HAL
open science

Conception pour la fabrication additive, par fusion laser sur lit de poudre, de composants hyperfrequences

Mathieu François

To cite this version:

Mathieu François. Conception pour la fabrication additive, par fusion laser sur lit de poudre, de composants hyperfrequences. Mécanique des matériaux [physics.class-ph]. HESAM Université, 2020. Français. NNT : 2020HESAE008 . tel-03041563

HAL Id: tel-03041563

https://pastel.hal.science/tel-03041563

Submitted on 5 Dec 2020

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

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

HESAM UNIVERSITÉ

Arts et Métiers Sciences et Technologies

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DES MÉTIERS DE L'INGÉNIEUR
PIMM – Campus de Paris

THÈSE

présentée par : **Mathieu FRANÇOIS**

soutenue le : **8 juin 2020**

pour obtenir le grade de : **Docteur d'HESAM Université**

préparée à : **École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers**

Spécialité : **Génie Mécanique & Procédés de Fabrication**

Conception pour la fabrication additive, par fusion laser sur lit de poudre, de composants hyperfréquences

THÈSE dirigée par :
M. PEYRE Patrice
M. SEGONDS Frédéric

et co-encadrée par :
M. RIVETTE Mickaël

JURY

M. François VILLENEUVE,	Professeur des Universités,	G-SCOP,	Université Grenoble-Alpes,	Président
M. Pascal MOGNOL,	Professeur des Universités,	GeM,	ENS de Rennes,	Rapporteur
M. Christophe DESRAYAUD,	Professeur des Universités,	SMS,	Mines de Saint-Etienne,	Rapporteur
Mme María GARCIA VIGUERAS,	Maître de Conférences,	IETR,	INSA de Rennes,	Examinatrice
M. Patrice PEYRE,	Directeur de Recherche CNRS,	PIMM,	Arts et Métiers,	Examinateur
M. Frédéric SEGONDS,	Maître de Conférences HDR,	LCPI,	Arts et Métiers,	Examinateur
M. Mickaël RIVETTE,	Maître de Conférences,	LCFC,	Arts et Métiers,	Examinateur
M. Simon TURPAULT,	Ingénieur Technologue,	HTE,	Thales SIX GTS France,	Invité

T H È S E

À MA MÈRE,

Remerciements

Mon infinie reconnaissance à ceux, et ils sont nombreux, qui m'ont aidé tout au long de ces trois années.

Mes premiers remerciements s'adressent à mon mentor, Jean-Pierre Aurez, Ingénieur chez Thales SIX, qui m'a accompagné sans relâche durant ces trois années et qui m'a partagé ses brillantes intuitions. Je souhaite lui témoigner ma plus profonde gratitude pour son amitié, sa disponibilité permanente et les nombreuses choses qu'il m'a enseignées. Je me sens extrêmement privilégié d'avoir pu travailler avec lui et apprendre quotidiennement à ses côtés.

Mes talentueux encadrants, qui ont grandement oeuvré dans ces travaux de Recherche et sans qui certains résultats présentés dans ce manuscrit n'auraient pas eu la même qualité ; et qui ont très largement contribué aux félicitations du jury lors de ma soutenance de thèse. Mon Directeur de thèse, Patrice Peyre, pour m'avoir transmis son incroyable expertise des procédés laser, éclairé sur l'interprétation des résultats et parfois poussé dans mes retranchements pour continuellement donner le meilleur de moi-même. Mon co-Directeur de thèse, Frédéric Segonds, pour son initiation pédagogique aux méthodes de conception, ses approches et remarques toujours pertinentes et son suivi méthodique de mes travaux. Mon encadrant de thèse, Mickaël Rivette, pour ses questionnements perspicaces sur l'ensemble des domaines étudiés, sa disponibilité sans faille dans les moments de doutes et pour les mots encourageants qu'il m'a toujours exprimés. J'espère sincèrement avoir répondu à leurs attentes, tant scientifiquement qu'humainement, et je dois avouer que je suis particulièrement fier d'avoir mon nom accolé au leur en première page de ce manuscrit. Je leur dois beaucoup dans la réussite de cette thèse de doctorat.

Au remarquable chef d'orchestre de ces travaux, Simon Turpault, Ingénieur chez Thales, pour avoir exhaucé tous mes souhaits au cours de ces trois années. Il m'a laissé une liberté totale d'entreprendre et d'orienter ces Recherches vers la direction qui me semblait la plus opportune pour atteindre les objectifs fixés. Avec toute mon amitié, je souhaite le remercier infiniment pour ce soutien sans faille, ses remarquables qualités humaines, le travail acharné qu'il a effectué pour moi et pour ses conseils sans égal. Je suis très honoré de l'avoir eu à mes côtés.

Aux membres accomplis du Jury, François Villeneuve, Christophe Desrayaux, Pascal Mognol et Maria Garcia Vigueras, pour avoir accepté d'évaluer ce travail pluridisciplinaire. Les remarques, questions, hypothèses et suppositions de qualité qu'ils m'ont exposées m'ont permis d'envisager de nouvelles perspectives pour la suite de ces travaux. Je souhaite également les remercier pour les félicitations qu'ils m'ont exprimées à la suite de ma

soutenance de thèse ; recevoir des éloges de scientifiques de leur calibre est une réelle fierté.

Aux ingénieurs antennistes de Thales SIX, Lilia Manach, Mathilde Bellec, Bertrand Boin, Mohamed Merouani et Bilal Hadji pour m'avoir accompagné, aiguillé et conseillé sur les pointilleuses questions hyperfréquences.

Aux ingénieurs des différentes entités de Thales, avec qui j'ai participé à un projet de développement pour composants hyperfréquences en fabrication additive, Olivier Maas, Philippe Favard, Yann Cailloce, Damien Pacaud, Thierry Pierré, Florent Lebrun, Wilson Maia, Thomas Merlet, Anne-Charlotte Amiaud et Youssef Chairi. Leur expertise et leurs idées ont été une réelle richesse pour mes travaux.

A Léana Rose-Picot, ingénieur chez Thales SIX, pour m'avoir apporté son soutien sur la phase expérimentale en s'occupant notamment de toute la logistique avec les fabricants et sous-traitants.

Au directeur du LCPI, Professeur Améziane Aoussat, pour m'avoir accueilli aux réunions de thèse mensuelles au sein de son laboratoire, ainsi qu'à l'ensemble des Maîtres de conférences et doctorants pour les remarques qu'ils m'ont faites au cours de ces trois années de travail et qui ont grandement participé à la qualité du travail présenté. Une mention particulière au brillant Eliot Graeff, que j'aurai le plaisir de retrouver au prix Pierre Bézier, pour l'intérêt qu'il a porté à mes Recherches et ses idées lumineuses.

A Corinne Dupuy, ingénieure de Recherche au PIMM, pour ses connaissances des procédés laser, ses conseils et le soutien crucial qu'elle m'a apporté au cours de la phase expérimentale. A Cyril Gorny, ingénieur d'études au PIMM, pour m'avoir appuyé au cours de la phase d'analyse qui a suivie.

