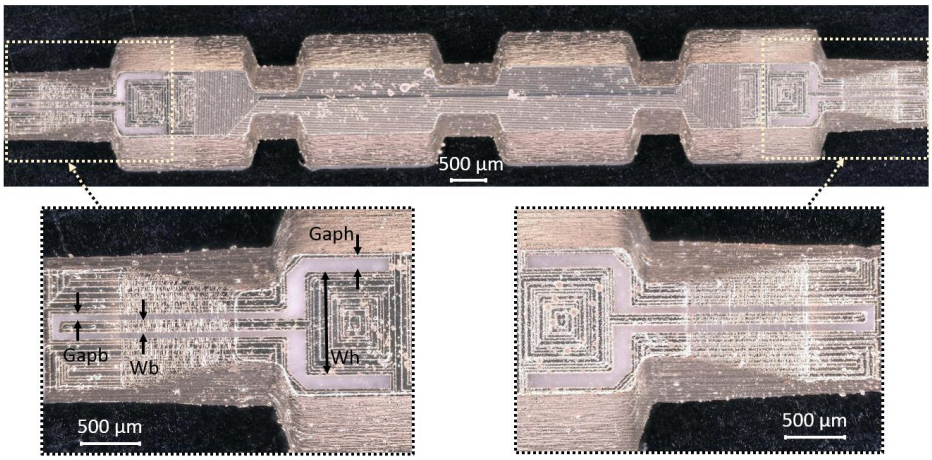


Figure III-19: Métallisation d'un filtre 4 pôle ATOMIQ du deuxième lot de fabrication

Dans la Figure III-19, nous pouvons observer les accès situés aux extrémités d'un filtre 4 pôles issue du projet ATOMIQ. Pour l'accès à gauche les dimensions mesurées moyennes sont Gapb=56.03 +/- 3 µm, Wb=104.83 +/- 4.7 µm, Gaph=110.33 +/- 2 µm et Wh=877.67 +/- 2 µm.

Pour le second accès à droite nous avons respectivement Gapb=34.78 +/- 1.85 µm, Wb=123.77 +/- 2.85 µm, Gaph=101.83 +/- 4.75 µm et Wh=896.67 +/- 0.5 µm.

L'ensemble des dimensions du premier accès sont très proches des valeurs théoriques attendues. En revanche, celles du deuxième accès sont éloignées des valeurs théoriques avec une tolérance de fabrication entre 10 et 20 µm en fonction des dimensions.

Une telle variation de précision entre les deux accès peut s'expliquer par le fait qu'ils ont été réalisés en plusieurs fois. Par conséquent les conditions de d'impression n'étant pas exactement similaires, nous n'avons pas les mêmes résultats et précision. L'impédance caractéristique du motif coplanaire de l'accès 1 est proche de 50 Ω tandis que celle de l'accès 2 est à 41 Ω. Une telle désadaptation sur l'accès 2 va induire des pertes de réflexion supplémentaires sur la réponse en fréquence du filtre.

Ce deuxième lot de fabrication ne nous a pas permis d'obtenir de filtre fonctionnel en raison d'un problème majeur : le décollement de la couche métallique pendant la phase de mesure. Comme nous pouvons le constater sur la Figure III-20, le fait de poser les pointes de mesure sur la surface produit un décollement de la couche métallique si bien que les pointes se retrouvent en contact avec l'alumine. C'est pourquoi toutes nos mesures de paramètres S ont été des échecs sur ce lot de filtres à métalliser par AJP.

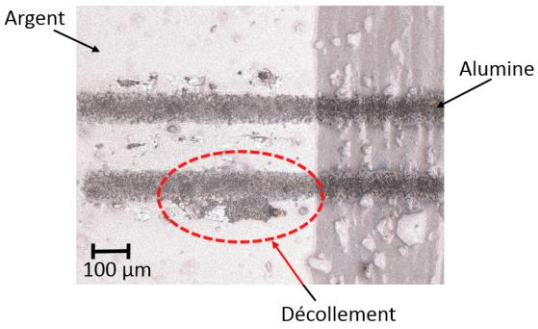


Figure III-20: Exemple de décollement de la métallisation sur un filtre 4 pôles ATOMIQ

Pour la suite il serait intéressant d'augmenter le nombre de couches déposées afin de vérifier si plus de matière peut résister au positionnement des pointes. Néanmoins une telle stratégie d'impression diminuera la précision d'impression des motifs d'excitation sur ces filtres.

Les problèmes de décollement de la couche imprimée observés sont les mêmes que ceux mis en évidence dans la partie III.1.2.1. De ce fait, nous mettons en évidence de la même manière le besoin de rechercher des méthodes permettant d'améliorer l'accroche de l'encre sur ce type de substrat.

III.2.3. Conclusion et discussion sur la métallisation des filtres ATOMIQ

Dans cette partie du chapitre, nous avons cherché à métalliser sélectivement des filtres 4 pôles issues du projet ATOMIQ avec la technologie AJP.

Nous avons utilisé deux stratégies d'impression pour métalliser sélectivement ces composants de dimensions millimétriques.

La première permet d'imprimer chaque face du filtre en une seule fois. Le modèle CAO utilisé pour l'impression comprend toutes les dimensions théoriques simulées. Cependant un tel modèle ne prend pas en compte les différentes tolérances de fabrication du filtre fabriqué à métalliser. Nous avons ainsi observé des décalages dans le positionnement d'un des deux motifs d'excitation. Une telle stratégie d'impression n'est pas adaptée pour des composants aux dimensions millimétriques et présentant des tolérances de fabrications comme celles de la SLA céramique 3D.

Pour pallier ce problème, la deuxième stratégie d'impression requiert de séparer la métallisation du filtre en plusieurs parties : une impression par motif d'excitation puis une dernière impression pour le reste du filtre. Les modèles CAO utilisés pour chaque impression comprennent toutes les dimensions mesurées pour gagner en précision lors du positionnement.

Cette méthode offre l'avantage de pouvoir bien positionner chaque motif lors de l'impression. Néanmoins la caméra de positionnement de l'AJP étant noir et blanc cette étape reste difficile à réaliser étant donné que les couleurs dominantes du filtre en alumine et de la plateforme d'impression sont respectivement blanc et gris. Malgré ce dernier point, cette stratégie est la plus adaptée aux composant de dimensions millimétriques.

Le meilleur filtre obtenu à une réponse en fréquence centré à 39.64 GHz avec une bande passante de 1.63 GHz à -7.63 dB et à ses pertes d'insertion à -12.52 dB. Cela correspond à un décalage de 0.36 GHz par rapport à la fréquence centrale cible recherchée.

Malgré la différence de stratégie employée et le problème de décollement observé, il est difficile de comparer la qualité de ces deux lots de fabrication du fait que chaque lot a été réalisé avec des paramètres d'impression différents. Un exemple d'impression pour les deux lots montrés dans la Figure III-21 permet de mieux observer leurs différences.

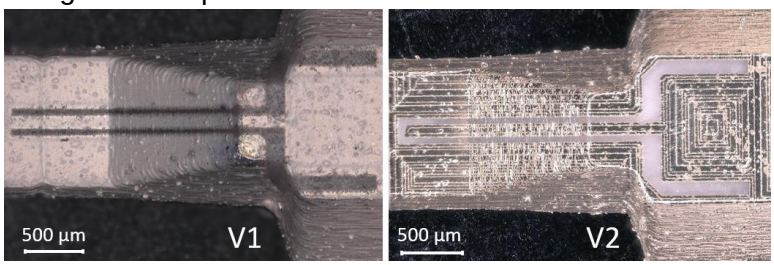


Figure III-21: Différence entre le premier lot (V1) et le deuxième lot (V2)

Dans la Figure III-21 les filtres V1 et V2 ont été respectivement imprimés avec une largeur de trait de 100 µm et 50 µm. De plus certaines parties du filtre V2 ont reçu plusieurs cycles de frittage étant donné la stratégie de fabrication en plusieurs fois utilisée.

Ces différents résultats nous portent à conclure que l'AJP est adaptée pour métalliser tous type de structures plates ou 3D. Cependant, il semblerait que les meilleures conditions expérimentales de mis en œuvre soient obtenues lorsque le substrat est lisse (par exemple l'alumine de rugosité de 0.15 µm de la partie II.3.3). Le problème récurrent des objets imprimés fabriqué par SLA céramique 3D est que la rugosité de surface est plus élevée (de l'ordre du micromètre) impliquant de ce fait une perte de précision lors des impressions.

De tels objets fabriqués par la technologie SLA céramique 3D de la société 3D Ceram à Limoges proposent des niveaux de pertes très faibles (tangente de pertes tanδ à 6.10^{-4} à 40GHz) adaptés aux applications hyperfréquences fonctionnant aux fréquences millimétriques. Néanmoins la faible accroche de l'encre à base d'argent sur ce type de substrat ne permet pas sans l'amélioration de l'adhésion de réaliser plus que de simple prototypes et preuves de concept à l'heure actuelle.

Nous conseillons pour la suite de réaliser la métallisation des différentes parties de ce type de composant en une seule fois et de tout fritter à la fin de l'impression.

La maitrise du procédé de métallisation des filtres issus du projet ATOMIQ peut donner accès à un grand nombre d'applications. Pour ne citer que l'une des plus intéressante dans le cadre de ce travail de thèse, nous souhaiterions à terme utiliser la technologie AJP afin de pouvoir réaliser du réglage de filtres de dimensions millimétriques. Plus particulièrement, la réponse en fréquence des filtres fabriqués est toujours plus ou moins décalée par rapport aux spécifications à cause des tolérances de fabrication. Cet élément met en évidence la nécessité de pouvoir appliquer une stratégie robuste de réglage après fabrication s'avère essentielle.

Ce dernier point nous permet d'introduire la dernière partie de ce chapitre dans laquelle nous allons présenter la méthode de réglage post fabrication de ce type de filtres céramique 3D par gravure laser développée au laboratoire Xlim.

III.3. Correction de la réponse en fréquence des filtres

Les technologies additives sont souvent utilisées afin de pouvoir réaliser des composants hyperfréquences tels que des filtres ou des guides d'ondes en plastique, en métal ou encore en céramique [III.12]. Plus particulièrement pour les filtres, l'ensemble des tolérances de fabrication inhérentes aux technologies additives ou aux techniques de fraisage traditionnelles amènent des décalages dans leur réponse en fréquence, d'autant plus pénalisants que la bande passante relative du filtre est étroite, critère qui concourt à utiliser une technologie volumique.

Afin de compenser ces effets, l'ensemble de ces variations dimensionnelles est évalué et un moyen de les compenser est prévu dès la phase de conception. Il existe plusieurs méthodes en fonction du composant considéré. En [III.13], ce décalage est corrigé en positionnant des vis dans des zones de champs EM (maximum de champ E ou H) et dont leur position optimale est déterminée à l'aide d'un algorithme spécifique. En [III.14], les vis sont remplacées par des plots pouvant être réalisés séparément et dont la taille est déterminée par analyse de la réponse en paramètres S mesurée. Cependant ces vis ou plots de réglage ne sont pas applicables pour des filtres diélectriques pleins tels que ceux présentés en [III.15].

Pour contourner ce problème, il est possible d'utiliser une graveuse laser afin de venir graver précisément la couche métallique de ces filtres. Par exemple, dans les travails présentés en [III.16] et [III.17], des motifs spécifiques ont été gravés afin de créer des zéros de transmission à des fréquences précises permettant ainsi d'ajuster la réponse en fréquence du filtre après sa fabrication. Nous pouvons également citer le travail présenté en [III.18] où la technique d'ablation laser est utilisée afin de corriger la réponse en fréquence d'un filtre supraconducteur en perçant le matériau à des endroits précis et optimisés.

La méthode que nous souhaitons proposer est basée sur le principe issu du travail présenté en [III.19] et sur la théorie des matrices de couplage d'un filtre [III.20]. En nous basant sur la matrice du filtre, nous souhaitons optimiser les formes et dimensions des différents motifs gravés dans le blindage métallique de filtres céramiques 3D afin d'ajuster leur réponse aux spécifications recherchées.

L'intérêt de cette méthode de réglage de filtre par gravure laser est de pouvoir être utilisée avec la technologie AJP. Plus précisément, sa mise en œuvre serait constituée de trois phases. La première consiste à métalliser entièrement le lot de filtres par AJP (comme présenté dans la partie III.2). Les filtres sont ensuite mesurés, le décalage de la réponse fréquentiel des filtres est pris en compte et les différents motifs de corrections sont optimisés. Enfin, ces motifs à graver sont appliqués sur les filtres par gravure laser.

Ici le principal intérêt d'utiliser l'AJP est de faire gagner de la souplesse à la méthode de réglage en donnant la possibilité de démétalliser au laser ou métalliser sélectivement par AJP certaines zones afin de pouvoir affiner au maximum la correction appliquée. Certaines machines comme l'Aérosol Jet HD fabriqué par Optomec [III.21] permettent d'utiliser un laser dans l'enceinte d'impression pour fritter les encres à base de nanoparticules métalliques juste imprimées et pourraient avoir ce rôle correctif.

Comme nous avons pu le constater dans la partie III.2.2, nous n'avons pas réussi à métalliser convenablement un filtre issu du projet ATOMIQ pour pouvoir lui appliquer la méthode de correction post fabrication par gravure laser.

Pour mettre en place cette méthode de correction, nous avons fabriqué avec la technologie SLA céramique 3D des résonateurs et des filtres 2 et 4 pôles. Ces filtres et résonateurs

fonctionnent sur le mode TM_{110} de fréquence centrale 8 GHz pour faciliter dans un premier temps leur manipulation et valider avant tout le protocole de réglage proposé ici dans la continuité des travaux de Khalil Drissi [III.10].

Nous commencerons par présenter dans cette partie les filtres et résonateurs fabriqués ainsi que l'équipement utilisé pour réaliser les gravures. Nous décrirons ensuite les différentes étapes de la méthode de réglage. Nous parlerons de la méthode en elle-même mais également de l'étude réalisée pour choisir les motifs de réglage les plus efficaces à appliquer.

Nous terminerons en présentant les différentes preuves de concept réalisées ainsi que la philosophie de correction que nous souhaitons mettre en évidence dans ce chapitre.

III.3.1. Présentation des composants et de l'équipement de la gravure laser utilisé

III.3.1.1. Présentation des filtres et des résonateurs

Nous avons fabriqué plusieurs filtres et résonateurs à l'aide de la technologie SLA céramique 3D. L'alumine est la même que celle utilisée pour les filtres issus du projet ATOMIQ, la permittivité ε_r est à 9.1 et la tangente de pertes tanδ est à 7.10^{-5} à 40GHz. Un exemple de résonateur et de filtre 2 et 4 pôles sont montrés dans la Figure III-22.

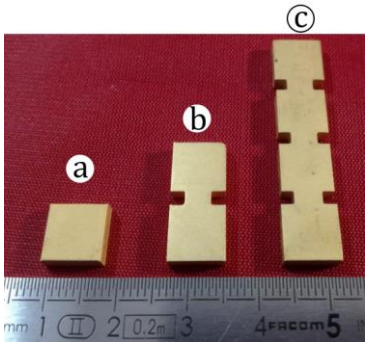


Figure III-22: Pièces fabriquées pour tester la méthode de réglage par gravure laser : ⓐ Résonateur ; ⓑ Filtre 2 pôles ; ⓒ Filtre 4 pôles

L'ensemble des composants ont été optimisés pour fonctionner sur le mode TM_{110} afin d'être plus sensibles à l'effet des motifs de correction appliqués. La Figure III-23 montre les champs E et H de ce mode.

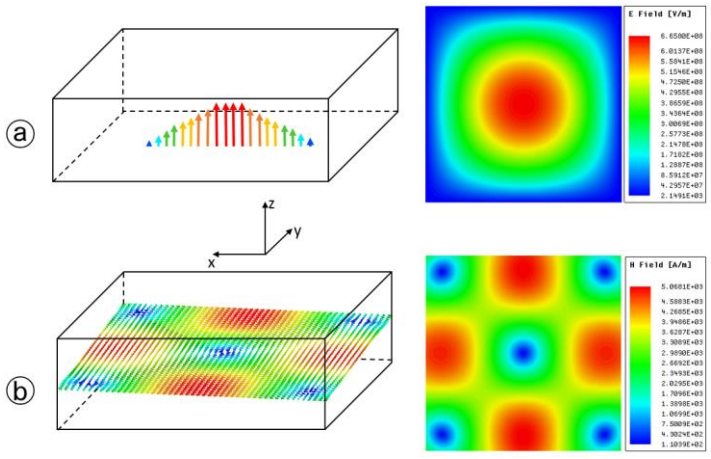


Figure III-23: Mode TM_{110}: ⓐ Champ E ; ⓑ Champ H

Les résonateurs (Figure III-22 ⓐ) ont leur fréquence de résonance théorique centrée à 8 GHz. Ils font 8.65 mm de côté et ont un facteur de qualité théorique d'environ 800. Pour les filtres 2 pôles (Figure III-22 ⓑ), leur réponse en fréquence théorique est centrée à 8 GHz avec une bande passante de 130 MHz à -20 dB. Leur facteur de qualité théorique est d'environ 600. Enfin pour les filtres 4 pôles (Figure III-22 ⓒ), leur réponse en fréquence théorique est centrée à 8 GHz avec une bande passante de 300 MHz à -20 dB. Leur facteur de qualité théorique est d'environ 600. Les simulations de ces résonateurs et filtres sont données dans la Figure III-24.

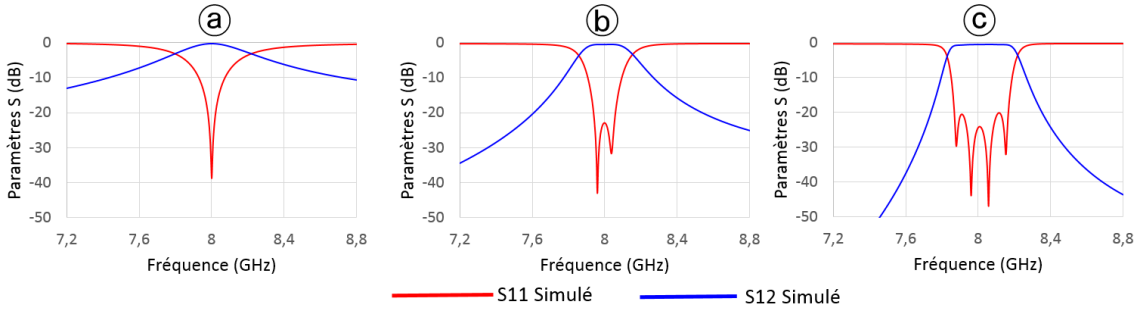


Figure III-24: Simulation des filtres fabriqués pour tester la méthode de réglage par gravure laser : ⓐ Résonateur ; ⓑ Filtre 2 pôles ; ⓒ Filtre 4 pôles

Ces filtres et résonateurs sont métallisés par dépôt autocatalytique de cuivre puis protégés par un flash d'or réalisé par électrolyse. L'épaisseur de métallisation ainsi obtenue est comprise entre 2 et 3 µm pour une conductivité d'environ 10 S/µm (valeur rétrosimulée à partir du facteur de qualité mesuré expérimentalement).

III.3.1.2. Présentation de la graveuse laser Cerinnov

Les différentes gravures des motifs de correction sont réalisées à l'aide de la graveuse laser fabriquée par la société Cerinnov à Limoges. Cette machine à la particularité d'être unique dans le sens où elle a été entièrement personnalisée afin de pouvoir réaliser entièrement la procédure de réglage des filtres. Elle est présentée dans son ensemble dans la Figure III-25.

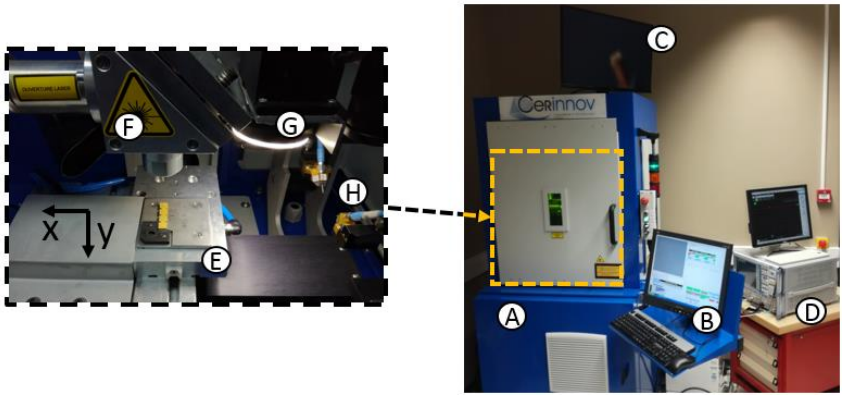


Figure III-25: Graveuse laser Cerinnov

Dans la Figure III-25 nous voyons l'extérieur et l'intérieur de la machine. Sa personnification repose sur l'ajout à l'intérieur d'une station de mesure sous pointes (Figure III-25 Ⓗ). La graveuse dispose d'un laser d'une longueur d'onde de 1064 nm pour un diamètre de faisceau de 50 µm. Nous utilisons principalement le laser en mode pulsé où

chaque pulsation dure 40 ns à une fréquence comprise entre 20 et 100 KHz. Les différents paramètres que l'on peut régler pour une gravure sont les suivants :

- Courant appliqué à la source laser,
- Vitesse de passage du laser,
- Nombre de passes,
- Distance minimum entre deux passages du laser.

Le concept que nous proposons ici consiste à pouvoir mesurer un filtre et d'apporter la correction nécessaire pour ajuster sa réponse en fréquence dans un seul et même environnement matériel. Pour être plus précis, nous voulons éviter de déplacer le filtre entre une station de mesure sous pointes et la graveuse laser afin de limiter les problèmes de réalignement successifs de la pièce de manière à améliorer l'efficacité et la pertinence de la procédure de réglage.

La graveuse Cerinnov est constituée de 8 parties :

- Partie extérieure Ⓐ: la machine de gravure laser au complet. La partie supérieure correspond à l'espace de gravure et de mesure. Deux portes latérales sont présentes afin de pouvoir intervenir librement au sein de l'espace de travail. Un petit tableau de commande près des portes permet d'allumer la lumière dans l'habitacle et le laser. La partie du bas contient toute la partie électronique, l'ordinateur contrôlant le programme de la machine ainsi que l'appareil d'aspiration maintenant la pièce sur son support,
- Partie extérieure Ⓑ : écran présentant l'interface (IHM) de la machine,
- Partie extérieure Ⓒ : écran connecté à une caméra permettant d'aligner les sondes de mesure sous pointes sur le filtre en cours de réglage.
- Partie extérieure Ⓓ : L'analyseur ZVA est placé le plus proche possible de la station sous pointes présente à l'intérieur de la machine.
- Partie intérieure Ⓔ : Cette partie correspond à la plate-forme sur laquelle nous plaçons le filtre à régler. Elle peut se déplacer le long des axes x et y et automatiquement vers les trois positions correspondant aux trois parties suivantes.
- Partie intérieure Ⓕ : Correspond à la première position de la plateforme. Elle regroupe le laser et une caméra afin de gérer l'alignement des motifs à graver sur le filtre. Cette partie peut se déplacer le long de l'axe z, ce qui permet également de graver des objets 3D.
- Partie intérieure Ⓖ : Correspond à la deuxième position de la plateforme. Il s'agit d'une deuxième caméra capable de fournir des images en couleur et avec une meilleure résolution que la première. Son rôle est de pouvoir observer la qualité des différentes gravures effectuées. Elle peut également servir à positionner la gravure. Son utilisation est complémentaire à la première caméra.
- Partie intérieure Ⓗ : Cette partie correspond à la troisième et dernière position de la plateforme. Elle comprend la station sous pointe ainsi qu'une troisième caméra branchée à l'écran de la partie Ⓒ. Cette dernière contrairement aux deux précédentes, est manuelle et se règle au moment des mesures du filtre à régler pour aider à l'alignement des pointes de mesure.

L'interface de la machine permet de passer automatiquement sur les parties Ⓕ, Ⓖ et Ⓗ de la Figure III-25 sans toucher au composant positionné sur la plateforme de gravure (Figure III-25 Ⓔ).

Nous avons testé un grand nombre de jeux de paramètres afin d'optimiser la procédure de gravure des filtres. Un exemple de la gravure des accès coplanaires d'un filtre est montré dans la Figure III-26.

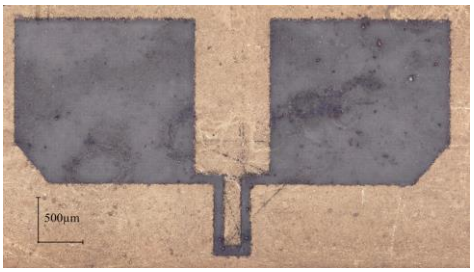


Figure III-26: Exemple de gravure de la couche cuivre/or des filtres par laser

A la suite de nos différents tests, la procédure de gravure que l'on retient est donnée dans le Tableau VIII.

Tableau VIII: Procédure de gravure sur les filtres métallisés par electroless + électrolyse

Etape 1 : Contour	Courant (A)	27	x20
	Vitesse (mm/s)	8	
Etape 2 : Remplissage	Courant (A)	27	x2
	Vitesse (mm/s)	8	
	Ecartement entre deux passages de laser (µm)	40	
Etape 3 : Contour	Courant (A)	27	x50
	Vitesse (mm/s)	8	

Pour graver la couche métallique cuivre/or de ces filtres, nous conseillons au début de bien graver les bords des motifs pour faciliter le reste de la gravure à l'intérieur du motif. Les bords sont à nouveaux gravés à la fin afin de bien dessiner le motif.

A la fin de la procédure, nous pouvons observer des petites billes de métal fondu sur le motif gravé. Il est inutile d'initier une nouvelle gravure au risque de surgraver le diélectrique des filtres. Une simple étape de nettoyage à l'alcool est suffisante pour les enlever.

Sur l'ensemble des tests effectués, nous avons évalué la précision de gravure ainsi que la précision de positionnement à +/- 10 µm. En respectant les paramètres de gravure prévus dans la procédure, nous pouvons également nous attendre à avoir une surgravure du diélectrique d'une dizaine de micromètres en profondeur. Aux fréquences auxquelles nous travaillons, ces tolérances de fabrication ne nous pénalisent pas pour utiliser la méthode de réglage post fabrication par gravure laser.

III.3.2. Description de la méthode

Pour des filtres diélectriques comme celui-ci (Figure III-22 ⓒ), comme l'on peut en trouver en [III.22], il est possible de changer la fréquence de résonance des résonateurs ainsi que le couplage entre résonateurs en gravant des motifs spécifiques dans le blindage métallique. Ces motifs vont créer des effets capacitifs ou inductifs changeant ainsi la réponse en fréquence du filtre. La méthode de réglage est décrite dans la Figure III-27 et est détaillée ici :

Étape ①: Le filtre est simulé électromagnétiquement avec le logiciel Ansys (filtre initial EM). Dans cette phase de conception les différentes spécifications sont définies : fréquence centrale, largeur de bande, pertes d'insertion dans la bande, etc.

Étape ②: Le filtre est fabriqué en utilisant la technologie de stéréolithographie 3D céramique. La couche métallique servant de blindage au filtre est réalisée par dépôt autocatalytique en cuivre afin d'obtenir une épaisseur suffisante. Un flash d'or est réalisé

ensuite par électrolyse pour protéger la pièce de l'oxydation. En raison des dispersions de fabrication, sa réponse ne satisfait pas les spécifications initiales mais est plutôt proche de celle simulée.

Étape ③ : La matrice de couplage (MC) du filtre initial est extraite et comparée à celle du filtre mesuré. Pour ces deux extractions, tous les couplages de la matrice sont pris en compte, y compris ceux parasites. En soustrayant ces deux matrices, nous sommes en mesure de déterminer le décalage à effectuer sur la fréquence de résonance des résonateurs et sur tous les couplages entre résonateurs. Ces manipulations sont réalisées grâce au logiciel Presto développé par l'INRIA qui permet, à partir d'une réponse en fréquence d'un filtre, d'extraire sa matrice de couplage normalisée en fréquence [III.23].

Étape ④ : Pour compenser ces décalages, nous choisissons les motifs de démétallisation à utiliser ainsi que leur taille. L'étude de ces motifs est présentée dans la partie suivante.

Étape ⑤ : Les différents motifs que nous avons choisis d'utiliser sont appliqués sur le filtre initial EM afin de simuler l'effet de chaque motif. Cependant, les dimensions initiales de ces motifs sont grossières et devront être optimisées. Nous effectuons alors une analyse de sensibilité qui consiste à déterminer l'impact des variations géométriques de chaque motif de réglage sur le comportement du filtre. Une simulation EM est effectuée dans chaque cas et les matrices extraites à chaque fois. Cet ensemble de matrices (appelé MC de variation dans la Figure III-27) sera utilisé dans l'étape suivante.

Étape ⑥ : A l'issue de l'étape ⑤ nous obtenons les lois de variation des coefficients de la matrice de couplage (MC) en fonction des dimensions des motifs appliqués sur le filtre initial EM. Nous associons alors la réponse du filtre fabriqué (Étape ②) à l'impact des dimensions des formes de réglage (Étape ⑤). Pour ce faire, nous soustrayons la MC du filtre initial EM à chaque MC issue des lois de variations des motifs afin d'isoler l'effet de chaque motif. Nous ajoutons ensuite la MC du filtre mesuré aux MC des lois de variations afin de lui appliquer les effets des motifs simulés. Chaque MC est normalisée en fonction de la fréquence centrale et de la largeur de bande issues des spécifications du filtre.

Étape ⑦ : La réponse du filtre avec les motifs est comparée avec les spécifications recherchées. La différence entre les deux va déterminer une erreur qui est ensuite minimisée par des algorithmes d'optimisation classiques. Les entrées utilisées pour l'optimisation sont les variations géométriques des motifs sélectionnés et simulés lors de l'étape ⑤. À la fin du processus, nous obtenons les dimensions des motifs pour lesquels la réponse du filtre correspond aux spécifications voulues. Cette étape d'optimisation est expliquée plus en détail dans le travail présenté en [III.24].

Étape ⑧ : Les motifs ainsi optimisés sont pour finir gravés sur le filtre que l'on souhaite régler. Nous obtenons une réponse en fréquence plus proche des spécifications. En fonction de la réponse en fréquence obtenue, une ou plusieurs itérations peuvent être nécessaires. Si c'est le cas, la réponse ainsi mesurée ramène le processus à l'étape ② si nécessaire. Dans cette dernière étape, nous devons nous assurer de ne pas faire de sur gravure dans le diélectrique afin d'éviter un décalage de fréquence inattendu pour cause de modification du volume du résonateur.

III.3.3. Etude sur les motifs de réglage : de la simulation à la validation expérimentale

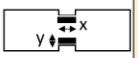
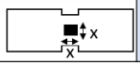
Dans cette partie nous allons présenter un certain nombre de motifs envisagés pour l'étape ④ de la procédure de réglage (Figure III-27). Une série de simulations de sensibilité permettra d'identifier les motifs les plus efficaces en fonction de notre besoin de correction du comportement en fréquence d'un filtre. Ces motifs seront ensuite testés expérimentalement sur des résonateurs et filtres fabriqués spécialement pour ces tests.

III.3.3.1. Simulation et choix des motifs de réglage

La première étape de ce travail a été de déterminer une relation entre les dimensions et les formes d'un motif gravé et leur impact sur la réponse en fréquence d'un filtre. Les différents motifs que nous envisageons sont présentés dans le Tableau IX.

Chaque couleur permet de différencier les effets des différents motifs présentés. Ils permettent d'influencer la fréquence de résonance d'un résonateur et le couplage entre deux pôles du filtre céramique retenu pour ce test et fonctionnant à 8 GHz. Tous les motifs en noir du Tableau IX représentent la zone où la couche de métal est enlevée sur le filtre. Nous considérons également qu'il n'y a pas de sur gravure, l'épaisseur des filtres diélectriques reste donc constante après cette étape de gravure. Tous les objets simulés intègrent des motifs d'excitations coplanaires comme présenté sur la Figure III-26.

Tableau IX: Effet des différents types de motifs de réglage envisagés

Motif de réglage	Effet
Motif carré	Fréquence ↗ quand x ↗
Motif rectangulaire	Fréquence ↗ quand x ↗
Motif en U	Fréquence ↗ quand x ↗
Motif en épingle	Fréquence ↘ quand x ↗
Motifs en U symétriques	Fréquence ↘ quand x ↗
Motif en H	Fréquence ↘ quand x ↗
Motif rectangulaires parallèles dans la zone de couplage 	Couplage ↗ quand x ↗
Motif carré dans la zone de couplage 	Couplage ↘ quand x ↗

Nous avons utilisé le logiciel de simulation ANSYS HFSS pour simuler les différents types de motifs présentés afin de quantifier leur efficacité et donc de sélectionner les plus adaptés au réglage du filtre.

Les différents motifs pour décaler la fréquence sont simulés sur un résonateur céramique unique et les motifs de décalage du couplage sont simulés avec un filtre deux pôles. Ces composants ont été conçus pour fonctionner autour de 8 GHz en utilisant le mode TM_{110}. Les dimensions appelées « x » dans le Tableau IX mettent en évidence les dimensions les plus sensibles pour chaque motif.

Pour le décalage en fréquence nous avons choisi de tester six motifs différents. Pour chaque motif nous avons optimisé la forme, les dimensions et le positionnement afin de trouver la meilleure sensibilité. Le résumé des différents résultats est donné dans la Figure III-28.

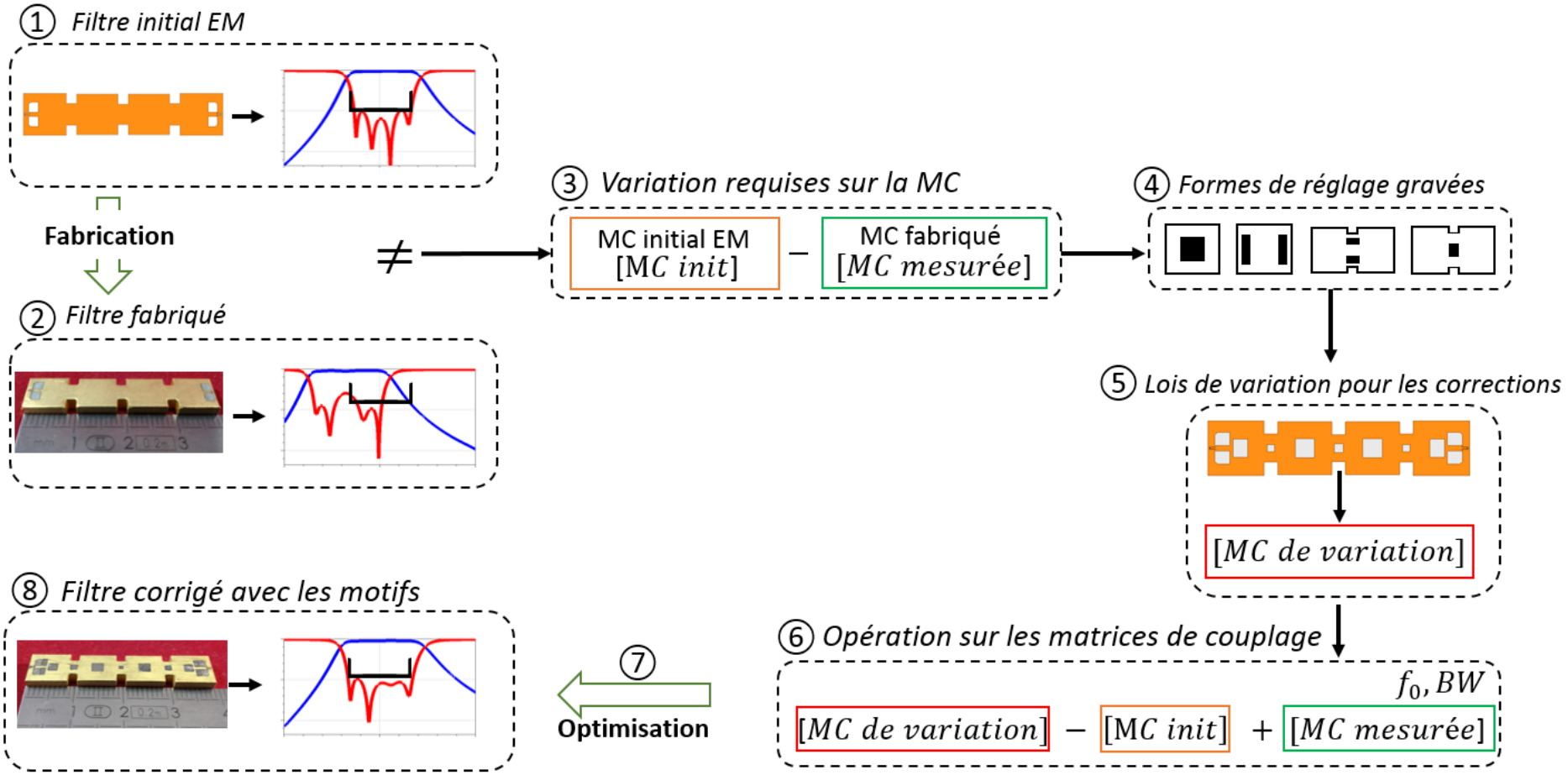


Figure III-27: Principe de la méthode de réglage de filtre post fabrication

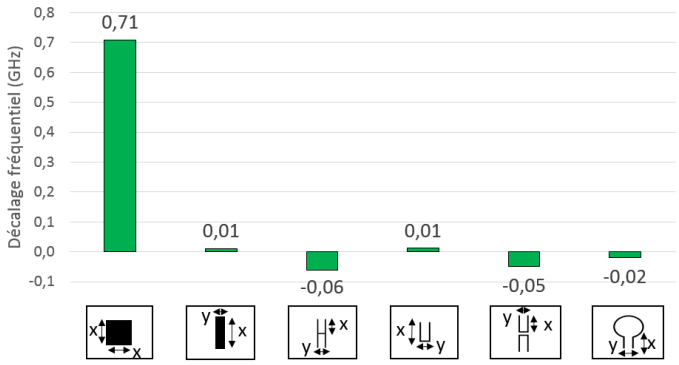


Figure III-28: Décalage fréquentiel maximum des différents motifs optimisés

Les premiers résultats de simulation nous donnent de très bons résultats pour le motif carré. On relève pour celui-ci un décalage de +700 MHz pour x=3 mm. Cependant l'impact des autres motifs est beaucoup moins intéressant. Le motif le plus efficace pour diminuer la fréquence est le H avec un shift de -60 MHz lorsque y=0.6 mm et x=2 mm.

Les phases d'optimisation complémentaires nous ont montré que le motif carré est plus efficace lorsqu'il est placé au centre du résonateur où est situé le maximum de champ E avec lequel il interagit le plus.

Pour le motif H, nous avons remarqué que son effet sur la fréquence augmentait lorsque l'on décalait par rapport au centre du résonateur. De ce fait en étudiant les champs EM nous avons remarqué que le motif réagissait particulièrement avec le champ magnétique. Pour un résonateur fonctionnant avec le mode TM_{110} les maximums de champ magnétique étant au niveau des bords du résonateur, cela nous a amené à tester une nouvelle configuration afin d'optimiser l'effet de ce motif (Figure III-29).

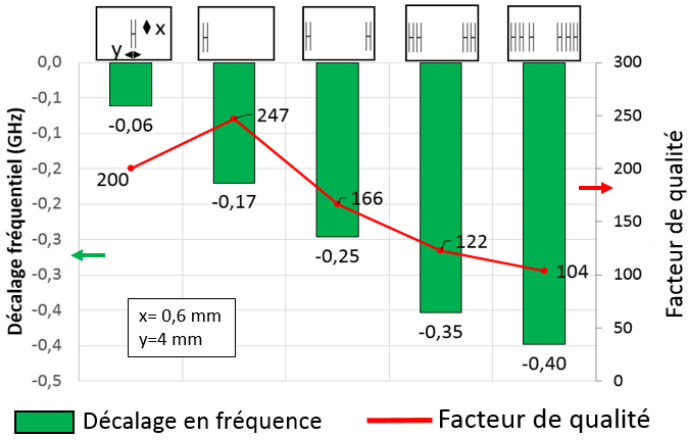


Figure III-29: Décalage fréquentiel : optimisation de la position du motif H

Dans la Figure III-29 lorsque l'on déplace le motif H sur le bord du résonateur nous passons d'un décalage de -0.06 GHz à -0.17 GHz.

A partir de ces résultats nous avons testé plusieurs cas de figure où nous avons placé plusieurs motifs en parallèle et de chaque côté du résonateur afin de trouver la configuration la plus intéressante. Pour un motif de chaque côté du résonateur le décalage est de -0.25 GHz puis pour deux et trois motifs de chaque côté, nous avons respectivement un décalage de -0.35 et -0.40 GHz.

Chacune de ces améliorations est suivie d'une diminution du facteur de qualité. Pour chacun des trois cas cités précédemment le facteur de qualité commence à 247, diminue

jusqu'à 166 pour quatre motifs gravés et 122 pour six motifs gravés. L'évolution des pertes en fonction du nombre de motifs gravés est donnée dans la Figure III-30.

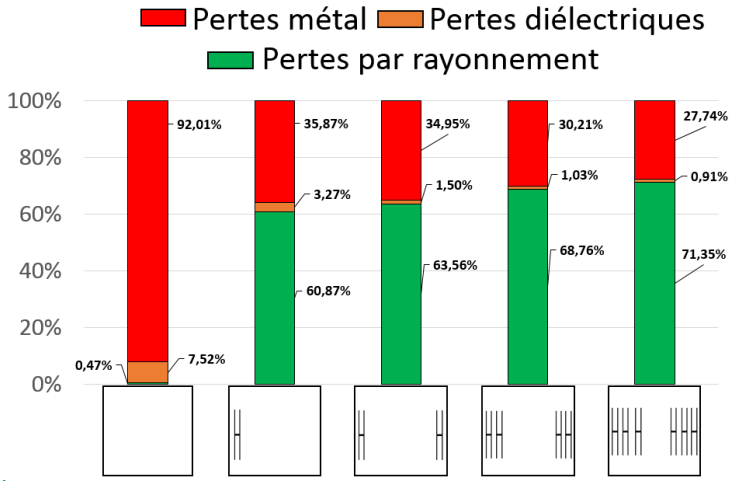


Figure III-30: répartition des pertes pour différents motifs gravés

Dans la Figure III-30 nous pouvons constater que, lors de l'ajout de tous les motifs de réglage, le pourcentage de pertes métalliques diminue et celui des pertes par rayonnement augmentent jusqu'à représenter plus de 70 % des pertes totales.