A mes collègues Sangil Han et Salvatore Ferdinando de l'École Nationale d'Ingénieurs de Saint-Étienne, pour avoir accepté de réaliser les essais d'écoulement de pâte abrasive sur les guides brevetés ainsi que la phase d'analyse. La qualité des résultats obtenus témoigne à elle-seule de leur niveau scientifique.

A Alexandre Hiricoiu, ingénieur chez ANSYS, pour l'aide et la disponibilité qu'il m'a apportées sur les simulations du procédé de fusion laser.

A Grégory Guichard, responsable de la cellule de prototypage chez Thales SIX, pour le temps qu'il a pris, à quelques jours de la remise de mon manuscrit, pour m'écouter, me relire, et me conseiller.

A l'Association Nationale Recherche Technologie, sans qui ce contexte de Recherche CIFRE pourrait difficilement avoir lieu. Je suis intimement convaincu que ce type d'étude est des plus enrichissants et des plus prolifiques, tant au niveau des résultats et du transfert de connaissances, que du renforcement d'une réseau de recherche essentiel à notre société.

Pour terminer, je tiens à remercier ma mère, qui a suivi l'émergence délicate du manuscrit, et qui a supporté les corrections frénétiques de dernière minute, jusqu'à ce que l'heure vienne de lâcher prise.

Résumé

Pendant de nombreuses années, les composants passifs hyperfréquences ont été utilisés dans des systèmes de communication notamment pour des chaînes d'alimentation d'antenne. Ce type d'équipement radiofréquence est déjà largement opérationnel dans différents domaines tels que les communications satellite, les radars, les observations spatiales etc. en raison de leurs avantages de faibles pertes ainsi que de leur capacité élevée de gestion d'énergie. Seulement, avec l'émergence de nouvelles technologies et une concurrence considérable sur le marché de la défense, les clients sont de plus en plus demandeurs de produits de moins en moins coûteux avec des délais d'obtention toujours plus courts, avec des exigences liées aux performances toutes aussi élevées.

Ces dernières années, plusieurs institutions et industries se sont intéressées de plus en plus aux procédés de fabrication additive (FA) pour les composants à propagation guidée. Ne nécessitant pas de brut de matière ni d'outillage dédié, les technologies additives apportent de nouvelles perspectives de conception. En particulier, l'ajout de matière couche par couche autorise la fabrication de pièces monolithiques, qui permettraient d'alléger les équipements et de réaliser des économies de temps et de coûts. D'autre part, l'une des plus grandes promesses de la fabrication additive réside dans les degrés de liberté supplémentaires qu'elle offre en conception, permettant de concevoir des architectures complexes et innovantes aux performances accrues, qui seraient irréalisables par des techniques conventionnelles. A ce titre, la fabrication additive a été identifiée comme pouvant jouer un rôle crucial dans le développement de ce type de pièce.

Cependant, comme tout procédé de fabrication, les procédés additifs possèdent leurs propres spécificités et contraintes liées aux phénomènes physiques mis en jeu au cours de la fabrication et dont il est nécessaire de tenir compte au cours de la phase de conception pour tirer pleinement profit des avantages qu'ils offrent. Ajoutées aux exigences hyperfréquences, le concepteur doit alors être en capacité d'identifier les liens qui existent entre les domaines de la conception, du procédé et électromagnétique pour garantir une pièce de qualité conforme au cahier des charges.

L'objectif de ces travaux de thèse est double. Le premier consiste à identifier les spécificités du procédé de fusion laser sur lit de poudre qui influent majoritairement sur les performances électromagnétiques, de manière à y apporter une attention particulière en phase de conception. Le second porte sur l'élaboration d'une méthode qui intègre les contraintes et opportunités de la fabrication additive tout en répondant aux objectifs, globaux et locaux, issus du cahier des charges hyperfréquences de manière à fabriquer des composants opérationnels.

Table des matières

Remerciements **ii**

Résumé **iii**

1 Contexte général de l'étude **1**
1.1 Introduction de la fabrication additive . . . 3
1.2 Opportunités et applications industrielles . . . 5
1.2.1 Les opportunités offertes par la fabrication additive . . . 5
1.2.2 Intérêt de la fabrication additive pour les produits de radiocommunication . . . 6
1.3 Facteurs de développement . . . 10
1.3.1 Intégration des connaissances liées à la technologie . . . 10
1.3.2 Développement et amélioration des outils industriels . . . 11
1.4 Synthèse et organisation du manuscrit . . . 12

2 Etat de l'art et problématique de Recherche **13**
2.1 La fabrication additive . . . 14
2.1.1 Introduction au procédé de Laser Beam Melting . . . 14
2.1.2 Déformations thermiques . . . 15
2.1.3 Etats de surface . . . 17
2.1.4 Orientation de fabrication . . . 19
2.1.5 Synthèse de la fabrication additive . . . 20
2.2 Composants guidés hyperfréquences en FA . . . 21
2.2.1 Caractéristiques de propagation guidée . . . 21
2.2.2 Composants hyperfréquences réalisés en fabrication additive . . . 28
2.2.3 Synthèse des composants guidés hyperfréquences réalisés en fabrication additive . . . 34
2.3 Méthodes de conception pour la fabrication additive . . . 35
2.3.1 Méthodes de type contrainte . . . 35
2.3.2 Méthodes de type opportunité . . . 37
2.3.3 Synthèse méthodologique . . . 39
2.4 Problématique de Recherche . . . 41

3 Expérimentations **43**
3.1 Objectif de l'étude . . . 44
3.2 Démarche expérimentale . . . 44
3.3 Protocole expérimental . . . 46
3.3.1 Choix des composants . . . 46
3.3.2 Orientations et quantités . . . 46
3.3.3 Matériau et fabrication . . . 46

3.3.4 Traitements de surface . . . 47
3.3.5 Découpage des échantillons . . . 48
3.3.6 Mesures hyperfréquences . . . 49
3.3.7 Mesures des états de surfaces . . . 50
3.4 Résultats . . . 52
3.4.1 Performances électromagnétiques . . . 52
3.4.2 Mesures des états de surfaces . . . 56
3.5 Discussions . . . 64
3.6 Synthèse et intégration . . . 70
3.6.1 Synthèse . . . 70
3.6.2 Intégration en phase de conception . . . 70

4 Proposition d'une méthode de DfAM dédiée aux composants hyperfréquences 73
4.1 Vision générale . . . 74
4.2 Détails de la méthode . . . 76
4.2.1 Définition d'une structure modulaire orientée . . . 76
4.2.2 Conception du vide . . . 79
4.2.3 Habillages mécanique et thermique . . . 82
4.2.4 Analyses finales . . . 84
4.3 Synthèse . . . 86