Les pertes diélectriques, grâce à la faible tangente de pertes de l'alumine, restent très faibles dans tous les cas de figure (environ 3% au maximum).

Lorsque l'on ajoute un motif de réglage en H sur le bord du résonateur nous ajoutons des pertes par rayonnement ce qui a pour effet d'amener le taux des pertes par rayonnement totales à environs 60% des pertes globales du résonateur. Pour deux, quatre et six motifs gravés ces pertes par rayonnement continuent à augmenter et représentent respectivement 63%, 69% et 71% de pertes globales.

Ces fortes augmentations des pertes par rayonnement entrainent une nette diminution du facteur de qualité théorique présenté dans la Figure III-29.

Ce motif demandant trop de précision de gravure nous avons cherché à simplifier le motif H. Pour se faire, nous avons considéré des motifs rectangulaires de même largeur et de même longueur. Nous avons effectué les mêmes simulations afin de pouvoir comparer l'impact de ces deux formes de motifs. Les résultats de cette comparaison sont donnés Figure III-31.

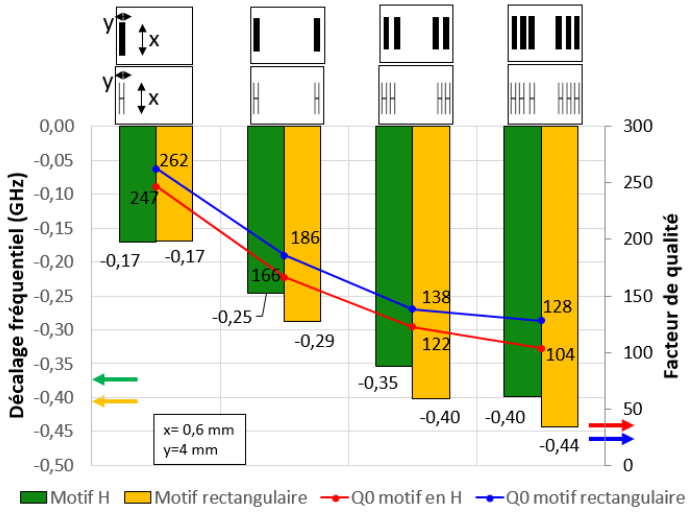


Figure III-31: Comparaison des décalages fréquentiels entre les motifs H et rectangulaire

Pour tous les cas de figure, nous avons avec les motifs rectangulaires un meilleur décalage fréquentiel pour des pertes moins importantes par rapport au motif H. En fonction du décalage fréquentiel recherché, les trois premiers cas permettent d'obtenir un décalage de -0.17 GHz, -0.29 GHz et -0.4 GHz pour un, deux et quatre rectangles gravés respectivement. Cependant pour chaque cas le facteur de qualité du résonateur qui commence à 262 chute à 186 puis à 138. Graver 6 rectangles est moins intéressant car l'encombrement sur la surface du résonateur est trop important par rapport au gain que cela apporte.

Afin de mieux comprendre l'impact des motifs rectangulaires sur la fréquence et les pertes du résonateur, la Figure III-32 fournit des tracés de champs E et H lorsque ce motif est placé au milieu pour le décalage de fréquence positif et près des bords de la face supérieure du résonateur pour le décalage de fréquence négatif. Lorsqu'il est placé au milieu, le carré gravé interagit fortement avec le champ électrique où il est maximal pour le mode TM_{110}. Il ajoute un effet capacitif équivalent qui diminue lorsque la surface du carré augmente, augmentant ainsi la fréquence du résonateur.

Lorsque les motifs rectangulaires sont placés sur les bords du résonateur, ils interagissent avec le champ magnétique où il est maximal pour le mode TM_{110}, fournissant un effet inductif complémentaire équivalent qui abaisse la fréquence du résonateur lorsque la longueur des fentes augmente.

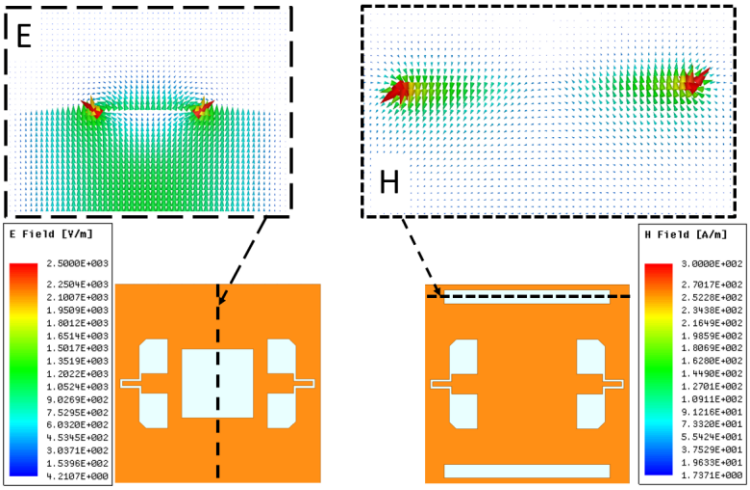


Figure III-32: Champs E et H au niveau de chaque motif gravé sur le résonateur

Nous nous basons sur le même principe lorsque l'on souhaite augmenter ou diminuer le couplage entre deux résonateurs. Un motif carré est positionné au milieu de l'iris de couplage et deux motifs rectangulaires sont placés sur les bords opposés de l'iris pour respectivement diminuer et augmenter le couplage entre deux résonateurs adjacents.

A cause de la largeur de l'iris, nous ne pouvons positionner que deux motifs rectangulaires par iris. En effet si nous en utilisons plus, ces derniers seront trop proches du centre de l'iris et nous obtiendrons l'effet inverse de ce que l'on recherche avec ce motif. Les résultats des simulations sur l'impact de ces motifs sont donnés dans la Figure III-33.

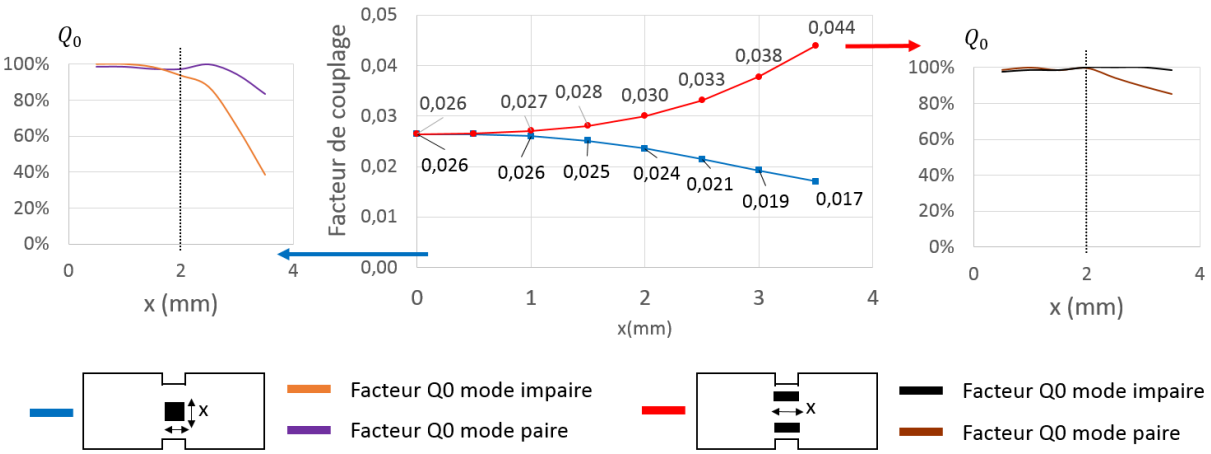


Figure III-33: Effet des motifs carrés et rectangulaires sur le facteur de couplage entre deux résonateurs

Comme nous pouvons le constater dans la Figure III-33 ces motifs peuvent diminuer ou augmenter le couplage entre résonateurs adjacents. De plus les fentes rectangulaires parallèles fournissent environ deux fois plus de variation sur le couplage par rapport à celle amenée par la fente carrée. Avec le mode TM_{110}, le carré et les fentes parallèles sur les bords interagissent principalement avec les champs électrique et magnétique respectivement, comme on peut le voir sur la Figure III-34.

De plus nous pouvons constater que les motifs positionnés sur les couplages entre deux pôles influencent leur facteur de qualité respectif d'une manière importante seulement lorsque la dimension x est supérieure à 2mm. Plus précisément, pour ces valeurs de x le motif carré a un impact sur le mode impair et les motifs rectangulaires parallèles ont un impact sur le mode pair.

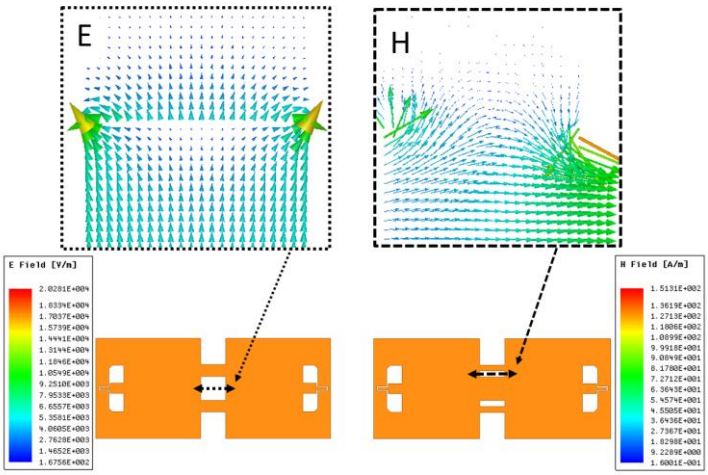


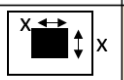
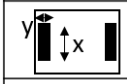
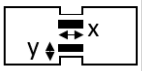
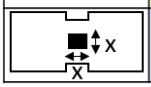
Figure III-34: Champs E et H au niveau de chaque motif gravé sur l'iris entre deux résonateurs

En conclusion, nous avons décidé d'utiliser les quatre formes d'accord qui sont résumées dans le Tableau X. Le motif carré positionné au centre du résonateur permet un décalage de +400 MHz (soit un décalage de +5%) pour x=4 mm et les motifs rectangulaires positionnés au bord du résonateur permettent un décalage de -270 MHz (soit un décalage de -3.375 %) autour de 8 GHz pour x=4 mm et y=0.6 mm. Les pertes sont augmentées respectivement de 40% et 78% lorsque l'on provoque de tels décalages fréquentiels.

Il est possible d'obtenir des décalages plus importants mais au détriment d'une grande baisse du facteur de qualité des résonateurs, qui ne justifierait plus l'emploi de technologies volumiques.

Les motifs rectangulaires parallèles amènent presque le double de pertes que le motif carré. Les différents résultats obtenus nous permettent d'envisager une dynamique de réglage à priori suffisante de nos filtres à condition que le décalage fréquentiel à compenser reste limité sous peine de forte dégradation du facteur de qualité.

Tableau X: Motifs sélectionnés pour le réglage de filtre

Motifs utilisés	Décalage maximum	Taille
	Fréquence↗ de 400 MHz Facteur de qualité ↘ 40 %	x=4 mm
	Fréquence ↘ by 270 MHz Facteur de qualité ↘ 78 %	x=0,6 mm y=4 mm
	Facteur de couplage↗ de 0,0175	x=3,5 mm y=0,5 mm
	Facteur de couplage ↘ de 0,0094	x=3,5 mm

III.3.3.2. Comparaison entre la simulation et l'expérimentation

Les résonateurs et filtres 2 pôles utilisés pour tester les effets sur la fréquence et le couplage des différents motifs sélectionnés dans le Tableau X sont ceux présentés dans la partie III.3.1.1. Les gravures ont été réalisées avec la graveuse Cerinnov présentée dans la partie III.3.1.2. Les différents dispositifs réalisés ont été également mesurés à l'aide d'un analyseur ZVA avec une paire de pointes de mesure ACP de pitch 250 µm.

Les comparaisons entre les simulations et les mesures des décalages fréquentiels obtenus sont données dans les Figure III-35 et Figure III-36 et pour les décalages des couplages dans les Figure III-37 et Figure III-38.

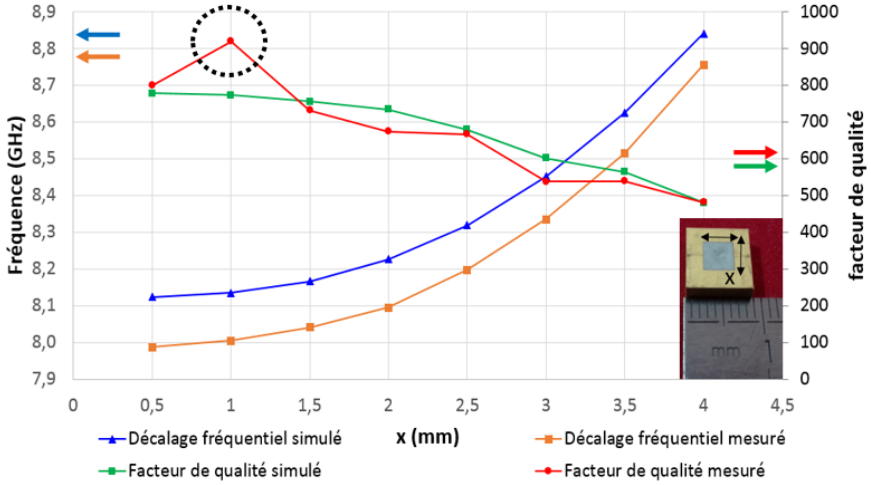


Figure III-35: Décalage fréquentiel motif carré : comparaison simulation et mesure

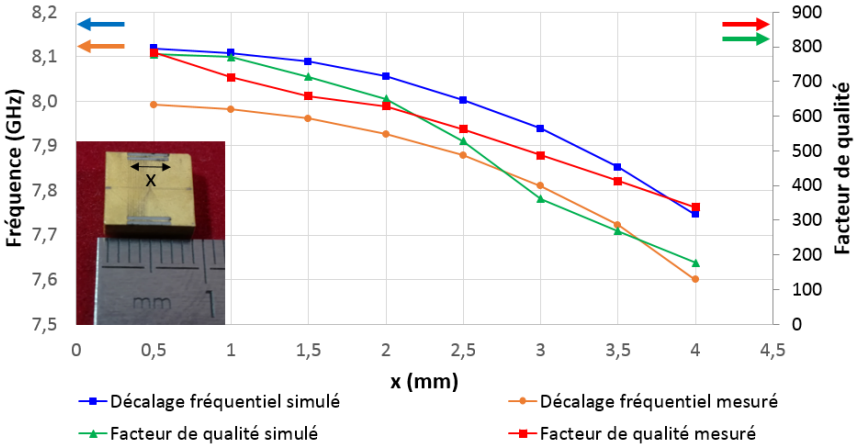


Figure III-36: Décalage fréquentiel motifs rectangulaires parallèles : comparaison simulation et mesure

Dans la Figure III-35, nous pouvons constater que pour le carré gravé au centre d'un résonateur, le décalage fréquentiel ainsi que les pertes sont très similaires entre la simulation et les essais expérimentaux. Nous remarquerons cependant un problème au niveau de la mesure du facteur de qualité pour une valeur de « x » de 1 mm que nous n'avons pas réussi à identifier. Nous pouvons constater aussi certains écarts entre facteurs de qualité mesurés et simulés dans le cas des deux rectangles gravés sur les bords du résonateur (Figure III-36). On constate néanmoins la progressive baisse du facteur de qualité plus les rectangles démétallisés augmentent

A partir de ces résultats, nous pouvons en conclure que, malgré ces variations au niveau des pertes, nous avons validé expérimentalement l'efficacité de ces motifs sur les fréquences de résonance de ces résonateurs. Les différences entre les valeurs mesurées et simulées peuvent de plus être un effet combiné de la précision de fabrication des pièces 3D, l'épaisseur non homogène de la métallisation, la précision de la gravure laser et une légère surgravure en profondeur de la pièce céramique.

Ces différents problèmes ne poseront toutefois aucune difficulté car la plage de réglage relative est toujours aussi grande que prévu, la procédure de réglage que nous allons proposer restera donc valable.

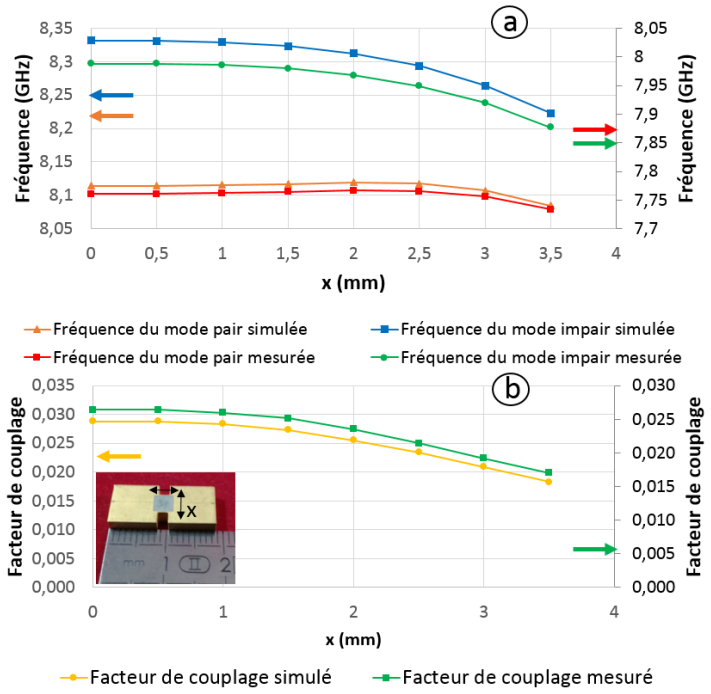


Figure III-37: Décalage du couplage pour le motif carré : comparaison simulation et mesure

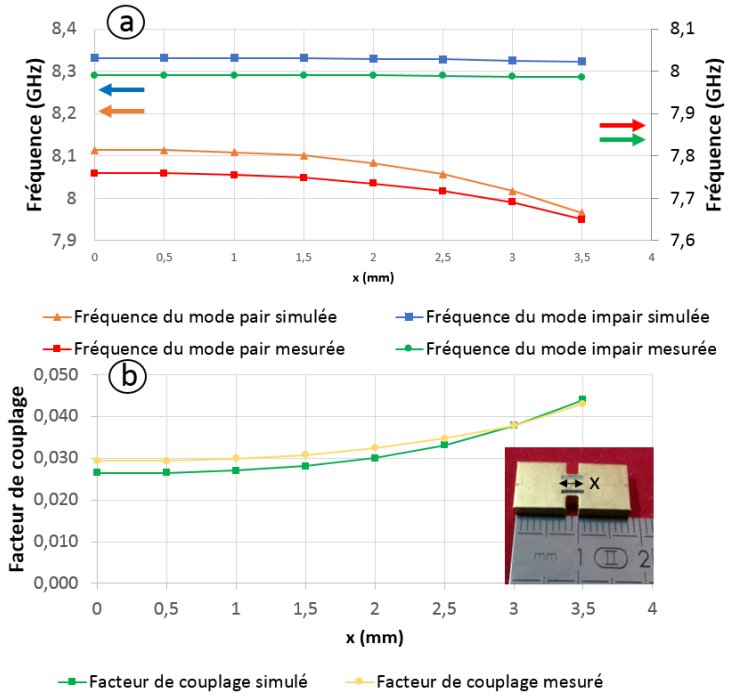


Figure III-38: Décalage du couplage pour le motif rectangulaire parallèles : comparaison simulation et mesure

Les Figure III-37 et Figure III-38 montrent l'évolution du couplage entre deux résonateurs en fonction de la taille du carré et des fentes rectangulaires respectivement. Ces figures décrivent également l'évolution des fréquences des modes pair et impair avec une comparaison entre les cas simulés et mesurés en fonction de la taille des motifs gravés. Le comportement mesuré est en bon accord avec la simulation, confirmant la possibilité d'augmenter ou de diminuer le couplage entre deux résonateurs en céramique.

A nouveau les différences entre les valeurs mesurées et simulées sont dues à la précision de fabrication, à l'épaisseur non homogène de la métallisation et enfin à la précision de la gravure laser. Toutefois, comme précédemment, ces différents problèmes ne poseront aucune difficulté car la plage de réglage relative correspond à nos attentes.

Pour conclure, les quatre formes de réglage que nous avons choisies pour notre filtre présentent des résultats très similaires à ceux obtenus en simulation. La dernière étape consiste donc à les utiliser en pratique sur un filtre à régler pour lui faire respecter un jeu de spécifications et ainsi de tester la méthode d'optimisation présentée précédemment.

III.3.4. Réglage post fabrication d'un filtre 3D céramique

Dans cette partie nous allons considérer deux filtres de Chebyshev du 4ème ordre dont les spécifications sont les suivantes :

- Fréquence centrale : 8 GHz,
- Bande passante : 350 MHz,
- Adaptation <-20 dB sur toute la bande.

Ces filtres sont présentés dans la partie III.3.1.1 et ont des caractéristiques diélectriques suivantes : $\varepsilon_r = 9.1$, $tan\delta = 7.10^{-5}$. La conductivité effective du blindage métallique du filtre est évaluée à 10 S/µm. Avant de détailler la phase de réglage de ces filtres, nous allons présenter l'environnement matériel et logiciel derrière la procédure de réglage d'un filtre.

III.3.4.1. Environnement matériel et logiciel de la procédure de réglage

Le concept que nous proposons ici consiste à pouvoir mesurer un filtre et à apporter une correction sur sa réponse en fréquence au sein d'un seul environnement matériel. Pour être plus précis, nous souhaitons pouvoir effectuer les étapes de mesure et de gravure sans déplacer le filtre à corriger. Ainsi nous limitons au maximum les problèmes de positionnement du filtre dans la graveuse permettant de ce fait d'améliorer l'efficacité de la procédure de réglage. L'environnement matériel est décrit dans la Figure III-25.

Le principe fondamental de la procédure de réglage est qu'une fois que le filtre est positionné à l'intérieur de la machine, il ne sera pas libéré tant qu'il ne remplira pas les spécifications requises. Ce principe est décrit dans la Figure III-39.

Pour commencer, le filtre céramique 3D conçu puis fabriqué et métallisé (Figure III-39 ① et ②) est placé dans la machine de gravure laser. Les accès d'entrée et de sortie du filtre sont réalisés par gravure laser des accès coplanaires situés au-dessus des résonateurs 1 et 4 (Figure III-39 ③) et une première mesure permet de déterminer si le filtre correspond ou non aux spécifications.

Dans le cas contraire, deux orientations sont possibles (Figure III-39 ④) : soit la réponse en fréquence est trop décalée et le réglage est impossible ; soit le décalage est compris dans la gamme de correction possible des motifs à graver. Pour ce dernier cas, nous utilisons la méthode d'optimisation (présentée dans la Figure III-27) afin de pouvoir récupérer les dimensions des motifs nécessaires à la correction du filtre (Figure III-39 ⑤) . Ces motifs sont ensuite gravés puis le filtre est à nouveau mesuré (Figure III-39 ⑥ et ⑦). En fonction de la réponse en fréquence, le réglage peut nécessiter plusieurs itérations, dans ce cas une nouvelle optimisation des différents motifs de réglage est réalisée (Figure III-39 ④) .

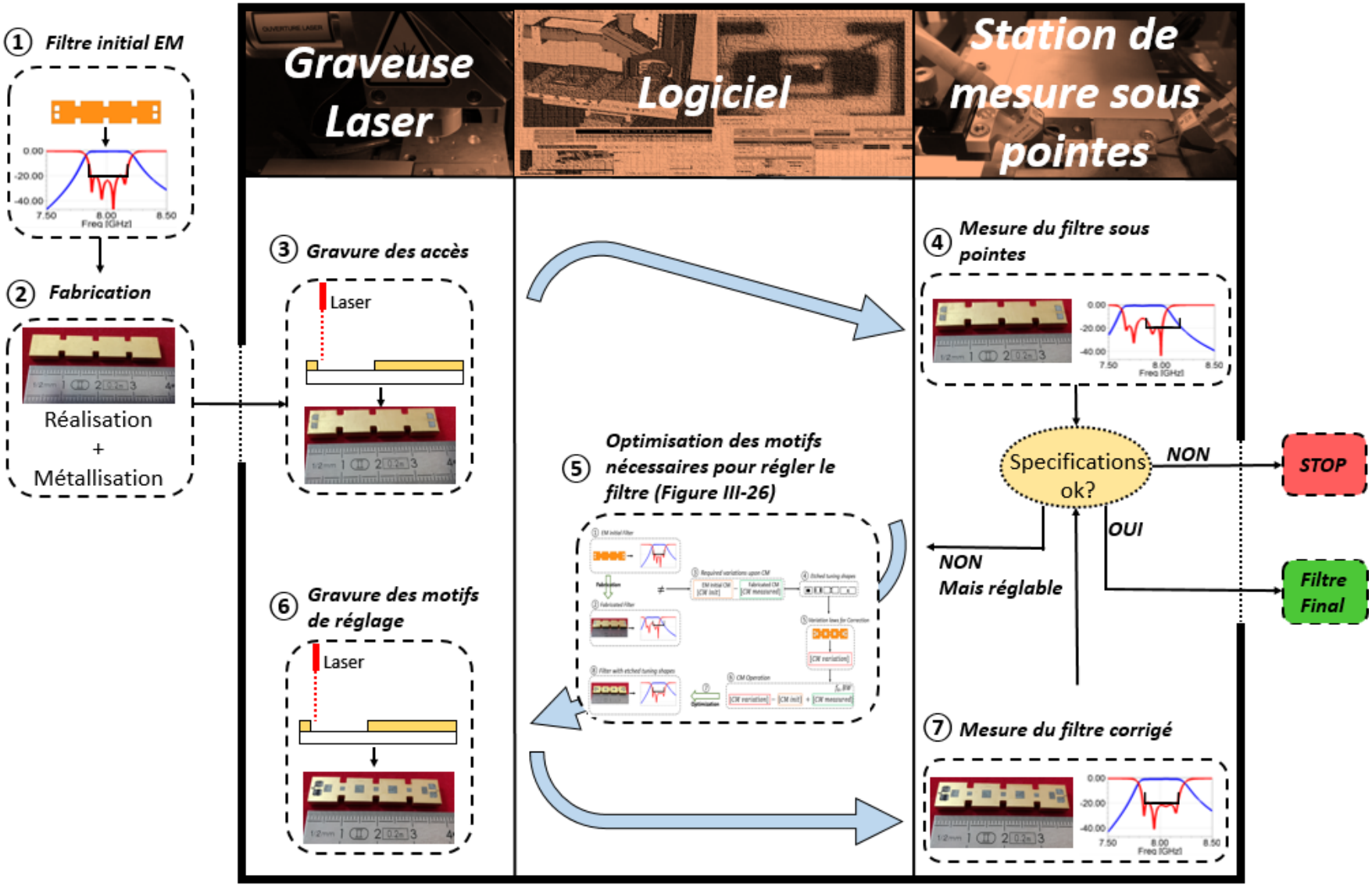


Figure III-39: Vue schématique de la procédure expérimentale pas à pas pour le réglage d'un filtre

III.3.4.2. Réglage de filtres test

La Figure III-40 présente les trois étapes du processus de réglage expérimental de ces filtres, de gauche à droite.

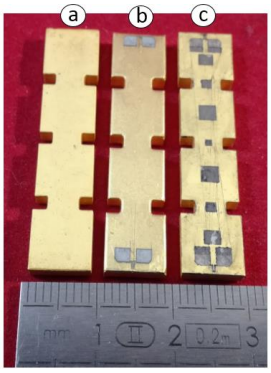


Figure III-40: Trois étapes de la méthode de réglage : ⓐ filtre métallisé ; ⓑ filtre avec accès coplanaires ; ⓒ filtre avec gravure de réglage

Comme expliqué précédemment, l'objectif de cette procédure est de compenser les erreurs de fabrication existantes en appliquant la méthode de réglage décrite dans la Figure III-27 et en utilisant la procédure décrite Figure III-39 dans la machine de gravure laser personnalisée Cerinnov.

Compte tenu des résultats obtenus et validés expérimentalement dans la partie III.3.3.2, une plage de réglage limitée peut être appliquée dans la pratique. Cela correspond à +5 / -4% pour le décalage fréquentiel et +66 / -36% pour la variation de couplage. En d'autres termes, la réponse du filtre est initialement évaluée pour savoir si sa réponse en fréquence peut être rattrapée ou non.

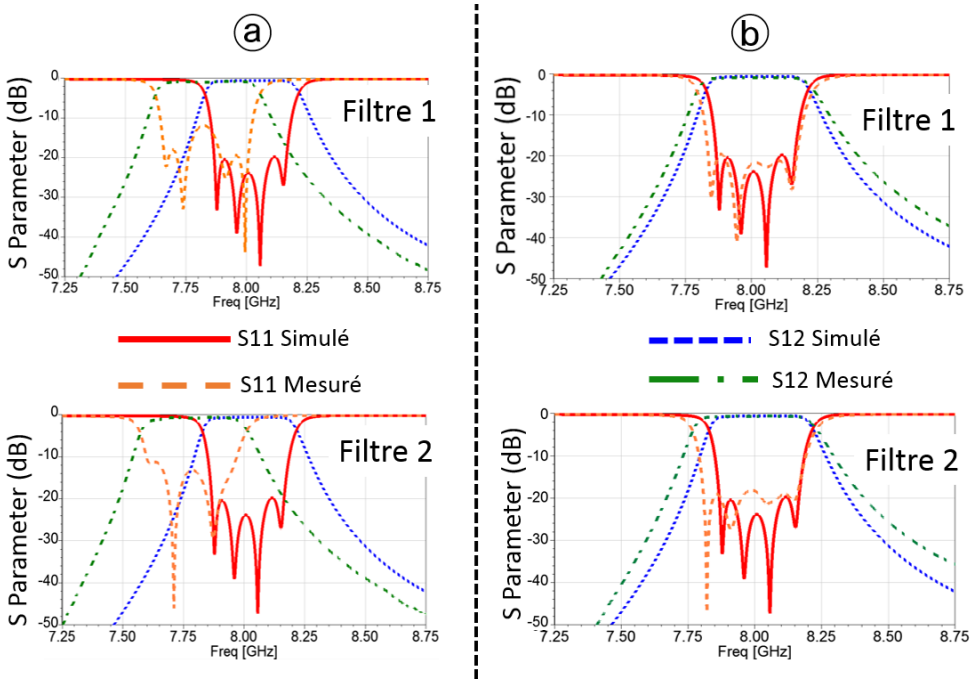


Figure III-41: Simulation et mesure des filtre 1 et 2 : ⓐ Avant le réglage ; ⓑ Après le réglage

La Figure III-41 ⓐ présente les paramètres S simulés et mesurés des deux filtres de test différents issus d'un même lot de fabrication. Ces paramètres S mesurés expérimentalement pour chaque filtre constituent la réponse initiale (voir l'étape ② de la Figure III-27). Nous avons

un décalage de 0,18 GHz et 0,21 GHz pour la fréquence centrale du filtre 1 et 2 respectivement et une adaptation inférieure à 12 dB et 11,4 dB respectivement. Nous appliquons ensuite la méthode de réglage sur ces filtres en utilisant la procédure de gravure de la Figure III-39.

La Figure III-41 ⓑ présente les résultats finaux obtenus après l'achèvement de la méthode proposée. Nous avons ramené la fréquence centrale ainsi que l'adaptation proches des spécifications initiales.

Cependant, nous n'avons pas pu diminuer la bande passante de plus de 0,04 GHz sur les 0,06 à 0.07 GHz initialement souhaités. Pour les pertes, nous avons extrait un facteur de qualité équivalent Q_0 de 730 avant et 537 après la correction pour le filtre 1, soit une baisse de 26%, et 510 pour le filtre 2, soit une perte de 36%. Si nous le comparons aux variations du facteur de qualité observées lors des simulations et expérimentations sur un résonateur seul, nous avons un peu moins de pertes avec le filtre, ce qui signifie moins de pertes métalliques. Les deux filtres corrigés ont eu une seule itération du procédé de réglage (Figure III-39). Nous avons évalué la surgravure des motifs à environs 35 µm.

Un résumé des différentes données est présent dans le Tableau XI. La différence entre la théorie et les mesures des deux filtres testés provient à notre avis de légères sur-gravures (moins de 10 µm d'erreur) et du fait que nous avons eu des problèmes de matériaux brûlés au cours du processus de gravure.

Tableau XI: Résumé des données avant et après réglage des filtres

	Fréquence centrale (GHz)	Largeur de bande (GHz)	Pertes d'insertion (dB)	Adaptation (dB)	Ondulation (dB)	Q estimé
Filtre simulé	8	0.3	0.7	20	0.03	800
Filtre 1 mesuré avant le réglage	7.82	0.37	0.83	12	0.2	730
Filtre 1 mesuré après le réglage	8	0.33	0.96	19.61	0.02	537
Filtre 2 mesuré avant le réglage	7.79	0.36	0.72	11.36	0.17	800
Filtre 2 mesuré après le réglage	7.98	0.35	0.75	18.25	0.05	510

Dans le Tableau XI, nous remarquons que les pertes d'insertion des filtres sont plus faibles après la gravure des différents motifs de réglage. En regardant plus précisément la réponse en fréquence des deux filtres, nous pouvons constater que l'ondulation est beaucoup plus importante avant la gravure des motifs. Avant et après la gravure, nous avons donc respectivement des pertes d'insertions à 0.83 et 0.96 dB pour le premier filtre et à 0.72 et 0.75 dB pour le deuxième.

III.3.5. Conclusion et discussion sur la méthode de réglage

Les deux filtres de test que nous avons proposés ont été réglés et ramenés aux spécifications requises avec un bon accord par rapport aux valeurs souhaitées. Leur réponse en fréquence mesurée initialement étaient légèrement décalée vers les basses fréquences, leur largeur de bande un peu trop large et leur adaptation remontant jusqu'à -11 dB.

Ce décalage a donc été corrigé de manière appropriée grâce à la plage de réglage disponible fournie par les motifs gravés au laser. Comme prévu, les motifs gravés dégradent également les pertes d'insertion du filtre. Pratiquement, la correction d'un décalage de 0,18 GHz (filtre 1) et de 0,21 GHz (filtre 2) entraîne des pertes respectives de 0,96 et 0,75 dB. Les adaptations finalement obtenues étaient respectivement de 19,61 et 18,25 dB, ce qui est très proche des besoins initiaux. En ce qui concerne les largeurs de bande mesurées, 330 et 350 MHz ont été obtenus, ce qui est proche de la bande passante de 350 MHz attendu dans les spécifications.

Des erreurs liées à la surgravure et au positionnement des motifs sur des filtres ont été observées, entraînant ainsi de petites variations des corrections réellement appliquées et empêchant par conséquent de réaliser un ajustement parfait aux spécifications initiales. Avec les équipements actuels, la méthode nécessite un va-et-vient entre mesure, gravure et modélisation EM avec de nombreuses interventions manuelles qui ralentissent le processus de réglage. Cependant, la pertinence des différentes étapes a été prouvée et nous pouvons combiner les différents motifs de gravure afin de corriger la réponse en fréquence d'un filtre que ce soit en plus (augmentation de fréquence, de bande passante) ou en moins (diminution de fréquence, de bande passante).

L'équipement actuel, même partiellement manuel, pourrait être facilement automatisé. Cette station laser / banc de mesure sous pointes personnalisé pourrait par exemple être motorisée et l'ensemble du processus peut être automatisé: mesure automatisée et vérification initiale pour déterminer si le filtre pouvait réellement être réglé ou non, optimisation des modèles nécessaires pour la correction de fréquence et de couplage, création des fichiers CAO pour la gravure laser de tels motifs, mesure à nouveau du filtre et, si nécessaire, réoptimisation automatique de motifs complémentaires. La machine entièrement automatisée pourrait alors régler de manière autonome un lot de filtres et les relâcher une fois le réglage requis appliqué.

III.4. Conclusion générale du chapitre

Dans ce chapitre nous avons testé les capacités de la technologie AJP pour métalliser des substrats et objets 3D. Les différents tests que nous avons réalisés nous ont permis de mettre en place une procédure d'impression spécifique 3D à l'encre à base de nanoparticules argent, nous permettant d'imprimer sur des objets de géométries complexes (plans inclinés, formes sphériques, etc).

Nous avons remarqué lors des différents essais deux points très importants pour la suite :

- Nous conseillons d'imprimer sur des plans inclinés d'un angle ≥ 45° afin de diminuer le risque de coupures des lignes déposées,
- Imprimer sur des substrats très rugueux (rugosité de l'ordre du micromètre) dégrade fortement la précision d'impression que l'on peut atteindre. Nos différentes impressions sur des objets céramique 3D mais également sur des filtres issus du projet ATOMIQ nous a prouvé

qu'une telle rugosité de surface n'assure pas forcément une bonne accroche de l'encre déposée. En effet toute nos impressions ont souffert de décollement de la couche métallique, que ce soit dans le temps ou à la suite d'un contact mécanique.

Comme nous l'avons conclu dans ce chapitre, de telles métallisations sur des pièces réalisées par stéréolithographie 3D céramique nécessitent une étude approfondie de la préparation de surface du diélectrique afin d'augmenter l'accroche de l'encre à base d'argent utilisée.

La méthode de réglage des filtres présentée dans ce chapitre est pleinement applicable sur les filtres 3D céramiques issus de ce projet mais aussi en utilisant l'AJP comme technique de réglage.

Nous avons montré la machine que nous avons conçue et qui permet de graver et de mesurer les filtres que l'on cherche à régler dans un seul et même environnement technologique. Basée sur le même concept, une station sous pointe pourrait être installée dans une machine d'impression AJP dans laquelle est installé un laser. Certaines machines AJP ont déjà un laser installé dans le but de fritter directement chaque ligne d'encre déposée [III.21].

Après l'étape de frittage, ce laser pourrait également servir à graver les couches métalliques déposées afin de réduire le nombre d'étapes technologiques nécessaires pour appliquer la méthode de réglage de filtre. A condition de maitriser la métallisation d'un filtre volumique, ce qui demande une étude approfondie du sujet, un composant pourrait être entièrement métallisé sélectivement, mesuré puis corrigé dans le même environnement que ce soit par la gravure ou l'ajout de matière. Il pourrait ainsi être intéressant de cumuler les capacités additives de l'AJP et d'ablation du laser en une seule et même technologie de fabrication et de correction.

Références bibliographiques Chapitre III

[III.1] A. H. Khalil et al., "3-D pyramidal and collective Ku band pass filters made in Alumina by ceramic stereolithography," 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Baltimore, MD, 2011, pp. 1-4.

[III.2] A. Salas-Barenys, N. Vidal, J. Sieiro, J. M. López-Villegas, B. Medina-Rodriguez and F. M. Ramos, "Full-3D printed electronics process using stereolitography and electroless plating," 2017 32nd Conference on Design of Circuits and Integrated Systems (DCIS), Barcelona, 2017, pp. 1-4.

[III.3] JetMetal™, « Métallisation par pulvérisation de 2 aérosols en phase aqueuse », [en ligne] Consulté sur : https://www.jetmetal-tech.com/technologies

[III.4] B. K. Tehrani, B. S. Cook and M. M. Tentzeris, "Inkjet-printed 3D interconnects for millimeter-wave system-on-package solutions," 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), San Francisco, CA, 2016, pp. 1-4.

[III.5] B. K. Tehrani, R. A. Bahr, W. Su, B. S. Cook and M. M. Tentzeris, "E-band characterization of 3D-printed dielectrics for fully-printed millimeter-wave wireless system packaging," 2017 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), Honololu, HI, 2017, pp. 1756-1759.

[III.6] nScrypt Inc. nScrypt Smartpump Conformal and 3D printing, [video en ligne], Youtube, 24 sept. 2015 [consulté le 10 juillet 2019], 1 vidéo, 2 min, [en ligne] Consulté sur : https://www.youtube.com/watch?time_continue=9&v=V-vNJ8-JTZs

[III.7] B. K. Tehrani, B. S. Cook and M. M. Tentzeris, "Inkjet-printed 3D interconnects for millimeter-wave system-on-package solutions," 2016 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS), San Francisco, CA, 2016, pp. 1-4.

[III.8] F. Cai, Y. H. Chang, K. Wang, C. Zhang, B. Wang and J. Papapolymerou, "Low-Loss 3-D Multilayer Transmission Lines and Interconnects Fabricated by Additive Manufacturing Technologies," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol. 64, no. 10, pp. 3208-3216, Oct. 2016.

[III.9] Jubaid Abdul Qayyum, Marvin Abt, Aljoscha Roch, Ahmet Cagri Ulusoy, John Papapolymerou, “Ultra wideband 3D interconnects using aerosol jet printing up to 110 GHz”, 2017 12th European Microwave Integrated Circuits Conference (EuMIC)

[III.10] Mohamed Khalil DRISSI, “Composants céramiques 3D innovants pour des applications spatiales de télécommunications millimétriques en bandes Q et V », Sciences de l'ingénieur, sous la direction de Nicolas Delhote, Serge Verdeyme et Olivier Tantot, Limoges, Faculté des Sciences et Techniques de Limoges, 2016

[III.11] A. H. Khalil et al., "3-D pyramidal and collective Ku band pass filters made in Alumina by ceramic stereolithography," 2011 IEEE MTT-S International Microwave Symposium, Baltimore, MD, 2011, pp. 1-4.

[III.12] E. Laplanche et al., "Additive manufacturing of low cost and efficient proof of concepts for microwave passive components," in IET Microwaves, Antennas & Propagation, vol. 11, no. 14, pp. 1997-2004, 19 11 2017.

[III.13] C. Kwak, M. Uhm, I. Yom and H. J. Eom, "Automated Microwave Filter Tuning Using Curve Similarity and Weighted Least Squares," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 22, no. 10, pp. 539-541, Oct. 2012.

[III.14] M. Brumos, V. E. Boria, M. Guglielmi and S. Cogollos, "Correction of manufacturing deviations in circular-waveguide dual-mode filters using aggressive space mapping," 2014 44th European Microwave Conference, Rome, 2014, pp. 624-627.

[III.15] Faten Kouki, Marc Thévenot, Stéphane Bila, Nicolas Delhote, Serge Verdeyme, Thierry Monédière, “Miniature ceramic filters for wireless communications front-ends at 60 GHz”, International Workshop on Microwave Filters , 2015, Toulouse, France

[III.16] A. El Mostrah, B. Potelon, E. Rius, C. Quendo, J. F. Favennec and H. Leblond, "Association of HPWRs and DBRs for a High Rejection C-Band Filter With Post-Tuning Elements," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 23, no. 6, pp. 297-299, June 2013.