5 Application à la conception d'un guide d'ondes en bande K 89
5.1 Introduction . . . 90
5.2 Application de la méthode de DfAM proposée . . . 92
5.2.1 Définition d'une structure modulaire orientée . . . 93
5.2.2 Conception du vide . . . 95
5.2.3 Habillages mécanique et thermique . . . 111
5.2.4 Analyses finales . . . 114
5.3 Fabrication et traitement de surface . . . 117
5.4 Résultats et discussions . . . 119
5.4.1 Matériaux bruts de fabrication . . . 119
5.4.2 Traitement AFM . . . 120
5.5 Conclusions . . . 122

6 Conclusions 123
6.1 Synthèse des travaux réalisés . . . 124
6.2 Apports industriels et scientifiques . . . 126
6.3 Perspectives de Recherche . . . 128

Bibliographie 130

Publications 139

Table des figures

1.1 Evolution des recherches associées aux mots "Additive Manufacturing" sur Google depuis 2004 . . . 3
1.2 Usages de la fabrication additive d'après [1] . . . 3
1.3 Evolution du marché mondial de la fabrication additive en milliards de dollars d'après [2] . . . 4
1.4 Répartition du marché industriel mondial de la fabrication additive en 2017 [3] . . . 5
1.5 Exemple de produit de SatCom ciblé par Thales pour la fabrication additive : antenne portative avec (en rouge) la pièce complexe hyperfréquences . 7
1.6 Type de composant hyperfréquences ciblés : (à gauche) la version usinée (à droite) la version pour la fabrication additive . . . 8
1.7 Liberté géométrique offerte par la fabrication additive : (à gauche) un filtre rectangulaire réalisé par moyens conventionnels (à droite) pour la fabrication additive [4] . . . 9
1.8 Intérêt de la fabrication additive pour les composants hyperfréquences . . . 9

2.1 Procédé de fusion laser sur lit de poudre [1] . . . 14
2.2 Recensement des paramètres influant sur la qualité finale d'une pièce produite par fabrication additive métallique, d'après [5] . . . 15
2.3 Influence de l'orientation sur les zones de déformations thermiques . . . 16
2.4 Représentation de l'effet escalier . . . 17
2.5 Analyse MEB de surfaces fabriquées à 45 degrés . . . 18
2.6 Structures en porte-à-faux autosupportée et non supportée en fonction de l'angle critique formé avec le plateau de fabrication [6] . . . 19
2.7 Guide d'ondes rectangulaire de section ab . . . 23
2.8 Mode de propagation selon la fréquence utilisée . . . 24
2.9 Densité du courant électrique en fonction de sa profondeur de pénétration à l'intérieur des parois conductrices . . . 25
2.10 Représentation des ondes incidentes a_i et réfléchies b_i aux ports d'un guide d'ondes . . . 27
2.11 Guide d'onde rectangulaire WR42 couramment conçu pour l'usinage . . . 28
2.12 Filtre à iris du 6e ordre en bande K couramment conçu pour l'usinage . . . 29
2.13 Modèle boule de neige d'après [7] . . . 30
2.14 Représentation du déplacement du courant électrique en surface du conducteur sur l'épaisseur de peau : (en haut) pour une surface lisse, (en bas) pour une surface rugueuse . . . 31
2.15 Filtre Rx du 5e ordre en bande Ku conçu pour la fabrication additive . . . 32
2.16 Filtre Rx du 5e ordre en bande X : (a) rectangulaire classique (b) pour la fabrication additive . . . 32
2.17 Conception d'une antenne monopulse 4x4 en bande Ka . . . 33

2.18 Conception d'une antenne monopulse 4x4 en bande Ka 34

3.1 Démarche expérimentale pour chaque orientation Oi 45
3.2 Orientations autosupportées choisies pour la fabrication des guides WR-28 . 46
3.3 Principe de l'Abrasive Flow Machining d'après [8] 48
3.4 Découpage des guides WR-28 en 9 tronçons de 20 mm 49
3.5 Découpage des tronçons chiffrés selon deux plans longitudinaux (vue en coupe) pour un WR-28 de dimensions 3,556x7,112 mm^2 49
3.6 Evolution des paramètres Ra, Rt et Rq sur la petite surface upskin de l'Orientation 3 50
3.7 Représentation du paramètre « périm » relevé au profilomètre mécanique . 50
3.8 Représentation des relevés de périmètres effectués sur une surface du tronçon n : 5 mesures longitudinales (bleu) et 5 mesures transversales (turquoise) sur une longueur de scan de 2000 microns 51
3.9 Pertes en transmission et delta (pointillés) pour les 5 orientations en fonction de la fréquence obtenus sur les guides WR-28 matériau brut 53
3.10 Classement, par ordre de performances en transmission sur matériau brut, des orientations de fabrication pour les guides WR-28 54
3.11 Pertes en transmission en fonction de la fréquence obtenues sur les guides WR-28 traités par décapage chimique 54
3.12 Pertes en transmission en fonction de la fréquence obtenues sur les guides WR-28 traités par AFM 55
3.13 Pertes en transmission moyennes (en dB) relevées entre 28 et 35 GHz en fonction de l'orientation de fabrication, avant et après traitement de surface 56
3.14 Moyennes des périmètres des profils mesurés, en fonction de l'orientation de fabrication, sur les 4 surfaces constitutives du guide d'ondes brut : surface verticale (rouge), surface upskin (turquoise) et surface downskin (bleu) . . . 57
3.15 Phénomène d'agglomération des particules de poudre sur les surfaces downskin et upskin, engendré par le transfert de chaleur de l'énergie laser dans le lit de poudre à l'intérieur d'un guide d'onde 58
3.16 Imageries au MEB des différents types de surfaces fabriquées en Al7SiMg0.6 sans traitement de surface : upskin, downskin et verticale. Grandissement x70 (gauche) et x200 (droite) 59
3.17 Périmètres moyens mesurés, selon l'orientation de fabrication, sur les 4 surfaces constitutives du guide d'ondes après décapage chimique : surface verticale (rouge), surface upskin (turquoise) et surface downskin (bleu) 59
3.18 Imageries au MEB des différents types de surfaces fabriquées en Al7SiMg0.6 traitées par décapage chimique : upskin, downskin et verticale. Grandissement x70 (gauche) et x200 (droite) 60
3.19 Périmètres moyens mesurés, selon l'orientation de fabrication, sur les 4 surfaces constitutives du guide d'ondes après traitement AFM : surface verticale (rouge), surface upskin (turquoise) et surface downskin (bleu) 61
3.20 Imagerie au MEB représentative d'une surface fabriquée en Al7SiMg0.6 et traitée par AFM (présence de stries d'abrasion), quelque soit sa nature avant traitement. Grandissement x70 (gauche) et x200 (droite) 62
3.21 Périmètre moyen le plus long mesuré sur les 4 surfaces du guide d'ondes, pour chaque orientation de fabrication, avant et après traitement de surface 63
3.22 Périmètre moyen limitant sur chaque guide d'onde en fonction des pertes en transmission moyennes sur la bande 28-35 GHz relevées sur celui ci . . . 64