[III.17] Y. Zhu, J. Chen and P. Yan, "Millimeter-wave band-pass filter based on complementary split ring and SIW resonators," 2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC), Nanjing, 2015, pp. 1-3.

[III.18] S. Courreges, C. Thibon, F. A. Houndonougbo, A. Crunteanu, V. Madrangeas and M. Maignan, "Tuning of Superconducting Filters With Laser Ablation Technique," in IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 19, no. 5, pp. 3715-3721, Oct. 2009.

[III.19] Parker, Nathan J., S. W. Goodyear, D. Ellis and Richard G. Humphreys. “Laser tuning of HTS microwave filters.” (2002).

[III.20] A. E. Atia and A. E. Williams, "Narrow-Bandpass Waveguide Filters," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 20, no. 4, pp. 258-265, Apr. 1972.

[III.21] OPTOMEC, “The Aerosol Jet HD System”. [En ligne] Consulté sur : https://www.optomec.com/printed-electronics/aerosol-jet-printers/aerosol-jet-high-density-printed-electronics/

[III.22] Y. Marchives, N. Delhote, S. Verdeyme and P. M. Iglesias, "Wide-band dielectric filter at C-band manufactured by stereolithography," 2014 44th European Microwave Conference, Rome, 2014, pp. 187-190.

[III.23] Aurélien Périgaud, “ Conception de banques de filtres micro-ondes passifs compacts dans la bande 2-20 GHz à l’aide des technologies multicouches », Thèse de doctorat en Electronique des Hautes

Fréquences et Optoélectronique. Communications Optiques et Micro-ondes, Sous la direction de D. BAILLARGEAT et S. BILA, Soutenue le 26 mars 2009 à Limoges, en partenariat avec Université de Limoges. Faculté des sciences et techniques (autre partenaire)

[III.24] Ludovic Carpentier, “Filtres céramiques microondes par stéréolithographie 3D », Thèse de doctorat en Electronique des Hautes Fréquences et Optoélectronique. Electronique des Hautes fréquences, Photonique et Systèmes, Sous la direction de Nicolas Delhote et de Serge Verdeyme, Soutenue en 2012 à Limoges, en partenariat avec Université de Limoges. Faculté des sciences et techniques (autre partenaire)

[III.25] P. Aurélien, V. Serge, D. Nicolas, B. Stéphane, T. Olivier and L. Carpentier, "Continuously Tunable X-Band Filter Using a 3D Spiral Ribbon," 2018 IEEE MTT-S International Conference on Numerical Electromagnetic and Multiphysics Modeling and Optimization (NEMO), Reykjavik, 2018, pp. 1-4.

[III.26] N. Delhote et al., "Ceramic Layer-By-Layer Stereolithography for the Manufacturing of 3-D Millimeter-Wave Filters," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 55, no. 3, pp. 548-554, March 2007.

Chapitre IV. Utilisation des caractéristiques de l'AJP afin de réaliser des composants innovants

Dans les deux chapitres précédents nous avons testé les différentes caractéristiques de la machine d'impression aérosol Optomec AJ200 et mis au point une procédure pour imprimer des composants hyperfréquences sur des substrats plats et 3D. Les lignes de transmission que nous avons réalisées à l'aide de l'encre à base d'argent sur ces substrats ont au mieux atteint une atténuation linéique de 0.2 dB/mm à 40 GHz. Ces résultats sont proches de l'état de l'art actuel.

La procédure mise en place doit cependant être ajustée en fonction du substrat utilisé, du vieillissement de l'encre et à chaque fois que l'encre est remplacée (ses caractéristiques changent légèrement d'un lot à un autre).

A partir des résultats obtenus lors des différents essais et impressions réalisées, nous souhaitons dans ce dernier chapitre présenter le concept d'une nouvelle famille de lignes de transmission. Leur principe de fabrication repose principalement sur la capacité de l'AJP à imprimer précisément sur des substrats conformes.

La principale particularité de cette nouvelle famille de composants est qu'elle permet de réaliser des lignes de transmission très haut en fréquence (>100 GHz) dont l'adaptation est supérieure à -20 dB sur une longueur de ligne supérieure au centimètre.

De par sa résolution, l'AJP peut aisément imprimer des lignes de transmissions pouvant fonctionner dans la bande des fréquences millimétriques, et dans certains cas pouvant dépasser les 100 GHz 0 [IV.2] et [IV.3].

Néanmoins les lignes fabriquées sont principalement des lignes de transmission CPW très courtes (à peine quelques millimètres) afin de limiter les résonances parasites. Contrairement aux lignes CPWG elles n'ont pas de modes parasites liés à la résonance du plan de masse sous le substrat (partie II.1.1). Mais par contre, toute discontinuité peut générer des différences de potentiel entre conducteurs latéraux, et donc la propagation du mode fente, qui peut être éliminé qu'en connectant les plans de masse entre eux, ce qui ramène à l'utilisation de vias ou de bonding.

L'adaptation des lignes de transmission réalisées est au mieux de -15 dB sur leur bande de fonctionnement, ce qui peut amener des pertes supplémentaires.

Pour éviter au maximum ces différents problèmes, la méthode la plus couramment utilisée est de réaliser des vias traversant métalliques [IV.4] pour des lignes CPWG. Ainsi les différents plans de masses (inférieur et latéraux) sont connectés entre eux, les amenant tous au même potentiel et supprimant des modes de résonance s'installant dans le substrat entre les dits plans de masse. Cette méthode permet également d'assurer une bonne adaptation des lignes de transmission sur l'ensemble de leur bande de fonctionnement (de plusieurs dizaines de GHz).

Deux étapes sont en général nécessaires afin de réaliser des vias traversant : la réalisation du via (perçage ou impression) et sa métallisation.

Pour l'étape de réalisation du via, soit le substrat diélectrique est percé mécaniquement [IV.5] ou par laser [IV.6], soit des trous sont directement laissés lors de l'impression d'un substrat par technologie additive [IV.7]. L'étape de métallisation du via peut être réalisée selon plusieurs méthodes en fonction des applications, des matériaux et des composants réalisés :

- Métallisation par bain chimique [IV.8],
- Utilisation de pate conductrice pour remplir les vias [IV.9],
- Dépôt d'encre conductrice en utilisant des technologies additives (inkJet, AJP, …) [IV.10] [IV.11].

En utilisant les technologies additives, nous pouvons soit complètement remplir les vias soit simplement métalliser leurs flancs avant de recuire le métal ajouté.

Lorsque le via est rempli d'encre conductrice puis fritté, nous pouvons observer des craquelures ou au contraire des zones pas assez frittées à l'intérieur du vias pouvant provoquer des discontinuités électriques pénalisantes.

A l'inverse, si nous souhaitons seulement métalliser les flancs du vias, ce dernier doit être percé ou imprimé en forme de cône dont l'inclinaison des plans inclinés est au minimum de 45° pour optimiser le recouvrement de l'encre déposée (partie III.1.1). Le problème de ce cas de figure est que le diamètre de ces vias devient forcément plus important. Il est donc beaucoup plus compliqué à utiliser sur des composants fonctionnant à des fréquences >100 GHz. Le travail présenté en [IV.12] montre ces deux cas de figure.

Pour simplifier au maximum cette étape technologique, la nouvelle famille de lignes de transmission que nous présentons dans ce chapitre permet de remplacer les vias traversant par des murs métalliques.

Pour réaliser ces lignes de transmission nous avons principalement utilisé des substrats dont les épaisseurs ne dépassent pas 50 µm en kapton® (polyimide) ou entièrement imprimés à partir de l'encre polyimide utilisée dans la partie II.4 (avec leur tangente de pertes respectives 9.10^{-3} et 4.10^{-2}) . En effet, comme nous avons pu le constater dans le travail en [IV.13], des substrats diélectriques fins (ici environ 20 µm d'épaisseur) et de permittivité faible sont principalement utilisés pour réaliser des lignes de transmission. Le niveau de performances de celles-ci sont les mêmes que celles réalisées dans les parties II.3.3.2 et III.1.2.2 sur des substrats alumine (de tangente de pertes 3.10^{-4}).

Nous allons donc commencer ce chapitre par présenter cette nouvelle famille de lignes de transmission que nous avons appelée Vialess. Nous réaliserons ensuite une comparaison avec une ligne de transmission CPWG classique puis nous présenterons les différentes lignes réalisées et mesurées.

La deuxième partie de ce chapitre concerne toute une nouvelle gamme de composants inspirée du concept de la Vialess et adaptée à la fabrication additive par AJP. Nous présenterons des lignes Vialess autocollantes dont le but principal est à terme d'être utilisées pour interconnecter plusieurs composants entre eux. Des filtres et résonateurs inspirés de la technologie SIW ont également été réalisés et fabriqués sur le même principe de réalisation que la Vialess.

L'ensemble des différents essais effectués dans cette partie ont pour unique but de réaliser et prouver des preuves de concept.

IV.1. Méthode alternative de fabrication de vias: la ligne de transmission Vialess

IV.1.1. Présentation

De manière générale, la meilleure manière de fabriquer une ligne de transmission, d'une longueur supérieure à plusieurs millimètres et bien adaptée sur toute sa bande de fréquence de fonctionnement, est de connecter les différents plans de masse entre eux en utilisant des vias traversant.

Le travail présenté en [IV.14] montre plusieurs configurations de positionnement de vias sur une ligne de transmission CPWG. Leur étude montre qu'il est nécessaire de positionner plusieurs rangés de vias de façon à ce qu'ils soient le plus rapprochés possible pour éliminer de manière efficace les résonances parasites à hautes fréquences (supérieures à 70 GHz). La Figure IV-1 montre la manière recommandée de réaliser une ligne de transmission CPWG.

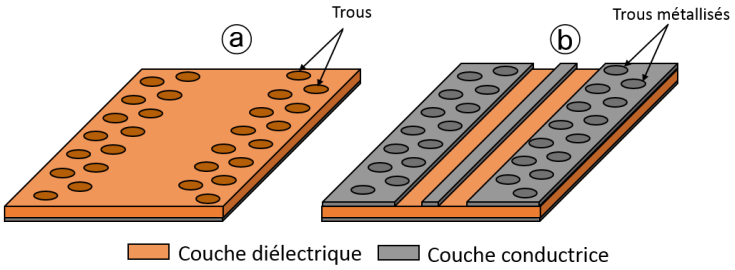


Figure IV-1: Description d'une ligne de transmission CPWG recommandée en bande millimétrique : ⓐ Réalisation des vias traversant dans le substrat ; ⓑ Métallisation des vias traversant

Dans la Figure IV-1 ⓐ, les vias traversant sont réalisés soit par perçage mécanique du substrat soit par impression. Dans la Figure IV-1 ⓑ, la couche métallique est ajoutée et l'ensemble des vias sont métallisés.

Dans le cas où nous souhaitons entièrement imprimer les lignes de transmission CPWG, ce n'est pas l'étape d'impression du substrat diélectrique qui est la plus longue et la plus difficile à réaliser mais l'étape de métallisation des vias traversant. En effet, pour plusieurs dizaines de micromètres de diélectrique imprimé, il faut être capable de remplir ces vias d'encre à base d'argent par AJP.

Sans compter le temps de fabrication très important que cela représente, il est difficile de bien fritter une couche métallique aussi épaisse. Ainsi, une méthode de frittage adaptée pour des dépôts fins de quelques micromètre d'épaisseur sera insuffisante pour une couche de plusieurs dizaines de micromètre d'épaisseur.

Dans le cas où les vias traversant sont en forme de cônes, leur diamètre plus important limitera leur nombre par unité de surface et par conséquent cela limitera leur effet sur les fréquences de résonance parasites.

A partir de ces observations, nous pensons que de telles méthodes de réalisation sont peu adaptées lorsque l'on souhaite réaliser des lignes de transmission CPWG fonctionnant à 100 GHz avec la technologie additive.

C'est pourquoi, afin de simplifier au maximum la mise en œuvre d'impression et de contourner toutes ces problématiques, nous proposons une nouvelle famille de ligne de transmission que nous avons appelé ligne Vialess. La Figure IV-2 présente une ligne de transmission Vialess telle que nous l'avons imaginée.

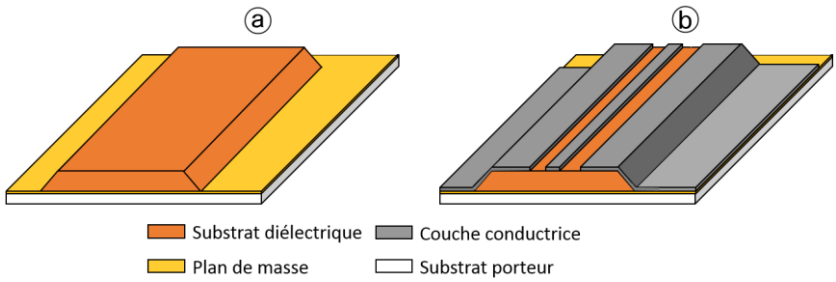


Figure IV-2: Description d'une ligne de transmission Vialess : ⓐ Réalisation du substrat diélectrique avec des plans inclinés ; ⓑ Réalisation de la couche conductrice et métallisation des plans inclinés

Dans la Figure IV-2 ⓐ un substrat porteur est métallisé afin de créer un plan de masse. Sur celui-ci est imprimé un substrat diélectrique qui comprend sur ses flancs des plans inclinés de 45°. Dans la Figure IV-2 ⓑ, la couche conductrice est ensuite imprimée sur le substrat diélectrique. Les flancs inclinés métallisés permettent de connecter les différents plans de masse entre eux.

Contrairement à la ligne de transmission CPWG classique, nous avons remplacé les rangées de vias traversant par deux murs métalliques et nous avons utilisé moins de quantité d'encre diélectrique. En termes de caractéristiques électriques, nous avons effectué plusieurs études de comparaison par simulation afin de situer cette ligne de transmission Vialess par rapport à une ligne de transmission CPWG classique.

IV.1.2. Comparaison des lignes CPWG et Vialess par simulation

Avec le logiciel de simulation électromagnétique ANSYS 17, nous avons comparé les lignes de transmission CPWG et Vialess en fonction des mêmes paramètres de simulation. Les matériaux utilisés dans les simulations sont les suivants :

→ Un substrat polyimide (ε_r=3.12 et tanδ=0.026) de 50 µm d'épaisseur,
→ Un plan de masse en or (σ=41 S/µm) de 5 µm d'épaisseur,
→ Une couche conductrice en argent (σ=20 S/µm) de 2 µm d'épaisseur.

Les deux modèles de simulation sont visibles dans la Figure IV-3.

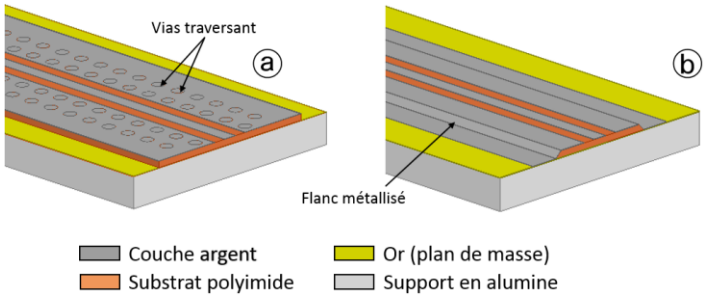


Figure IV-3: Modèle simulé des lignes de transmission : ⓐ CPWG ; ⓑ Vialess

Pour la ligne de transmission CPWG (Figure IV-3 ⓐ), nous avons pris en compte les règles de design généralement utilisées lorsque l'on utilise des vias traversant : leur diamètre est environ égal à deux fois l'épaisseur du substrat et l'écartement centre à centre entre deux vias équivaut à deux fois leur diamètre. Nous avons positionné deux rangées de vias de chaque côté de la ligne pour optimiser leur effet.

Pour la ligne de transmission Vialess (Figure IV-3 ⓑ) les flancs sont inclinés de 45°.

Dans la Figure IV-4, nous avons comparé les niveaux de pertes de chacune de ces deux lignes de transmission dans les mêmes conditions de simulation. Chaque ligne fait 10 mm de longueur.

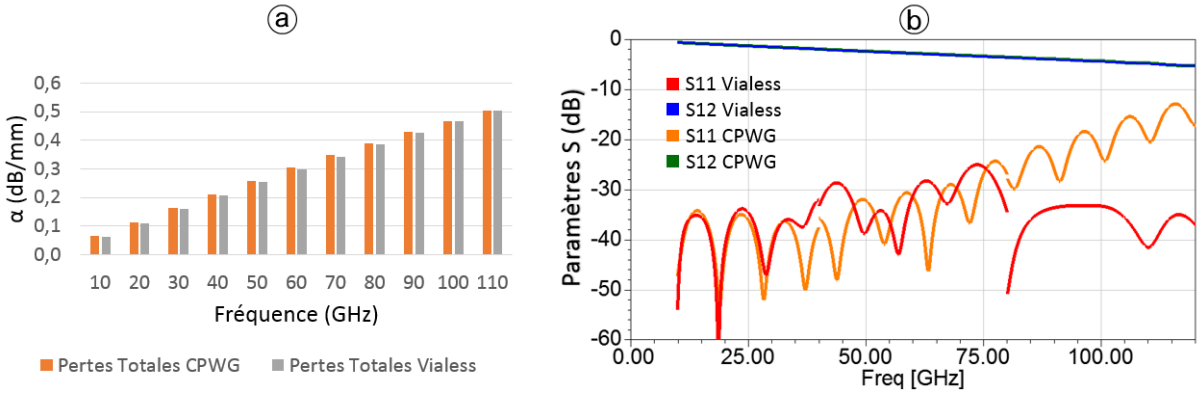


Figure IV-4: Comparaison des lignes de transmission CPWG et Vialess : ⓐ Comparaison des atténuations linéiques ; ⓑ Comparaison des paramètres S

Comme nous pouvons le constater dans la Figure IV-4 ⓐ, de 10 à 110 GHz ces deux types de lignes de transmission ont des performances très similaires. A 100 GHz, en fonction des paramètres de simulation, nous avons une atténuation linéique de 0.468 et 0.465 pour les lignes de transmission CPWG et Vialess respectivement.

Lorsque nous observons les paramètres S de ces deux lignes de transmissions dans la Figure IV-4 ⓑ, nous pouvons cependant constater que la ligne de transmission CPWG commence à se désadapter à 100 GHz alors que la ligne de transmission Vialess reste adaptée autour de -25 dB sur toute la bande de fréquence.

Nous pouvons donc constater que la ligne de transmission Vialess est plus performante pour des fréquences supérieures à 100 GHz. Les murs métalliques apparaissent logiquement plus adaptés que les vias pour maintenir une impédance caractéristique constante selon l'axe de propagation, la section de la ligne restant uniforme.

Les pertes de ces deux lignes sont d'origines métallique, diélectrique et par rayonnement. Nous avons mis en évidence leur évolution en fonction de la fréquence dans la Figure IV-5

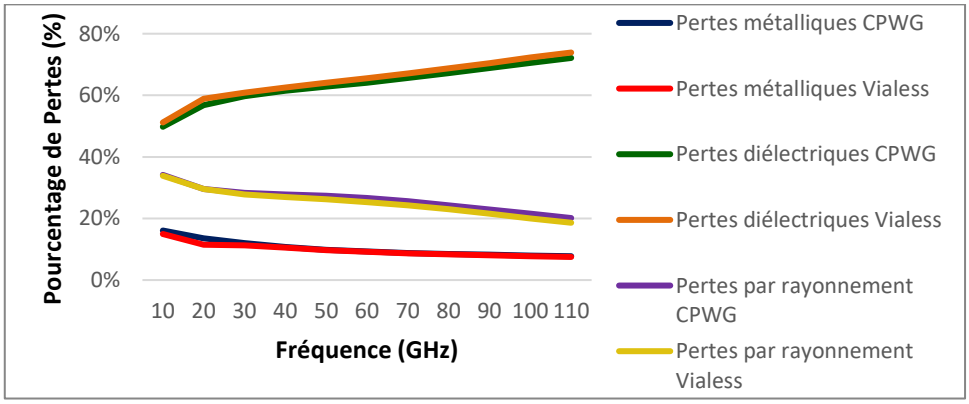


Figure IV-5: Différents niveaux de pertes des lignes CPWG et Vialess

Les différents types de pertes sont similaires pour les deux lignes de transmission CPWG et Vialess. Si nous nous plaçons vers 100 GHz alors les pertes métalliques, diélectrique et par rayonnement représentent respectivement 7.95%, 70.51% et 21.54%.

Ceci montre que pour obtenir les performances les plus intéressantes il faudra choisir des substrats ou encres diélectriques à faibles pertes.

L'ensemble de ces résultats nous permet de conclure que le modèle de ligne de transmission Vialess permet d'obtenir des niveaux de performances similaires aux lignes de transmission CPWG. Sa méthode de fabrication étant beaucoup plus simple à mettre en œuvre avec la technologie AJP, elle est parfaitement adaptée pour des applications hyperfréquences aux fréquences millimétriques.

IV.1.3. Caractéristiques de la ligne de transmission Vialess

Lorsque nous réalisons une ligne de transmission Vialess, nous pouvons jouer sur quatre paramètres (Figure IV-6): la largeur de la ligne centrale W, les largeurs de gaps Gap, la largeur des plans de masses latéraux L_{masse} et enfin l'épaisseur du substrat diélectrique $h_{substrat}$.

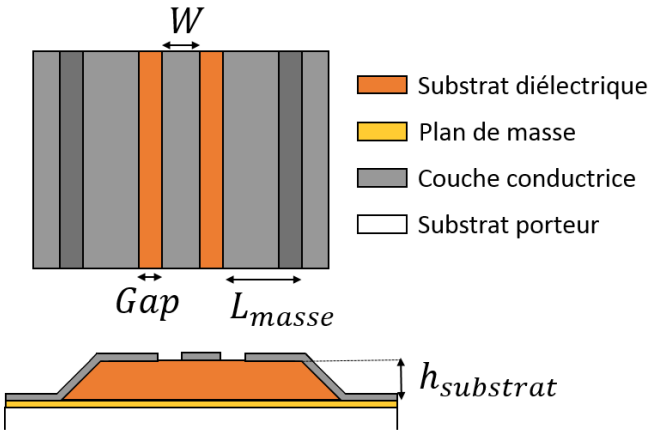


Figure IV-6: dimensions importantes d'une ligne de transmission Vialess

Les dimensions W et Gap permettent directement de gérer l'impédance caractéristique de la ligne. Les résultats de nos simulations nous ont permis de démontrer que la ligne de transmission Vialess est très robuste face aux tolérances de fabrication. En effet, nous avons établi que pour une impédance caractéristique qui varie de +/- 10 Ω, l'adaptation de la ligne diminue au maximum jusqu'à environ -15 dB. Cela correspond à une dispersion sur W et gap d'environ 50 µm, ce qui est largement compatible avec les tolérances vues dans le Chapitre II. Nous conseillons cependant en pratique de ne pas dépasser les +/- 5 Ω afin de travailler avec une ligne de transmission dont l'adaptation est d'environ -20 dB, ce qui correspond à une dispersion entre 20 et 25 µm des dimensions W et gap.

En fonction de la dimension L_{masse}, nous pouvons repousser les fréquences parasites des modes supérieurs. Plus précisément, plus celle-ci est petite et plus les résonances sont repoussées vers les hautes fréquences. Cette dimension doit être adaptée en fonction de la paire de pointes que nous souhaitons utiliser pour leur mesure et la fréquence maximum de fonctionnement de la ligne de transmission Vialess

Pour terminer, nous avons effectué une série de simulations afin de relever l'évolution des pertes de la ligne en fonction de différentes épaisseurs allant de 20 à 100 µm. La Figure IV-7 présente l'évolution des pertes de la ligne de transmission Vialess en fonction de l'épaisseur du substrat diélectrique.

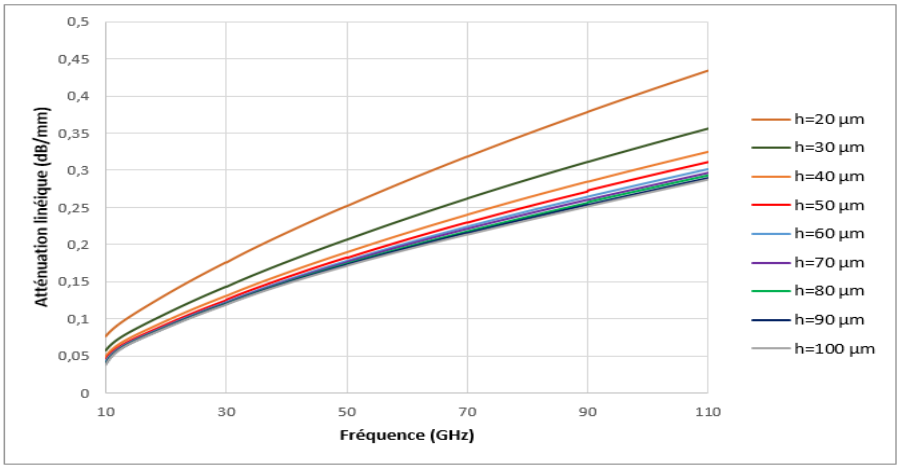


Figure IV-7: Evolution des performances de la lignes Vialess en fonction de l'épaisseur du substrat

Nous pouvons constater que pour une épaisseur de polyimide passant de 20 à 50 µm, l'atténuation linéique de la ligne s'améliore de 0.12 dB/mm à 110 GHz. Passer de 50 à 60 µm d'épaisseur n'amène qu'une diminution supplémentaire de 0.01 dB/mm.

Nous considérons donc pour la suite qu'une épaisseur de 50 µm de polyimide sera suffisante pour nous assurer que les lignes de transmission Vialess que nous souhaitons réaliser aient des performances à l'état de l'art (<0.2 dB/mm).

IV.1.4. Fabrication des lignes de transmission Vialess

Durant notre étude, nous avons réalisé deux types de prototypes pour la ligne de transmission *Vialess*.

Pour le premier prototype, l'AJP est seulement utilisé pour imprimer l'encre à base d'argent sur une bande adhésive de Kapton® afin de réaliser une preuve de concept le plus simplement possible. En nous basant sur les résultats obtenus pour l'impression de l'encre à base d'argent dans le Chapitre II, la mise en œuvre de devrait pas comporter de difficultés particulières.

Le second prototype quant à lui est entièrement imprimé par AJP par une éjection séquentielle d'encre à base de polyimide et d'encre à base d'argent. D'après les résultats de la partie II.4.1, nous estimons que nous aurons des difficultés de contrôle dans l'épaisseur de polyimide imprimé. Cela aura pour effet de modifier l'impédance caractéristique de la ligne de transmission Vialess d'une façon que nous ne pourrons que peu prévoir et ainsi probablement amener des pertes supplémentaires liées à l'adaptation de la ligne.

IV.1.4.1. Premier type de prototype : réalisation de Vialess par impression argent

IV.1.4.1.1. Fabrication du premier prototype de lignes de transmission Vialess

Afin de réaliser le plus rapidement possible nos prototypes de lignes de transmission *Vialess* nous avons cherché à simplifier sa réalisation en nous concentrant uniquement sur l'étape d'impression de l'encre à base d'argent que nous maitrisons le mieux.

C'est pourquoi nous avons choisi comme substrat une bande de Kapton® autocollante d'épaisseur 50 µm (partie IV.1.3) sur laquelle nous allons imprimer les pistes en argent.

La fabrication du premier prototype de la ligne de transmission Vialess s'effectue en quatre étapes (Figure IV-8).

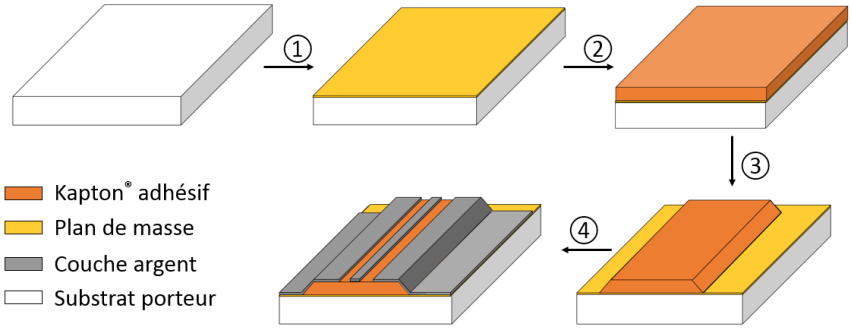


Figure IV-8: Etapes de fabrication du prototype de lignes de transmission Vialess sur Kapton® adhésif : ① Métallisation du substrat support ; ② Collage du Kapton® adhésif sur le plan de masse ; ③ Découpage laser du Kapton® ; ④ Impression de la couche métallique par AJP

Dans la Figure IV-8, l'étape ① permet de réaliser un plan de masse sur le substrat supportant la ligne de transmission Vialess. Nous pouvons soit réaliser des dépôts métalliques à l'aide de bains chimiques, soit simplement utiliser un support métallique tel que l'aluminium.

Dans les étapes ② et ③ respectivement, la bande de Kapton® adhésive est placée sur le plan de masse puis est découpée au laser (machine de gravure laser Cerinnov présentée dans la partie III.3.1.2). Pour terminer dans l'étape ④, l'encre à base d'argent est déposée sur la bande découpée puis frittée.

L'utilisation du scotch Kapton® est intéressante sur plusieurs points. Il peut être directement collé sur le plan de masse et sa souplesse le rend facile à manipuler. En utilisant un palpeur nous avons précisément mesuré son épaisseur à 51 +/- 1 µm.

En utilisant la méthode de caractérisation par cavité résonante fendue (partie II.2.1.1), nous avons évalué sa permittivité ε_r entre 3.02 et 3.09 et sa tangente de pertes tanδ entre $2{,}35.10^{-2}$ et $2{,}61.10^{-2}$ pour des fréquences entre 8 et 13 GHz.

Afin de quantifier la précision de découpe accessible avec notre équipement laser, nous avons effectué plusieurs tests de découpe de Kapton® adhésif. Ces tests consistent à découper des bandes de plusieurs largeurs différentes afin de mettre en évidence la tolérance de gravure pour ensuite la réduire le plus possible en optimisant le procédé de gravure. Des exemples des rectangles découpés ainsi que les différentes mesures réalisées sont données dans la Figure IV-9.

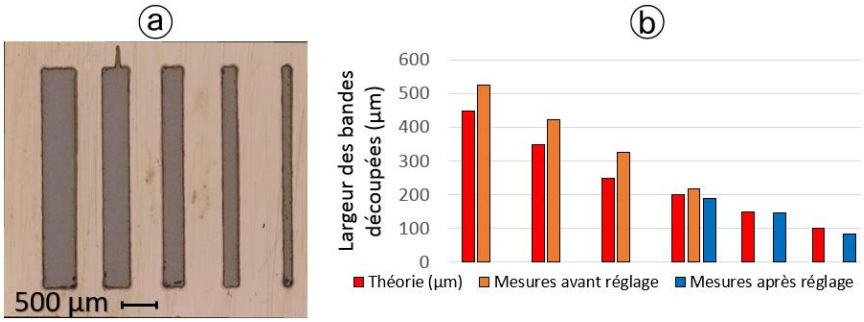


Figure IV-9: Etude de précision des gravures : ⓐ Exemple des gravures réalisées sur le scotch Kapton® ; ⓑ Comparaison entre les dimensions théoriques et mesurées avant et après l'optimisation du procédé de gravure

Dans la Figure IV-9 ⓑ, nos premiers tests ont mis en évidence un décalage systématique de 73 +/- 4 µm entre les dimensions mesurées et théoriques. Une fois compensé, nous avons réussi à obtenir une largeur minimum de bande découpée de 85 µm. Néanmoins, nous conseillons de ne pas descendre en dessous de 150 µm afin de limiter la tolérance de fabrication à +/- 10 µm.

Pour fabriquer la ligne de transmission Vialess nous avons découpé des bandes de Kapton® adhésif de largeur moyenne 789 +/- 3 µm et 373 +/- 7 µm respectivement. Sur ces deux gabarits de bandes, nous avons imprimé deux types de lignes de transmission Vialess dont les fréquences de fonctionnement maximum sont respectivement 40 GHz et 67 GHz.

Chaque bande découpée a une longueur de 1 cm. Pour l'impression d'argent, les pistes métalliques supérieures ont été imprimées en 1 et 2 couches.

Les flancs des bandes découpées étant presque droits, nous avons augmenté localement le paramètre de recouvrement des traits d'argent imprimés à 75% afin d'augmenter le recouvrement de l'encre en ajoutant plus de matière. Ce paramètre a été appliqué uniquement pour 1 couche déposée car nous avons émis l'hypothèse que pour 2 couches, la quantité de matière déposée est suffisante pour permettre un bon recouvrement sur les flancs. De plus, augmenter le recouvrement augmente de manière non négligeable le temps d'impression des lignes et comme nous l'avons expliqué dans la partie II.3.2.1.2 ; nous préférons privilégier les impressions les moins longues afin de limiter les problèmes d'instabilité des paramètres d'impression dans le temps.

Un exemple de ligne de transmission Vialess imprimée sur une bande de Kapton® adhésive est montré dans la Figure IV-10.

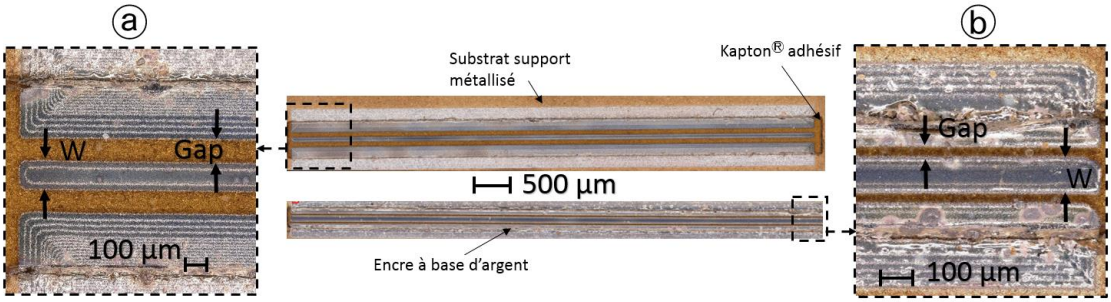


Figure IV-10: Exemple de lignes de transmission Vialess sur du Kapton® adhésif : ⓐ Ligne 40 GHz; ⓑ Ligne 67 GHz

Toutes les mesures de dimensions ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence et sont données en Annexe 3.

Les dimensions mesurées sont très proches des valeurs théoriques pour 1 couche déposée. Pour 2 couches, la tolérance de fabrication amène une impédance caractéristique de la ligne de transmission de 47 Ω. Malgré ces légères variations nous sommes dans de bonnes conditions expérimentales (partie IV.1.3).

Nous avons utilisé un profilomètre Dektak afin de mesurer les différentes épaisseurs des lignes. Pour les lignes Vialess 40 GHz (Figure IV-10 ⓐ) nous avons mesuré une épaisseur moyenne pour 1 et 2 couches respectivement de 1.58 +/- 0.11 µm et 3.56 +/- 0.13 µm. Pour les Vialess à 67 GHz (Figure IV-10 ⓑ) nous avons pour 1 et 2 couches respectivement

1.98 +/- 0.17 µm et 3.92 +/- 0.09 µm. Chaque ligne de transmission a été frittée avec la méthode de frittage F_{180} (partie II.3.2.2.1) qui fournit une conductivité effective évaluée à 22 S/µm. Nous devons donc nous attendre à observer des pertes métalliques supplémentaires liées à la profondeur de peau jusqu'à 40 GHz pour les lignes déposées en 1 couche.

La seule difficulté de mise en œuvre que nous avons pu observer est liée d'une part aux coins des bandes découpées qui sont arrondis, et d'autre part à l'aspect transparent du Kapton®, ce qui amène une tolérance d'alignement de l'équipement d'impression par AJP que nous pouvons estimer à 100 µm. Afin de compenser ce manque de précision nous avons mesuré précisément au microscope numérique Keyence les bandes découpées afin de pouvoir positionner au mieux le modèle CAO.

IV.1.4.1.2. Mesures et analyses des lignes de transmission Vialess imprimées sur du Kapton® adhésif

Nous avons utilisé un analyseur PNA-X Keysight avec des pointes de mesures GSG ACP (pitch de 250 µm) pour les lignes de transmission Vialess fonctionnant sur la bande de fréquences [10 MHz ; 40 GHz] et GSG Infinity (pitch 125 µm) pour la bande de fréquences [10 MHz ; 67 GHz].

La première mesure réalisée pour une ligne de transmission Vialess imprimée sur une bande de Kapton® adhésive découpée au laser est montrée dans la Figure IV-11.

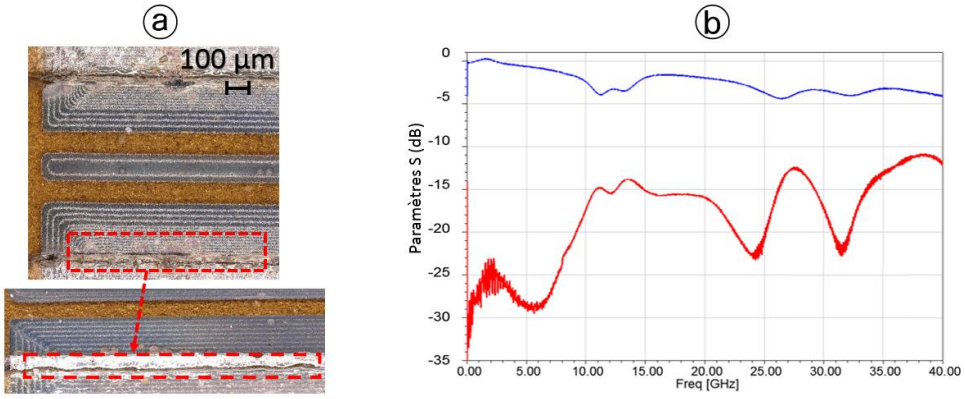


Figure IV-11: Première mesure de la ligne de transmission Vialess sur Kapton® adhésif : ⓐ Zoom sur le flanc de la ligne et présence de craquelure ; ⓑ Mesures des paramètres S jusqu'à 40 GHz

Dans la Figure IV-11 ⓐ, nous pouvons observer une grande fissure de chaque côté de la ligne de transmission au niveau des flancs. Nous supposons que le recouvrement de l'encre a été insuffisant au niveau de la jonction entre la bande adhésive et le plan de masse du substrat support à cause de l'inclinaison trop droite du flanc après découpe laser. De ce fait, le stress apporté par le frittage de l'encre argent et le positionnement des pointes de mesure ont causé l'apparition de ces fissures.

Dans la Figure IV-11 ⓑ, nous avons les paramètres S de la mesure d'une des lignes de transmission Vialess avec les fissures sur les flancs. Nous remarquons plusieurs fréquences de résonances parasites ainsi qu'une adaptation bien plus faible que prévue initialement entre -10 et -15 dB. De plus, en augmentant la pression appliquée sur le substrat par les pointes de mesure, nous avons constaté que la réponse en fréquence de la ligne de transmission changeait constamment.

Pour réparer les flancs des lignes de transmission Vialess fabriquées, nous avons simplement appliqué précisément une colle métallique epoxy chargée en particules d'argent. Nous avons évalué la conductivité de celle colle argent à 1.10^6 S/µm. Les lignes réparées sont montrées dans la Figure IV-12.

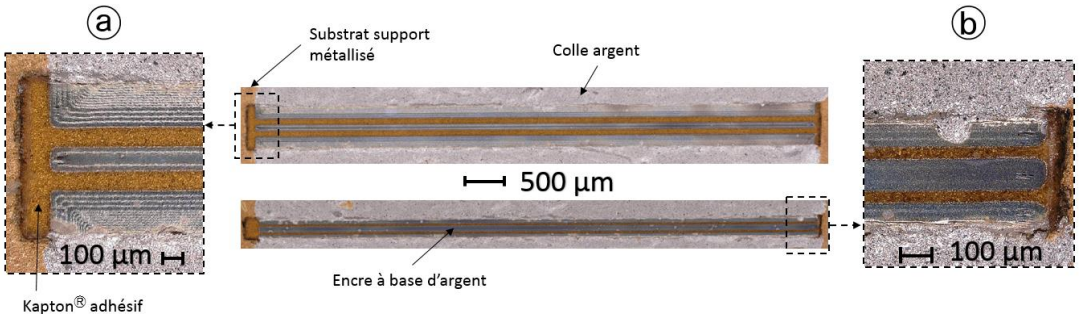


Figure IV-12: Lignes Vialess réparées à l'aide d'une colle argent epoxy : ⓐ Ligne 40 GHz ; ⓑ Ligne 67 GHz

Dans les Figure IV-12 ⓐ et ⓑ, nous pouvons observer les lignes de transmission Vialess fonctionnant sur les bandes de fréquences [10 MHz ; 40 GHz] et [10 MHz ; 67 GHz] respectivement.

De nouvelles mesures de paramètres S ont été réalisées avec un analyseur PNA-X Keysight sur les mêmes bandes de fréquences en utilisant des pointes de mesures GSG ACP (pitch de 250 µm) pour les lignes de transmission Vialess fonctionnant sur la bande de fréquences [10 MHz ; 40 GHz] et GSG Infinity (pitch 125 µm) pour la bande de fréquences [10 MHz ; 67 GHz]

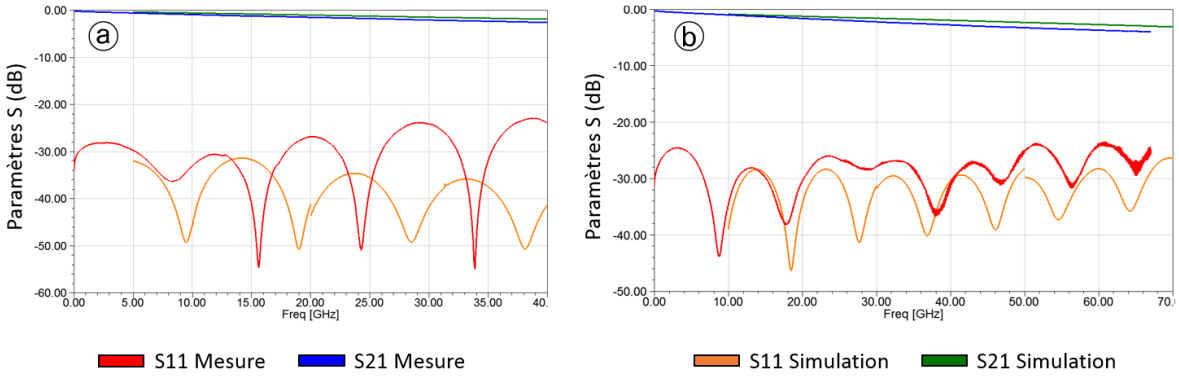


Figure IV-13: Mesures des lignes de transmission Vialess réparée : ⓐ Ligne 40 GHz ; ⓑ Ligne 67 GHz

Dans les Figure IV-13 ⓐ et ⓑ nous observons expérimentalement un comportement très proche de ce que nous obtenons en simulation sur toute la bande de fréquences étudiée. Malgré les différents écarts dimensionnels que nous avons relevés, nous gardons une très bonne adaptation comprise entre -30 et -25 dB sur toute la bande de fréquence de fonctionnement.

Néanmoins nous observons plus de pertes en mesure. Nous supposons que ces pertes supplémentaires viennent principalement de deux points :

- De la rugosité du dépôt métallique non pris en compte dans la simulation,
- Des pertes du substrat sous évaluées. Plus précisément, les valeurs simulées proviennent de caractérisation effectuée jusqu'à 13 GHz. Pour mieux prendre en

compte les véritables caractéristiques électriques du scotch Kapton®, il sera nécessaire d'effectuer la caractérisation plus haut en fréquence.

Nous avons également confirmé par simulation que l'ajout d'un mauvais conducteur au niveau des flancs ne dégrade pas les performances des lignes de transmission Vialess. En effet, la colle à base d'argent étant très éloignée des maximums de champs nous n'avons aucun impact significatif sur les performances des lignes de transmission en simulation.

Nous avons tracé les différentes atténuations linéiques des lignes de transmission Vialess imprimées sur le Kapton® adhésif dans la Figure IV-14.

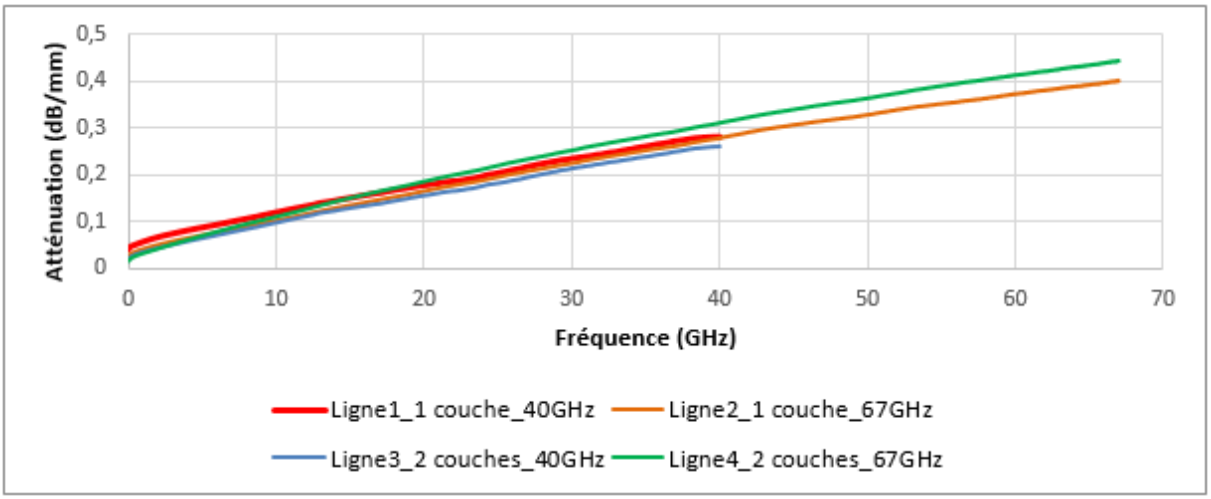


Figure IV-14: Niveau d'atténuation de chaque ligne Vialess mesurée après réparation

Dans la Figure IV-14, nous pouvons constater que les atténuations linéiques des lignes de transmission Vialess imprimées en 1 couche sont très proches. Nous pouvons relever à 40 et 60 GHz respectivement 0.28 dB/mm et 0.37 dB/mm.

Pour les lignes de transmission Vialess imprimées en 2, couches les résultats sont plus éloignées. Pour la Vialess 40 GHz en 2 couches, nous relevons à cette fréquence une atténuation linéique de 0.26 dB/mm. Pour la Vialess à 67 GHz en 2 couches nous relevons pour 40 et 60 GHz respectivement une atténuation linéique de 0.31 dB/mm et 0.41 dB/mm.

L'impression des lignes de transmission Vialess en 1 couche semble être mieux contrôlée et leurs performances semblent plus répétables que pour les lignes imprimées en 2 couches.

IV.1.4.1.3. Mesures des lignes Vialess sur Kapton® sur la bande 75-110 GHz

Les dimensions des lignes de transmission Vialess 67 GHz nous permettant d'utiliser des pointes de mesure de pitch 100 µm, nous les avons ainsi mesurées sur la bande [75 GHz ; 110 GHz]. Un exemple de mesure est donné Figure IV-15.

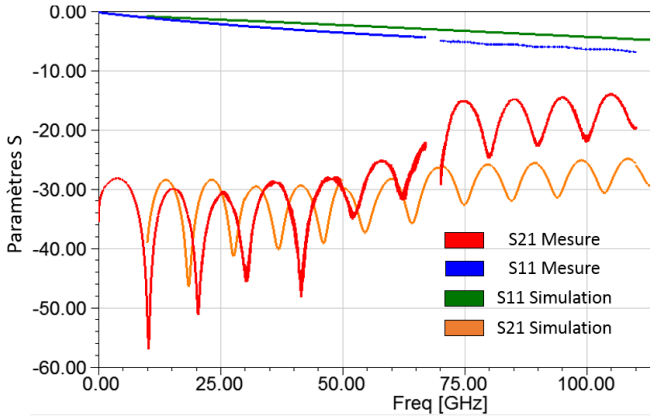


Figure IV-15: Mesure d'une ligne de transmission Vialess sur Kapton® adhésif jusqu'à 110 GHz

Dans la Figure IV-15 nous pouvons remarquer que nous obtenons une désadaptation de 10 dB par rapport à ce qui avait été obtenu avant 67 GHz amenant donc de ce fait l'adaptation autour de -15 dB sur la bande de fréquence [75 GHz ; 110 GHz].

Nous avons plusieurs hypothèses pour expliquer cette désadaptation :

- Un problème lié aux pointes de mesure utilisées. Plus précisément, le manque de souplesse des pointes Infinity peut limiter le contact avec le dépôt lorsque celui-ci n'est pas parfaitement plat.
- Un problème lié à la calibration du banc (logiciel utilisé ou kit de calibrage non adapté à haute fréquence).

Nous pensons que le problème principal se trouve dans le positionnement des pointes de mesure Infinity. En effet, comme nous souhaitons le montrer avec la Figure IV-16 le contact entre les pointes de mesure et le dépôt métallique n'est pas optimal. De plus, la bande adhésive Kapton® est souple et ne facilite pas leur contact en augmentant la pression appliquée sur la couche d'argent par les pointes de mesure.

Ces conditions de mesure créent une résistance de contact non maitrisée et donc apportent des pertes supplémentaires ainsi qu'une désadaptation de lignes de transmission.

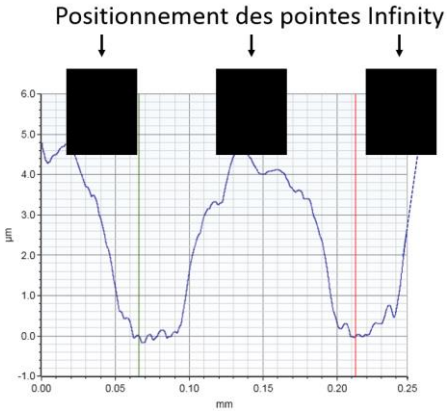


Figure IV-16: Schéma du positionnement des pointes de mesure Infinity de pitch 100 µm sur les lignes de transmission Vialess prévues pour fonctionner sur la bande de fréquences [10 MHz ; 67 GHz]

Cette désadaptation apporte des pertes supplémentaires que nous pouvons observer dans la Figure IV-17.

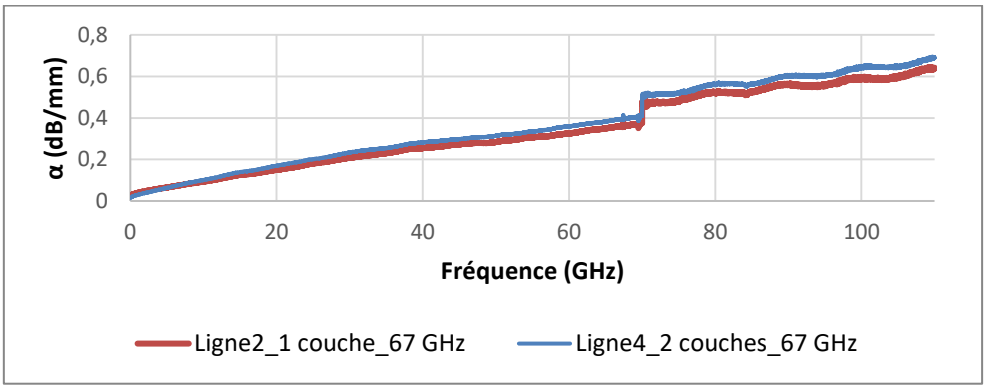


Figure IV-17: Atténuation mesurée de la ligne Vialess après réparation jusqu'à 110 GHz

Dans la Figure IV-17 nous pouvons observer un saut des valeurs d'atténuation qui correspond à 0.095 dB/mm pour la Vialess à 67 GHz en 1 couche et 0.098 dB/mm pour la Vialess à 67 GHz en 2 couches.

IV.1.4.2. Deuxième type de prototype : réalisation de lignes Vialess entièrement imprimées

IV.1.4.2.1. Fabrication des lignes

La philosophie de ce deuxième prototype de ligne de transmission Vialess est de pouvoir proposer un composant entièrement imprimé par la technologie AJP.

Nous avons ici utilisé comme substrat de support une plaque d'aluminium qui fera office de plan de masse. La conductivité effective de l'aluminium est évaluée à 23.69 +/- 2.09 S/µm à 35 GHz (méthode de caractérisation par cavité de la partie II.2.1.2).

La partie diélectrique de la ligne de transmission est imprimée à l'aide de l'encre à base de polyimide de permittivité ε_r d'environs 3.5 et une tangente de pertes tanδ d'environ 0.05 sur la bande de fréquences [30 GHz ; 70 GHz] (partie II.4.2).

Chaque ligne est imprimée avec 13 couches de polyimide pour une épaisseur totale souhaitée de 20 µm. La cuisson utilisée pour polymériser l'encre à base de polyimide est basée sur les informations données par le fabriquant soit 300°C pendant 30 min.

Pour la partie conductrice, les lignes de transmission ont été imprimées avec 1 couche d'encre à base d'argent et en appliquant la méthode de frittage $F_{200P_{CTTC}}$ pour une conductivité effective attendue supérieure à 40 S/µm. Nous avons choisi de favoriser la précision d'impression à l'épaisseur de matériau déposé à partir des constats faits dans la partie précédente.

Nous réalisons ces lignes de transmission Vialess entièrement imprimées dans l'optique de pouvoir les mesurer à des fréquences supérieures à 170 GHz. A ces fréquences, les seules pointes de mesures que nous pouvons utiliser au laboratoire Xlim sont des Infinity de pitch 70 µm pour la bande de fréquences [110 GHz ; 170 GHz] et 50 µm pour les bandes de fréquences [140 GHz ; 220 GHz] et [220 GHz ; 330 GHz].

Pour que les dimensions de nos lignes de transmission Vialess nous permettent de garder une impédance caractéristique de 50 Ω, nous avons choisi d'imprimer une épaisseur de polyimide de 20 µm, une largeur de ligne centrale W de 38 µm et une largeur de gaps de 25 µm (voir sur la Figure IV-19). Nous avons choisi de monter en fréquence au détriment des performances (partie IV.1.3) avec une épaisseur de polyimide plus faible que les 50 µm recommandés précédemment. Le mode propagé sera dans ce cas plus de nature microruban que coplanaire.

La fabrication du deuxième prototype de la ligne de transmission Vialess est effectuée en deux étapes (Figure IV-18Figure IV-8).

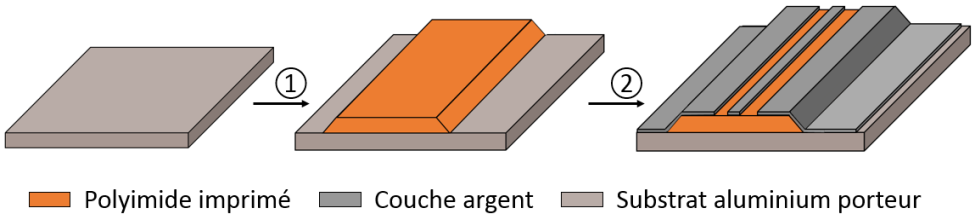


Figure IV-18: Etapes de fabrication du prototype de ligne de transmission Vialess entièrement imprimée : ① Impression de l'encre à base de polyimide ; ② Impression de l'encre à base d'argent

Dans la Figure IV-18, dans l'étape ①, nous imprimons l'encre à base de polyimide sur un substrat d'aluminium. Après la cuisson du polyimide, nous déposons l'encre à base d'argent dans l'étape ② qui est ensuite frittée selon la méthode de frittage $F_{200P_{CTTC}}$ (partie II.3.2.2.1). Contrairement à la fabrication de la ligne de transmission Vialess sur du Kapton® adhésif, ici nous avons seulement une seule étape technologique d'impression par aérosol.

Les lignes de transmission Vialess entièrement imprimées sont montrées dans la Figure IV-19.

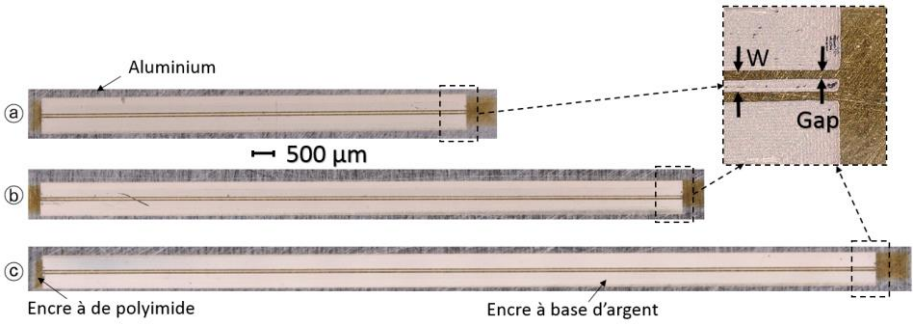


Figure IV-19: Lignes de transmission Vialess entièrement imprimées : ⓐ 1 cm ; ⓑ 1.5 cm ; ⓒ 2 cm de longueur

Toutes les mesures de dimensions ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence et sont données en Annexe 3. Les erreurs importantes que nous pouvons observer sur les largeurs de gaps sont causés par une variation de quantité de matière déposée. Les lignes de transmission étant très longues les paramètres d'impression ont dû varier dans le temps.

Dans la Figure IV-19 nous pouvons observer que les lignes en argent sont plutôt bien centrées sur le polyimide imprimé. Cependant, nous avons eu des difficultés d'alignement de l'AJP dans la mesure où le polyimide imprimé transparent est difficile à observer avec la caméra de la machine.

Il est donc intéressant de remarquer que l'imprimante Aérosol Jet® 200 SERIES SYSTEMS est peu adaptée à l'utilisation de matériaux transparents ou dont la couleur offre un contraste trop peu élevé entre le matériau cible et le reste du support.

Les épaisseurs de polyimide et d'argent ont été mesurées avec un profilomètre Dektak.

Pour les lignes de transmission de 1 cm, 1.5 cm et 2 cm de longueur, l'épaisseur moyenne mesurée du polyimide est de 15.83 +/- 1.31 µm, 12.75 +/- 0.6 µm et 12.73 +/- 0.16 µm. Pour les épaisseurs de métallisation mesurées de ces mêmes lignes de transmission, on retrouve ici aussi les constats sur les variations probables de quantité de matière éjectée. Nous avons respectivement 2.05 +/- 0.17 µm, 2.39 +/- 0.15 µm et 1.5 +/- 0.12 µm.

Pour l'ensemble des réalisations, les dimensions et épaisseurs mesurées sont assez éloignées des valeurs théoriques attendues. Comme nous l'avons expliqué dans la partie II.4.1, nous ne maitrisons pas parfaitement la procédure d'impression de l'encre polyimide c'est pourquoi nous manquons encore de précision.

En revanche l'ensemble des impressions réalisées avec l'encre à base d'argent manque également de précision. Nous pensons que cette tolérance de fabrication est due à une encre vieillissante qui n'a plus les mêmes propriétés qu'une encre neuve. Plus précisément, les paramètres d'impression mis en évidence dans la partie II.3.4 ne sont plus parfaitement adaptés.

Pour les lignes de transmission de 1 cm, 1.5 cm et 2 cm de longueur, l'ensemble des tolérances de fabrication amènent respectivement des impédances caractéristiques de 49.9 Ω, 44 Ω et 46 Ω. Ces valeurs d'impédance sont liées à la largeur du ruban, à l'épaisseur du substrat plus qu'au dimensionnement des gaps.

Avec le profilomètre Dektak, nous avons également vérifié si le profil des lignes de transmission Vialess imprimées correspond au modèle prévu (Figure IV-18). L'ensemble des profils ressemble à celui de la ligne Vialess de 1 cm de longueur présenté dans la Figure IV-20.

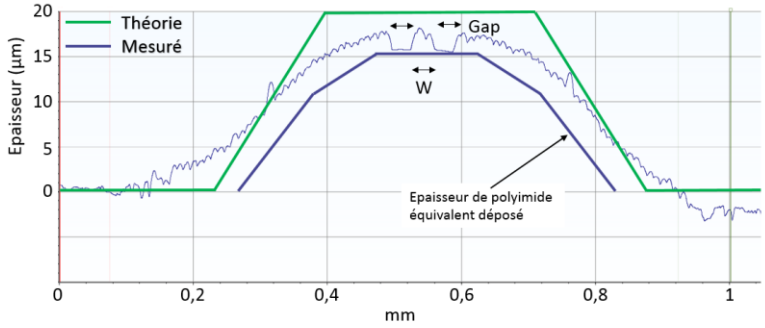


Figure IV-20: Profil d'une ligne de transmission Vialess de 1 cm de longueur

Dans la Figure IV-20 nous pouvons constater que le profil est plus arrondi par rapport au modèle théorique prévu. Ce manque de planéité sur le sommet de la ligne Vialess comparé au modèle théorique (courbe verte de la Figure IV-20) va venir compliquer le positionnement des pointes. Nous allons nous retrouver dans le même cas de figure présenté dans la Figure IV-16.

Cependant la ligne centrale reste assez bien centrée (écart inférieur à 50 µm) sur le dépôt de polyimide imprimé. Le surplus de matière sur la ligne centrale peut également se révéler gênant pour la pose des pointes de mesure.

IV.1.4.2.2. Mesures et analyse des lignes Vialess entièrement imprimées

Les lignes de transmission Vialess entièrement imprimées ont été réalisée pour fonctionner jusqu'à 300 GHz avec des pointes de mesures Infinity de pitch 50 µm.

Nous avons utilisé un analyseur ZVA et des pointes GSG ACP de pitch 120 µm pour la bande de fréquences [10 MHz ; 67 GHz] puis un analyseur PNA-X Keysight avec des pointes de mesures GSG Infinity de pitch 75 µm pour mesurer dans la bande de fréquences [110 GHz ; 170 GHz]. Les mesures des lignes de transmission Vialess sont visibles dans la Figure IV-21.

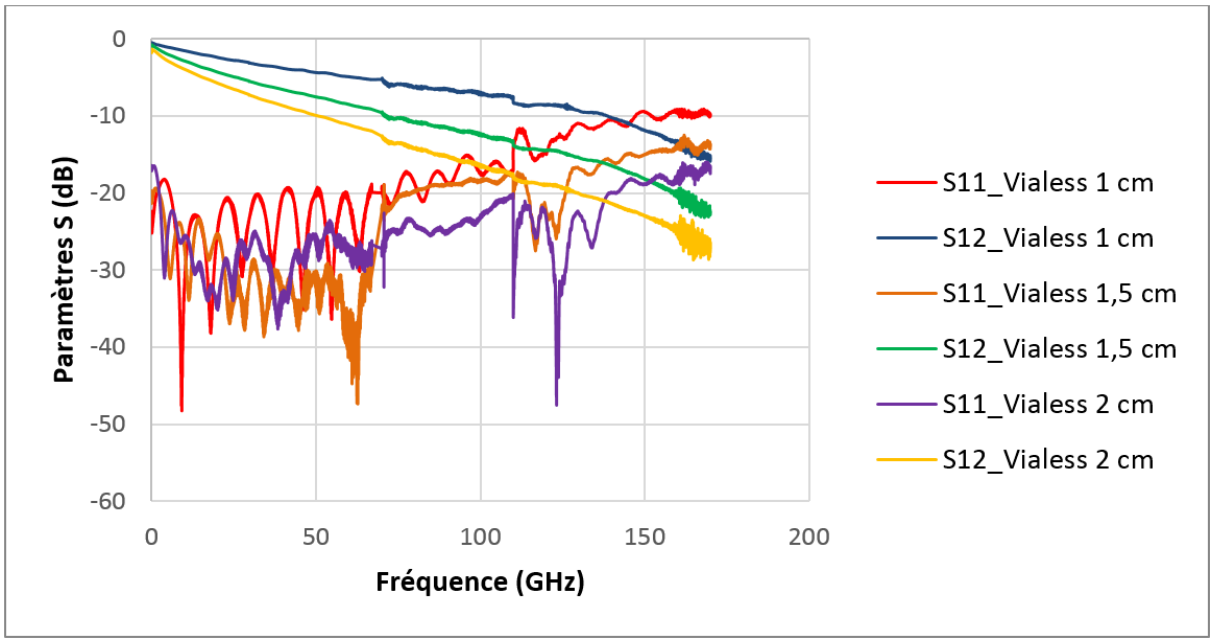


Figure IV-21: Mesure des lignes de transmission Vialess entièrement imprimées sur la bande de fréquences [10 MHz ; 170 GHz]

Dans la Figure IV-21, nous pouvons constater que pour les trois lignes mesurées sur la bande de fréquences [10 MHz ; 67 GHz] l'adaptation est comprise entre -30 et -20 dB. Malgré les écarts de fabrication constatés, les adaptations sont très correctes et les lignes de transmission fonctionnent très correctement jusqu'à 67 GHz.

Sur la bande de fréquences [110 GHz ; 170 GHz], nous avons en revanche une certaine variation dans l'adaptation des lignes de transmission Vialess. Comme illustré dans la Figure IV-16, nous pensons que les pointes Infinity ne sont pas positionnées de manière optimales sur les dépôts métalliques en raison d'un manque de planéité sur l'ensemble des composants (arrondi du polyimide imprimé, surplus d'encre à base d'argent). Pour améliorer les résultats de mesure, nous sommes donc obligés d'appliquer plus de pression avec les pointes sur la couche d'argent ce qui est fortement déconseillé lorsque nous utilisons des pointes de mesure Infinity.

La ligne de transmission qui semble le mieux fonctionner sur cette bande de fréquences semble être la ligne Vialess de 2 cm de longueur. Son adaptation reste meilleure que -15 dB jusqu'à 170 GHz.

Pour l'ensemble des lignes de transmission Vialess, nous remarquons également la présence de pertes supplémentaires dès que le paramètre S_{11} passe au-dessus de -20 dB. Pour les Vialess de 1 cm, 1.5 cm et 2 cm de longueur ces pertes apparaissent respectivement dès 110 GHz, 130 GHz et 140 GHz.

Nous avons relevé les atténuations linéiques de trois lignes de transmission Vialess entièrement imprimées dans la Figure IV-22.

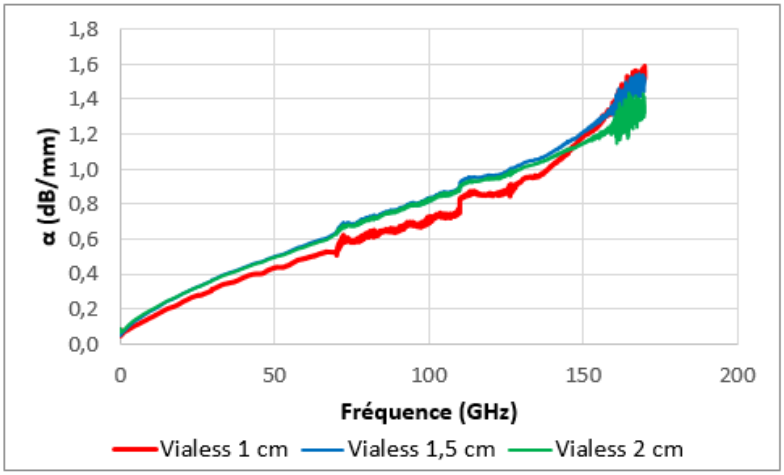


Figure IV-22: Atténuation linéique des différentes lignes Vialess entièrement imprimées

Dans la Figure IV-22, nous pouvons observer que la ligne de transmission Vialess de 1 cm de longueur présente moins de pertes que les deux autres. Comme expliqué dans la partie IV.1.3, les pertes de la ligne de transmission Vialess diminuent lorsque l'épaisseur de polyimide augmente. Etant donné que la ligne Vialess de 1 cm à plus d'épaisseur de polyimide imprimé, ces résultats correspondent à nos attentes.

Nous avons relevé à 40 GHz des atténuations linéiques de 0.38 dB/mm, 0.44 dB/mm et 0.43 dB/mm pour les lignes de transmission Vialess de longueur 1, 1.5 et 2 cm de longueur respectivement. A 100 GHz, nous relevons respectivement une atténuation linéique de 0.7 dB/mm, 0.82 dB/mm et 0.82 dB/mm. Et enfin à 140 GHz, nous relevons respectivement une atténuation linéique de 1.02 dB/mm, 1.1 dB/mm et 1.07 dB/mm.

Les épaisseurs des lignes de 1.5 cm et 2 cm de longueur étant similaires (12.75 µm et 12.76 µm d'épaisseur respectivement), nous retrouvons des atténuations linéiques très proches sur l'ensemble de la bande de fonctionnement.

La tangente de pertes étant plus élevée que celle du scotch Kapton (0.06 contre 0.02) nous avons donc des atténuations linéiques plus fortes avec les lignes de transmission Vialess entièrement imprimées que pour leur version à base de Kapton®. Nous pouvons améliorer ces performances à condition d'améliorer la méthode de cuisson du polyimide imprimé pour espérer diminuer les pertes.

IV.1.5. Comparaison de la ligne Vialess avec l'état de l'art

Afin de nous positionner par rapport à l'état de l'art actuel, nous avons comparé les performances de nos lignes de transmission à celles présentes dans la littérature.

Dans le Tableau XII nous avons comparé les atténuations linéiques à trois fréquences différentes situées respectivement dans les bandes de mesures [10 MHz ; 67 GHz], [70 GHz ; 110 GHz] et [110 GHz ;170 GHz].

Tableau XII: Comparaison de la performance des lignes Vialess avec l'état de l'art

Référence	α (dB/mm)			Longueur (mm)	Substrat / Epaisseur
	40 GHz	100 GHz	140 GHz		
Vialess sur Kapton®	0,26	0,65		10	Scotch Kapton / 50 µm
Vialess imprimée	0,38	0,7	1,02	10	Polyimide / 15.8 µm
	0,44	0,82	1,1	15	Polyimide / 12.75 µm
	0,43	0,82	1,07	20	Polyimide / 12.76 µm
[IV.15]	0,23			1.7	Alumine 3D / 500 µm – 1 mm
	0,25				
[IV.16]	0,55			11.4	Polyimide / N.A.
[IV.17]	0,2			2.4	Polyimide / 50 µm
[IV.18]	0,2			2	Polyimide / 20.7 µm
[IV.19]	≈0,2	≈0,33		1	LCP / 175 µm
	≈0,2	≈0,86		1	VeroWhite / 200 µm
[IV.20]			≈[0,32; 0,42]	[1; 3]	LCP / 50 µm

De façon générale, nous pouvons constater que les lignes de transmission Vialess imprimées sur du scotch Kapton® ont des performances proches de l'état de l'art sur la bande de fréquences [10 MHz ; 67 GHz]. Néanmoins, plus haut en fréquence le scotch Kapton® à trop de pertes par rapport par exemple à un substrat LCP ([IV.19] et [IV.20]).

Les lignes de transmission Vialess entièrement imprimées sont un peu éloignées de l'état de l'art actuel sur l'ensemble des bandes de fréquences testées.

Nous pouvons cependant remarquer que les lignes Vialess fabriquées sont d'une très importante longueur (entre 10 et 20 mm) comparé à la majorité des lignes de transmission du Tableau XII. Elles présentent dans le meilleur cas un coefficient d'adaptation inférieure à -20 dB sur la bande de fréquences [10 MHz ; 140 GHz].

Les lignes de transmission Vialess imprimées sur le Kapton® ont été réalisées avant la mise en place de la méthode de frittage $F_{200P_{CTTC}}$ (partie II.3.2.2.1) permettant d'obtenir une conductivité effective du dépôt argent supérieure à 40 S/µm. En appliquant cette méthode, nous pourrions obtenir des atténuations linéiques de 0.21 dB/mm et 0.49 dB/mm à 40 GHz et 110 GHz respectivement. Pour être réellement au niveau l'état de l'art actuel, nous devons réaliser la prochaine génération de lignes de transmission Vialess sur des substrats diélectriques avec moins de pertes tels que le Roger 4003C (tangente de pertes à 0.005 à 10 GHz) par exemple.

Pour les lignes de transmission Vialess entièrement imprimées, nous devons soit améliorer la cuisson du polyimide imprimé soit trouver une encre diélectrique avec moins de pertes.

IV.1.6. Conclusion et discussion

Dans ce chapitre de thèse, nous avons proposé une nouvelle façon de fabriquer les lignes de transmission CPWG sans réaliser de vias traversant pour relier les différents plans de masse entre eux.

L'avantage principal du concept de cette nouvelle famille de ligne de transmission que nous avons appelé Vialess est de simplifier au maximum la fabrication de telles lignes et d'utiliser la précision et les capacités multicouches et multimatériaux de la technologie l'AJP.

Nous avons démontré par simulation que le comportement ainsi que les performances de ces deux types de ligne de transmission sont similaires. Les pertes de la ligne de transmission Vialess étant constituées à plus de 70% de pertes diélectriques dans notre cas, le choix du substrat diélectrique à utiliser est d'une importance cruciale. De plus, sa forte robustesse permet de compenser une variation de l'impédance caractéristique de la ligne de transmission de +/- 10 Ω.

Lors de la fabrication de la ligne de transmission Vialess nous conseillons donc de favoriser des diélectriques à pertes faibles avec une épaisseur supérieure à 50 µm pour limiter les pertes amenées par le plan de masse, et pour travailler sur un mode coplanaire. En appliquant ces conseils et en frittant l'encre à base d'argent déposée avec la méthode de frittage $F_{200P_{CTTC}}$ permettant d'obtenir une conductivité effective du dépôt supérieure à 40 S/µm, nous pouvons potentiellement obtenir des atténuations linéiques au niveau de l'état de l'art actuel voir au-delà.

Nous avons réalisé deux types de prototype. Pour le premier, nous avons imprimé de l'encre à base d'argent sur des bandes de Kapton® adhésives découpées au laser. Pour le second, nous avons entièrement imprimé la ligne Vialess sur un substrat métallique avec de l'encre à base de polyimide et de l'encre à base d'argent.

Le premier permet de démontrer la simplicité de mise en œuvre que présente la fabrication d'une ligne de transmission Vialess. Quant au second, il nous permet de démontrer que nous sommes capables d'imprimer entièrement une ligne de transmission fonctionnant jusqu'à 170 GHz avec l'AJP malgré un manque de contrôle de l'impression du polyimide.

Pour la ligne Vialess imprimée sur du Kapton®, nous avons relevé des atténuations linéiques de 0.26 dB/mm et 0.65 dB/mm à 40 GHz et 110 GHz respectivement. Pour la ligne Vialess entièrement imprimée, nous avons 0.38 dB/mm et 1.02 dB/mm pour 40 GHz et 140 GHz respectivement.

Malgré des performances un peu éloignées de l'état de l'art actuel, il est aisé de réaliser une deuxième génération de composants avec des matériaux plus intéressants. Par exemple, en utilisant du Roger 4003 C comme diélectrique avec une tangente de pertes d'environs 0.005 et un dépôt métallique de conductivité effective d'environs 40 S/µm, nous pouvons descendre en dessous de la barre des 0.2 dB/mm à 40 GHz (Tableau XII).

En conclusion de cette partie du chapitre, nous avons constaté qu'à l'heure actuelle le premier prototype de ligne de transmission Vialess est plus intéressant et simple à mettre en œuvre. Son principal avantage est de nous permettre de travailler avec un matériau diélectrique d'épaisseur homogène et constante que nous pouvons placer sur n'importe quel type de support (plat ou 3D). Nous évitons donc de devoir imprimer plusieurs dizaines de micromètres d'épaisseur d'encre diélectrique sur de grandes surfaces au risque d'avoir des problèmes d'impression liés au temps important d'utilisation de l'AJP.

Le point faible de cette fabrication de ligne de transmission Vialess est que nous n'arrivons pas à l'heure actuelle à métalliser avec l'AJP convenablement les flancs des bandes adhésives découpées par laser. Il est nécessaire de réaliser une intervention manuelle après l'impression pour correctement les métalliser.

En nous basant sur le prototype de ligne de transmission Vialess imprimée sur du Kapton® nous allons présenter dans la suite de ce chapitre plusieurs concepts d'application ou de composants hyperfréquences inspirées du même concept de fabrication.

IV.2. Les applications du principe des lignes Vialess

Dans la première partie de ce chapitre, nous avons présenté le concept des lignes de transmission Vialess. Leurs principaux avantages sont de pouvoir fonctionner sur une très large bande de fréquences, d'être très robustes aux variations de l'impédance caractéristique de la ligne de transmission et d'être simples de fabrication.

Les deux types de prototypes sont basés sur deux philosophies différentes : le premier repose sur l'utilisation d'un substrat diélectrique autocollant (partie IV.1.4.1.1) et le second est entièrement imprimé par AJP (partie IV.1.4.2).

Dans la suite de ce chapitre, nous souhaitons utiliser le principe de fabrication des prototypes sur bande adhésive pour proposer des nouveaux concepts de composants et d'applications.

Nous souhaitons développer le concept de ligne de transmission autocollante afin de l'utiliser pour des applications d'interconnections de composants hyperfréquences. Dans cet optique, nous présenterons deux moyens de connecter ces lignes de transmission Vialess autocollante : par soudage en connectant les lignes entre elles et par contact selon le principe du Flip-chip.

Enfin, nous souhaitons proposer une méthode de fabrication alternative aux composants généralement réalisés à l'aide de la technologie SIW en nous basant sur le principe des lignes Vialess. Nous allons réaliser principalement des filtres fonctionnant sur le mode TM_{110} (similaires aux filtres de la partie III.3.1.1) et des filtres interdigités.

L'ensemble des composants réalisés dans cette partie ont pour unique but d'apporter une preuve de concept sur les idées présentées. Nous ne sommes dans l'immédiat pas dans

l'optique de proposer des composants ou concepts pouvant être comparés à l'état de l'art actuel.

IV.2.1. Les interconnexions de type Vialess

Il existe plusieurs méthodes pour connecter plusieurs composants ou substrats entre eux. Les plus généralement utilisées, en fonction des matériaux et des applications visées sont les suivants :

- Les interconnexions par fil d'or ou de cuivre (bonding) [IV.21],
- Les interconnexions verticales par vias métalliques traversant [IV.22]
- Les interconnexions par contact avec des bumps en utilisant la technique Flip-chip [IV.23].

Plus de détails sur ces différentes méthodes d'assemblage sont donnés dans [IV.24]. Néanmoins, dans le domaine des fréquences millimétriques ces techniques souffrent de discontinuités impactant ainsi les performances de l'interconnexion. Plus spécifiquement pour un fil de bonding, la réactance en série change considérablement avec la fréquence, limitant ainsi la bande de fréquence de la liaison à une fréquence maximum d'environ 50 GHz [IV.25] sans effets trop gênants sur les performances (pertes, désadaptation).

Pour le Flip-chip, la présence de métal sous la puce ou le composant provoque des désadaptations ce qui a également pour effet de détériorer les performances de l'interconnexion [IV.26] si elles ne sont pas correctement contrôlées.

Plus récemment, des méthodes alternatives d'interconnexion ont été recherchées et développées en utilisant les technologies de fabrication additive. Dans les travaux présentés en [IV.27] et [IV.28], la technologie InkJet est utilisée afin de réaliser des plots métalliques traversant verticaux pour connecter deux parties d'un composant. Nous avons également certains travaux, comme celui présenté en [IV.29], qui allient la technologie AJP avec la technologie de bonding par fils pour réaliser des interconnexions précises.

Malgré le fait que ces travaux proposent une méthode de fabrication alternative au bonding et autres vias métalliques traversant classique, ils ne proposent pas d'innovation particulière pour les améliorer.

Les travaux présentés en [IV.17] et [IV.3] sont ceux ayant retenu le plus notre attention. En effet, la technologie AJP est ici utilisée pour imprimer une pente diélectrique sur laquelle est déposée une ligne métallique pour connecter la surface d'une puce à son substrat d'accueil.

L'utilisation d'une ligne de transmission pour relier deux composants semble plus maitrisée que le bonding ou le via traversant et permet d'être utilisée sur les composants ne pouvant pas être connectés par Flip-chip.

En nous basant sur ce principe, nous souhaitons utiliser les lignes de transmission Vialess autocollantes pour connecter un composant avec son substrat.

IV.2.1.1. Lignes de transmission Vialess autocollantes

IV.2.1.1.1. Présentation et fabrication des lignes

Nous avons cherché à prendre à notre avantage le côté adhésif du scotch Kapton® afin de réaliser des composants autocollants pouvant être placés sur n'importe quelle surface.

Cependant, à cause d'un manque d'adhésion de l'encre à base d'argent probablement lié à sa faible épaisseur lorsque nous manipulons le scotch Kapton®, nous n'avons pas utilisé l'AJP pour la réalisation des prototypes. En alternative plus immédiate d'une phase de recherche d'une encre métallique plus adaptée aux substrats souples, nous avons simplement choisi d'utiliser l'imprimante Inkjet Dimatix présente au laboratoire Xlim. L'encre à base d'argent utilisée sur cette machine semble plus résistante aux manipulations, ce qui la rend adaptée pour valider les divers concepts que nous souhaitons proposer. Néanmoins la conductivité effective maximum que nous pouvons obtenir est proche de 5 S/µm. De plus, sur l'ensemble des impressions, les résultats sont assez hétérogènes à cause d'une qualité et précision de fabrication moins importante que par AJP.

Chaque ligne de transmission Vialess a été imprimée en 2 couches d'argent sur deux épaisseurs de Kapton® (épaisseur finale de 100 µm) afin d'augmenter leurs dimensions pour tenir compte de la limite de résolution plus contraignante de cette imprimante (évaluée à 150 µm). Elles sont ensuite frittées sur une plaque chauffante à 200°C pendant 6h puis découpées à la longueur voulue manuellement.

Les lignes de transmission sont ensuite positionnées sur un plan métallique en cuivre. De la laque argent est déposée sur les flancs de chaque lignes Vialess afin de connecter électriquement les différents plans de masses avec le plan métallique.

Un exemple de ligne de transmission Vialess autocollante réalisée est donné dans la Figure IV-23. Chaque ligne fait environ 1 cm de longueur.

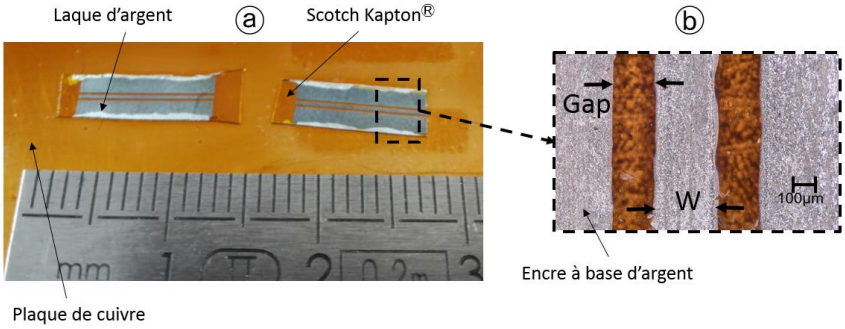


Figure IV-23: Exemple de ligne Vialess autocollante : ⓐ Lignes de transmission imprimée par InkJet ; ⓑ Zoom d'une ligne Vialess

Les dimensions ont été mesurées avec un microscope numérique Keyence. Pour une largeur de ligne centrale et de gaps théorique de 230 µm et 180 µm nous mesurons respectivement 250.25 +/- 4 µm et 183.25 +/- 5 µm. L'écart dimensionnel observé amène une impédance caractéristique de 47 Ω proche des 50 Ω visés.

Les lignes ont été mesurées avec un analyseur ZVA en utilisant une paire de pointes de mesures ACP de pitch 250 µm sur la bande de fréquence [10 MHz ; 40 GHz].

Nous avons décollé, recollé et mesuré les lignes de transmission Vialess autocollantes trois fois afin de quantifier l'effet de ces manipulations sur la réponse en paramètres S (sans remettre de la laque à chaque fois). Un exemple de mesures est donné dans la Figure IV-24.