3.23 Microstructures d'alliage Al-Si [9] : (à gauche) issue de fonderie (à droite) issue du procédé LBM . . . 65
3.24 Analyse du taux de porosité généré suivant O5 par binarisation de la surface (coupe (xz)) . . . 67
3.25 Imageries au MEB des surfaces verticales fabriquées en Al7SiMg0.6 des orientations O1/O2 et O5. Grandissement x70 (gauche) et x200 (droite) . . 68
3.26 Représentation de l'écart entre le périmètre mesuré (en bleu) et le trajet du courant électrique (en rouge) : (à gauche) dans la couche superficielle de O5 (à droite) dans le cas d'agrégat coalescé . . . 68

4.1 Conception pour les procédés traditionnels de composants hyperfréquences . 74
4.2 Méthodologie DfAM proposée appliquée aux composants guidés hyperfréquences . . . 75
4.3 Etape 1 : définition d'une structure modulaire orientée . . . 76
4.4 Illustration de différents agencement spatiaux dans l'EGC (boite grise) de 3 ECC (mauve clair) pour remplir la fonction globale de duplexeur et respectant les interfaces fonctionnelles (rose) . . . 77
4.5 Etape 2 : Conception du Vide . . . 79
4.6 Représentation des notions de remplissage et contour selon l'orientation des surfaces d'après [10] . . . 81
4.7 Etape 3 : Habillages mécanique et thermique . . . 82
4.8 Etape 4 : Analyses finales . . . 84

5.1 Présence de supports à l'intérieur d'un canal de propagation rectangulaire orienté à 0°par rapport au plateau de fabrication . . . 90
5.2 Orientations de fabrication considérées pour la fabrication de guide d'ondes rectangulaires WR . . . 91
5.3 Espace Global de Conception (en gris) et interfaces fonctionnelles WR-42 (en bleu) . . . 92
5.4 Cotes et dimensions (en mm) des brides d'interfaces WR-28 selon NF EN 60154-2 . . . 93
5.5 Module 1 : Définition d'une structure modulaire orientée . . . 93
5.6 Dimensions (en mm) de l'Espace Elémentaire de Conception . . . 94
5.7 Agencement spatial de l'Espace Elémentaire de conception à l'intérieur de l'Espace Global de Conception . . . 94
5.8 Orientation choisie pour la fabrication . . . 94
5.9 Module 2 : Conception du Vide . . . 95
5.10 Etape 2.1 : Conformité FA - Table états de surface et autosupportage . . . 96
5.11 Etape 2.2 : Développement de formes - Catalogue de conception . . . 96
5.12 Dôme de la cathédrale Santa Maria del Fiore de Florence . . . 97
5.13 Conception du Vide . . . 97
5.14 Etape 2.3 : Conformité FA - Table états de surface et autosupportage . . . 97
5.15 Etape 2.4 : Optimisation des propriétés RF - Simulations . . . 98
5.16 Etape 2.5 : Conformité FA - Etats de surfaces . . . 99
5.17 Dimensions (en mm) de la section du Vide . . . 99
5.18 Etape 2.6 : Optimisation des propriétés RF - Conductivité électrique et simulations . . . 99
5.19 Simulations HFSS des paramètres S obtenus pour la géométrie du Vide comparées aux paramètres-S mesurés sur les WR42 : (en haut) les pertes d'adaptation, (en bas) les pertes par transmission . . . 100

5.20 Visualisation du Vide, dont les dimensions de la section sont celles affichées sur la figure 5.17, de longueur 186 mm pour l'aluminium AlSi7Mg0.6 et 120 mm pour le titane Ti6Al4V 101
5.21 Changement géométrique brutal entre le Vide et l'interface fonctionnelle rectangulaire WR42 101
5.22 Visualisation du Vide avec la zone de raccordement de type « lissage balayé » de 33 mm et de longueur totale 186 mm pour l'aluminium AlSi7Mg0.6 et 120 mm pour le titane Ti6Al4V 102
5.23 Simulations HFSS des paramètres S obtenus pour la géométrie du Vide avec une zone de raccordement de 33 mm pour le titane et l'aluminium comparées aux paramètres-S mesurés sur les WR42 : (en haut) les pertes d'adaptation, (en bas) les pertes par transmission 102
5.24 Etape 2.7 : Conformité FA - Autosupportage et évacuation de la poudre . . 103
5.25 Portion en contre-dépouille (en rouge foncé) de la zone de raccordement d'une longueur de 33 mm 103
5.26 Portion en contre-dépouille (en rouge foncé) de la zone de raccordement d'une longueur de 13 mm 104
5.27 Simulations HFSS des paramètres S obtenus pour la géométrie du Vide avec une zone de raccordement de 13 mm comparées aux paramètres-S mesurés sur les WR42 : (en haut) les pertes d'adaptation, (en bas) les pertes par transmission 105
5.28 Amplitude du champ électrique E à l'intérieur du canal de propagation pour le Vide en aluminium de 186 mm 106
5.29 Dispositif de circulation de la pâte abrasive 106
5.30 Etape 2.8 : Paramétrie machine 107
5.31 Surface obtenue par profilométrie optique pour $P_{remplissage}$=225 W, $V_{remplissage}$=1100 mm/s, $P_{contour}$=100W, $V_{remplissage}$=450 mm/s et un diamètre de spot de 70μm. Rugosité R_a mesurée 9,37 μm 107
5.32 Evolution de la rugosité Sa en fonction de la puissance de remplissage pour $V_{remplissage}$=1100 mm/s et $V_{contour}$=450 mm/s avec un diamètre de spot laser de 70 μm 108
5.33 Evolution de la rugosité Sa en fonction de la puissance de contour pour $V_{remplissage}$=1100 mm/s et $V_{contour}$=450 mm/s avec un diamètre de spot laser de 70 μm 108
5.34 Evolution de la rugosité Sa en fonction de la VED de remplissage 109
5.35 Evolution de la rugosité Sa et du taux de porosité en fonction de la puissance de remplissage pour $V_{remplissage}$=1100 mm/s, $P_{downskin}$=100W et et $V_{downskin}$=1000 mm/s avec un diamètre de spot laser de 70 μm 109
5.36 Evolution de la rugosité Sa en fonction de la VED de downskin pour quatre VED de remplissage avec un diamètre de spot de 70 μm 110
5.37 Conception du vide pour un guide d'onde en bande K avec un raccordement de 13 mm et une longueur totale de 186 mm pour l'aluminium, 120 mm pour le titane 111
5.38 Conception du vide pour un guide d'onde en bande K avec un raccordement de 33 mm et une longueur totale de 186 mm pour l'aluminium 111
5.39 Module 3 : Habillages mécanique et thermique 111
5.40 Fonction coque générée à partir du Vide 112
5.41 Calcul de flambement avec ANSYS Mechanical 2020 R1 pour la géométrie développée en titane avec les caractéristiques mécaniques de la table 4.3 . . 112