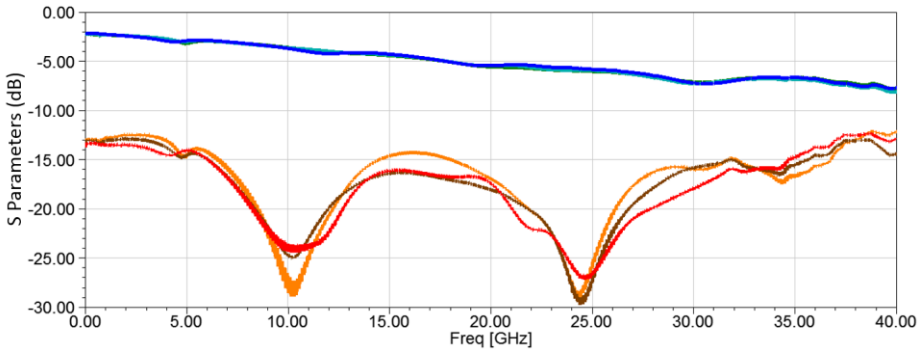


Figure IV-24: Mesures après plusieurs décollages / collages d'une ligne Vialess sur un support cuivre

A 40 GHz nous avons une atténuation linéique comprise dans l'intervalle [0.77 ; 0.81] dB/mm pour les trois mesures, soit une dispersion d'environ 0.04 dB/mm.

Les pertes très élevées comparées à nos précédentes réalisations (partie IV.1.5) viennent principalement de l'encre utilisée et de la méthode de frittage employée donnant une conductivité effective évaluée à 5 S/µm.

Nous sommes cependant en mesure de démontrer que les lignes de transmission Vialess autocollantes peuvent être placées et repositionnées sans pertes supplémentaires significatives.

Si nous souhaitons entièrement imprimer par AJP ce type de ligne de transmission, nous serions proche du cas de figure présenté en [IV.30]. Dans ce travail, un modèle d'interconnexion utilisant une ligne de transmission microstrip entièrement imprimée par AJP permet de connecter le dessus d'une puce à son substrat porteur jusqu'à 18 GHz avec une atténuation linéique à cette fréquence de 0.9 dB/mm.

IV.2.1.1.2. Application de la ligne autocollante

Le rôle principal de notre ligne de transmission Vialess autocollante est de pouvoir être utilisée pour interconnecter un composant et un substrat.

Pour se faire nous avons utilisé les filtres réalisés dans la partie III.3.4.2 afin de réaliser un premier prototype d'interconnexion d'un substrat vers ces filtres 3D. Le filtre fait 3 mm d'épaisseur et est placé sur un substrat porteur de cuivre (Figure IV-25).

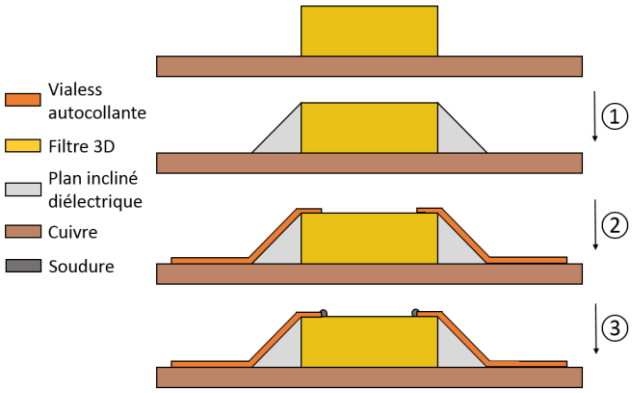


Figure IV-25: Mise en œuvre de l'interconnexion à l'aide de la ligne de transmission Vialess : ① Positionnement des plans inclinés diélectriques métallisés à la laque argent ; ② Collage des lignes de transmission Vialess adhésives ; ③ Connexion métallique entre les lignes Vialess et les accès coplanaires du filtre par soudure

Dans la Figure IV-25 étape ①, nous positionnons des plans inclinés contre les flancs du filtre au niveau des accès. Ces plans sont de même épaisseur et sont fabriquées en ABS à l'aide de la technologie FDM (partie I), puis métallisés à la laque à base d'argent (à noter qu'un plan incliné métallique peut faire le même travail).

Dans l'étape ②, nous positionnons précisément les lignes de transmission Vialess autocollantes sur les plans inclinés. L'extrémité des lignes de transmission est positionnée au niveau des accès d'excitation coplanaires gravés à la surface du filtre.

Pour finir dans l'étape ③, la connexion métallique est réalisée en utilisant de la colle métallique ou des billes de soudure.

L'ensemble de modèle final est présenté dans la Figure IV-26.

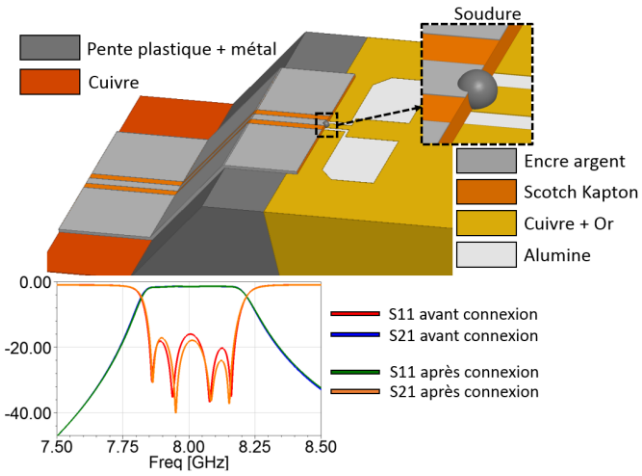


Figure IV-26: Modèle de la connexion de la ligne autocollante sur un filtre volumique et performances simulées

Dans la Figure IV-26, les pertes d'insertions théorique du filtre céramique avant et après l'utilisation des lignes de transmission Vialess autocollantes sont respectivement de 0.66 dB et 1.53 dB à la fréquence centrale du filtre (8 GHz). Les deux lignes Vialess utilisées (plus de 1 cm de longueur chacune) amènent ainsi 0.87 dB de pertes. Ces pertes pourraient diminuer dans le cas où la couche métallique serait déposée par AJP (avec une conductivité supérieure à 20 S/µm). Dans le cas présent, les pertes d'interconnexions sont élevées mais l'exercice suffit pour valider la preuve de concept.

IV.2.1.2. Ligne Vialess Flip-chip

En nous basant sur le principe de la ligne de transmission Vialess autocollante présentée précédemment, nous avons cherché à améliorer l'étape de connexion avec un composant (Figure IV-25 ③).

En effet, positionner manuellement de la colle métallique ou des billes de soudure peut s'avérer extrêmement compliqué en fonction des dimensions des lignes de transmission. C'est pourquoi nous nous sommes inspirés du principe Flip-chip pour positionner nos lignes de transmission. Le principe de la mise en œuvre est donné dans la Figure IV-27.

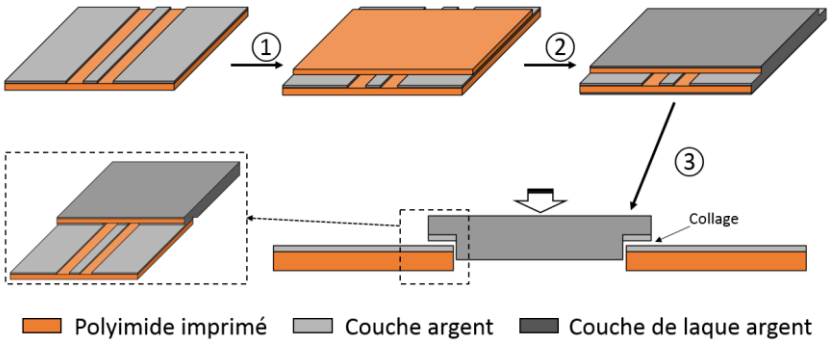


Figure IV-27: Mise en œuvre de l'interconnexion Flip-chip à l'aide de la ligne de transmission Vialess : ① Collage d'une bande de scotch Kapton® sur une ligne Vialess existante ; ② Métallisation avec de la laque argent pour assurer le blindage de la transition Vialess ; ③ Positionnement de la transition entre deux lignes CPW

Dans la Figure IV-27 étape ①, nous plaçons une bande adhésive sur une ligne de transmission Vialess, puis nous réalisons le blindage électromagnétique de la ligne en déposant de la laque à base d'argent sur tous ses côtés dans l'étape ②. Au niveau des extrémités de la transition Vialess, nous avons laissé deux accès coplanaires de type Vialess afin de pouvoir réaliser la connexion avec les autres composants. Dans l'étape ③, nous positionnons notre ligne sur les composants à connecter en faisant attention à ce qu'elle soit correctement alignée.

Dans l'optique de réaliser rapidement notre premier prototype, nous avons choisi de graver mécaniquement à l'aide d'une graveuse LPKF S63 un substrat Roger 4003C (ε_r=3.55 et tanδ=0.0027) d'épaisseur 250 µm, recouvert sur les deux faces par 18 µm de cuivre afin d'interconnecter les trois parties de l'interconnexion Vialess Flip-Chip.

La ligne de transmission finale obtenu après avoir appliqué les différentes étapes de la Figure IV-27 est montrée dans la Figure IV-28.

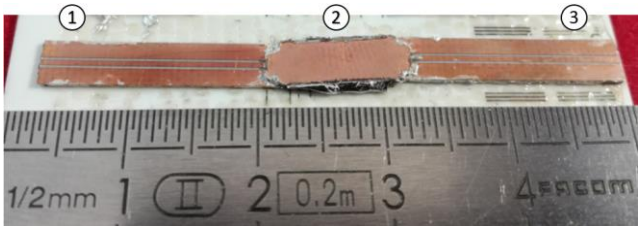


Figure IV-28: Interconnexion Vialess Flip-Chip : ① ③ Lignes Vialess ; ② Ligne Vialess Flip-Chip

Dans la Figure IV-28 la transition est constituée de trois parties : nous avons les deux lignes de transmission Vialess (① et ③) que nous voulons connecter entre elles en utilisant une transition Vialess Flip-chip (②). Les côtés de la transition Vialess ont été métallisés par soudure pour assurer une bonne solidité de l'ensemble du composant.

Nous avons mesuré la transition avec un analyseur ZVA en utilisant une paire de pointes de mesures ACP de pitch 250 µm sur la bande de fréquence [10 MHz ; 40 GHz]. Dans la Figure IV-29 nous avons l'atténuation de la transition Vialess Flip-Chip uniquement et dans la Figure IV-30 nous avons l'atténuation de tout le composant.

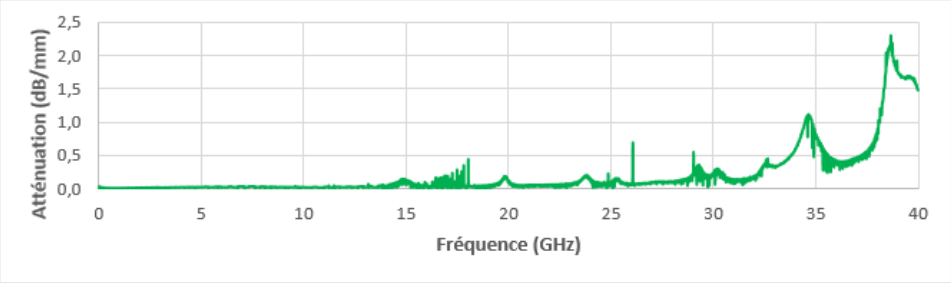


Figure IV-29: Mesure de la ligne Vialess Flip-Chip

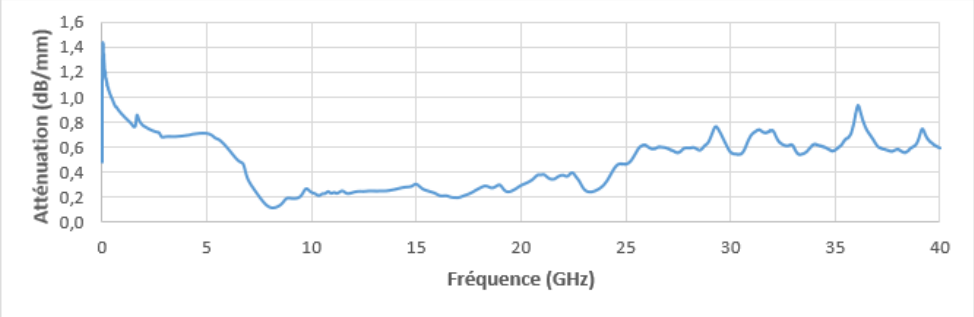


Figure IV-30: Mesure de la transition Vialess

A 20 GHz, nous avons une atténuation de 0.13 dB/mm et 0.29 dB/mm pour la Vialess Flip-Chip et pour la connexion complète deux lignes Vialess respectivement. Nous pensons que les pertes viennent de plusieurs points :

- L'alignement des pièces ①, ② et ③ (Figure IV-28) et le positionnement de la soudure ne sont pas optimaux,
- Le contact électrique entre les lignes ①, ③ et la transition ② n'est pas parfait et détériore la réponse en fréquence.

Malgré des performances peu intéressantes, nous avons fait une preuve de concept sur une transition par Vialess de type Flip-Chip. Nous devrions être capable de régler les différents problèmes rencontrés dans une deuxième version de la transition Vialess pour laquelle le Roger 4003C est remplacé par du scotch Kapton®. Les dimensions des lignes de transmission Vialess seraient alors dimensionnées pour faciliter leur manipulation.

IV.2.2. Les filtres de type Vialess

Plusieurs technologies de composants sont disponibles lorsque nous souhaitons réaliser des composants de filtrage par technologie additive. Nous pouvons principalement en relever trois groupes :

- Les composants volumiques, que nous pouvons réaliser par technologie additive 3D ou par usinage [IV.31],
- Les composants planaires, que nous pouvons réaliser par lithographie ou à l'aide des technologies d'impression additives en [IV.32] et [IV.33],
- Les composants SIW en 2.5D, que nous pouvons réaliser principalement par usinage [IV.34].

Dans cette partie de ce chapitre, nous proposons une méthode pour réaliser des composants, fabriqués généralement en technologie SIW, grâce aux technologies

d'impression additive. En nous inspirant du concept de la ligne de transmission *Vialess* nous remplacerons les vias traversant de la technologie SIW par des murs métalliques.

L'intérêt de tels composants est de pouvoir directement imprimer par AJP des structures volumiques avec des facteurs de qualité plus importants que pour les structures planaires. De plus, l'ensemble de la fabrication du composant est réalisé en une seule étape technologique. En comparaison, les composants de la technologie SIW sont réalisés au moins en deux étapes technologiques : les vias traversant sont percés mécaniquement puis métallisés par soudure ou par métallisation chimique en fonction de ses dimensions.

Nous allons présenter dans cette partie plusieurs concepts de filtres pouvant être entièrement imprimés par AJP tel que des filtres interdigités ou des filtres volumiques fonctionnant sur le mode TM_{110}.

Néanmoins nous ne sommes pas encore capables d'imprimer l'encre à base de polyimide avec assez de précision pour réaliser des composants aussi complexes. Nous allons donc principalement présenter un exemple de chaque filtre réalisé en simulation ainsi que des résonateurs imprimés.

Tous les composants que nous présentons dans cette partie ont à l'heure actuelle pour unique but de proposer une preuve de concept. La recherche de performances pourra être réalisée dans une deuxième génération de composant.

IV.2.2.1. Filtre à structure interdigitée

Cette famille de filtres a comme avantage de proposer de forts couplages entre chaque élément résonant ce qui la rend adaptée aux bandes de fréquences moyennes et larges, comme présenté dans les travaux en [IV.35] et [IV.36].

La Figure IV-31 présente le modèle du filtre simulé que nous souhaitons réaliser avec l'AJP. Nous avons utilisé du polyimide (ε_r=3.5 et tanδ=0.04) de 50 µm d'épaisseur comme substrat, de l'argent (σ=21 S/µm) pour la métallisation et de l'or (σ=30 S/µm) pour le plan de masse. La connexion avec la masse des quatre résonateurs λ/4 visibles sur la Figure IV-31 se fait en métallisant les flancs du filtre en polyimide imprimé.

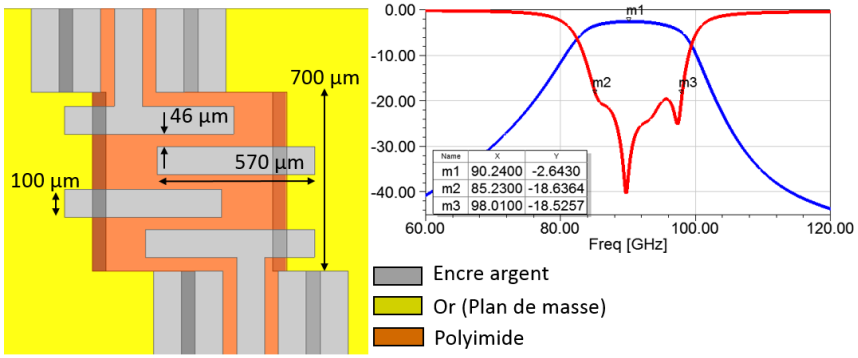


Figure IV-31: Modèle simulé du filtre interdigité inspiré du Vialess

Le filtre présenté dans la Figure IV-31 est un filtre 4 pôles de fréquence centrale 90.24 GHz et de bande de fréquences 12.8 GHz. Les pertes d'insertion à la fréquence centrale sont de 2.64 dB et le facteur de qualité est évalué à 60.

L'unique but de ce composant est de servir de preuve de concept pour les filtres Vialess que nous souhaitons à terme imprimer par AJP. Il est donc possible d'optimiser les performances dans la prochaine génération de filtre.

L'avantage d'un tel filtre est que cette disposition et technique de mise à la masse permet une impression simplifiée de la couche métallique. De plus, l'impression de l'encre argent n'est d'aucune difficulté particulière étant donné que les dimensions sont grandes devant la résolution de l'AJP.

Néanmoins une telle réalisation en AJP amène une problématique majeure : nous devons être capable de contrôler les dimensions des flancs inclinés du polyimide imprimé afin d'être le plus précis possible sur la longueur électrique des résonateurs. De plus, l'alignement de la machine sur le polyimide imprimé transparent pour imprimer la couche d'encre à base d'argent est une étape difficile donnant une tolérance de positionnement de +/- 100 µm supplémentaire. A l'heure actuelle nous ne sommes pas capables d'imprimer entièrement un tel composant.

Malgré ces problématiques, nous avons imprimé un résonateur interdigité afin de pouvoir quantifier le facteur de qualité que nous pouvons obtenir avec un tel composant. Un exemple de résonateur est montré dans la Figure IV-32.

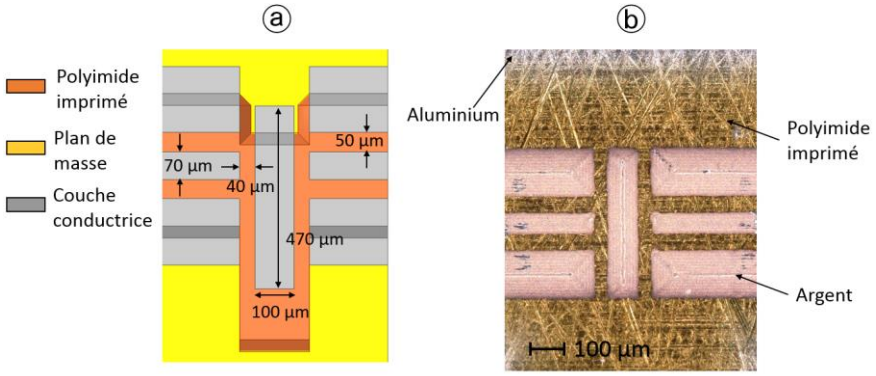


Figure IV-32: Impression d'un résonateur interdigité : ⓐ modèle simulé ; ⓑ modèle imprimé

Dans la Figure IV-32 ⓐ le résonateur fait 470 µm de longueur et le polyimide imprimé fait 30 µm d'épaisseur. La fréquence de résonance est à 104.3 GHz et le facteur de qualité est évalué à 80.

Dans la Figure IV-32 ⓑ, nous avons un exemple de résonateur imprimé. Nous n'avons pas pu le mesurer à cause de deux problèmes majeurs :

- Le résonateur n'est pas connecté à la masse,
- Les lignes d'excitation coplanaires Vialess sont connectées au plan de masse à cause d'un problème de positionnement.

Le résonateur imprimé ne correspond donc pas au modèle théorique attendu. Il est donc nécessaire de bien maitriser l'étape d'impression du polyimide afin d'imprimer des filtres Vialess interdigités.

IV.2.2.2. Filtre SIW Vialess

D. Deslandes et K.Wu, deux auteurs ayant largement participé à la démocratisation des dispositifs SIW, ont fourni en 2006 un article énonçant les différentes règles de design à suivre lorsque nous réalisons ce type de composants [IV.37]. Ils ont l'avantage de pouvoir présenter des coûts de fabrication faibles et des facteurs de qualité élevés par rapport aux filtres planaires.

Les composants SIW sont principalement réalisés par usinage des vias traversant délimitant les résonateurs. Les règles de construction sont généralement les suivantes :

- Empêcher que la densité de vias ne vienne fragiliser la structure,
- Limiter les fuites entre les perçages métallisés,
- Éviter la présence de bandes interdites dans la bande de fréquence de fonctionnement.

En nous inspirant du concept de la ligne Vialess, nous proposons de réaliser ces composants entièrement par AJP. Les trois règles énoncées précédemment n'étant plus valides pour ce cas de figure, elles deviennent celles mise en évidence dans les parties II.3.1.1, II.4.1 et III.1.1 à savoir :

- Imprimer de préférence sur un substrat porteur de faible rugosité (de l'ordre de 0.15 µm),
- Imprimer des plans inclinés d'environs 45° pour favoriser l'impression de l'encre à base d'argent,
- Fritter l'ensemble du dépôt argent avec la méthode de frittage $F_{200P_{CTTC}}$ pour avoir une conductivité effective d'environs 40 S/µm.

Nous ne sommes pas en mesure de réaliser une impression aussi complexe qu'un filtre avec l'encre à base de polyimide. Cependant, nous avons réalisé des résonateurs afin de déterminer les facteurs de qualités moyens de tels composants entièrement imprimés par AJP.

IV.2.2.2.1. Présentation du composant

La Figure IV-33 présente le modèle du filtre que l'on souhaite réaliser avec l'AJP. Nous avons utilisé du polyimide (ε_r=3.5 et tanδ=0.04) comme substrat de 50 µm d'épaisseur, de l'argent (σ=21 S/µm) pour la métallisation et de l'or (σ=30 S/µm) pour le plan de masse. Les vias traversant sont remplacés par des murs métalliques de la même manière que la ligne *Vialess* classique.

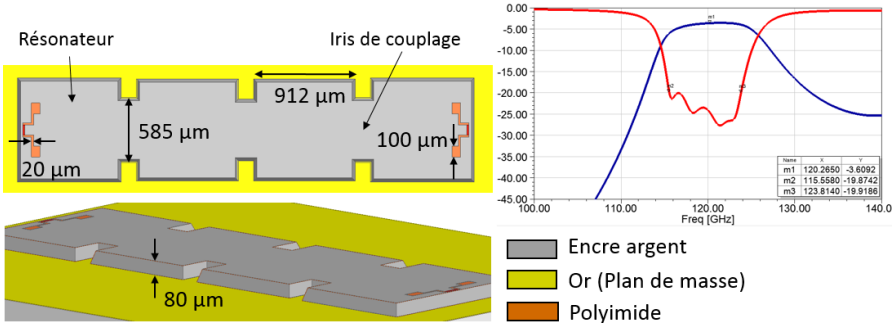


Figure IV-33: Modèle simulé du filtre Vialess inspiré de la technologie SIW

Le filtre présenté dans la Figure IV-33 est un filtre 4 pôles centré à 120 GHz et de bande 8.25 GHz. Les pertes d'insertion à la fréquence centrale sont de 3.6 dB et le facteur de qualité est évalué à 80.

L'unique but de ce composant est ici aussi de servir de preuve de concept pour les filtres Vialess que nous souhaitons à terme imprimer par AJP.

Réaliser un tel composant requiert de maitriser deux étapes : l'impression précise du polyimide et le bon positionnement des motifs d'excitation en argent. Ces deux étapes n'étant pas maitrisées à l'heure actuelle (partie II.4.1), nous ne pouvons pas envisager de réaliser un tel composant par AJP.

Cependant nous avons réalisé des résonateurs simples basés sur le même concept de fabrication afin de quantifier les valeurs de facteur de qualité de tel composants entièrement imprimés par AJP.

IV.2.2.2.2. Fabrication et mesure des résonateurs SIW Vialess

Afin de quantifier les facteurs de qualité typiques de ce type de composants nous avons imprimé par AJP trois gabarits de résonateurs. Nous avons un grand résonateur de 7 mm de côté (GR), un résonateur de taille moyenne de 4 mm de côté (MR) et enfin un petit résonateur de 2.4 mm de côté (SR). Un exemple de ces résonateurs est donné dans la Figure IV-34. L'encre polyimide imprimée a été cuite au four à 300 °C pendant 30 min et l'encre argent a été fritté suivant la méthode $F_{200P_{CTTC}}$ afin d'obtenir une conductivité effective de 40 S/µm.

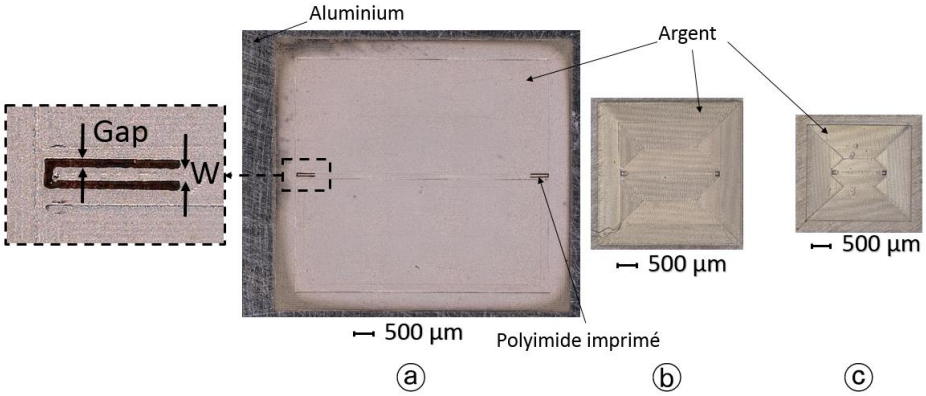


Figure IV-34: Résonateurs Vialess imprimés : ⓐ GR de 7 mm de côté; ⓑ MR de 4 mm de côté ; ⓒ SR de 2.4 mm de coté

Toutes les mesures de dimensions ont été réalisées à l'aide d'un microscope numérique Keyence et sont données en Annexe 3. Les modes de résonances fondamentaux des résonateurs ⓐ, ⓑ et ⓒ sont respectivement environ 16 GHz, 28 GHz et 45 GHz.

L'ensemble de ces résonateurs a été mesuré avec un analyseur ZVA Keysight en utilisant des pointes de mesure GSG ACP de 125 µm de pitch sur la bande de fréquence [10 MHz ; 67 GHZ]. Les facteurs de qualité mesurés des fréquences de résonance de ces résonateurs sont donnés dans la Figure IV-35.

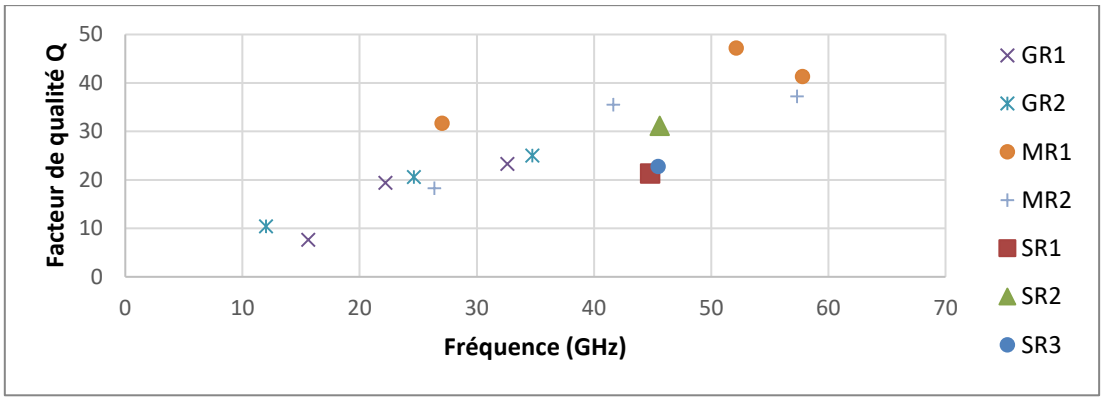


Figure IV-35: Facteurs de qualité mesurés des résonateur Vialess imprimés

Les facteurs de qualité de l'ensemble de ces résonateurs Vialess imprimés sont compris entre 10 et 50 sur la bande de fréquences [10 MHz ; 67 GHZ]. Cette forte variation entre ces valeurs vient directement du manque de contrôle sur la mise en œuvre de l'encre à base de polyimide.

Si nous comparons les facteurs de qualité obtenus avec ceux de résonateurs planaires, comme par exemple ceux des anneaux résonnants imprimés dans la partie II.4.2, nous pouvons constater qu'ils sont plus importants sur une même bande de fréquences. Plus précisément, avec les anneaux résonnant nous ne dépassons pas 30 en facteur de qualité alors que ceux des résonateurs Vialess sont majoritairement compris entre 20 et 40. La taille et la surface des résonateurs SIW Vialess sont cependant plus importantes que celles des résonateurs en anneau. En comparaison pour un mode fondamental proche de 10 GHz, le diamètre d'un anneau résonant est de 3.24 mm tandis qu'un résonateur SIW Vialess est un carré de 7 mm de côté.

De ce fait, nous avons prouvé que nous sommes capables de réaliser des résonateurs volumiques entièrement par AJP et que ceux-ci ont des facteurs de qualités légèrement supérieures à ceux des résonateurs planaires aux mêmes fréquences.

IV.2.3. Conclusion et discussion

Dans cette deuxième et dernière partie de chapitre, nous avons présenté deux nouveaux types de composants inspirés du concept de la ligne de transmission Vialess. Le premier est un type de ligne de transmission Vialess autocollante utilisée pour des problématiques d'interconnexion de composants tandis que le second est une nouvelle méthode de fabrication de composants de filtrage volumique et planaire généralement fabriqués par des technologies PCB.

Nous pensons qu'il est possible de repenser toute une gamme de composants dont la fabrication est basée sur l'utilisation de vias traversant métallisés afin de les adapter pour la technologie d'impression par AJP.

Nous avons mis en œuvre deux philosophies :

- La mise en avant de bande adhésive Kapton® dans la réalisation de composants hyperfréquences dans la bande de fréquence millimétrique,
- La mise en avant de composants entièrement réalisables par AJP afin de simplifier au maximum le nombre d'étapes technologiques.

La première chose à laquelle nous avons pensé en utilisant ces bandes diélectriques adhésives fut d'utiliser son côté adhésif afin de pouvoir réaliser des interconnexions. Dans la littérature, tous les travaux réalisés sur ce thème montrent l'impression d'une ligne de transmission sur une pente également imprimée pour relier la face supérieure d'une puce à un substrat.

Le désavantage que nous y voyons est que pour chaque changement d'épaisseur imprimée, les dimensions de la ligne doivent être optimisées. Nous devons donc connaitre précisément les différentes dimensions de la puce et être capable de précisément imprimer le diélectrique. De plus, l'impression de pentes diélectriques épaisses par la technologie AJP prend du temps et n'est pas adaptée pour des épaisseurs supérieures à 50 µm.

Nous pensons donc que le fait d'utiliser un diélectrique autocollant d'épaisseur homogène pour relier plusieurs composants entre eux sur une épaisseur bien supérieure à 50 µm et peut permettre de réduire fortement les temps d'impression en se concentrant seulement sur le dépôt de l'encre métallique. De plus ces substrats sont très low cost et sont suffisamment faciles à manipuler pour que nous puissions les utiliser dans nos applications.

Nous avons montré à partir de prototypes des preuves de concept d'interconnexion autocollantes innovantes, peu chères et faciles à fabriquer. L'atténuation linéique de tels composants à 40 GHz est comprise entre 0.77 et 0.81 dB/mm. Nous avons également réalisé un prototype d'une transition Vialess en utilisant une graveuse mécanique LPKF S63 et un substrat Roger 4003C. L'atténuation linéique de l'ensemble de l'interconnexion est évaluée à environ 0.6 dB/mm à 30 GHz.

En utilisant des matériaux avec moins de pertes et en maitrisant mieux les différentes étapes de fabrication, nous pensons être en mesure de proposer des interconnexions au niveau de l'état de l'art actuel.

Nous avons également voulu élargir le nombre de possibilités en considérant des filtres basés également sur l'utilisation de vias traversant métallisés. Nous avons souhaité exploiter les capacités de la technologie AJP en adaptant plusieurs catégories de filtres, comme des filtres planaires interdigités ou plus généralement des filtres SIW.

Néanmoins, notre manque d'expérience sur l'impression de l'encre à base de polyimide ne nous permet pas de réaliser de tels composants à l'heure actuelle. Il est donc nécessaire d'optimiser l'impression de l'encre avant de considérer des composants aussi exigeant d'un point de vue dimentionnel que des filtres.

Malgré ces difficultés, nous avons réalisé des résonateurs Vialess interdigité et SIW. Le premier n'a pas fonctionné à cause d'une erreur d'impression, tandis que les autres résonateurs SIW nous donnent des facteurs de qualité compris entre 10 et 50 sur la bande de fréquence [10 MHz ; 70 GHz].

IV.3. Conclusion du chapitre et discussion

Dans ce dernier chapitre nous avons présenté une nouvelle famille de lignes de transmission CPWG que nous avons appelée Vialess. Les rangées de vias traversant métallisés caractéristiques de ce type de composant ont été remplacées par des plans inclinés métallisés.

Cette nouvelle ligne de transmission est simple de réalisation, très large bande et très robuste dans la mesure où elle supporte des variations d'impédance caractéristique de la ligne de +/- 10 Ω. Elle est également très large bande

Nous avons exploré deux philosophies de fabrication :

- L'utilisation de bande de Kapton® adhésives comme substrat et l'impression des pistes métalliques avec l'AJP et l'encre à base d'argent,
- L'impression complète de la ligne de transmission Vialess par AJP.

La première nous permet d'utiliser un substrat lisse à l'épaisseur homogène pour nous concentrer uniquement avec l'AJP sur la métallisation sélective. Cette dernière étape étant maitrisée, nous sommes capables de réaliser des lignes de transmission avec une grande précision. L'atténuation de 0.25 dB/mm à 40 GHz obtenue avec ce type de ligne Vialess est proche de l'état de l'art.

Ces performances sont proches de celles obtenues avec des substrats alumine plus épais et beaucoup plus rugueux ayant beaucoup moins de pertes.

A partir de cette constatation, nous conseillons pour les prochains travaux utilisant la technologie d'impression AJP de choisir des diélectriques fins et lisses en priorité afin d'exploiter pleinement les capacités de la machine.

Les lignes de transmission Vialess entièrement imprimées n'ont pas fourni de très bonnes performances à cause d'une encre diélectrique mal maitrisée et ayant trop de pertes aux fréquences millimétriques. Cependant nous avons prouvé que nous sommes capables, malgré toutes les difficultés de mise en œuvre de l'encre polyimide, de réaliser des lignes de transmission fonctionnant de 10 MHz jusqu'à 170 GHz avec une adaptation inférieure ou proche de -20 dB sur toute la bande de fréquence. Nous faisons partie des seuls à l'heure actuelle à proposer des lignes de transmission fonctionnant sur une aussi large de bande de fréquence.

En nous basant sur le concept de la ligne de transmission Vialess, nous avons imaginé une nouvelle façon d'interconnecter plusieurs composants entre eux ou avec un substrat. En effet, nous avons tiré avantage de l'aspect adhésif des bandes de Kapton® découpées pour proposer des lignes de transmission Vialess autocollantes.

Nous avons testé deux cas de figure pour connecter les interconnexions Vialess : dans le premier nous positionnons la ligne autocollante puis nous effectuons les connexions électriques par soudure tandis que pour le deuxième cas la connexion se fait par contact métallique de la même manière qu'un composant Flip-chip (il est cependant nécessaire de rajouter de la colle). Les premiers prototypes fabriqués nous ont permis d'obtenir pour ces deux cas de figure des atténuations linéiques de 0.5 et 0.6 dB/mm à 30 GHz et 40 GHz respectivement.

Pour finir nous nous sommes inspirés du concept de la ligne de transmission Vialess et des composants réalisés en technologie SIW afin de présenter une nouvelle gamme de composants de filtrage entièrement imprimables par AJP. Plus précisément, les vias

généralement réalisés mécaniquement sont remplacés par des plans inclinés métallisés par AJP.

Cette méthode de fabrication peut être appliquée à un grand nombre de composants, mais nous avons choisi dans un premier temps choisi de ne réaliser que des preuves de concept en ne considérant qu'un type de filtre planaire et volumique. Nous avons ainsi travaillé sur un filtre interdigité 4 pôles centré à 90 GHz et un filtre volumique fonctionnant sur le mode TM_{110} centré à 120 GHz.

Ne maitrisant pas parfaitement l'impression de l'encre à base de polyimide nous n'avons pas été en mesure de fabriquer des composants aussi exigeant d'un point de vue dimensionnel que des filtres. Cependant, nous avons imprimé des résonateurs afin de quantifier les facteurs de qualité typiques de ce type de composants en fonction de la fréquence de résonance.

Sur l'ensemble des résonateurs volumiques imprimés nous avons relevé des facteurs de qualité compris entre 10 et 50 sur la bande de fréquence [10 MHz ; 70 GHz]. Cette variation est principalement dû à la tolérance de fabrication du dépôt de polyimide imprimé.

Il est donc nécessaire de maitriser parfaitement l'impression de l'encre diélectrique avant de considérer la réalisation de filtres ou de résonateurs Vialess.

Si nous regardons plus loin dans l'avenir, nous pouvons imaginer une machine de fabrication de composants Vialess composée d'une tête d'impression AJP essentiellement utilisée pour l'impression d'encre à base d'argent, d'un laser de découpe et d'un four photonique.

Le fonctionnement de la machine serait similaire à la technologie LOM (partie 1) dans le sens ou un rouleau amène les feuilles de diélectrique adhésives et chaque couche est collée thermiquement à l'aide d'une presse chauffante puis gravée à l'aide d'un laser. L'AJP vient ensuite déposer une couche d'encre à base d'argent sur les bandes découpées et l'ensemble est fritté par four photonique. Nous pouvons également imaginer que le laser servant à la découpe peut également venir fritter les couches d'argent afin de compléter la phase de frittage

Sans parler directement de machine, nous pourrions également imaginer des lignes *Vialess* fabriquées en rouleau. Le principe serait de découper la longueur voulue et de la placer sur les composants à relier directement manuellement ou à l'aide d'une machine. Il reste cependant la question de la connexion métallique entre l'interconnexion Vialess et les composants à relier à optimiser.

Références bibliographiques Chapitre IV

[IV.1]S. Li, M. Yi, S. Pavlidis, H. Yu, M. Swaminathan and J. Papapolymerou, "Investigation of surface roughness effects for D-band SIW transmission lines on LCP substrate," 2017 IEEE Radio and Wireless Symposium (RWS), Phoenix, AZ, 2017, pp. 121-124.

[IV.2]F. Cai, Y. Chang, K. Wang, W. T. Khan, S. Pavlidis and J. Papapolymerou, "High resolution aerosol jet printing of D- band printed transmission lines on flexible LCP substrate," 2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014), Tampa, FL, 2014, pp. 1-3.

[IV.3]J. A. Qayyum, M. Abt, A. Roch, A. C. Ulusoy and J. Papapolymerou, "Ultra wideband 3D interconnects using aerosol jet printing up to 110 GHz," 2017 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, 2017, pp. 1112-1115.

[IV.4]A. Sain and K. L. Melde, "Impact of Ground via Placement in Grounded Coplanar Waveguide Interconnects," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 6, no. 1, pp. 136-144, Jan. 2016.

[IV.5]Q. Jiang, C. Domier and N. C. Luhmann, "A Ultra Wideband Low Loss CBCPW-to-Microstrip Transition With Multiple Via Holes," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 24, no. 11, pp. 751-753, Nov. 2014.

[IV.6]E. K. W. Gan, H. Y. Zheng and G. C. Lim, "Laser drilling of micro-vias in PCB substrates," Proceedings of 3rd Electronics Packaging Technology Conference (EPTC 2000) (Cat. No.00EX456), Singapore, 2000, pp. 321-326.

[IV.7]F. Cai, Y. Chang, K. Wang, C. Zhang, B. Wang and J. Papapolymerou, "Low-Loss 3-D Multilayer Transmission Lines and Interconnects Fabricated by Additive Manufacturing Technologies," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 10, pp. 3208-3216, Oct. 2016.

[IV.8]M. Nikolova, J. Watkowski, D. Desalvo and R. Blake, "New generation solution for micro via metallization and through hole plating," 2007 International Microsystems, Packaging, Assembly and Circuits Technology, Taipei, 2007, pp. 119-122.

[IV.9]H. T. Hai, K. Lee, D. Ando, Y. Sutou, M. Koyanagi and J. Koike, "Feasibility study of Cu paste printing technique to fill deep via holes for low cost 3D TSV applications," 2017 IEEE International Interconnect Technology Conference (IITC), Hsinchu, 2017, pp. 1-3.

[IV.10] I. Reinhold, M. Thielen, W. Voit, W. Zapka, R. Götzen and H. Bohlmann, "Inkjet printing of electrical vias," 18th European Microelectronics & Packaging Conference, Brighton, 2011, pp. 1-4.

[IV.11] M. Kujala, T. Kololuoma, J. Keskinen, D. Lupo, M. Mäntysalo and T. M. Kraft, "Screen Printed Vias for a Flexible Energy Harvesting and Storage Module," 2018 International Flexible Electronics Technology Conference (IFETC), Ottawa, ON, 2018, pp. 1-6.

[IV.12] S. Kim, A. Shamim, A. Georgiadis, H. Aubert and M. M. Tentzeris, "Fabrication of Fully Inkjet-Printed Vias and SIW Structures on Thick Polymer Substrates," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 6, no. 3, pp. 486-496, March 2016.

[IV.13] F. Cai et al., "Aerosol jet printing for 3-D multilayer passive microwave circuitry," 2014 44th European Microwave Conference, Rome, 2014, pp. 512-515.

[IV.14] A. Sain and K. L. Melde, "Impact of Ground via Placement in Grounded Coplanar Waveguide Interconnects," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 6, no. 1, pp. 136-144, Jan. 2016.