5.42 Identification des surfaces en contre-dépouille par rapport à un angle α=45°pour l'alliage AlSi7Mg0.6 : (en haut) pour la transition 13 mm (en bas) pour la transition 33 mm 113
5.43 Structures de supportage générées automatiquement par le logiciel Magics pour les géométries développées pour l'alliage AlSi7Mg0.6 : (à gauche) vue transversale (à droite) vue longitudinale 113
5.44 Création manuelle des structures de supportage nécessaires à l'étaiement des surfaces en contre-dépouille ici pour la zone de raccordement de 13 mm 114
5.45 Déplacements (en mm) induites par le procédé LBM d'après les simulations du logiciel ANSYS Mechanical 2020 R1 pour les géométries développées : (en haut à gauche) AlSi7Mg0.6 transition 13 mm (en haut à droite) AlSi7Mg0.6 transition 33 mm (en bas) Ti6Al4V transition 13 mm 115
5.46 Outillage conçu pour le traitement de surface par écoulement de pâte abrasive (AFM) : (à gauche) la vue d'ensemble (au milieu) une vue en coupe (à droite) une vue de dessus 116
5.47 Pièces hyperfréquences développées (en jaune) représentées à l'intérieur de leur EGC et EEC respectifs : (en haut) AlSi7Mg0.6 de 186 mm avec une transition de 33 mm (au milieu) AlSi7Mg0.6 de 186 mm avec une transition de 13 mm (en bas) Ti6Al4V de 120 mm avec une transition de 13 mm . . . 116
5.48 Guides d'ondes en alliage Ti6Al4V développés suivant la méthode DfAM dédiée aux composants hyperfréquences et fabriqués au PIMM avec une paramétrie machine optimisée 117
5.49 Outillage conçu pour la géométrie développée en titane (en rouge) pour le traitement de surface AFM, intégré à l'outillage de la machine VECTOR 200118
5.50 Mesures des paramètres-S obtenus pour les trois géométries conçues et fabriquées en AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V comparées aux paramètres-S mesurés sur les WR42 : (en haut) les pertes d'adaptation, (en bas) les pertes par transmission 119
5.51 Mesures des paramètres-S obtenus après traitement AFM pour la géométrie conçue et fabriquée en Ti6Al4V comparées aux paramètres-S mesurés sur le WR42 : (en haut) les pertes d'adaptation, (en bas) les pertes par transmission121

Liste des tableaux

2.1 Bandes de fréquence du spectre radio selon l'UIT 21
2.2 Bandes de fréquence du spectre radio selon l'IEEE 22
2.3 Dimensions de guides d'ondes rectangulaire en fonction de la bande passante en régime monomode pour la bande Ka 25
2.4 Expérimentations identifiées pour répondre aux problématiques de Recherche d'après les hypothèses formulées 42

3.1 Composition chimique de l'alliage d'aluminium AlSi7Mg0.6 47
3.2 Composition du bain utilisé pour le décapage chimique (en %) 48
3.3 Paramètres d'essais utilisés lors du traitement AFM 48
3.4 Caractéristiques de l'analyseur de réseau 49
3.5 Caractéristiques du profilomètre optique utilisé 51
3.6 Equivalence entre les pertes par transmission et le pourcentage de puissance non transmise 52
3.7 Moyenne sur la bande 28-35 GHz des pertes et relevées sur matériau brut (en dB) et l'écart-type sur les 3 exemplaires selon l'orientation de fabrication 53
3.8 Moyenne sur la bande 28-35 GHz des pertes (en dB) mesurées avant et après traitement de surface en fonction de l'orientation de fabrication . . . 55
3.9 Evolution du périmètre limitant mesuré sur chaque orientation avant et après décapage chimique, pour la même surface considérée 60
3.10 Evolution du périmètre le plus long mesuré sur chaque orientation avant et après traitement AFM, pour la même surface considérée 61
3.11 Conductivités électriques 66
3.12 Priorités des orientations surfaciques 71
3.13 Etats de surfaces moyens et conductivité électrique équivalente obtenus conformément à une orientation de fabrication donnée pour l'alliage AlSi7Mg0.6 pour une paramétrie machine donnée 71

4.1 Priorités des orientations surfaciques 78
4.2 Conductivité électrique équivalente en fonction de l'orientation de la surface limitante pour les alliages AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V pour une paramétrie de fabrication donnée 80
4.3 Caractéristiques mécaniques minimales des alliages AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V qualifiés sur la machine PROX 300 DMP 83

5.1 Exigences électromagnétiques pour les guides d'ondes réalisés en LBM pour les alliages AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V 92
5.2 Priorités des orientations surfaciques 96
5.3 Caractéristiques géométriques exigées pour les conformités avec la FA et l'ECE 98

5.4 Conductivité électrique équivalente en fonction de l'orientation de la surface limitante pour les alliages AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V pour une paramétrie de fabrication donnée 100
5.5 Caractéristiques de la machine VECTOR 200 106
5.6 Paramétrie machine optimisée pour la fabrication du guide d'onde en Ti6Al4V et paramétrie standard fournie par le constructeur 110
5.7 Paramètres adoptés pour le traitement AFM 118

Chapitre 1

Contexte général de l'étude

Ce premier chapitre introduit le cadre général de ces travaux. Il s'agit d'apporter au lecteur une vision globale du contexte scientifique dans lequel s'inscrivent ces recherches.

Le contexte actuel de la production manufacturière sera tout d'abord présenté. Cette analyse permettra d'expliquer l'émergence de la fabrication additive dans une production toujours plus contrainte en termes de temps et de coût de fabrication.

La deuxième partie du chapitre présentera la nécessité de développer des outils d'aide à la conception orientés pour la fabrication additive. Ce constat, à l'origine de ces travaux, se fera à travers l'analyse des opportunités offertes par cette technologie d'une part, et par l'étude des verrous à son exploitation généralisée d'autre part.

Outre la synthèse du contexte général de ces recherches, la troisième partie présentera la problématique industrielle ainsi que le plan retenu pour le présent manuscrit.

1.1 Introduction de la fabrication additive

D'après la norme NF ISO/ASTM 52900, la fabrication additive ou fabrication par ajout de matière est « *un procédé consistant à assembler des matériaux pour fabriquer des pièces à partir de données de modèle en 3D, en général couche après couche* ». Cette approche s'oppose diamètralement à la fabrication soustractive, c'est à dire aux procédés par retrait de matière utilisés depuis des siècles, tels que l'usinage, le tournage ou encore le polissage. Cela permet, entre autre, de réduire de manière significative la perte de matière lors de la fabrication et de s'affranchir du besoin d'outillages. Le développement de la fabrication additive n'a cessé de croître depuis les années 2000, offrant une multitude de procédés différents et couvrant une très large gamme de matériaux.