[IV.15] Anthony Delage, Nicolas Delhote, Serge Verdeyme, Barbara Bonnet, Ludovic Carpentier, Cindy Schick, Thierry Chartier, Christophe Chaput, “Aerosol Jet Printing of Millimeter Wave Transmission Lines on 3D Ceramic Substrates Made by Additive Manufacturing”, International Microwave Symposium (IMS 2018), Jun 2018, Philadelphia, United States

[IV.16] F. Cai, Y. Chang, K. Wang, C. Zhang, B. Wang and J. Papapolymerou, "Low-Loss 3-D Multilayer Transmission Lines and Interconnects Fabricated by Additive Manufacturing Technologies," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 64, no. 10, pp. 3208-3216, Oct. 2016.

[IV.17] M. T. Craton, J. D. Albrecht, P. Chahal and J. Papapolymerou, "A Chip-First Approach to Millimeter-Wave Circuit Packaging," in IEEE Microwave and Wireless Components Letters, vol. 29, no. 2, pp. 116-118, Feb. 2019.

[IV.18] I. Piekarz, J. Sorocki, M. T. Craton, K. Wincza, S. Gruszczynski and J. Papapolymerou, "Application of Aerosol Jet 3-D Printing With Conductive and Nonconductive Inks for Manufacturing mm-Wave Circuits," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology, vol. 9, no. 3, pp. 586-595, March 2019.

[IV.19] J. A. Qayyum, M. Abt, A. Roch, A. C. Ulusoy and J. Papapolymerou, "Ultra wideband 3D interconnects using aerosol jet printing up to 110 GHz," 2017 47th European Microwave Conference (EuMC), Nuremberg, 2017, pp. 1112-1115.

[IV.20] F. Cai, Y. Chang, K. Wang, W. T. Khan, S. Pavlidis and J. Papapolymerou, "High resolution aerosol jet printing of D- band printed transmission lines on flexible LCP substrate," *2014 IEEE MTT-S International Microwave Symposium (IMS2014)*, Tampa, FL, 2014, pp. 1-3.

[IV.21] Y. Pan et al., "Comparing the copper and gold wire bonding during thermalsonic wire bonding process," 2016 17th International Conference on Electronic Packaging Technology (ICEPT), Wuhan, 2016, pp. 240-243.

[IV.22] D. An, X. Li, J. Mou and X. Lv, "Modeling and Characteristic of the Vertical Bonding-Wire Interconnection in Ka-band," 2008 Global Symposium on Millimeter Waves, Nanjing, 2008, pp. 229-232.

[IV.23] Q. Zeng, Y. Guan, J. Chen and Y. Jin, "Low-Temperature Ultrasonic Bonding of Cu/Sn Microbumps with Au Layer for High Density Interconnection Applications," 2017 IEEE 67th Electronic Components and Technology Conference (ECTC), Orlando, FL, 2017, pp. 1894-1899.

[IV.24] Andreas Inmann, Diana Hodgins. “Implantable Sensor Systems for Medical Applications”, Microassembly and micropackaging of implantable systems. Woodhead Publishing, 2nd January 2013, 544 p. ISBN: 9781845699871

[IV.25] Y. P. Zhang and D. Liu, "Antenna-on-Chip and Antenna-in-Package Solutions to Highly Integrated Millimeter-Wave Devices for Wireless Communications," in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 57, no. 10, pp. 2830-2841, Oct. 2009.

[IV.26] W. Heinrich, A. Jentzsch, and G. Baumann, “Millimeter-wave characteristics of flip-chip interconnects for multichip modules,” IEEE Trans. Microw. Theory Tech., vol. 46, no. 12 PART 2, pp. 2264–2268,1998.

[IV.27] N. Quack, J. Sadie, V. Subramanian and M. C. Wu, "Through Silicon Vias and thermocompression bonding using inkjet-printed gold nanoparticles for heterogeneous MEMS integration," 2013 Transducers & Eurosensors XXVII: The 17th International Conference on Solid-State Sensors, Actuators and Microsystems (TRANSDUCERS & EUROSENSORS XXVII), Barcelona, 2013, pp. 834-837.

[IV.28] T. Falat, J. Felba, A. Moscicki and J. Borecki, "Nano-silver inkjet printed interconnections through the microvias for flexible electronics," 2011 11th IEEE International Conference on Nanotechnology, Portland, OR, 2011, pp. 473-477.

[IV.29] S. Stoukatch et al., "Evaluation of Aerosol Jet Printing (AJP) technology for electronic packaging and interconnect technique," 2012 4th Electronic System-Integration Technology Conference, Amsterdam, Netherlands, 2012, pp. 1-5.

[IV.30] A. A. Gupta, M. C. M. Soer, M. Taherzadeh-Sani, S. G. Cloutier and R. Izquierdo, "Aerosol-Jet Printed Transmission Lines for Microwave Packaging Applications," in IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology.

[IV.31] Johann Sence, William Feuray, Aurélien Perigaud, Olivier Tantot, Nicolas Delhote, et al.. Plastic and metal additive manufacturing technologies for microwave passive components up to Ka band. International Journal of Microwave and Wireless Technologies, Cambridge University Press/European Microwave Association 2018, pp.1 - 11.

[IV.32] D. Sette, A. Blayo, C. Poulain and D. Mercier, "Silver nanoparticle inkjet printed 17 GHz filter," 2013 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest (MTT), Seattle, WA, 2013, pp. 1-4.

[IV.33] S. Yang, S. Zhen and A. Shamim, "Fully Inkjet Printed 85GHz Band Pass Filter on Flexible Substrate," 2018 48th European Microwave Conference (EuMC), Madrid, 2018, pp. 652-654.

[IV.34] C. Tomassoni, R. Bahr, M. Tentzeris, M. Bozzi and L. Perregrini, "3D printed substrate integrated waveguide filters with locally controlled dielectric permittivity," 2016 46th European Microwave Conference (EuMC), London, 2016, pp. 253-256.

[IV.35] G. L. Matthaei, "Interdigital Band-Pass Filters," in IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 10, no. 6, pp. 479-491, November 1962.

[IV.36] R. J. Wenzel, "Exact Theory of Interdigital Band-Pass Filters and Related Coupled Band-Pass Structures," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 13, no. 5, pp. 559-575, September 1965.

[IV.37] D. Deslandes and Ke Wu, "Accurate modeling, wave mechanisms, and design considerations of a substrate integrated waveguide," in IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, vol. 54, no. 6, pp. 2516-2526, June 2006.

Conclusion

Le travail présenté dans ce manuscrit est le résultat d'une collaboration entre le laboratoire Xlim, le Centre National d'Etudes Spatiales (CNES) et Thalès Alenia Space (TAS).

Ces travaux de thèse ont porté sur l'utilisation et la caractérisation de la technologie additive d'impression par aérosol, dans la réalisation 2D ou 3D de composants hyperfréquences dans la bande des fréquences millimétriques ainsi que leur problématique d'intégration.

La technologie d'impression par aérosol (AJP) utilisée appartient au Centre de Transfert de Technologie Céramiques de Limoges, (CTTC). En particulier, il s'agit du modèle Aérosol Jet® 200 SERIES SYSTEMS. Nous nous sommes également appuyés sur l'utilisation de la stéréolithographie 3D (SLA) céramique. Elle nous a permis de fabriquer des structures tridimensionnelles, complexes, monoblocs, très compliquées voire impossibles à fabriquer avec d'autres procédés tels que le moulage. Sa résolution et sa précision nous permettent d'atteindre des résolutions de quelques dizaines de micromètres.

Nous avons composé ce travail de thèse de quatre parties. Chacune correspond à une étape supérieure dans l'étude, à l'utilisation de la technologie et aux différents concepts qu'elle met en jeu.

Dans le **Chapitre I** nous avons commencé par présenter l'état de l'art actuel des différentes technologies additives qui existent. Nous avons cherché à montrer pourquoi nous avons choisi l'AJP afin de réaliser nos composants hyperfréquences et la SLA pour réaliser nos structures et substrats 3D. Les technologies présentées dans ce chapitre sont les plus couramment utilisées dans le domaine de l'impression directe (DW) que cela soit pour l'impression planaire ou l'impression 3D. Néanmoins nous avons choisi de ne pas citer certaines techniques issues de technologies existantes mais uniquement présente dans certains laboratoires et pas assez matures pour envisager des réalisations plus abouties. Cette étude bibliographique nous a montré que ces deux technologies proposent des résolutions supérieures à toutes celles que l'on peut trouver dans le domaine. L'AJP est très proche de la technologie nScrypt en termes de caractéristique, néanmoins elle se prédispose plus à de la réalisation de pièces 3D métalliques et se rangeant plus dans la catégorie des technologies d'impression 3D. L'AJP reste avec l'InkJet la technologie présentant le plus d'articles scientifiques prouvant ainsi que son concept et son utilisation sont assez abouties pour réaliser les différentes études de ce travail de thèse.

Dans le **Chapitre II** nous nous sommes intéressés au potentiel de l'AJP utilisée par le CTTC. Une première étude bibliographique nous a permis d'orienter nos recherches en vertu du choix de l'encre à nanoparticules métalliques et du procédé de frittage à appliquer sur nos dépôts afin qu'ils aient des caractéristiques finales optimales.

Nous avons effectué plusieurs tests géométriques simples afin de quantifier la résolution de l'AJP avec une encre donnée ainsi que les différentes difficultés faisant partie de la mise en œuvre de l'impression. L'expérience du CTTC avec les encres métalliques nous a permis de sélectionner une encre à base de nanoparticules d'argent permettant une largeur de trait déposé de l'ordre de 20 µm.

Nous avons également caractérisé cette encre afin de déterminer si, en plus des résolutions observées, elle pouvait nous permettre d'atteindre des performances intéressantes dans la bande des fréquences millimétriques. La conductivité effective du dépôt est déterminée par sa qualité (liée à la rugosité de surface du support), par le processus de recuit utilisé permettant

de faire évaporer les solvants et compléments organiques puis de faire fusionner les particules métalliques entre elles et enfin d'optimiser l'épaisseur déposée en fonction de la ou des fréquences de fonctionnement recherchées. En utilisant deux méthodes de caractérisation de la conductivité des dépôts métalliques complémentaires (par cavité et par anneau résonant) nous avons quantifié une conductivité effective du dépôt d'encre à nanoparticules d'argent de 45 S/µm soit 70% de la valeur du bulk. Pour obtenir ces valeurs nous nous somme basés sur un travail réalisé par le professeur Papapolymerou dans lequel il présente une méthode de frittage par pallier. Le CTTC s'en est inspiré et l'a optimisé afin de mieux correspondre à l'équipement présent et à l'encre utilisée. Cependant, comme nous n'avons optimisé cette technique qu'à la fin du projet, nous n'avons pas pu l'appliquer à la plupart de nos composants.

Après avoir passé en revue les différentes spécificités de l'AJP et de notre encre à nanoparticules d'argent nous avons réalisé des composants hyperfréquences. Nous avons principalement imprimé des lignes de transmission et des résonateurs sur des substrats d'alumine afin de quantifier et de comparer le niveau de performance typique de ce genre de composants. Nous avons relevé une atténuation linéique de 0.2 dB/mm et des facteurs de qualité de l'ordre de 80 pour le mode fondamental d'un anneau résonnant vers 12 GHz. Ces différentes performances nous amènent proche de l'état de l'art actuel pour la réalisation de composants hyperfréquences fonctionnant dans la bande de fréquences millimétriques.

Ces résultats nous ont poussé à tester d'autres encres à nanoparticules métalliques. Néanmoins, à la suite d'un grand nombre de difficultés rencontrées, nous n'avons été en mesure de tester seulement de l'encre à nanoparticules d'or. Avec une mise en œuvre particulièrement délicate, nous avons deux fois moins de résolution et nous sommes 20 fois moins conducteur qu'avec l'encre à nanoparticules d'argent. Les performances sur des lignes de transmission nous donnent des atténuations linéiques de 1.32 dB/mm.

Une telle difficulté de mise en œuvre, additionnée aux manques de résultats nous a amené à conclure qu'il était nécessaire de changer d'encre. En effet pour qu'une encre soit utilisée dans des applications hyperfréquences il faut qu'elle soit simple au niveau de sa mise en œuvre et capable de fournir des résultats dont la qualité est répétable. Toutes ces caractéristiques ne sont pas forcément optimales avec l'encre à nanoparticules d'argent cependant, tout le long de ce travail de thèse, nous avons eu des composants aux performances équivalentes. Nous pensons donc qu'il est aujourd'hui plus efficace de concentrer ses efforts sur l'encre argent que sur d'autres encres or ou cuivre, beaucoup plus compliquées à mettre en œuvre et aux performances inférieurs. Bien entendu cette position peut être amenée à évoluer lorsque les encres auront été développées et proposeront des résultats plus intéressants.

Un point autre faible a été identifié lors de l'utilisation de l'Aérosol Jet® 200 SERIES SYSTEMS. En effet chaque paramètre doit être affiné et calibré avant chaque impression et la seule vérification sur l'impression est la largeur du trait que l'on peut observer et mesurer sur une caméra noire et blanche. L'expérience ainsi que l'observation vont donc avoir un impact sur les futures impressions. De ce fait, chaque utilisateur de la machine peut proposer une stratégie d'impression un peu différente ce qui amènera une variable supplémentaire sur la réalisation de composants hyperfréquences fonctionnant dans la bande de fréquences millimétriques.

Vers la fin de ce travail de thèse nous avons également imprimé une encre diélectrique polyimide. Les tests simples géométriques nous ont montré que nous pouvions construire des objets en 3D avec des épaisseurs de quelques dizaines de micromètres. Néanmoins le processus d'impression n'est pas assez mature et ne permet pas sur plusieurs objets d'obtenir les mêmes épaisseurs ou les mêmes qualités de surface. Nous avons utilisé la méthode de

caractérisation par anneau résonant pour extraire les caractéristiques de cette encre diélectrique. Entre 10 et 80 GHz nous avons donc extrait une permittivité d'environ 3.6 pour une tangente de pertes comprise entre 0.009 et 0.02. Il est également nécessaire pour la suite d'optimiser la cuisson de l'encre afin de réduire le niveau de pertes au maximum. Les résonateurs argent en anneau fabriqués sur le polyimide imprimé donnent des facteurs de qualité compris entre 15 et 20 vers 20 GHz.

Dans le **Chapitre III** nous avons cherché à vérifier les capacités d'impression 3D de l'AJP en proposant les mêmes types de tests géométriques simples que pour les tests planaires mais cette fois ci sur des structures 3D. Ces différentes structures ont été réalisées avec la technologie SLA céramique par le CTTC et par 3DCERAM à Limoges.

Nous n'avons pas constaté de grande différence sur la résolution, lorsque l'on change d'altitude d'impression. En effet une différence de hauteur d'impression n'a donné qu'une variation de quelques micromètres sur les largeurs de traits déposés. Néanmoins nous avons remarqué que la rugosité à une grande influence sur la qualité du dépôt et sur la résolution des impressions. Nous pensons que l'encre déposée coule entre ces aspérités provoquant ainsi un manque de contrôle et un manque d'épaisseur final du dépôt. Les objets réalisés par SLA ayant une forte rugosité (≈1 µm), cela devient encore plus problématique lorsque l'on métallise des plans inclinés car cela amène des coupures au niveau de la métallisation. Malgré cela nous avons conclu qu'une pente avec un angle minimum de 45° peut nous assurer une impression satisfaisante. Sur différents objets 3D nous avons ainsi imprimé des lignes de transmission coplanaires dont la meilleure atténuation linéique est de 0.22 dB/mm à 40 GHz.

A partir de ces différents résultats sur le dépôt d'encre à nanoparticules d'argent effectué sur des pentes et objets 3D, nous avons voulu entièrement métalliser des filtres volumiques réalisés par SLA céramique au CTTC dans le projet ATOMIQ. Ces filtres sont constitués d'alumine dont la tangente de pertes est à 6.10^{-4} et fonctionnent à 40 GHz. Les formes et les caractéristiques diélectriques ont été optimisées lors de la thèse de Mohamed Khalil Drissi afin de pouvoir être métallisées par AJP.

Pour autant, nous avons relevé différents problèmes lors de la métallisation. Pour commencer le positionnement de la tête d'impression sur ce genre d'objet est très compliqué, car les différentes formes sont difficilement visibles surtout en utilisant la caméra en noir et blanc. En effet, les formes optimisées du filtre ne fournissent que très peu de marge de positionnement pour l'impression de leur motif d'excitation, ce qui oblige obligatoirement de réaliser une métrologie minutieuse du composant. L'impression par morceau de ce type de composant permet de limiter les problèmes précédemment cités dans le positionnement. Néanmoins le plus gros problème que nous ayons relevé est le décollement de l'encre une fois frittée sur le filtre. En effet le moindre contact des pointes de mesures sur le filtre risque d'arracher la couche de métallisation rendant toute mesure impossible malgré un bon recouvrement de l'encre déposée. A l'heure actuelle l'encre à nanoparticules d'argent que nous utilisons avec l'AJP n'est pas adaptée à la surface de nos filtres réalisés par SLA. Il est nécessaire d'améliorer l'accroche de l'encre afin de pouvoir poser convenablement les pointes de mesure.

Ces filtres métallisés par AJP devaient servir à tester une méthode de réglage des filtres par l'utilisation d'une graveuse laser. En effet de par ses tolérances de fabrication, un filtre à souvent besoin d'être réglé afin de convenir aux spécifications initiales demandées. Afin de finaliser ce projet nous avons décidé de réaliser par SLA des filtres fonctionnant à 8GHz que nous avons métallisés par bains chimiques. Le principe de la méthode s'effectue à partir de la simulation de différents motifs à graver, afin de décaler la fréquence de résonance d'un pôle

et d'augmenter ou de diminuer le couplage entre deux pôles. Ensuite, un algorithme va venir optimiser leur forme afin de corriger la réponse mesurée du filtre. La particularité de cette méthode de réglage est qu'elle se passe du début jusqu'à la fin dans la machine de gravure laser dont la fabrication, la forme et l'aménagement ont été pensés pour réaliser les différentes étapes de réglage. De ce fait, les gravures de motif de réglage dans la couche métallique assurant le blindage du filtre ainsi que l'étape de mesures sous pointes des objets à corriger se fait directement dans l'enceinte de la machine. Les premiers tests ont permis de vérifier par la mesure l'effet de chaque gravure sur les fréquences de résonance et sur les couplages entre les pôles. A partir de ces résultats nous avons réalisé le réglage de plusieurs filtres quatre pôles afin de valider toute la méthode et la philosophie du concept de cette méthode de réglage par laser. A partir de ces résultats, la perspective sera d'appliquer cette méthode de réglage à tout un jeu de filtres fabriqués en optimisant une forme de motifs appliquée à une réponse en fréquence mesurée moyenne.

Enfin dans le **dernier Chapitre**, en nous basant sur les différents résultats et conclusions obtenues dans les chapitres précédents, nous avons cherché à réaliser des composants pouvant dépasser les 100 GHz de fréquence de fonctionnement et dont la fabrication utilise les caractéristiques de l'AJP. La majeure partie des travaux présentant des lignes de transmission fonctionnant à ces fréquences sont soit des lignes coplanaires sans plan de masse inférieur et très courts soit des lignes coplanaires avec plans de masse comprenant plusieurs rangées de vias traversant, ce qui permet de mettre tous les plans de masse au même potentiel. La réalisation de ces vias étant très compliquée par AJP, tant au niveau du recouvrement, du temps d'impression et du frittage, nous proposons de remplacer simplement ces trous par des pentes métallisées. Nous avons ainsi appelé les lignes de ce nouveau modèle de ligne de transmission des lignes Vialess.

L'AJP va venir réaliser la ligne sur la partie supérieure du substrat avec la résolution que l'on a déterminée, imprimer des pentes puis les métalliser. Afin d'obtenir rapidement un résultat sur le concept, nous avons choisi d'utiliser du film adhésif Kapton© comme substrat afin de réaliser nos premières lignes. L'atténuation linéique que nous avons obtenue est au mieux de 0.26 dB/mm à 40 GHz avec une adaptation au niveau de – 30 dB sur toute la bande de fréquence.

La version entièrement imprimée a donné une atténuation de 0.32 dB/mm à la même fréquence de fonctionnement. Après avoir éliminé les hypothèses sur un métal peu conducteur grâce à des images MEB et sur un diélectrique avec trop de pertes après caractérisation, nous pensons que ces pertes supplémentaires viennent de la pose des pointes de mesures qui n'est pas optimale à cause du profil arrondi de la ligne imprimée en polyimide. Par conséquent, avant de réaliser entièrement des composants hyperfréquence multi-matériaux sur des substrats plats, mais également plus tard sur des substrats 3D à formes complexes, il est nécessaire de maitriser l'impression du polyimide. Par ailleurs, la mesure de ce type de composant aux fréquences millimétriques est une étape compliquée qui est nécessaire d'être optimisée au niveau des outils de mesure utilisés, du positionnement des pointes et de la calibration.

Nous avons porté le concept de la ligne Vialess dans la création de nouveaux composants et techniques d'interconnexion innovants. Nous avons complété l'utilisation de l'AJP par du jet d'encre dans cette partie afin de nous concentrer sur la fabrication de prototypes mieux adaptés à des substrats flexibles. En utilisant du scotch Kapton© et la technologie InkJet nous avons fabriqué une ligne de transmission Vialess sur un substrat souple autocollant. L'aspect souple de la ligne viens de son frittage insuffisant ainsi que de sa faible épaisseur, amenant

de ce fait une atténuation linéique de 0.77 dB/mm à 40 GHz. Pour appliquer ce concept avec l'AJP il faut dans un premier temps trouver une encre à nanoparticules d'argent permettant des impressions plus robustes sur substratssouples (en fonction de la forme de ses particules). Ces lignes restent dans un premier temps plus simple à réaliser avec des méthodes de réalisation non directes comme la gravure laser par exemple.

Ces lignes autocollantes peuvent être utilisées dans des problématiques d'interconnexions de composants volumiques par exemple. En métallisant des pentes plastiques réalisées par FDM nous avons connecté à un substrat les filtres fonctionnant à 8 GHz réalisés dans le chapitre III. Pour terminer, nous pouvons détourner le principe afin de réaliser une ligne coplanaire Vialess Flip-chip. Ainsi la ligne devient complètement indépendante du milieu dans lequel elle est placé et la connexion se fait par contact sur chaque bout de la ligne. Le premier prototype est réalisé à partir d'une plaque de Roger 4003C gravée mécaniquement. Les trois parties de l'interconnexion sont connectées entre elles à chaque bout de ligne par de la colle métallique chauffée au four. Malgré le coté très artisanal du prototype nous obtenons une atténuation linéique de 0.6 dB/mm à 40 GHz. Pour le futur modèle en scotch Kapton© une zone non métallisée peut permettre de coller la ligne sur le composant désiré. En fonction des fréquences de fonctionnement les lignes peuvent être manipulées au microscope ou grâce à une machine « pick and place ».

Nous avons également présenté le concept de filtres interdigité et SIW Vialess. Ne maitrisant pas parfaitement l'impression de l'encre à base de polyimide nous n'avons pas été en mesure de fabriquer des composants aussi exigeant d'un point de vue dimensionnel que des filtres. Cependant, nous avons imprimé des résonateurs afin de quantifier les facteurs de qualité typiques de ce type de composants en fonction de la fréquence de résonance.

Sur l'ensemble des résonateurs volumiques imprimés nous avons relevé des facteurs de qualité compris entre 10 et 50 sur la bande de fréquence [10 MHz ; 70 GHz]. Cette variation est principalement dû à la tolérance de fabrication du dépôt de polyimide imprimé.

Il est donc nécessaire de maitriser parfaitement l'impression de l'encre diélectrique avant de considérer la réalisation de filtres ou de résonateurs Vialess.

Au court de ce travail de thèse nous avons démontré la capacité de la technologie d'impression par aérosol à réaliser des composants hyperfréquences dans la bande de fréquences millimétriques. Les différents résultats sur les performances des lignes de transmissions fabriquées sont au niveau de l'état de l'art. La conclusion que l'on peut donner sur l'AJP, si l'on souhaite travailler dans les hyperfréquences, est qu'il s'agit d'une technologie additive plus adaptée à la métallisation sélective et précise de couches minces de diélectrique à faible rugosité de surface. L'accroche de l'encre sur des objets réalisés par SLA doit également être optimisé pour débloquer un grand nombre d'applications. Cependant il semblerait que les limites techniques de cette version de l'AJP ne permettent pas la métallisation immédiate d'objets de différente nature. Enfin il serait intéressant d'améliorer les lignes Vialess afin de pouvoir proposer des lignes entièrement autocollantes permettant de répondre à la problématique d'interconnexion par fil ou par impression. L'utilisation lignes de transmission hyperfréquences autocollantes métallisées par AJP peut permettre de réduire et de simplifier un certain nombre de phases technologiques dans le but de proposer une solution de réalisation et d'utilisation simple et si possible, économique.

Annexes

Annexe 1. Impression 3D.....189
Annexe 2. Caractérisation par anneau résonant.....201
Annexe 3. Dimensions mesurées.....213

Annexe 1. Impression 3D

I. Impression par extrusion de matière

La technologie la plus représentative de cette catégorie est le FDM (Fused Deposition Modeling), appelé parfois FFF (Fused Filament Fabrication).

Son principe est basé sur l'extrusion d'un filament thermoplastique à travers une buse chauffée sur une plateforme, elle-même chauffée, afin de garantir une bonne accroche des couches entres elles. Suivant l'avancé de l'impression la plateforme ou la buse, se déplacent sur l'axe des z d'une hauteur correspondant à une épaisseur de tranche afin de pouvoir constituer l'objet final en 3D (Figure A. 1).

Elle est la plus répandue dans l'impression 3D grand public grâce à sa mise en œuvre simple et à des prix d'entrée de gamme très abordables (à partir de 300 €). Son large choix de thermoplastiques en fait également une technologie polyvalente. Les principaux plastiques utilisés avec cette technologie sont les suivantes :

- PLA (acide polylactique) : facilité d'impression, bio dégradable,
- ABS (acrylonitrile butadiène styrène) : résistance aux chocs à basse température (-40°C),
- PET (poly téréphtalate d'éthylène) : facilité d'impression, flexibilité et recyclable,
- Nylon : forte résistance aux chocs,
- TPU (polyuréthanes thermoplastiques) : forte résistance aux chocs et élasticité,
- PC (polycarbonate) : solidité et résistance thermique, alternative à l'ABS.

Ces différentes caractéristiques sont décrites plus précisément en [A.1]. Il est également possible d'imprimer des filaments composés de polymères et de matériaux tels que du bois, du métal ou d'autres matériaux insolite [A.2]. Les prix des bobines sont en général situés entre 20 et 50 €.

Il est également possible d'effectuer un post traitement sur les objets réalisés par technologie FDM afin d'améliorer la finition mais celui-ci reste facultatif et s'opère en fonction du besoin des utilisateurs.

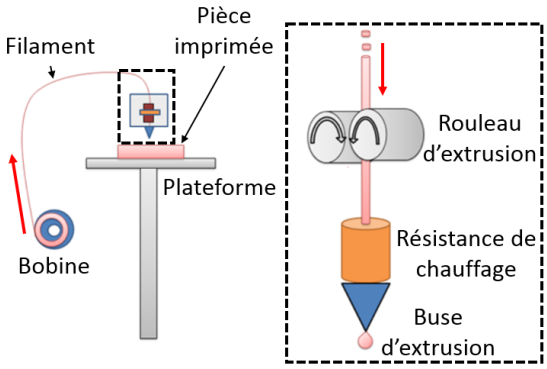


Figure A. 1: Schéma explicatif de la technologie FDM [A.3]

II. Impression par polymérisation

L'impression par polymérisation concerne toutes les technologies basées sur la même stratégie de réalisation : l'utilisation d'un polymère photosensible présent dans une cuve et solidifié de manière sélective à l'aide d'une source lumineuse UV.

Nous pouvons regrouper sous cette classification un grand nombre de technologies dérivées de la stéréolithographie (SLA) comme la DLP (Digital Light Processing), la CLIP (Continuous Liquid Interface Production) ou encore la DPP (Daylight Polymer Printing).

1. La Stéréolithographie

La technologie SLA consiste à durcir sélectivement la résine à l'aide d'un faisceau laser UV contrôlé par un miroir galvanométrique (axes x et y). Après chaque passage du laser la plateforme d'impression (voir la Figure A. 2) peut bouger de deux manières différentes en fonction de l'orientation du laser et par conséquent de la zone de polymérisation.

Si le laser arrive par le haut, la polymérisation de la résine se fait en surface et de ce fait, pour chaque tranche, la plateforme s'enfonce dans la résine à hauteur de l'épaisseur d'une tranche. Un racloir est également utilisé pour lisser uniformément la surface à chaque itération.

A l'inverse, si le laser arrive par le bas, la polymérisation se fait au fond de la cuve. Dans ce cas, la plateforme se retire du liquide de la même manière que précédemment. Le lissage se fait automatiquement grâce à la viscosité naturelle de la résine lorsque la couche durcie est décollée du fond.

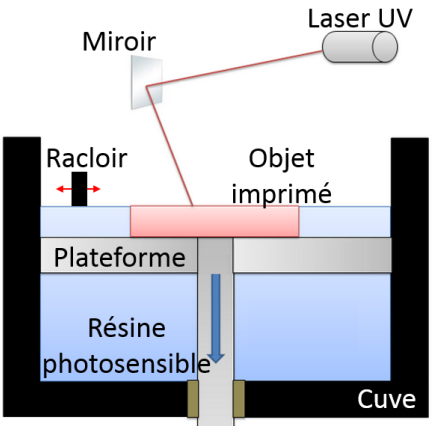


Figure A. 2: Schéma de la technologie SLA

La SLA est principalement utilisée lorsque l'on souhaite imprimer un objet avec une forte résolution. L'utilisation d'un laser pour scanner chaque tranche la rend moins adaptée à l'impression d'une multitude d'objets avec des temps de fabrication élevés. Pour terminer, ces objets doivent passer par un post traitement visant à les nettoyer des restes de résines plus ou moins visqueux. Pour rendre la pièce plus dure et résistante il est recommandé de les passer en four UV afin de compléter la phase de polymérisation.

Il existe un grand nombre de types de résines utilisables [A.4] pour cette technologie en fonction des secteurs et des applications voulues. Dans le cas des hyperfréquences, il existe des résines à base d'alumine et d'oxyde [A.5] qui sont très adaptées pour la réalisation de composants millimétriques [A.6] en présentant des pertes très faibles.

2. Digital Light Processing and Daylight Polymer Printing (DLP et DPP)

Les technologies DLP et DPP reposent sur le même principe que la SLA mais se distinguent par leur système d'irradiation de la résine avec l'utilisation d'une lampe UV.

Ce procédé permet d'illuminer une tranche entière de l'objet à imprimer en une seule opération. L'arrivée de la lumière, comme pour la SLA, peut se faire par le haut ou par le bas, en fonction de la machine utilisée et implique les mêmes problématiques (Figure A. 3).

L'unique différence entre ces deux technologies est que l'une utilise un projecteur DLP [A.7] et l'autre un écran LCD [A.8]. Le premier est constitué de pixels correspondant à des miroirs orientables activés par un champ électrique alors que le second est constitué de pixels correspondant à des matrices de LED.

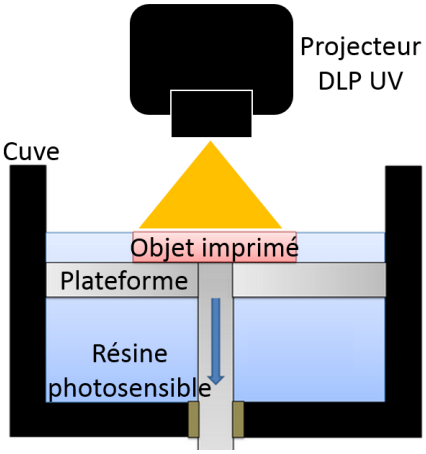


Figure A. 3: Schéma des technologies DLP / DPP

Par sa capacité à polymériser en une fois une tranche d'objet cette technologie est plus adaptée pour imprimer une multitude d'objets très rapidement couche par couche. L'utilisateur va devoir cependant gérer le ratio taille et résolution afin de pouvoir optimiser son temps d'impression en fonction de la résolution minimale recherchée.

La technologie DLP utilise les mêmes matériaux que pour la technologie SLA. En revanche pour la technologie LCD, les résines utilisées sont spécialement conçues pour être très sensibles à la luminosité et disposent d'une gamme spécifique [A.9]. Comme pour les pièces imprimées par SLA un post traitement est nécessaire.

3. Continuous Liquid Interface Production (CLIP)

La technologie CLIP développée par l'entreprise CARBON3D [A.10] est basée sur le même principe de fonctionnement que pour la technologie DLP. Sa particularité est de présenter une plaque perméable à l'oxygène et à la lumière qui est située au fond de la cuve.

La présence de l'oxygène va venir inhiber la solidification de la résine par la lampe UV créant ainsi une « zone morte » d'une dizaine de microns d'épaisseur. La plateforme se déplaçant lentement cette interface liquide va permettre une solidification en continu de la résine fournissant ainsi un gain de temps de fabrication conséquent (Figure A. 4). En guise de comparaison et d'exemple cette technologie est 100 fois plus rapide que la SLA [A.11].

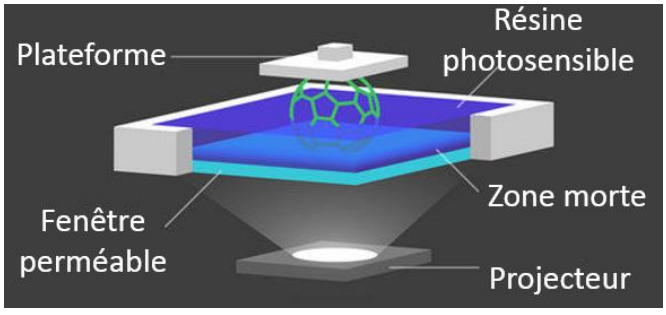


Figure A. 4: Schéma de la technologie CLIP [A.12]

Un certain nombre de versions de l'imprimante ainsi que plus d'une dizaine de résines plastiques sont disponibles sur le marché dont les prix varient de 99 $ à 399 $ [A.13]. Cependant nous pouvons relever, au moment de l'écriture de ce travail de thèse, l'absence de résine céramique risquant de limiter les applications liées au domaine de l'hyperfréquence pour la réalisation de composants fonctionnant aux fréquences millimétriques.

A toutes fins utiles, cette technologie est vendue comme un service et non pas comme une machine impliquant un abonnement annuel. Elle devient également de plus en plus présente dans l'industrie, comme par exemple chez le constructeur automobile Lamborghini pour réaliser des pièces à l'échelle 1 [A.14] ou encore une société américaine spécialisée sur les équipements sportifs avec l'impression de doublures de casque de football [A.15].

III. Impression par fusion sur lit de poudre

L'impression par fusion de lit de poudre est une méthode basée sur l'utilisation d'un laser ou d'un faisceau d'électrons comme source de chaleur permettant de fusionner des e poudre, tranches par tranche, afin d'imprimer un objet en 3D. Les principales technologies appliquant cette méthode sont la Selective Laser Sintering (SLS), la Selective Laser Melting (SLM), la Electron Beam Melting (EBM) et la Multi Jet Fusion (MJF).

1. Selective Laser Sintering et Selective Laser Melting (SLS et SLM)

Les technologies SLS et SLM utilisent un laser comme source de chaleur afin d'agglomérer et de fusionner entre elles des particules de poudres placées dans un conteneur (voir la Figure A. 5). Le SLS concerne plus particulièrement les poudres de matériaux plastiques, de verre ou d'alumine [A.16]. Le SLM quant à lui va venir fritter des particules métalliques constituées principalement d'alliages [A.17].

Le fonctionnement de ces deux technologies est identique. La poudre est placée dans un conteneur qui est appelé lit de poudre. A chaque passage du laser pour durcir une tranche de l'objet 3D le lit va s'abaisser à hauteur d'une épaisseur de couche et un racloir va venir homogénéiser la surface. Ce procédé est répété jusqu'à ce que la pièce soit terminée (Figure A. 5). Pour terminer l'objet final est nettoyé par brossage ou par air comprimé afin de retirer les restes de poudre.

Contrairement aux autres technologies additives 3D les objets réalisés par les technologies SLS et SLM reposant dans un lit de poudre, aucun support n'est nécessaire lors de l'impression [A.18]. Cette caractéristique permet d'imprimer toutes sortes de formes très complexes et internes.

Les objets imprimés sont également très durables dans le temps au point de pouvoir rivaliser avec les pièces fabriquées par des méthodes traditionnelles comme le moulage par injection ou l'usinage multiaxe par exemple. Néanmoins les pièces réalisées par ces technologies ont des rugosités de surface très fortes [A.19] qui peuvent compliquer leur utilisation ou leur finition. Il existe cependant des études dans lesquelles plusieurs de ces états de surfaces ont été optimisés [A.20] afin de convenir aux différents besoins recherchés.

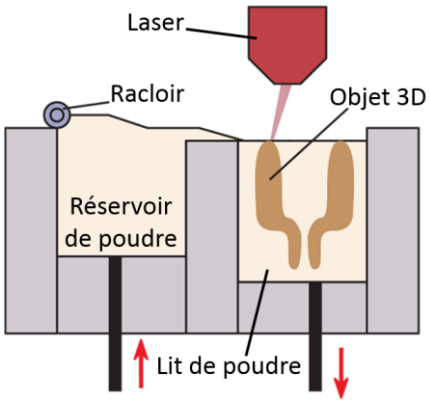


Figure A. 5: Schéma des technologies SLS / SLM [A.21]

2. Electron Beam Melting (EBM)

La technologie EBM est une technologie développée par Arcam AB, qui peut fusionner et fritter des poudres métalliques [A.22] à l'aide d'un faisceau d'électrons à haute énergie. Cette particularité lui permet de limiter au maximum les contraintes exercées sur le matériau, en le comparant au laser de la technologie SLM.

Cette technologie produit également une plus forte température (entre 700°C et 1000°C) sur la poudre ce qui a pour effet d'accélérer le processus d'impression. Pour autant, cette technologie ne permet pas de réaliser de gros objets. Par ailleurs, le rayon du faisceau d'électrons étant un peu plus large que celui du faisceau laser, sa précision de réalisation est inférieure au SLM.

Le fonctionnement est similaire aux technologies précédentes. La particularité de ce système est le faisceau d'électrons qui est formé en chauffant un filament de tungstène sous vide. Ces électrons vont ensuite être accélérés et guidés par des électrodes afin de les projeter précisément à grande vitesse sur la poudre métallique et ainsi la fritter. A la fin de chaque passage la plateforme descend et un racloir vient homogénéiser la surface de la poudre (Figure A. 6). Les pièces passent ensuite en post traitement avec une phase de nettoyage et, en fonction des besoins, des phases de finitions (polissage, usinage de surface, …) complémentaires.

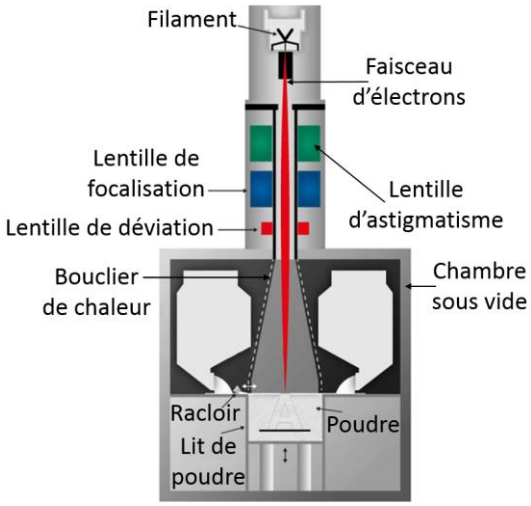


Figure A. 6: Schéma de la technologie EBM [A.23]

3. Multi Jet Fusion (MJF)

La technologie MJF développée par HP et dévoilée en 2016 est une combinaison des technologies SLS et InkJet. Elle se distingue des technologies SLS, SLM et EBM parce qu'elle n'utilise pas de faisceau d'énergie comme source de chaleur pour fusionner les grains de poudre.

En effet, un système de buse similaire à l'impression Jet d'encre va venir déposer une encre polymère photosensible aux endroits nécessaires sur la surface de poudre. Une lampe infrarouge (IR) à forte énergie est ensuite utilisée afin de chauffer les zones marquées par l'encre et donc forcer la fusion entre les particules de la poudre. Afin de limiter la propagation de chaleur dans la poudre, une encre d'inhibition peut être également utilisée sur les bords des impressions précédentes. A chaque étape la plateforme descend à hauteur d'une épaisseur de tranche et un racloir vient égaliser et homogénéiser la surface de la poudre (Figure A. 7).

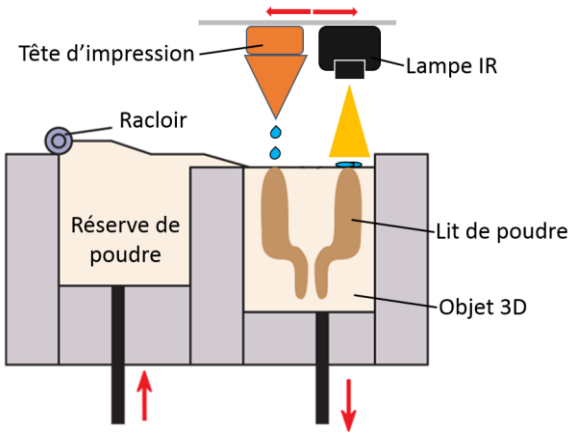


Figure A. 7: Schéma de la technologie MJF

Les matériaux utilisés sont principalement des poudres plastiques [A.24] et les différentes encres polymères utilisées sont fabriquées directement par HP.

De la même manière que les autres technologies de fusion sur lit de poudre, il est nécessaire d'effectuer un post traitement comprenant le nettoyage et une phase de finition. Pour les pièces métalliques il est nécessaire de chauffer la pièce finale afin de fritter les particules entre elles, tout en éliminant les dernières traces de polymère.

IV. Impression par projection de matière

Les technologies de projection de matière dans la réalisation d'objet 3D sont souvent apparentées aux impressions jet d'encre 2D utilisant le procédé de goutte à la demande (DOD).

De manière générale, une série de buses déposent le matériau par impression couche par couche. A mesure que les gouttelettes sont déposées sur la plateforme une lumière UV vient les solidifier. Il est également nécessaire d'utiliser des matériaux supports afin de pouvoir construire l'objet en 3D. Ces derniers étant solubles il est possible de les retirer lors d'une étape de post traitement sans abimer la pièce finale.

Les technologies PolyJet et NanoParticle Jetting (NPJ) sont les plus représentées dans cette catégorie. Se basant sur le même principe de dépôt, ce système est capable d'imprimer de la cire perdue, notamment pour des applications de moulage [A.25] dans la métallurgie.