FIGURE 1.1 – Evolution des recherches associées aux mots "Additive Manufacturing" sur Google depuis 2004

Depuis le brevet déposé en 1984 par le Français Jean-Claude André, la fabrication additive a continué de se développer. Bien qu'elle ait acquis une notoriété relativement tardive dans le domaine public [1](Figure 1.1), la fabrication additive est néanmoins très connue depuis plusieurs décennies des industriels. Dans les années 80, le besoin de personnalisation s'intensifiant, les bureaux d'études ont commencé à s'y intéresser pour réduire les coûts et les délais dans le cadre du prototypage rapide pour la validation de projets (Figure 1.2). A partir des années 90, la fabrication additive est adoptée sous le concept d'outillage rapide et permet par exemple la fabrication de moules d'injection plastique. Dès les années 2000, l'idée de réaliser un produit en petite série de manière directe se développe pour donner naissance au concept de fabrication rapide. Plus récemment, les industriels tendent vers un modèle permettant de fabriquer des pièces de grandes tailles, des assemblages complexes ainsi que de plus grandes séries.

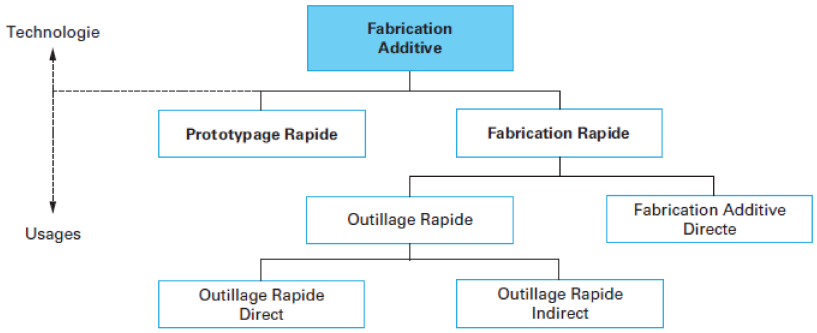

FIGURE 1.2 – Usages de la fabrication additive d'après [1]

Entrainée par une maturité grandissante, l'obsolescence de certains brevets, une diversification des usages et des investissements majeurs de grands industriels comme General Electric, qui a fait des procédés additifs une technologie clé de sa transformation numérique

1. trends.google.com/trends/explore ?q=what%20is%203d%20printing&date=all (04/04/2018)

dans laquelle il a deja investi plus de 1,5 milliards de dollars depuis 2010 [2], la fabrication additive connait un développement très dynamique qui a tendance à s'accentuer au cours des dernières années. En effet, le marché mondial de la fabrication additive a été évalué en 2014 par le cabinet Wohlers Associates [11] à plus de 4 milliards de dollars - sans considérer les investissements portés par les industriels - avec une croissance annuelle moyenne de près de 27%. A l'horizon 2020, le marché mondial est estimé entre 11,7 et 21,5 milliards de dollars selon les sources, preuve que l'emploi des technologies additives est en pleine expansion [2, 3].

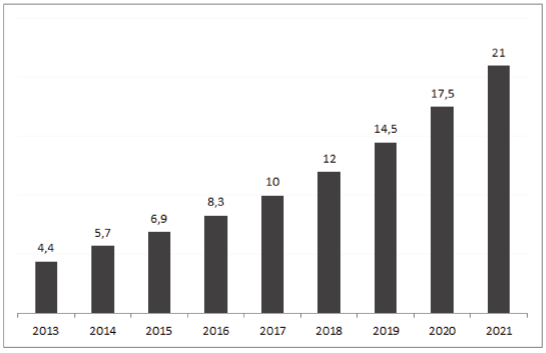

FIGURE 1.3 – Evolution du marché mondial de la fabrication additive en milliards de dollars d'après [2]

Toutefois, malgré un développement intense au cours des dernières années, la fabrication additive demeure subsidiaire comparée au marché mondial des procédés de fabrication classiques qui pèse près de 82 milliards de dollars. Sa faible utilisation - bien qu'en forte croissance - peut s'expliquer par l'existence d'un certain nombre de verrous scientifiques et technologiques liés à la relative jeunesse de ces procédés. Aussi, la singularité de cette technologie nécessite des ressources humaines et techniques nouvelles pour en maitriser l'ensemble des spécificités. Il semblerait qu'une exploitation massive de la fabrication additive sur le marché mondial ne puisse se faire sans la levée de ces deux principaux verrous.

2. ge.com/additive/press-releases/ge-makes-significant-progress-investments-additive-equipment-companies (04/04/2018)

1.2 Opportunités et applications industrielles

1.2.1 Les opportunités offertes par la fabrication additive

La fabrication additive est exploitée dans des domaines industriels très variés, allant du médical à l'automobile en passant par l'architecture (Figure 1.4). Cette diversité est principalement due aux opportunités offertes par les procédés additifs qui permettent de répondre à des usages variés : mécaniques, thermiques, électromagnétiques, etc. Chaque domaine d'application peut tirer de la technologie des atouts spécifiques. Certains apparaissent toutefois comme transversaux et indépendants de la nature ou du domaine d'application de la pièce fabriquée. Généralement, ils peuvent être résumés en quatre catégories : absence d'outillage, liberté de conception, disparition des assemblages et efficacité environnementale.

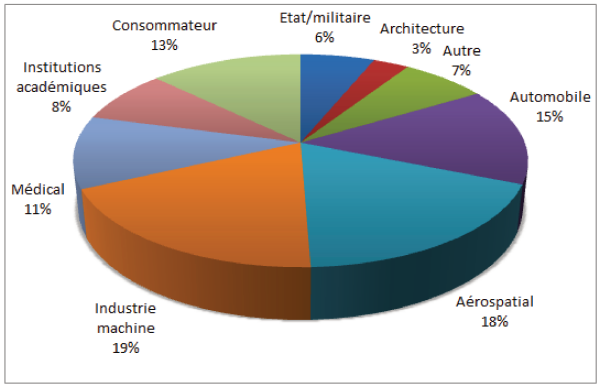

FIGURE 1.4 – Répartition du marché industriel mondial de la fabrication additive en 2017 [3]

1. **Absence d'outillage**. La technologie d'ajout de matière couche par couche permet de s'affranchir de la fabrication d'outillages onéreux dédiés à fabrication d'une pièce. Alors que traditionnellement il fallait des jours ou même des semaines pour recevoir un prototype ou un produit fini, la fabrication additive a la capacité de produire des pièces fonctionnelles en petites séries, ce qui offre un gain de temps non négligeable par rapport aux techniques de fabrication classiques. Aussi, l'absence d'outillage a une influence considérable sur le *time to market* - c'est à dire le temps nécessaire à la mise sur le marché d'un produit. La décision stratégique de mettre un produit sur le marché avant la concurrence est primordiale pour la compétitivité d'une entreprise puisque les parts de marché à acquérir y sont plus importantes.

2. **Liberté de conception**. Les restrictions imposées par la fabrication traditionnelle [3] sur la faisabilité ne sont généralement plus pertinentes pour la fabrication additive. Puisque les composants sont bâtis couche par couche, les exigences de conception liées au brut initial ou à l'accès aux outils ne sont pas appropriées dans le cadre de la fabrication additive. Cela donne aux concepteurs une grande liberté en conception et permet la création facile de géométries très complexes. Cette flexibilité dans la conception est d'autant plus intéressante que la complexité n'augmente pas le coût final de la pièce. En effet, la valeur est basée sur la quantité de matière et le temps nécessaires à la fabrication. Cette spécificité permet alors de concevoir des produits multifonctionnels tout en restant très compétitifs sur les marchés.