1. PolyJet

La technologie PolyJet a été brevetée par la société Objet en 1999 appartenant aujourd'hui à Stratasys. Elle combine la technologie InkJet et l'utilisation d'encres polymères photosensibles.

En effet ces encres sont déposées en fonction du motif à imprimer sur la plateforme et chaque éjection est suivie d'une émission de lumière UV afin de la durcir couche après couche (Figure A. 8). Un matériau de support de type gel est utilisé pour réaliser des formes complexes. Ce matériau peut être facilement retiré à partir de bain de soude ou de jet d'eau.

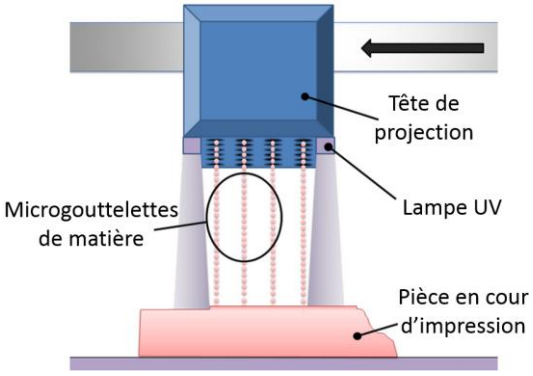


Figure A. 8: Schéma de la technologie PolyJet [A.26]

Cette technologie est compatible avec un grand choix de polymères et est capable de réaliser des structures multi matériaux [A.27] en stockant chaque matériau dans des têtes d'impression distinctes. Aujourd'hui Stratasys a mis en vente une vingtaine de types de machines adaptées à différentes applications comme le prototypage, l'industrie et l'orthodontie.

2. Nano Particle Jetting (NPJ)

NPJ est une technologie brevetée par Xjet dont le principe est très proche de la technologie InkJet étant donné qu'elle utilise également des encres à base de nanoparticules métalliques.

Son fonctionnement utilise une série de buses qui déposent l'encre sur le plateau d'impression en fonction du motif de la tranche voulue. Pour chaque couche déposée, le plateau est porté à haute température (soit 300 °C) afin de faire évaporer le solvant et fritter les particules métalliques entre elles. Ce processus est répété jusqu'à l'obtention de l'objet final (Figure A. 9).

En plus des encres nanoparticules métalliques, Xjet a mis au point des encres à nanoparticules céramiques [A.28] ouvrant de nouvelles possibilités d'utilisation dans le secteur des hyperfréquences.

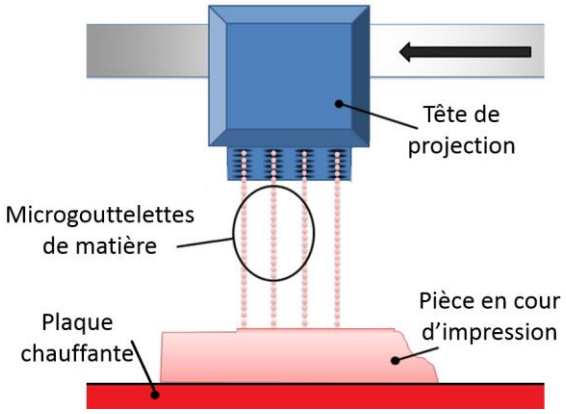


Figure A. 9: Schéma technologie NPJ

Une fois imprimée la pièce passe par une phase de post traitement durant laquelle les supports sont enlevés et un dernier frittage est réalisé afin d'obtenir les caractéristiques finales du matériau souhaité.

V. Impression par projection de liant

La technologie d'impression 3D par projection de liant, appelée également Binder Jetting (BJ), a été développée au Massachusetts Institute of Technology. Cette technique consiste à déposer des couches fines d'adhésif sur des matériaux en poudre afin de lier les particules entre elles.

Elle ressemble beaucoup à la technologie MJF, à la différence qu'il n'y a pas de source de chaleur utilisée pour fusionner la couche de poudre. Dans ce cas, l'adhésif est déposé par des têtes d'impression et éjecté en fines gouttelettes sur la surface de la poudre. De la même manière que les technologies par fusion sur lit de poudre, à chaque couche déposée, la plateforme descend dans le lit de poudre et un racloir vient égaliser et homogénéiser la surface. Le procédé est répété jusqu'à l'impression complète de l'objet souhaité (Figure A. 10).

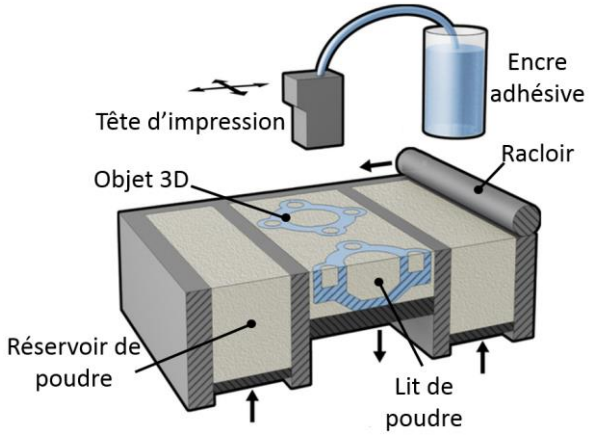


Figure A. 10: Schéma de la technologie BJ [A.29]

Les pièces réalisées doivent passer par une phase de post traitement afin d'être nettoyées en retirant la poudre non collée par l'encre adhésive. La pièce est ensuite chauffée à haute température afin de fusionner ou fritter selon les caractéristiques finales de l'objet à réaliser. Les matériaux utilisables sont principalement des poudres métalliques mais également du grès, de la silice [A.30] et de la céramique [A.31].

L'une des technologies les plus connues dans cette catégorie est la ColorJet Printing (CPJ), marque déposée par Zcorp puis rachetée par 3D System. Cette technologie est capable d'imprimer en couleurs les objets en fonction de l'adhésif utilisé. Cependant ces procédés ne sont pas destinés à des applications fonctionnelles en raison de leur porosité et sont donc réservé à des fins de démonstration [A.32].

VI. Impression par laminage de feuille (SL)

Les technologies de fabrication par laminage de feuille (SL) fonctionnent en superposant des couches de matériaux, sous forme de feuilles. Ces feuilles sont collées entre elles par un adhésif et sont découpées à l'aide d'une lame ou d'un laser afin de correspondre à la tranche de l'objet 3D. Les matériaux utilisables ainsi que le type d'applications envisageables dépendent de la technologie utilisée.

Il existe plusieurs technologies utilisant ce procédé comme la Laminated object manufacturing (LOM), la Composite Based Additive Manufacturing (CBAM) et la Selective Lamination Composite Object Manufacturing (SLCOM).

1. Laminated object manufacturing (LOM)

La technologie LOM a été initialement développée par Cubic technologies (anciennement Helisys Inc). Elle fonctionne avec un rouleau qui permet d'alimenter la plateforme d'impression en feuilles de matériaux recouvertes d'une couche adhésive.

Chaque couche est collée thermiquement à l'aide d'une presse chauffante puis gravée à l'aide d'un laser ou d'une lame. Les contours des motifs de chaque couche sont gravés ainsi qu'une certaine partie autour de la pièce afin d'obtenir une bonne planéité durant l'utilisation de la presse. Cette zone va également être gravée d'un grand nombre de petits motifs, ayant la forme de croix, dans le but de faciliter l'extraction de la pièce finale.

Après chaque gravure, la plateforme descend d'une hauteur d'une épaisseur de feuille puis le rouleau amène une partie neuve du matériau. Ce procédé est effectué pour chaque tranche de l'objet à imprimer (Figure A. 11).

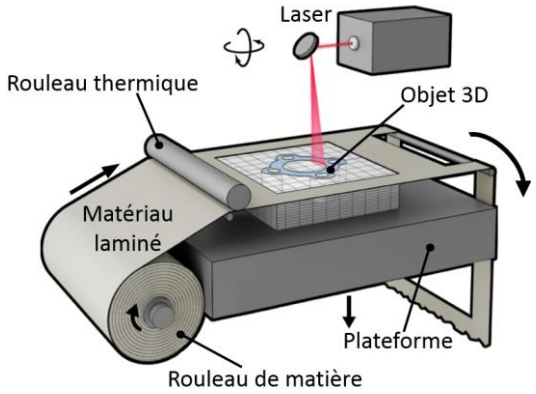


Figure A. 11: Schéma de la technologie LOM [A.33]

Cette technologie est très polyvalente et peut permettre l'utilisation d'un grand nombre de matériaux. Cependant dans la pratique les matériaux papiers et plastiques sont les plus souvent utilisés pour leur facilité de découpage. L'utilisation de feuilles métalliques est également possible mais compliquée à réaliser si l'on veut obtenir un process stable et efficace [A.34].

Les principales technologies sur le marché sont la SD300pro de Solido et la ARKPro de Mcor. La première est spécialisée dans le laminage de feuilles composées de PVC et de colle

propriétaire alors que la seconde est spécialisée sans le laminage de feuilles de papier en couleur. Elles proposent un process peu couteux pour des applications orientées vers la réalisation de modèles de démonstration. Comme l'objet à imprimer est pris dans un bloc de papier compact il est possible de réaliser des formes complexes, cependant ces systèmes sont incapables de réaliser des objets creux. Il est notable que la précision des réalisations dépend directement de l'épaisseur des feuilles

2. Composite Based Additive Manufacturing et Selective Lamination Composite Object Manufacturing (CBAM et SLCOM)

Les technologies CBAM et SLCOM se caractérisent principalement par les matériaux qu'elles utilisent. En effet elles permettent d'utiliser des feuilles de matériaux composites renforcées par des fibres fusionnées avec des thermoplastiques [A.35]. Une tête d'impression va déposer une solution aqueuse sur la feuille de composite en fonction des motifs voulus.

Cette feuille est ensuite recouverte de poudre thermoplastique, laquelle se colle à la solution précédemment déposée. L'excès de poudre est soufflé, puis le procédé est répété afin d'obtenir toutes les couches nécessaires à la réalisation du bloc souhaité. Le bloc ainsi obtenu est pressé puis cuit au four. Cette cuisson a pour effet de faire fusionner les composants entre eux afin d'obtenir un thermoplastique composite renforcé à base de fibres. L'objet ainsi obtenu est ensuite nettoyé de l'excédent de matière non fusionnée par un sablage ou un bain chimique. Le schéma du processus est présenté Figure A. 12.

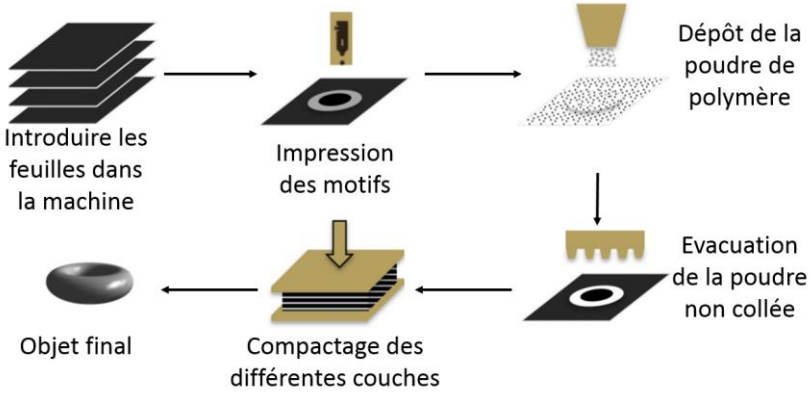


Figure A. 12: Schéma explicatif des technologies CBAM et SLCOM [A.36]

Le principe de la technologies CBAM a été breveté par le start up Impossible Objects tandis que la technologie SLCOM est développée par la société Envision TEC.

VII. Impression par dépôt sous énergie concentrée

Les technologies de Direct Energy Deposition (DED) permettent de fabriquer des objets en fusionnant directement des matériaux et en les déposant couche après couche.

Les matériaux utilisés sont principalement des poudres métalliques. Cette catégorie peut englober un certain nombre de technologies cependant, nous allons nous restreindre à celles qui sont capables de réaliser des structures en 3D. Les principales technologies adaptées à ces impressions en 3D sont LENS, Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM) et Laser Deposition Welding (LDW).

1. LENS

La technologie LENS distribuée par Optomec est basée sur l'utilisation d'un laser afin de fritter et fusionner des particules de poudres métalliques. En ce point elle est proche de la technologie SLM qui permet de fusionner les particules couche par couche dans un lit de poudre. La différence ici est que ces particules sont éjectées en continues sous pression par plusieurs buses sur le substrat. Enfin un laser focalisé sur le même point que les flux de particules permettent un frittage sélectif couche par couche (Figure A. 13).

Un gaz d'argon est utilisé dans l'enceinte de la machine afin de limiter au maximum l'oxydation des particules métalliques lors de l'impression [A.37]. Un post-traitement des objets imprimés est nécessaire afin d'obtenir les caractéristiques finales recherchées. En effet il est possible de compléter le frittage de la pièce ou d'effectuer des finitions en l'usinant.

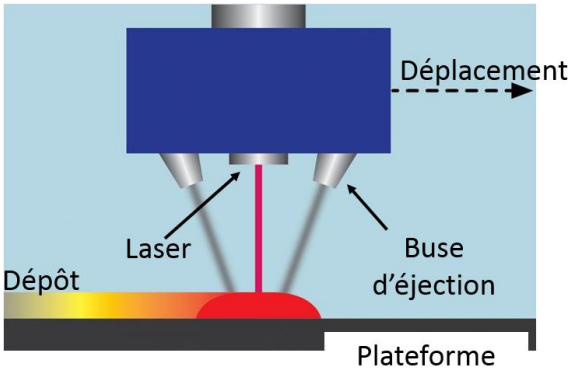


Figure A. 13: Schéma de la technologie LENS [A.38]

Cette technologie est particulièrement adaptée pour la construction d'objets métalliques dont les tailles sont trop imposantes pour l'utilisation des technologies de fusion de lit de poudre ou dans la réparation d'objets déjà existants. La majorité des matériaux sont des poudres métalliques mais il est également possible d'utiliser des matériaux composites à base de céramique [A.39].

2. Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM)

Développée par le fabriquant de systèmes d'impression 3D américain Sciaky, la technologie EBAM permet de produire des structures métalliques 3D de grandes tailles et à grande échelle.

Elle est présentée comme étant une alternative aux fabrications traditionnelles métalliques (forgeage, coulage) dans le sens où elle permet des productions plus rapides et des quantités de matières utilisées plus faibles. Lors de son fonctionnement un canon à électrons vient faire fondre le métal appliqué via une tête de soudage couche par couche jusqu'à l'impression totale de l'objet (Figure A. 14).

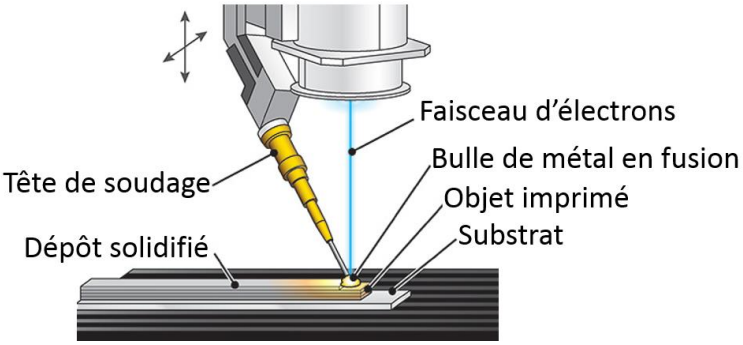


Figure A. 14: Schéma de la technologie EBAM [A.40]

Cette technologie est adaptée à n'importe quelle phase du cycle de vie d'un objet, de sa fabrication jusqu'à sa réparation. Les matériaux utilisés sont principalement des métaux onéreux comme le tantale ou le tungstène [A.41] car cette méthode de réalisation permet de limiter les déchets contrairement à l'usinage classique.

3. Laser Deposition Welding (LDW)

La technologie LDW est très similaire à la technologie EBAM. Dans ce cas, un laser est utilisé pour fritter un métal sur un substrat.

Contrairement à la technologie LENS cette technologie permet de construire des objets en 3D en appliquant manuellement un fil métallique, quelle vient fusionner et fritter avec le substrat, en appliquant de la poudre métallique également fondue à l'aide d'un laser (Figure A. 15). Des tests de réalisations multicouches ont été réalisées en [A.42] et l'utilisation de plusieurs métaux lors d'un même fonctionnement est également possible [A.43].

La société DMG MORI a combiné le LSW à une machine de fraisage 5 axes afin de réaliser une machine hybride capable d'imprimer une pièce et de la retravailler au sein du même process.

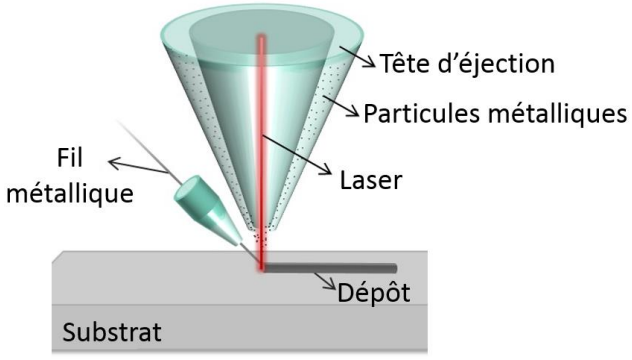


Figure A. 15: Schéma de la technologie LDW [A.44]

Annexe 2. Caractérisation par anneau résonant

Nous allons présenter dans ces annexes toutes les équations utilisées pour utiliser la méthode de caractérisation avec des anneaux résonnant. Toutes les équations utilisées ont également leur calcul d'incertitudes en fonction des différents paramètres utilisés.

I. Caractérisation de permittivité

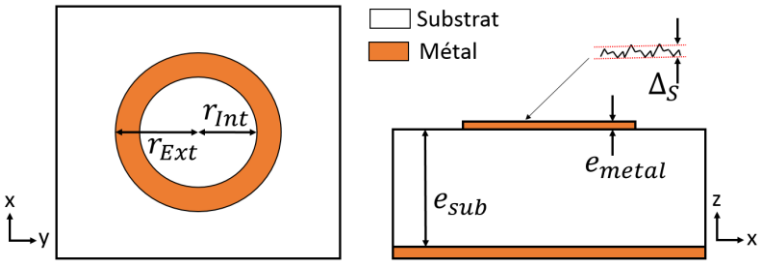


Figure A. 16: Schéma de présentation des différents paramètres géométrique d'un anneau résonant

Les dimensions géométriques de l'anneau r_{Int} et r_{Ext} peuvent être mesurées à l'aide d'un microscope numérique. En fonction de la taille de l'anneau et de l'objectif du microscope, il est possible de mesurer les rayons. L'épaisseur e_{sub} peut être obtenue à l'aide d'un palpeur. Enfin l'épaisseur de métallisation e_{metal} et sa rugosité de surface Δ_S peuvent être obtenu à l'aide d'un profilomètre. Ces différentes étapes permettent d'alimenter en données les différentes équations qui permettront par la suite d'extraire les propriétés électriques des matières utilisées lors de la fabrication de l'anneau.

Cet anneau résonnant produit des résonnances dépendant de ces paramètres. Nous pouvons ainsi relever la permittivité effective $\varepsilon_{r,e_{ff}}$ avec l'équation *(A. 1)*.

$$\varepsilon_{r,e_{ff}} = \left(\frac{nc}{2\pi r_m f_n}\right)^2 \quad \text{(A. 1)}$$

f_n, r_m, c et ε_{eff} correspondent respectivement à la n^{ième} fréquence de résonnance, à la moyenne entre le rayon intérieur et le rayon extérieur de l'anneau, à la vitesse de la lumière (299 792 458 $^{m}/_{s}$) et à la permittivité effective du diélectrique.

Nous pouvons ainsi extraire la valeur de la permittivité ε_r du matériau avec l'équation *(A. 2)*.

$$\varepsilon_r = \frac{2\varepsilon_{r,e_{ff}} + M - 1}{M + 1} \quad \text{(A. 2)}$$

$$M = \left(1 + \frac{12h}{W_{eff}}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad \text{(A. 3)}$$

$$W_{eff} = W + \frac{1.25t}{\pi}\left[1 + \ln\left(\frac{2h}{t}\right)\right] \quad \text{(A. 4)}$$

Dans les équations *(A. 3)* et *(A. 4) W* représente la largeur de l'anneau, que ,nous pouvons obtenir en faisant la différence entre le rayon extérieur r_{Ext} de l'anneau et le rayon intérieur r_{Int} de l'anneau, et W_{eff} est la largeur effective de l'anneau.

Les calculs d'incertitudes de ces équations sont donnés avec les équations *(A. 5), (A. 6), (A. 7)* et *(A. 8)*.

$$\Delta_{\varepsilon_r} = \frac{2}{M+1}\Delta_{\varepsilon_{r,e_{ff}}} + \frac{2(\varepsilon_{r,e_{ff}}-1)}{(M+1)^2}\Delta_M \quad \text{(A. 5)}$$

$$\Delta_{\varepsilon_{r,e_{ff}}} = \frac{1}{2f_0}\left(\frac{cn}{\pi r_m f_0}\right)^2 \Delta_{f_0} + \frac{1}{2r_m}\left(\frac{cn}{\pi r_m f_0}\right)^2 \Delta_{r_m} \quad \text{(A. 6)}$$

$$\Delta_M = \frac{1}{4\sqrt{3}\, W_{eff}\left(\frac{h}{W_{eff}}\right)^{\frac{3}{2}}}\Delta_h + \frac{h}{4\sqrt{3}\left(\frac{h}{W_{eff}}\right)^{\frac{3}{2}} {W_{eff}}^2}\Delta_{W_{eff}} \quad \text{(A. 7)}$$

$$\Delta_{W_{eff}} = \Delta_W + \frac{5t}{4\pi h}\Delta_h + \frac{5ln\left(\frac{2h}{t}\right)}{4\pi}\Delta_t \quad \text{(A. 8)}$$

Pour la seconde étape de la méthode nous allons, pour chaque pic de résonance identifié sur le paramètre S_{21} du dispositif, calculer le facteur de qualité en charge puis à vide en utilisant les équations *(A. 9)* et *(A. 11).* Leur calcul d'incertitudes sont donnés avec les équations *(A. 10)* et *(A. 12).*

$$Q_L = \frac{f_0}{\Delta_{f_{-3dB}}} \quad \text{(A. 9)}$$

$$\Delta_{Q_L} = \frac{1}{\Delta_{f_{-3dB}}}\Delta_{f_0} + \frac{2f_0}{(\Delta_{f_{-3dB}})^2}\Delta_{\Delta_{f_{-3dB}}} \quad \text{(A. 10)}$$

$$Q_0 = \frac{Q_L}{1-10^{\frac{S21}{20}}} \quad \text{(A. 11)}$$

$$\Delta_{Q_0} = \frac{1}{1-10^{\frac{S21}{20}}}\Delta_{Q_L} + \frac{Q_L}{(1-|S_{21}|_{lin})^2}\Delta_{S_{21_{lin}}} \quad \text{(A. 12)}$$

Dans ces équations $f_2 - f_1$ correspond à la bande de fréquence à -3 dB à la fréquence de résonnance f_n et S_{21} est le paramètre de transmission de l'anneau en dB à la fréquence de résonance.

A partir de ces valeurs nous sommes capables de remonter aux pertes totales du dispositif, exprimées en dB dans l'équation *(A. 13)* avec son incertitude dans l'équation *(A. 14)*.

$$\alpha_{tot} = \frac{\pi}{Q_0\lambda_g}\left[\frac{Neper}{unité\ de\ longeur}\right]$$
ou
$$\alpha_{Total} = \frac{\pi}{Q_0\,\lambda_g} * 8{,}685889638\ \left[\frac{dB}{unité\ de\ longueur}\right] \quad \text{(A. 13)}$$

$$\Delta_{\alpha_{tot}} = \frac{\pi}{\lambda_g {Q_0}^2}\Delta_{Q_0} + \frac{\pi}{Q_0 {\lambda_g}^2}\Delta_{\lambda_g} \quad \text{(A. 14)}$$

Remarque : $1Neper = 8.685889638\ dB$

$$\lambda_g = \frac{2\pi r_m}{n} \quad \text{(A. 15)}$$

$$\Delta_{\lambda_g} = \frac{2\pi}{n}\Delta_{r_m} \quad \text{(A. 16)}$$

Dans l'équation *(A. 15)*, λ_g représente la longueur d'onde guidée à la fréquence de résonance du pic sur lequel nous faisons la mesure. Nous pouvons également donner le niveau de pertes totales en fonction des différents niveaux de pertes issues du diélectrique et du conducteur (équation *(A. 17)*).

$$\alpha_{Total} = \alpha_{diel} + \alpha_{metal} \quad \text{(A. 17)}$$

A partir de cette partie nous avons le choix entre deux scénarios : la caractérisation de la conductivité d'un dépôt métallique ou la caractérisation de la permittivité et tangente de pertes de la couche diélectrique.

La tangente de pertes est nécessaire pour obtenir la conductivité et la conductivité est nécessaire pour obtenir la tangente de pertes. Il est nécessaire au préalable de caractériser l'un ou l'autre avant d'utiliser cette méthode. Cependant, ces paramètres n'ont pas une grande influence sur les calculs, les valeurs n'ont donc pas besoin d'être très précise pour pouvoir effectuer une bonne extraction.

II. Caractérisation de conductivité

Nous sommes dans le cas où nous souhaitons caractériser la conductivité effective de la couche métallique de l'anneau résonnant.

A partir de l'équation *(A. 17)*, nous devons remonter à la valeur des pertes métalliques α_{metal} pour extraire la conductivité du dépôt métallique σ.

Nous commençons donc par calculer les pertes diélectriques α_{diel} du résonateur en fonction de la tangente de pertes tanδ avec l'équation *(A. 18)* (avec son calcul d'incertitude dans l'équation *(A. 19)*).

$$\alpha_{diel} = 27.3\frac{\varepsilon_r}{\varepsilon_r - 1}\frac{\varepsilon_{r,e_{ff}} - 1}{\sqrt{\varepsilon_{r,e_{ff}}}}\frac{tan\delta f_0}{c} \quad \text{(A. 18)}$$

$$\Delta_{\alpha_{diel}} = 27.3\left[\frac{f_0(\varepsilon_{r,e_{ff}} - 1)tan\delta}{c\sqrt{\varepsilon_{r,e_{ff}}}(\varepsilon_r - 1)^2}\Delta_{\varepsilon_r} + \frac{f_0 tan\delta(\varepsilon_{r,e_{ff}} + 1)}{2(\varepsilon_r - 1)c{\varepsilon_{r,e_{ff}}}^{\frac{3}{2}}}\Delta_{\varepsilon_{r,e_{ff}}} + \frac{\varepsilon_r(\varepsilon_{r,e_{ff}} - 1)}{(\varepsilon_r - 1)c\sqrt{\varepsilon_{r,e_{ff}}}}\left(f_0\Delta_{tan\delta} + tan\delta\Delta_{f_0}\right)\right] \quad \text{(A. 19)}$$

Nous pouvons maintenant calculer la valeur des pertes métalliques α_{metal} en fonction du rapport $\mathrm{W}/\mathrm{e}_{\mathrm{substrat}}$ avec les équations *(A. 20), (A. 27)* et *(A. 32)*.

- $\frac{W}{h} \leq \frac{1}{2}\pi$:

$$\alpha_{metal} = \frac{8.68 R_{S1} M_\alpha}{2\pi Z_0 h}\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hU}{\pi W_{eff}}\right)\left[\frac{dB}{unité\ de\ longueur}\right] \quad \text{(A. 20)}$$

$$M_\alpha = 1 - \left(\frac{W_{eff}}{4h}\right)^2 \quad \text{(A. 21)}$$

$$U = ln\left(\frac{4\pi W}{t}\right) + \frac{t}{W} \quad \text{(A. 22)}$$

Nous nous intéressons plus particulièrement à R_{S1} la résistance de rugosité de surface (équation *(A. 23)*) et à son calcul d'incertitude (équation *(A. 24)*).

$$R_{S1} = \frac{\alpha_{metal} 2\pi Z_0 h}{8.68 M_\alpha\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hU}{\pi W_{eff}}\right)} \quad \text{(A. 23)}$$

$$\begin{aligned}\Delta_{R_{S1}} = \frac{2Z_0}{8.68 M_\alpha}\Bigg[&\frac{\pi h}{\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hU}{\pi W_{eff}}\right)}\Delta_{\alpha_{metal}} + \frac{\pi \alpha_{metal} \pi^3 {W_{eff}}^2}{\left(\pi W_{eff} + h(\pi + U)\right)^2}\Delta_h \\ &+ \frac{\pi \alpha_{metal} h}{M_\alpha\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hU}{\pi W_{eff}}\right)}\Delta_{M_\alpha} + \frac{\alpha_{metal} h^2 \pi^2 (U + \pi)}{\left(\pi W_{eff} + hU + h\pi\right)^2}\Delta_{W_{eff}} \\ &+ \frac{\alpha_{metal} h^2}{W_{eff}\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hU}{\pi W_{eff}}\right)^2}\Delta_U\Bigg]\end{aligned} \quad \text{(A. 24)}$$

$$\Delta_{M_\alpha} = \frac{W_{eff}}{8h^2}\Delta_{W_{eff}} + \frac{{W_{eff}}^2}{8h^3}\Delta_h \quad \text{(A. 25)}$$

$$\Delta_U = \frac{W - t}{W^2}\Delta_W + \left|\frac{1}{W} - \frac{1}{t}\right|\Delta_t \quad \text{(A. 26)}$$

- $\frac{1}{2}\pi \leq \frac{W}{h} \leq 2$:

$$\alpha_{metal} = \frac{8.68 R_{S1} M_\alpha}{2\pi Z_0 h}\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)\left[\frac{dB}{unité\ de\ longueur}\right] \quad \text{(A. 27)}$$

$$V = ln\left(\frac{2h}{t}\right) + \frac{t}{W} \quad \text{(A. 28)}$$

Avec M_α et son incertitude calculés dans les équations *(A. 21)* et *(A. 25)* respectivement.

Nous nous intéressons plus particulièrement à R_{S1} la résistance de rugosité de surface (équation *(A. 29)*) et à son calcul d'incertitude (équation *(A. 30)*).

$$R_{S1} = \frac{\alpha_{metal} 2\pi Z_0 h}{8.68 M_\alpha\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)} \quad \text{(A. 29)}$$

$$\Delta_{R_{S1}} = \frac{2Z_0}{8.68M_\alpha}\left[\frac{\pi h}{\left(1+\frac{h}{W_{eff}}+\frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)}\Delta_{\alpha_{metal}} + \frac{\pi\alpha_{metal}\pi^3 {W_{eff}}^2}{\left(\pi W_{eff}+h(\pi+V)\right)^2}\Delta_h + \frac{\pi\alpha_{metal}h}{M_\alpha\left(1+\frac{h}{W_{eff}}+\frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)}\Delta_{M_\alpha} + \frac{\alpha_{metal}h^2\pi^2(V+\pi)}{\left(\pi W_{eff}+hV+h\pi\right)^2}\Delta_{W_{eff}} + \frac{\alpha_{metal}h^2}{W_{eff}\left(1+\frac{h}{W_{eff}}+\frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)^2}\Delta_V\right] \quad \text{(A. 30)}$$

$$\Delta_V = \frac{1}{h}\Delta_h + \left|\frac{1}{W}-\frac{1}{t}\right|\Delta_t + \frac{t}{W^2}\Delta_W \quad \text{(A. 31)}$$

- $2 \leq \frac{W}{h}$:

$$\alpha_{metal} = \frac{8.68R_{s1}}{2\pi Z_0 h}\left[\frac{W_{eff}}{h}+\frac{\frac{W_{eff}}{\pi h}}{\frac{W_{eff}}{2h}+0.94}\right]\left(1+\frac{h}{W_{eff}} + \frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)\left\{\frac{W_{eff}}{h} + \frac{2}{\pi}ln\left[2\pi e^{\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}\right]\right\}^{-2}\left[\frac{dB}{unité\ de\ longueur}\right] \quad \text{(A. 32)}$$

Avec V et son incertitude calculée dans les équations *(A. 28)* et *(A. 31).*

Nous nous intéressons plus particulièrement à R_{S1} la résistance de rugosité de surface (équation *(A. 33)*) et à son calcul d'incertitude (équation *(A. 34)*).

$$R_{s1} = \frac{\alpha_{metal}2\pi Z_0 h}{8.68\left[\frac{W_{eff}}{h}+\frac{\frac{W_{eff}}{\pi h}}{\frac{W_{eff}}{2h}+0.94}\right]\left(1+\frac{h}{W_{eff}}+\frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)\left\{\frac{W_{eff}}{h}+\frac{2}{\pi}ln\left[2\pi e^{\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}\right]\right\}^{-2}} \quad \text{(A. 33)}$$

$$\Delta_{R_{S1}} = \frac{2\pi Z_0 h}{8.68\left[\frac{W_{eff}}{h}+\frac{\frac{W_{eff}}{\pi h}}{\frac{W_{eff}}{2h}+0.94}\right]\left(1+\frac{h}{W_{eff}}+\frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)\left\{\frac{W_{eff}}{h}+\frac{2}{\pi}ln\left[2\pi e^{\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}\right]\right\}}^{-2}\Delta_{\alpha_{metal}} +$$

$$\frac{2\pi\alpha_{metal}Z_0}{\frac{\frac{Vh}{\pi W_{eff}}+\frac{h}{W_{eff}}+1}{\left(\frac{2ln\left(2\pi e^{\frac{W_{eff}}{2h}+0.94}\right)}{\pi}+\frac{W_{eff}}{h}\right)^2}+8.68\left(\frac{W_{eff}}{\pi h\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}+\frac{W_{eff}}{h}\right)}\left|1-h\left(\frac{\frac{V}{\pi W_{eff}}+\frac{1}{W_{eff}}}{\left(\frac{2ln\left(2\pi e^{\frac{W_{eff}}{2h}+0.94}\right)}{\pi}+\frac{W_{eff}}{h}\right)^2}-\right.\right.$$

$$\left.\left.\frac{2\left(-\frac{W_{eff}}{\pi h^2}-\frac{W_{eff}}{h^2}\right)\left(\frac{Vh}{\pi W_{eff}}+\frac{h}{W_{eff}}+1\right)}{\left(\frac{2ln\left(2\pi e^{\frac{W_{eff}}{2h}+0.94}\right)}{\pi}+\frac{W_{eff}}{h}\right)^3}+8.68\left(\frac{W_{eff}}{\pi h^2\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}-\frac{W_{eff}}{h^2}+\frac{{W_{eff}}^2}{2\pi\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)^2h^3}\right)\right)\right|\Delta_h +$$

$$\frac{2\pi\alpha_{metal}Z_0h\left(\frac{-\frac{h}{W_{eff}{}^2}\left(\frac{V}{\pi}+1\right)}{\left(\frac{2ln\left(2\pi e\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}{\pi}+\frac{W_{eff}}{h}\right)^2}-\frac{2\left(\frac{1}{\pi h}+\frac{1}{h}\right)\left(1+\frac{h}{W_{eff}}+\frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)}{\left(\frac{2ln\left(2\pi e\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}{\pi}+\frac{W_{eff}}{h}\right)^3}+8.68\left(\frac{1}{\pi h\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}-\frac{W_{eff}}{2\pi h^2\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)^2}+\frac{1}{h}\right)\right)}{\left(\frac{\frac{Vh}{\pi W_{eff}}+\frac{h}{W_{eff}}+1}{\left(\frac{2ln\left(2\pi e\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}{\pi}+\frac{W_{eff}}{h}\right)^2}+8.68\left(\frac{W_{eff}}{\pi h\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}+\frac{W_{eff}}{h}\right)\right)^2}\Delta_{W_{eff}}+$$

$$\frac{2\alpha_{metal}h^2Z_0}{W_{eff}\left(\frac{2ln\left(2\pi e\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}{\pi}+\frac{W_{eff}}{h}\right)^2\left(\frac{\frac{Vh}{\pi W_{eff}}+\frac{h}{W_{eff}}+1}{\left(\frac{2ln\left(2\pi e\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}{\pi}+\frac{W_{eff}}{h}\right)^2}+8.68\left(\frac{W_{eff}}{\pi h\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}+\frac{W_{eff}}{h}\right)\right)^2}\Delta_V \quad \text{(A. 34)}$$

A partir de R_{S1} nous pouvons remonter à la valeur de la résistance de surface R_S avec Δ_S la rugosité de surface et δ_S la profondeur de peau de la couche métallique dans l'équation *(A. 35).*

$$R_S = \frac{R_{S1}}{1 + \frac{2}{\pi} tan^{-1}\left[1.4\left(\frac{\Delta_S}{\delta_S}\right)^2\right]} \quad \text{(A. 35)}$$

La profondeur de peau de la couche métallique s'exprime en fonction de la conductivité effective du métal σ et de la perméabilité du vide μ=4π.10 -7 [H/m] dans l'équation *(A. 36).*

$$\delta_S = \sqrt{\frac{1}{\pi f_0 \mu \sigma}} \quad \text{(A. 36)}$$

Les calculs d'incertitudes de R_S et δ_S sont donnés respectivement dans les équations *(A. 37)* et *(A. 38).*

$$\Delta_{R_S} = \frac{1}{1 + \frac{2}{\pi} tan^{-1}\left[1.4\left(\frac{\Delta_S}{\delta_S}\right)^2\right]} \Delta_{R_{S1}} + \frac{140\pi {\delta_S}^2 R_{S1} \Delta_S}{(49\Delta_S^4 + 25\Delta_S^4)\left(2tan^{-1}\left(\frac{7\Delta_S^2}{5{\delta_S}^2}\right) + \pi\right)^2} \Delta_{\Delta_S} + \frac{140\pi \Delta^2 R_{S1} \delta_S}{\left(49\Delta_S^4 + 25{\delta_S}^4\right)\left(2tan^{-1}\left(\frac{7\Delta_S^2}{5{\delta_S}^2}\right) + \pi\right)^2} \Delta_{\delta_S} \quad \text{(A. 37)}$$

$$\Delta_{\delta_S} = \frac{1}{2\sqrt{\pi}\mu\sigma\sqrt{\frac{1}{\mu\sigma f_0}} f_0^2} \Delta_{f_0} + \frac{1}{2\sqrt{\pi}\mu f_0 \sqrt{\frac{1}{\mu f_0 \sigma}} \sigma^2} \Delta_\sigma \quad \text{(A. 38)}$$

Si nous considérons que la rugosité de la couche métallique est négligeable, ou si nous ne voulons pas prendre en compte ce paramètre, nous pouvons simplifier les calculs en choisissant $R_{S1} = R_S$.

Nous pouvons ainsi exprimer la conductivité σ en fonction de R_S (ou R_{S1}) dans l'équation *(A. 39)* avec son calcul d'incertitude dans l'équation *(A. 40).*

$$\sigma = \frac{{R_S}^2}{\pi f_0 \mu} \quad \text{(A. 39)}$$

$$\Delta_\sigma = \frac{2R_S}{\pi f_0 \mu} \Delta_{R_S} + \frac{{R_S}^2}{\pi \mu f_0^2} \Delta_{f_0} \quad \text{(A. 40)}$$

III. Caractérisation de tangente de pertes

Nous sommes dans le cas où nous souhaitons caractériser la tangente de pertes de la couche diélectrique de l'anneau résonnant.

A partir de l'équation *(A. 17)*, nous devons remonter à la valeur des pertes diélectriques α_{diel} pour extraire la tangente de pertes $tan\delta$.

Nous commençons donc par calculer la résistance du surface R_S de la couche métallique (équation *(A. 41)*), afin de remonter à la valeur de la résistance de rugosité de surface R_{S1}

(équation *(A. 43)*), pour calculer les pertes métalliques α_{metal} (en fonction du rapport $W/e_{substrat}$ avec les équations *(A. 45), (A. 47)* et *(A. 49)*).

$$R_S = \sqrt{\frac{\pi f_0 \mu_0}{\sigma}} \tag{A. 41}$$

$$\Delta_{R_S} = \frac{\sqrt{\pi}\mu_0}{2\sigma\sqrt{\frac{\mu_0 f_0}{\sigma}}}\Delta_{f_0} + \frac{\sqrt{\pi} f_0 \mu_0}{2\sigma^2\sqrt{\frac{\mu_0 f_0}{\sigma}}}\Delta_\sigma \tag{A. 42}$$

En fonction de la rugosité de surface Δ_S de la couche métallique et de la profondeur de peau δ_S (équation *(A. 36)*) nous pouvons calculer la résistance de rugosité de surface R_{S_1} avec l'équation *(A. 43)* et son incertitude avec l'équation *(A. 44)*.

$$R_{S_1} = R_S\left(1 + \frac{2}{\pi}tan^{-1}\left[1.4\left(\frac{\Delta_S}{\delta_S}\right)^2\right]\right) \tag{A. 43}$$

$$\Delta_{R_{S_1}} = \left(1 + \frac{2}{\pi}tan^{-1}\left[1.4\left(\frac{\Delta_S}{\delta_S}\right)^2\right]\right)\Delta_{R_S} + \frac{140\delta_S^2 R_S \Delta_S}{\pi\left(49\Delta_S^4 + 25{\delta_S}^4\right)}\Delta_{\Delta_S} + \frac{140\Delta_S^2 R_S \delta_S}{\pi\left(49\Delta_S^4 + 25{\delta_S}^4\right)}\Delta_{\delta_S} \tag{A. 44}$$

Nous pouvons maintenant calculer la valeur des pertes métalliques α_{metal} en fonction du rapport $W/e_{substrat}$ avec les équations *(A. 45), (A. 47)* et *(A. 49)*.

- $\frac{W}{h} \leq \frac{1}{2}\pi$:

$$\alpha_{metal} = \frac{8.68 R_{S1} M_\alpha}{2\pi Z_0 h}\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hU}{\pi W_{eff}}\right)\left[\frac{dB}{unité\ de\ longueur}\right] \tag{A. 45}$$

Avec son calcul d'incertitudes avec l'équation *(A. 46)*.

$$\Delta_{\alpha_{metal}} = \frac{8.68}{2\pi Z_0}\left[\frac{M_\alpha}{h}\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hU}{\pi W_{eff}}\right)\Delta_{R_{S_1}} + \frac{R_{S1}}{h}\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hU}{\pi W_{eff}}\right)\Delta_{M_\alpha} + \frac{M_\alpha R_{S_1}}{h^2}\Delta_h + \frac{M_\alpha R_{S_1}(U+\pi)}{\pi {W_{eff}}^2}\Delta_{W_{eff}} + \frac{M_\alpha R_{S_1}}{\pi W_{eff}}\Delta_U\right] \tag{A. 46}$$

- $\frac{1}{2}\pi \leq \frac{W}{h} \leq 2$:

$$\alpha_{metal} = \frac{8.68 R_{S1} M_\alpha}{2\pi Z_0 h}\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)\left[\frac{dB}{unité\ de\ longueur}\right] \tag{A. 47}$$

Avec son calcul d'incertitudes avec l'équation *(A. 48)*.

$$\Delta_{\alpha_{metal}} = \frac{8.68}{2\pi Z_0}\left[\frac{M_\alpha}{h}\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)\Delta_{R_{S_1}} + \frac{R_{S1}}{h}\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)\Delta_{M_\alpha} + \frac{M_\alpha R_{S_1}}{h^2}\Delta_h + \frac{M_\alpha R_{S_1}(V+\pi)}{\pi {W_{eff}}^2}\Delta_{W_{eff}} + \frac{M_\alpha R_{S_1}}{\pi W_{eff}}\Delta_V\right] \tag{A. 48}$$

- $2 \leq \frac{W}{h}$:

$$\alpha_{metal} = \frac{8.68R_{s1}}{2\pi Z_0 h}\left[\frac{W_{eff}}{h} + \frac{\frac{W_{eff}}{\pi h}}{\frac{W_{eff}}{2h} + 0.94}\right]\left(1 + \frac{h}{W_{eff}} + \frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)\left\{\frac{W_{eff}}{h} + \frac{2}{\pi} ln\left[2\pi e^{\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}\right]\right\}^{-2} \left[\frac{dB}{unité\ de\ longueur}\right] \quad \text{(A. 49)}$$

Avec son calcul d'incertitudes avec l'équation *(A. 50)*.

$$\Delta_{\alpha_{metal}} = \frac{8.68}{2\pi Z_0 h}\left[\frac{W_{eff}}{h}+\frac{\frac{W_{eff}}{\pi h}}{\frac{W_{eff}}{2h}+0.94}\right]\left(1+\frac{h}{W_{eff}}+\frac{hV}{\pi W_{eff}}\right)\left\{\frac{W_{eff}}{h}+\frac{2}{\pi}ln\left[2\pi e^{\left(\frac{W_{eff}}{2h}+0.94\right)}\right]\right\}^{-2}\Delta_{R_{S_1}}$$

$$+\left\{\frac{\left[\begin{array}{c}(47h+25W_{eff})\left(\left(50(\ln(\pi)+\ln(2))+47\right)h+25(\pi+1)W_{eff}\right)\\ \left(5425(47\pi+50)R_S\left((V+\pi)h+\pi W_{eff}\right)+5425R_S(V+\pi)\left((47\pi+50)h+25\pi W_{eff}\right)\right)-\\ 254975R_S((47\pi+50)h+25\pi W_{eff})((50(\ln(\pi)+\ln(2)+47)h+25(\pi+1)W_{eff})((V+\pi)h+\pi W_{eff}\\ -10850(50(\ln(\pi)+\ln(2))+47)R_S(47h+25W_{eff})\ ((47\pi+50)h+25\pi W_{eff})((V+\pi)h+\pi W_{eff})\end{array}\right]}{2\pi Z_0(47h+25W_{eff})^2\left((50(\ln(\pi)+\ln(2))+47)h+25(\pi+1)W_{eff}\right)^3}\right\}\Delta_h$$

$$+\left\{\frac{\left[\begin{array}{c}(25W_{eff}+47h)(\pi(25(\pi+1)W_{eff}+(50(\ln(\pi)+\ln(2))+47)h)(5425R_S\left(25\pi W_{eff}+(47\pi+50)h\right)+\\ 135625R_S\left(\pi W_{eff}+hV+\pi h\right)-271250(\pi+1)R_S(\pi W_{eff}+hV+\pi h)(25\pi W_{eff}+(47\pi+50)h))-\\ 135625R_S(\pi W_{eff}+hV+\pi h)(25\pi W_{eff}+(47\pi+50)h)(25(\pi+1)W_{eff}+(50(\ln(\pi)+\ln(2))+47)h)\end{array}\right]}{2\pi Z_0(47h+25W_{eff})^2\left((50(\ln(\pi)+\ln(2))+47)h+25(\pi+1)W_{eff}\right)^3}\right\}\Delta_{W_{eff}}$$

$$+\frac{5425hR_S(25\pi W_{eff}+(47\pi+50)h)}{2\pi(25W_{eff}+47h)(25(\pi+1)W_{eff}+\left((50(\ln(\pi)+\ln(2))+47)h\right)^2 Z_0}\Delta_V \qquad \text{(A. 50)}$$

Les variables M_α, U et V ont leurs équations en *(A. 21)*, *(A. 22)* et *(A. 28)* et leurs incertitudes dans les équations *(A. 25), (A. 26)* et *(A. 31)*.

Pour finir, nous pouvons maintenant calculer la tangente de pertes $tan\delta$ avec l'équation *(A. 51)* et son incertitude avec l'équation *(A. 52)* en fonction des pertes diélectriques α_{diel}.

$$tan\delta = \alpha_{diel}\frac{1}{27.3}\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r}\frac{\sqrt{\varepsilon_{r,e_{ff}}}}{\varepsilon_{r,e_{ff}} - 1}\frac{c}{f_0} \quad \text{(A. 51)}$$

$$\Delta_{tan\delta} = \frac{\alpha_{diel}c\sqrt{\varepsilon_{r,e_{ff}}}}{27.3f_0\left(\varepsilon_{r,e_{ff}} - 1\right){\varepsilon_r}^2}\Delta_{\varepsilon_r} + \frac{5{\varepsilon_r}^{-1}(\varepsilon_r - 1)\alpha_{diel}c(\varepsilon_{r,e_{ff}} + 1)}{273f_0\left(\varepsilon_{r,e_{ff}} - 1\right)^2\sqrt{\varepsilon_{r,e_{ff}}}}\Delta_{\varepsilon_{r,e_{ff}}} + \frac{1}{27.3}\frac{\varepsilon_r - 1}{\varepsilon_r}\frac{\sqrt{\varepsilon_{r,e_{ff}}}}{\varepsilon_{r,e_{ff}} - 1}\frac{c}{f_0}\Delta_{\alpha_{diel}} + \frac{{\varepsilon_r}^{-1}(\varepsilon_r - 1)\alpha_{diel}c\sqrt{\varepsilon_{r,e_{ff}}}}{27.3(\varepsilon_{r,e_{ff}} - 1)f_0^2}\Delta_{f_0} \quad \text{(A. 52)}$$

A partir de l'équation *(A. 17)* nous pouvons également écrire les pertes diélectriques en fonction des pertes totales α_{tot} et métalliques α_{metal} avec l'équation *(A. 53)* (avec son incertitude dans l'équation *(A. 54)*).

$$\alpha_{diel} = \alpha_{tot} - \alpha_{metal} \quad \text{(A. 53)}$$

$$\Delta_{\alpha_{diel}} = \Delta_{\alpha_{tot}} + \Delta_{\alpha_{metal}} \quad \text{(A. 54)}$$

Annexe 3. Dimensions mesurées

I. Résolution d'une impression : Tests géométriques d'impression par AJP

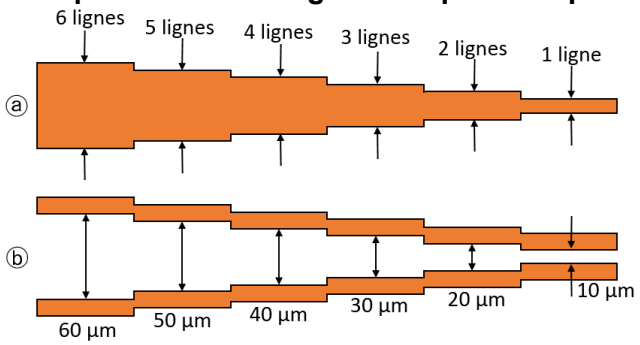


Figure A. 17: Tests géométriques d'impression : ⓐ Test de largeur ; ⓑ Test d'espacement entre lignes

Tableau A. I: Largeur des motifs mesurés en encre à base d'argent

	Largeur (µm)			
Trait	1 couche	Erreur	2 couches	Erreur
6	69,35	0,90	69,93	0,95
5	60,72	0,15	58,43	0,85
4	50,23	0,60	49,73	1,35
3	41,30	0,45	40,20	0,70
2	30,93	1,00	30,05	0,70
1	20,47	0,25	19,02	0,75

Tableau A. II: Interlignes mesurés en encre à base d'argent

	Espacement (µm)			
Théorique	1 couche	Erreur	2 couches	Erreur
60	57,33	0,95	59,07	0,35
50	48,35	1,85	49,83	0,65
40	38,27	1,75	39,10	1,00
30	28,00	1,85	30,47	0,60
20	20,07	1,40	20,10	0,85
10	9,15	0,80	11,32	0,85

Tableau A. III: Largeur des motifs mesurés en encre à base d'or

	Largeur (µm)			
Trait	1 couche	Erreur	2 couches	Erreur
6	167,52	3,20	172,90	2,60
5	141,92	0,90	149,80	2,55
4	119,00	1,40	124,72	0,70
3	94,47	1,50	100,08	1,45
2	70,33	0,70	75,03	1,05
1	44,20	1,00	49,47	1,75

Tableau A. IV: Interlignes mesurés en encre à base d'or

	Espacement (µm)			
Théorique	1 couche	Erreur	2 couches	Erreur
60	62,57	2,25	56,27	1,40
50	52,33	1,80	47,03	1,00
40	42,95	1,45	37,58	0,90
30	36,28	1,50	27,53	1,00
20	26,12	1,95	15,87	1,35
10	15,12	1,55		

II. Caractérisation des dépôts d'encres à nanoparticules métalliques

1. Les anneaux résonants

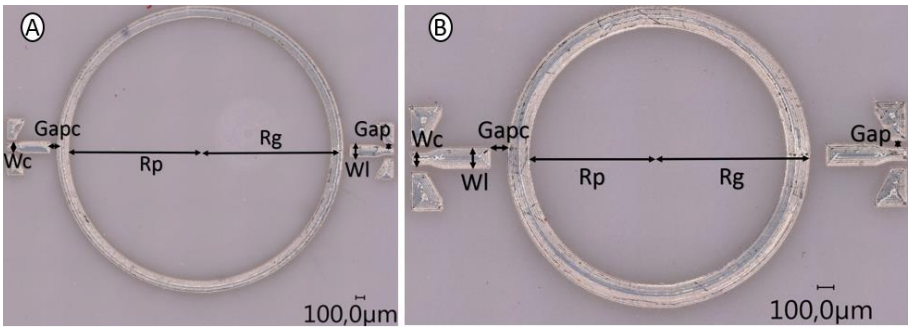


Tableau A. V: Exemple d'anneaux imprimés en argent : Ⓐ Grand anneau Ⓑ Petit anneau

	1 couche		2 couches		Simulation (µm)
	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	
Wc	75,9	1,8	81,0	1,5	80
Gap	47,8	2,3	44,3	4,5	45
Wl	134,0	1,5	140,0	1,7	136
Rg	1620,5	4,3	1622,4	1,8	1636
Rp	1488,3	1,8	1490,8	3,8	1500
Wr	132,2	3,5	131,7	3,5	136
Gapc	79,1	4,0	77,5	2,9	80

Tableau A. VI: Mesures des dimensions des petits anneaux résonants

	1 couche		2 couches		Simulation (µm)
	Moyenne(µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne(µm)	Erreur +/- (µm)	
Wc	82,0	1,4	78,9	3,6	80
Gap	39,2	3,3	44,4	5,3	45
Wl	142,0	3,2	137,7	4,2	136
Rg	941,5	2,3	933,9	6,0	936
Rp	800,0	0,5	799,3	9,5	800
Wr	141,5	2,0	134,6	5,3	136
Gapc	96,2	1,0	102,4	3,0	100

III. Réalisation de structures fonctionnelles

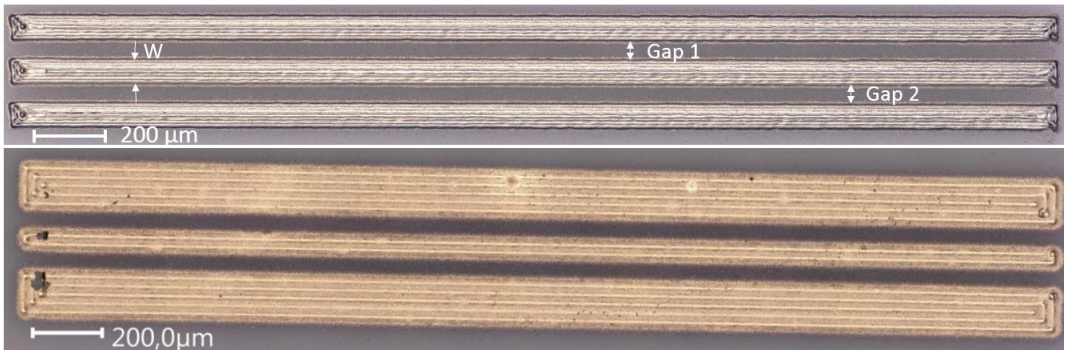


Figure A. 18: Lignes coplanaires CPW imprimées en argent et en or

Tableau A. VII: Dimensions des lignes coplanaires imprimées avec l'encre à base d'argent

	Ligne 1 (1 couche)		Ligne 2 (1 couche)		Ligne 3 (1 couche)		Ligne 4 (2 couches)		Ligne 5 (2 couches)		Ligne 6 (2 couches)		Théorie
	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	
W	82,40	1,6	82,73	0,9	83,17	0,6	81,10	0,75	80,67	0,8	80,87	0,4	80
Gap	42,12	0,88	41,20	0,85	41,93	0,82	44,65	0,40	44,28	0,63	43,90	0,53	45

Tableau A. VIII: Dimensions des lignes coplanaires imprimées avec l'encre à base d'or

	Ligne 1 (1 couche)		Ligne 2 (1 couche)		Ligne 3 (1 couche)		Ligne 4 (2 couches)		Ligne 5 (2 couches)		Ligne 6 (2 couches)		Théorie
	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	Moyenne (µm)	Erreur +/- (µm)	
W	70,37	0,8	71,07	0,8	71,07	1,75	77,00	0,7	76,33	2,65	76,53	1,5	75
Gap	47,72	1,25	45,05	0,80	46,52	1,95	39,63	2,18	39,90	1,78	39,40	1,68	42

IV. Caractérisation des dépôts d'encres à base de polyimide

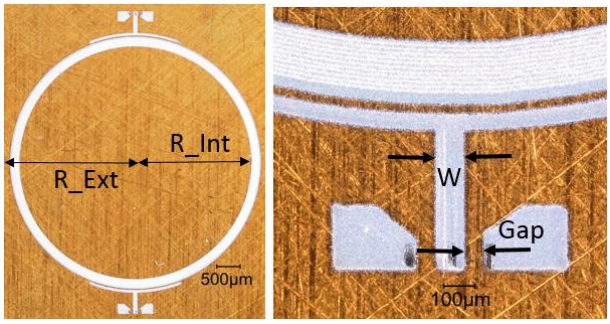


Figure A. 19:Dimensions des anneaux résonnants de caractérisation

Tableau A. IX: Dimensions des anneaux imprimés sur le dépôt de polyimide imprimé

	Anneau 1		Anneau 2		Anneau 3	
	Mesure	Simulation	Mesure	Simulation	Mesure	Simulation
W (µm)	95,08	90	91,23	75	79,95	75
Gap (µm)	63,71	68	21,89	35	64,21	68
R_Int (µm)	2478,33	2500	1976,33	2000	1476,67	1500
R_Ext (µm)	2679,33	2695	2182,67	2100	1675,33	1700

V. Effets d'une impression conforme par AJP sur la résolution

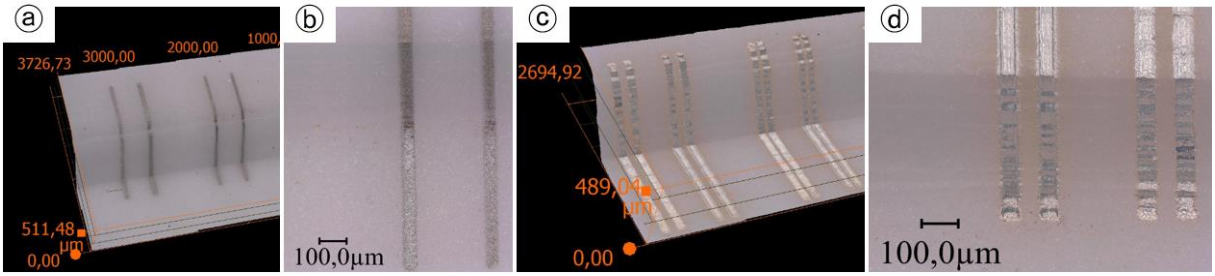


Figure A. 20: Exemple de motifs géométriques imprimés sur un plan incliné : ⓐ Vue 3D des tests de largeur ; ⓑ Vue du dessus des tests de largeur ; ⓒ Vue 3D des tests d'espacement entre lignes ; ⓓ Vue du dessus des tests d'espacement entre lignes

Tableau A. X: Résolution des impressions sur les plans inclinés : Largeur de lignes imprimées

	Concave				Convexe				Droit			
Théorique	1 couche	Erreur +/- (µm)	2 couches	Erreur +/- (µm)	1 couche	Erreur +/- (µm)	2 couches	Erreur +/- (µm)	1 couche	Erreur +/- (µm)	2 couches	Erreur +/- (µm)
50	47,5	1,3	50,6	0,9	47,2	1,7	49,9	0,8	49,0	1,6	52,6	0,8
25	33,1	0,2	30,0	1,3	30,0	1,4	27,6	1,0	30,6	1,2	26,7	1,6
10	11,7	1,2	13,1	1,3	10,8	1,0	13,5	1,9	13,2	0,4	14,3	0,8

Tableau A. XI: Résolution des impressions sur les plans inclinés : Interlignes imprimées

	Concave				Convexe				Droit			
Théorique	1 couche	Erreur +/- (µm)	2 couches	Erreur +/- (µm)	1 couche	Erreur +/- (µm)	2 couches	Erreur +/- (µm)	1 couche	Erreur +/- (µm)	2 couches	Erreur +/- (µm)
50	51,4	1,8	50,7	1,8	52,7	2,5	51,1	1,3	48,9	3,1	49,4	1,2
25	21,6	1,3	22,3	1,1	22,9	1,4	20,7	0,7	20,2	1,6	19,9	1,6

VI. Réalisation et mesure de lignes de transmissions 3D

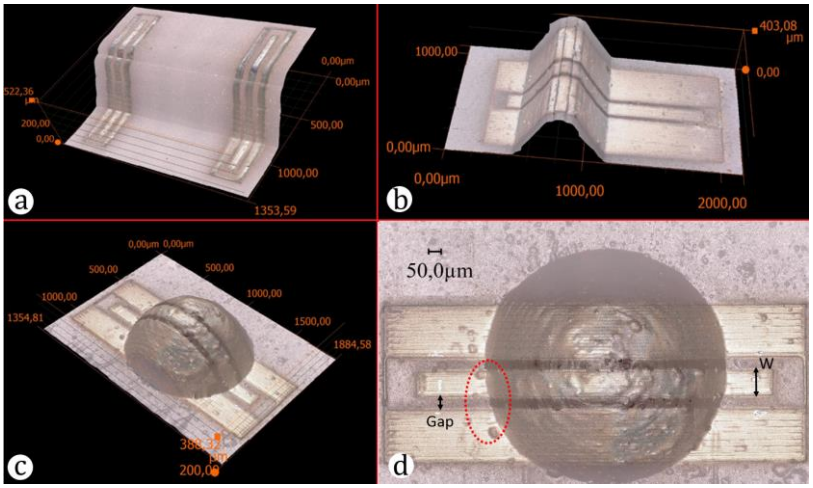


Figure A. 21: Exemple de lignes de transmission imprimées sur des substrats alumine 3D et relevés profilométriques: ⓐ CPW sur un plan incliné ; ⓑ CPW sur une crête ; ⓒ CPW sur une demi-sphère ; ⓓ Vue du dessus de la CPW sur la demi-sphère

Tableau A. XII: Dimensions mesurées des lignes de transmission coplanaires 3D imprimées sur les plans inclinés

	Théorique (µm)	Modèle					
		Concave (µm)		Convexe (µm)		Droit (µm)	
		1 couche	2 couches	1 couche	2 couches	1 couche	2 couches
W	65	64,1 +/- 1,05	62,8 +/- 2,2	61,1 +/- 2,2	63,4 +/- 1,75	59,4 +/- 1,65	58,6 +/- 6,4
Gap	38	47,1 +/- 2,35	41,8 +/-2,25	49,6 +/- 2,8	43 +/- 2,5	44,3 +/- 2,9	44,2 +/- 2,25
Longueur	1000	998,9 +/- 8,75	1008,3 +/- 3,55	1009,8 +/-5,6	1017,1 +/- 0,7	1002,2 +/- 2,1	1007,3 +/- 2,85

Tableau A. XIII: Dimensions mesurées des lignes de transmission coplanaires 3D imprimées sur les crêtes

	Théorique (µm)	Dimensions (µm)	
		1 couche	2 couches
W	110	116,2 +/- 5,35	117,2 +/- 2,7
Gap	45	40,8 +/- 3,9	36 +/- 4,1
Longueur	1775	1767,2 +/- 0,55	1762,3 +/- 2

Tableau A. XIV: Dimensions mesurées des lignes de transmission coplanaires 3D imprimées sur les demi-sphères

	Théorique (µm)	Dimensions (µm)	
		1 couche	2 couches
W	115	119,4 +/- 23,15	118,9 +/- 3,15
Gap	45	41,8 +/- 23,4	38,3 +/- 2,7
Longueur	1788	1779 +/- 0,75	1770,2 +/- 5,35

VII. Filtres 4 pôles ATOMIQ

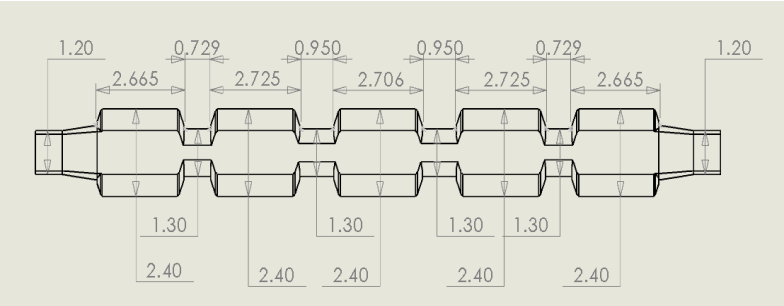


Figure A. 22: Vue du dessus du schéma du filtre 4 pôles issu du projet ATOMIQ

Tableau A. XV: Largeurs mesurées des résonateurs et des iris de couplage du filtre 4 pôles ATOMIQ

	Largeur résonateur				Largeur iris de couplage		
	n°1	n°2	n°3	n°4	n°1	n°2	n°3
Filtre 1	2400,33	2407,33	2408,00	2407,33	1320,67	1320,67	1322,33
Filtre 2	2387,00	2397,00	2401,00	2412,00	1312,00	1319,00	1321,33
Filtre 3	2403,00	2404,67	2406,67	2405,33	1318,67	1317,00	1317,67

VIII. Premier type de prototype : réalisation de Vialess par impression argent

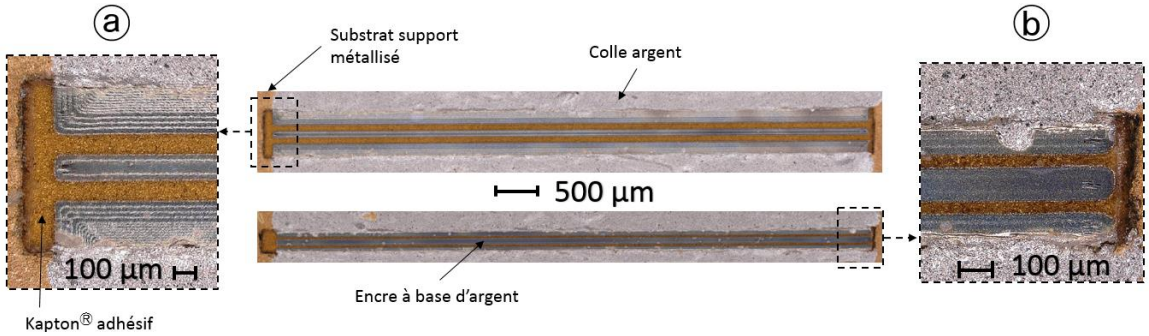


Figure A. 23: Exemple de lignes de transmission Vialess sur du Kapton® adhésif : ⓐ Ligne 40 GHz; ⓑ Ligne 67 GHz

Tableau A. XVI: Dimensions mesurées des lignes de transmission Vialess sur le Kapton® adhésif

	Ligne 40 GHz				Ligne 67 GHz			
	1 couche	Erreur +/-	2 couches	Erreur +/-	1 couche	Erreur +/-	2 couches	Erreur +/-
W (µm)	115,1	1,1	121,1	1,5	96,4	0,5	106,1	0,3
Gap (µm)	97,8	1,2	93,1	0,5	43,7	0,5	33,7	0,6

IX. Deuxième type de prototype : réalisation de lignes Vialess entièrement imprimées

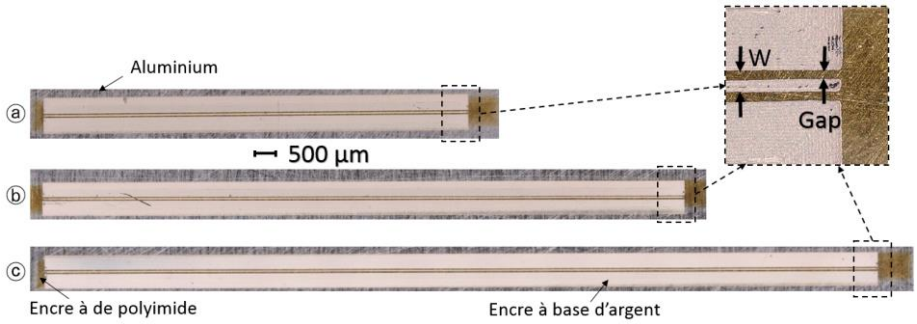


Figure A. 24: Lignes de transmission Vialess entièrement imprimées : ⓐ 1 cm ; ⓑ 1.5 cm ; ⓒ 2 cm de longueur

Tableau A. XVII: Dimensions mesurées des lignes de transmission Vialess entièrement imprimées

	Vialess 1 cm		Vialess 1,5 cm		Vialess 2 cm		Théorie
	Moyenne	Erreur +/-	Moyenne	Erreur +/-	Moyenne	Erreur +/-	
W (µm)	33,07	1,6	35,39	0,85	31,20	1,25	25,00
Gap (µm)	29,73	1,9	22,17	8,75	32,34	8,2	38,00

X. Fabrication et mesure des résonateurs SIW Vialess

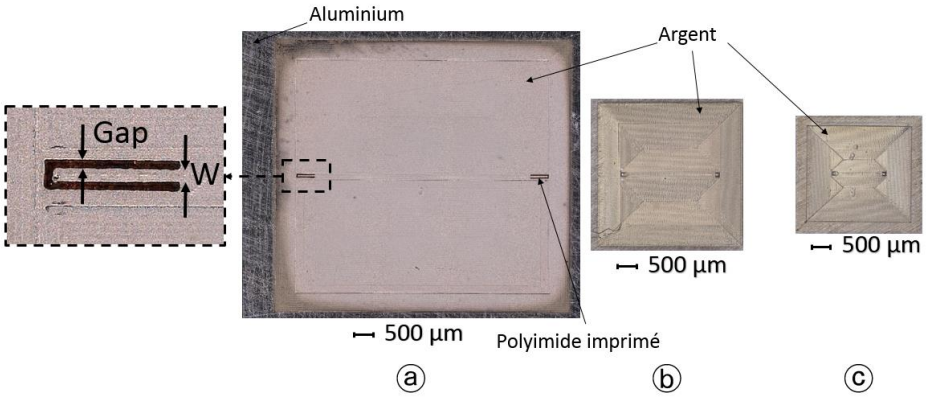


Figure A. 25: Résonateurs Vialess imprimés : ⓐ GR de 7 mm de côté; ⓑ MR de 4 mm de côté ; ⓒ SR de 2.4 mm de coté

Tableau A. XVIII: Dimensions mesurées des accès coplanaires de chaque résonateur SIW Vialess

	Grand résonateurs (GR)		Moyen résonateur (MR)		Petit résonateur (SR)		Théorie
	Moyenne	Erreur +/-	Moyenne	Erreur +/-	Moyenne	Erreur +/-	
W (µm)	46,13	1,95	48,15	2,15	51,00	2,10	50
Gap (µm)	33,84	1,75	33,26	2,70	34,28	4,25	30

Tableau A. XIX: Epaisseurs mesurées du polyimide imprimé et de l'argent déposé pour les résonateurs SIW Vialess

	GR1		GR2	
	Epaisseur	Erreur +/-	Epaisseur	Erreur +/-
Polyimide imprimé (µm)	63,50	0,84	48,00	0,80
Argent (µm)	1,91	0,21	2,03	0,21

	MR1		MR2	
	Epaisseur	Erreur +/-	Epaisseur	Erreur +/-
Polyimide imprimé (µm)	60,76	0,003	64,03	0,90
Argent (µm)	1,59	0,08	1,56	0,08

	SR1		SR2		SR3	
	Epaisseur	Erreur +/-	Epaisseur	Erreur +/-	Epaisseur	Erreur +/-
Polyimide imprimé (µm)	47,14	0,06	57,37	1,59	57,37	0,29
Argent (µm)	2,32	0,44	2,38	0,43	4,91	0,77

Références bibliographiques Annexes

[A.1] 3D Matter's Hub, “FDM 3D Printing materials compared”, [en ligne] Consulté sur: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared

[A.2] Alexandre Moussion, « TOP 10 des filaments pour imprimantes 3D les plus insolites ! », [en ligne] Consulté sur: http://www.primante3d.com/materiaux-exotiques-11102016/

[A.3] Imprimante3D EILCO, « Schéma FDM », Wikipédia L’encyclopédie libre, [en ligne] Consulté sur: https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Sch%C3%A9ma_FDM.png

[A.4] MAKERSHOP3D Expert en Impression 3D, « Guide d'achat des résines SLA d'impression 3D », [en ligne] Consulté sur: https://www.makershop.fr/content/65-guide-achat-resines-imprimante-3d

[A.5] 3DCERAM, « 3DMIX, céramiques pour impression 3D. », [en ligne] Consulté sur: https://3dceram.com/fr/ceramiques-pour-impression-3d/

[A.6] F. Kouki et al., "Miniature ceramic filter-antenna for wireless communications systems at 60GHz," 2014 44th European Microwave Conference, Rome, 2014, pp. 1588-1591.

[A.7] Optoma, « DLP® », [en ligne] Consulté sur: https://www.optoma.fr/projectortechnology/DLP

[A.8] Jean-Michel Courty et Édouard Kierlik (24 février 2016), « Des valves à lumière dans les écrans », POUR LA SCIENCE N° 461, [en ligne] Consulté sur: https://www.pourlascience.fr/sd/physique/comment-fonctionnent-les-ecrans-a-cristaux-liquides-8946.php

[A.9] Machines-3D, « Résines Liquid Crystal Daylight », [en ligne] Consulté sur: https://www.machines-3d.com/consommables-resines-liquid-crystal-daylight-xsl-367_420.html

[A.10] CARBON3D, « Our Technology », https://www.carbon3d.com/our-technology/

[A.11] Alex M. (18 mars 2015), “La technologie CLIP devrait révolutionner l’impression 3D ! », [en ligne] Consulté sur: https://www.3dnatives.com/clip-revolutionner-impression-3d/

[A.12] Sculpteo, « L’impression 3D avec l’imprimante 3D Carbon et la technologie CLIP » [en ligne] Consulté sur: https://www.sculpteo.com/fr/glossaire/imprimante-3d-carbon-technologie-clip/

[A.13] Alexandre Moussion (4 avril 2016), « Carbon3D dévoile « M1 » sa première imprimante 3D commerciale », [en ligne] Consulté sur: http://www.primante3d.com/carbon3d-m1-20160404/

[A.14] Iska Hain Saric, 02/11/2019, “Carbon and Automobili Lamborghini Partner to Digitally Manufacture Auto Parts at Scale” [en ligne] Consulté sur: https://www.carbon3d.com/news/carbon-and-lamborghini-partner-to-manufacture-auto-parts-at-scale/

[A.15] Iska Hain Saric, 02/01/2019, “Carbon® to Produce First-Ever 3D Printed Football Helmet Liner” [en ligne] Consulté sur: https://www.carbon3d.com/news/riddell-partners-with-carbon-to-produce-next-gen-football-helmet/. [Consulté le 27/08/2019]

[A.16] Sculpteo, « Technologie SLS pour l'impression 3D de plastique », [en ligne] Consulté sur: https://www.sculpteo.com/fr/materiaux/materiaux-sls/

[A.17] BEAMIT metal additive manufacturing, “LA FUSION SELECTIVE PAR LASER (SLM)”, [en ligne] Consulté sur: https://www.beamit-fabrication-additive.fr/work/fusion-selective-par-laser-slm/

[A.18] 3D Systems, “Frittage sélectif par laser (SLS) » [en ligne]. Disponible sur : [en ligne] Consulté sur: https://fr.3dsystems.com/selective-laser-sintering

[A.19] Moritz, Tassilo & Maleksaeedi, Saeed. (2018). Additive manufacturing of ceramic components. 10.1016/B978-0-12-812155-9.00004-9.

[A.20] M.Leary, “Surface roughness optimisation for selective laser melting (SLM): Accommodating relevant and irrelevant surfaces”, Laser Additive Manufacturing Materials, Design, Technologies, and Applications, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, 2017, Pages 99-118

[A.21] Jeff Kerns, Mar 23 2015, “What’s the Difference Between Stereolithography and Selective Laser Sintering?”. Machine Design. Disponible sur: [en ligne] Consulté sur: https://www.machinedesign.com/3d-printing/what-s-difference-between-stereolithography-and-selective-laser-sintering

[A.22] Arcam EBM, “EBM-Built Materials– way beyond average”, [en ligne] Consulté sur: http://www.arcam.com/technology/electron-beam-melting/materials/

[A.23] Lancaster, Robert & Davies, Gareth & Illsley, Henry & Jeffs, S.P. & Baxter, G.. (2016). Structural Integrity of an Electron Beam Melted Titanium Alloy. Materials. 9. 470. 10.3390/ma9060470.

[A.24] hp, “Éliminer les obstacles freinant l’adoption de l’impression 3D grâce à l’innovation des matériaux. », [en ligne] Consulté sur: https://www8.hp.com/fr/fr/printers/3d-printers/materials.html

[A.25] 3D SYSTEMS, “ProJet MJP 2500 IC”, [en ligne] Consulté sur: https://fr.3dsystems.com/3d-printers/projet-mjp-2500-ic

[A.26] Imprimante3D EILCO (17 février 2017), « Methode polyjet »[en ligne] Consulté sur: https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:Methode_polyjet.png

[A.27] CADindus, “Impression 3D : Technologie PolyJet », [en ligne] Consulté sur: http://www.cadindus.fr/prototypage-3d/impression-3d-technologie-polyjet.html

[A.28] XJET NPJ ,« XJet ceramics », 6 novembre 2017, 2min 20, [vidéo en ligne] Consulté sur: https://www.youtube.com/watch?v=SXgrDtd7aAg

[A.29] MANUFACTURINGGUIDE, « Binder jetting » [en ligne] Consulté sur: https://www.manufacturingguide.com/en/binder-jetting. [Consulté le 27/08/2019]

[A.30] Alkaios Bournias Varotsis, 3D HUBS, « Introduction to Binder Jetting 3D printing, [en ligne] Consulté sur: https://www.3dhubs.com/knowledge-base/introduction-binder-jetting-3d-printing#materials

[A.31] Pragnya Kunchala, Keerti Kappagantula, “3D printing high density ceramics using binder jetting with nanoparticle densifiers”, Materials & Design Volume 155, 5 October 2018, Pages 443-450

[A.32] 3D SYSTEMS, “Impression ColorJet”, [en ligne] Consulté sur: https://fr.3dsystems.com/on-demand-manufacturing/colorjet-printing

[A.33] MANUFACTURINGGUIDE, « Laminated Object Manufacturing, LOM» [en ligne] Consulté sur: https://www.manufacturingguide.com/en/laminated-object-manufacturing-lom

[A.34] Prechtl, M. & Otto, Andreas & Geiger, Manuel. (2005). Rapid Tooling by Laminated Object Manufacturing of Metal Foil. Advanced Materials Research. 6-8. 303-312. 10.4028/www.scientific.net/AMR.6-8.303.

[A.35] Impossible Objects, “Beyond compare, long-Fiber Makes our Composites Stronger, Lighter, Tougher. So, Why Mess Around with Anything Less? ”, [en ligne] Consulté sur: https://www.impossible-objects.com/materials/

[A.36] Beau Jackson, 3D PRINTING INDUSTRY, “Impossible Objects raises $6.4 million in series A funding for composite 3D printer development”, 11/10/2017 [en ligne] Consulté sur: https://3dprintingindustry.com/news/impossible-objects-raises-6-4-million-series-funding-composite-3d-printer-development-122534/

[A.37] OPTOMEC, “LENS Directed Energy Deposition (DED) 3D Printed Metal Technology”, [en ligne] Consulté sur: https://www.optomec.com/3d-printed-metals/lens-technology/

[A.38] ASM International, “Optomec develops controlled-atmosphere 3D printing system for large titanium parts”, 09/09/2018. [en ligne] Consulté sur: https://www.asminternational.org/news/industry/-/journal_content/56/10180/35282242/NEWS

[A.39] OPTOMEC, “LENS® Composites and Ceramics, A wide variety of composites and ceramic materials can be processed using LENS technology”, [en ligne] Consulté sur: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=7&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwiFp4fYxPXiAhWMlxQKHRq1BTMQFjAGegQIABAC&url=https%3A%2F%2Fwww.optomec.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2014%2F04%2FLENS_composites-ceramics_datasheet.pdf&usg=AOvVaw2PBgVdQMeqDjDcaC7YLFM1

[A.40] Peter Zelinski, 2/3/2016, “The Possibilities of Electron Beam Additive Manufacturing”, AM ADDITIVE MANUFACTURING. [en ligne] Consulté sur: https://www.additivemanufacturing.media/articles/the-possibilities-of-electron-beam-additive-manufacturing

[A.41] SCIAKY Inc, “FABRICATION ADDITIVE PAR FAISCEAU D'ÉLECTRONS », [en ligne] Consulté sur: https://www.sciaky.com/fr/fabrication-additive/technologie-de-fabrication-additive-par-faisceau-d-electrons

[A.42] Oliari, Stella & D'Oliveira, Ana Sofia & Schulz, Martin. (2017). Additive Manufacturing of H11 with Wire-Based Laser Metal Deposition. Soldagem & Inspeção. 22. 10.1590/0104-9224/si2204.06.

[A.43] TRUMPF, “Rechargement par dépôt laser (Laser Metal Deposition) », [en ligne] Consulté sur: https://www.trumpf.com/fr_FR/applications/fabrication-additive/laser-metal-deposition-lmd/

[A.44] Oliari, Stella & D'Oliveira, Ana Sofia & Schulz, Martin. (2017). Additive Manufacturing of H11 with Wire-Based Laser Metal Deposition. Soldagem & Inspeção. 22. 10.1590/0104-9224/si2204.06.

Attention, ne supprimez pas le saut de section suivant (page suivante non numérotée)

Technologie aérosol appliquée à l'intégration 3D et aux composants hyperfréquences

Ces travaux de thèse portent sur la mise au point de la technologie Aérosol Jet printing (AJP) pour réaliser des composants hyperfréquences dans la bande des fréquences millimétriques et pour répondre à des problématiques d'intégration 3D de composants.

Le premier chapitre est consacré à une étude bibliographique pour comparer les différentes technologies additives existantes sur le marché afin de positionner l'AJP par rapport à l'état de l'art. Le second chapitre est consacré à la sélection et à la caractérisation de matériaux métalliques et diélectriques sous forme d'encres imprimables par AJP. Ces différents tests s'appuient sur la réalisation de composants hyperfréquences sur des substrats céramique plats.

Le troisième chapitre est consacré à la métallisation sélective par AJP d'objets 3D céramique réalisés par stéréolithographie. Plus particulièrement, ces différents tests aideront à terme à pouvoir métalliser sélectivement des filtres volumiques en céramique fonctionnant aux fréquences millimétriques. Le quatrième chapitre concerne la conception, l'étude et la mise en œuvre de nouveaux types de composants hybrides et autres interconnexions entièrement imprimables par AJP. L'approche de ce travail est originale par l'utilisation d'une technologie additive innovante de métallisation sélective et son applications sur les composants passifs hyperfréquences.

Mots-clés : [fabrication additives, aerosol jet printing, hyperfréquence, ligne coplanaire, filtre, filtre volumique, caractérisation, fréquences millimétriques et microondes, céramique, argent, or, polyimide, cavité résonante]

Aerosol technology applied to 3D integration and microwave components

This thesis work is focused on the development of the Aerosol Jet printing (AJP) technology to produce microwave components in the millimeter frequency band and to address 3D component integration issues.

The first chapter is devoted to a bibliographic study to compare the different additive technologies available on the market in order to position the AJP in relation to the state of the art. The second chapter is dedicated to the selection and characterization of metallic and dielectric materials that can be printed by AJP. These various tests lead to the production of microwave and millimeter waves components on flat ceramic substrates.

The third chapter is devoted to the selective metallization by AJP of 3D ceramic objects produced by stereolithography. More specifically, the various tests will eventually allow ceramic volumetric filters operating at millimeter waves to be selectively metallized. The fourth chapter concerns the design, study and implementation of new types of hybrid components and interconnects that can be fully printed by AJP. This work is original through the use of an innovative additive selective metallization technology applied to microwave and millimeter wave passive components.

Keywords : [additive manufacturing, aerosol het printing, microwaves, coplanar line, filter, volumic filter, characterization, millimeter wave, ceramic, silver, gold, polyimide, resonant cavity]