3. usinage, moulage par injection, forage, etc.

3. **Disparition des assemblages**. La fabrication additive a également la capacité de créer des pièces monolithiques, c'est-à-dire des pièces qui ne nécessitent pas d'être assemblées pour former un produit fini. Cela est rendu possible grâce à la discrétisation en couches et à l'ajout de matière. Réduire, voire supprimer, la notion d'assemblage est important puisqu'elle permet techniquement de réduire la masse globale, d'augmenter les performances dans certains domaines spécifiques et de diminuer significativement le temps de production et les coûts associés.

1.2.2 Intérêt de la fabrication additive pour les produits de radiocommunication

Aujourd'hui avec l'émergence de nouvelles technologies et une concurrence considérable sur le marché de la défense, les clients sont de très demandeurs de produits de moins en moins coûteux avec des délais d'obtention toujours plus courts, tout en maintenant des performances très élevées. A ce titre, la fabrication additive pourrait jouer un rôle crucial car elle permettrait de réduire drastiquement ces trois facteurs. La liberté de conception aiderait à complexifier les pièces, de manière à obtenir des produits multifonctionnels et plus performants. Le procédé a donc été identifié par Thales Group comme une technologie clé. Thales SIX GTS France, une des entités du Group Thales, est spécialisée dans trois domaines majeurs :

1. **les systèmes de guerre électronique**. Ces équipements permettent d'avertir du changement de position de l'ennemi ou de son activité grâce à l'interception des communications ou des messages. Cette interception de données ainsi que la surveillance pratiquée, permettent ensuite de transmettre électroniquement des ordres de combat.
2. **la cybersécurité et la protection des données**. Face à la croissance de cyberattaques d'origines très variées, sans contrainte géographique et dans un monde massivement interconnecté, se protéger des menaces informatiques est devenu un enjeu capital sur tout le cycle de vie de la sécurité digitale, clé de voûte de la confiance numérique.
3. **les produits de radiocommunication**. L'art militaire moderne dépend plus que jamais des communications radio. La maîtrise du spectre électromagnétique en situation de combat est en partie liée aux activités de guerre électronique des transmissions. Elle consiste en des actions offensives, défensives et de renseignement sur l'ensemble du spectre électromagnétique. Ces activités exigent des systèmes automatisés toujours plus sophistiqués pour identifier les véritables menaces ou apporter une valeur ajoutée au renseignement. Les équipements de radiocommunication développés par Thales SIX GTS France concernent aussi bien les systèmes aéroportés et terrestres que navals.

Les deux premiers domaines étant plutôt portés par l'informatique et le digital, Thales SIX a canalisé son attention sur l'intérêt que pouvait présenter la fabrication additive pour la réalisation d'équipements de radiocommunication. Parmi eux, une large gamme repose sur des dispositifs électroniques, ce qui réduit d'ores et déjà les potentiels candidats parmi les différentes catégories de produits. Ensuite, la fabrication additive n'étant actuellement compétitive économiquement comparée aux techniques conventionnelles de fabrication que pour de petites séries [12], les équipements produits à plusieurs dizaines de milliers d'exemplaires ne peuvent non plus s'insérer dans cette démarche. Finalement, le choix s'est orienté vers des systèmes de radiocommunications dits *complexes* : les équipements pour les communications satellite dits « SatCom » (Figure 1.5).

FIGURE 1.5 – Exemple de produit de SatCom ciblé par Thales pour la fabrication additive : antenne portative avec (en rouge) la pièce complexe hyperfréquences

Réalisés en petites séries (quelques dizaines d'exemplaires par an), les terminaux SatCom permettent aux unités militaires de planifier et coordonner les mouvements de leurs troupes sur le terrain. Ils garantissent une communication tactique mobile, et s'intègrent facilement aux véhicules terrestres, aux navires et aux aéronefs. Ils offrent des fonctions de communication à la demande pour réseau tactique et une traçabilité optimale, pour permettre à toutes les personnes déployées de rester connectées pendant les missions militaires délicates. Grâce à la connaissance avancée et à la maîtrise des moyens de fabrication traditionnels, ces équipements ont pu atteindre des performances de plus en plus exigeantes au fil des dernières années. Néanmoins, ces technologies impliquent des délais de fabrication relativement longs, des coûts de production élevés et une liberté géométrique assez limitée. En cela, la fabrication additive apporte un nouveau paradigme et pourrait faire évoluer la réflexion sur la conception de ce type de composants. Outre les économies de temps et de coûts qui pourraient être bénéfiques à tous les domaines d'application, la fabrication additive pourrait contribuer à la réduction des volumes et des masses de ces équipements, souvent intégrés sur des avions ou directement portés par l'Homme.

1.2.2.1 Assemblage

Un assemblage consiste à lier entre elles plusieurs pièces pour former un ensemble, qu'il soit rigide ou élastique, articulé ou fixe, démontable ou permanent. Les terminaux SatCom sont composés de nombreuses pièces élémentaires assemblées permettant de traiter des signaux électromagnétiques émis et reçus. Ces pièces élémentaires nécessitent une grande précision, d'autant plus que la fréquence d'utilisation est importante et l'assemblage doit conserver cette précision pour en garantir les performances. Cependant, l'assemblage induit :

1. des pertes électriques à chaque interface (~0.1 dB en transmission), qui se traduisent par une perte de puissance du signal électromagnétique transmis ;
2. une augmentation de la masse et du volume global de la pièce (systèmes de serrage) ;
3. un coût très élevé lié à l'outillage (moulage, brasage) et à l'usinage pour permettre une mise en position précise de la liaison d'encastrement, de l'ordre du centième de millimètre (pions de centrage) ;
4. un délai de fabrication supplémentaire et non négligeable.

Aujourd'hui grâce à ce procédé, il est possible de réaliser de manière monolithique, c'est-à-dire en une seule et unique pièce, des structures tridimensionnelles qui comportent

des corps creux. Les concepteurs ont alors la capacité de s'affranchir facilement de certaines contraintes de conception qui pèsent sur la réalisation finale d'un produit comme les assemblages. Cela réduirait les pertes électriques, la masse, le coût et le délai de fabrication. La figure 1.6 représente une même pièce destinée à être réalisée par usinage et par fabrication additive (seul l'avantage lié à la suppression de l'assemblage est intégré sur cet exemple). La première, pesant 345g, est conçue par assemblage de 18 pièces alors que la seconde est une pièce monolithique de 200g, avec un coût de revient global divisé par 2,5. La suppression de 17 interfaces permet alors de s'affranchir d'environ 1,7 dB de pertes, soit l'équivalent de 30% de puissance non transmise.

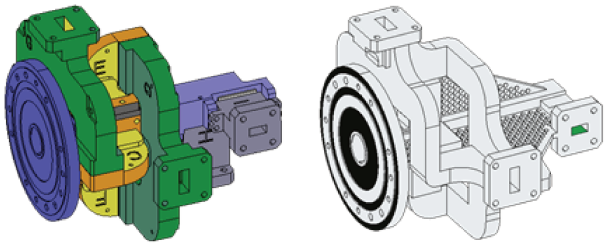

FIGURE 1.6 – Type de composant hyperfréquences ciblés : (à gauche) la version usinée (à droite) la version monolithique pour la fabrication additive

D'un côté, la disparition de la notion d'assemblage permet un allègement et une réduction des pertes du signal (jusqu'à 50% de puissance perdue aux interfaces pour un assemblage de 30 pièces). Au-delà d'entreprendre uniquement la réalisation de modèles existants sous forme monolithique, la fabrication additive présente deux autres avantages majeurs en conception : la liberté géométrique et l'intégration multifonctionnelle.

1.2.2.2 Liberté géométrique

Les géométries complexes sont des structures tridimensionnelles qui comportent souvent des espaces creux à cavités, comme les structures organiques. De nombreuses géométries complexes peuvent parfois être réalisées, avec un succès limité, en utilisant des technologies classiques telles que l'usinage et le moulage, ou entraîner des coûts excessifs. Dans ce cadre, la fabrication additive présente un atout évident : chaque forme conçue avec un programme de CAO devient réalisable en utilisant une technologie additive, moyennant le respect de certaines règles de conception, comme pour tout procédé. La fabrication additive garantit aux développeurs la plus grande liberté de conception possible : la complexité n'est plus dictée par le processus de fabrication, mais par le cahier des charges fonctionnel. Avec les procédés de fabrication traditionnels, les pièces hyperfréquences sont soumises à l'utilisation de formes géométriques simples, rectangulaires ou circulaires, pour assurer leur fabricabilité et garantir les performances électromagnétiques. Ainsi, au-delà de développer des pièces monolithiques, la fabrication additive permettrait d'amplifier significativement les performances à travers le déploiement de nouvelles formes géométriques, impossibles à réaliser par les moyens conventionnels (Figure 1.7). Aussi, le volume global de la pièce est presque le seul facteur pertinent concernant le coût, sa complexité n'ayant pratiquement aucune incidence. En général, plus la géométrie d'un composant est complexe, plus l'emploi de la fabrication additive est opportun. L'exploitation de cette liberté servirait à développer de nouvelles géométries plus adaptées aux besoins, conduisant à des performances accrues, des réductions de volume ou de masse.

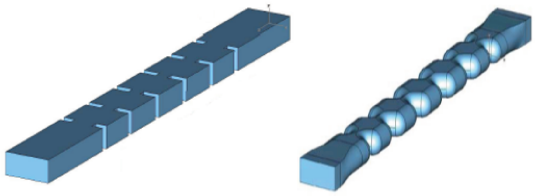

FIGURE 1.7 – Liberté géométrique offerte par la fabrication additive : (à gauche) un filtre réalisé par moyens conventionnels (à droite) pour la fabrication additive [4]

1.2.2.3 Intégration multifonctionnelle

Cette complexité géométrique conduit au troisième avantage majeur qu'offre la fabrication additive pour les pièces hyperfréquences : l'intégration multifonctionnelle. D'un point de vue électromagnétique, elle correspond à la conception d'un seul élément réalisant plusieurs fonctions différentes, normalement opérées par plusieurs éléments distincts. L'objectif est de compacter le volume de l'équipement pour en réduire les coûts et les pertes linéiques. Aussi, la puissance élevée transportée dans les équipements hyperfréquences étant dégagée sous forme de chaleur, il est indispensable d'y associer des éléments thermiques pour en contrôler la dissipation. Normalement fabriqués séparément puis assemblés, les radiateurs peuvent être directement intégrés et fabriqués sur la pièce hyperfréquences grâce à la fabrication additive, sans surcoût significatif. La pièce dispose alors d'un caractère multifonctionnel : mécanique, électromagnétique et thermique.

Pour résumer, l'intérêt de l'emploi de la fabrication additive dans le cadre d'équipements hyperfréquences réside dans la suppression d'assemblage, la complexité géométrique et l'intégration multifonctionnelle, qui permettraient de compacter les équipements, réduire les masses et les coûts, mais aussi accroitre les performances d'utilisation.

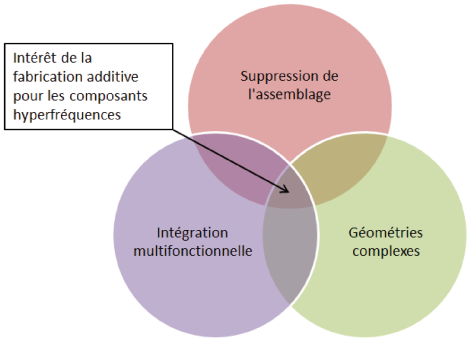

FIGURE 1.8 – Intérêt de la fabrication additive pour les composants hyperfréquences

A noter que les performances mécaniques ne seront pas discutées dans ce manuscrit. D'une part, car les pièces hyperfréquences n'ont pas vocation à subir de fortes contraintes mécaniques, et, d'autre part, car les alliages utilisés dans ces travaux ont été soumis à des campagnes de qualifications mécaniques au cours desquelles il a été montré que les couples machines/matériaux permettaient d'atteindre des caractéristiques mécaniques conformes au standard défini par Thales, qui sert de donnée d'entrée aux simulations mécaniques. En revanche, les traitements de surfaces spécifiques, appliqués aux pièces pour répondre à des exigences liées à l'environnement extérieur (résistance à la corrosion par exemple), seront explicités puisqu'ils font partie, à part entière, de la réalisation d'équipements opérationnels.

1.3 Facteurs de développement

Si la fabrication additive présente des atouts indéniables, son manque de maturité nécessite d'améliorer les systèmes de production associés et de lever d'importants verrous liés à ces technologies. Sans cela, il sera difficile d'en démocratiser l'utilisation industrielle à grande échelle. Les axes de développement s'articulent autour de deux sujets majeurs : l'amélioration des connaissances liées aux procédés additifs et les outils industriels de fabrication.

1.3.1 Intégration des connaissances liées à la technologie

Concernant la partie amont liée au processus de conception, la diffusion des connaissances, la définition d'une nouvelle méthode de conception et le développement de nouveaux logiciels intégrant les principes de la fabrication additive, constituent des axes importants de progrès dans l'optique d'une industrialisation à grande échelle.

1. **Education à la technologie.** La fabrication additive apportant un nouveau paradigme de conception, il est nécessaire de sensibiliser les acteurs de la phase amont de développement, aux avantages et limites des différents procédés. Sans cela, il parait difficile de casser les barrières cognitives assujeties à l'utilisation depuis de nombreuses décennies des procédés conventionnels de fabrication, et donc de bénéficier de tous les avantages offerts par la fabrication additive en termes de conception. En ce sens, de plus en plus d'institutions universitaires commencent à développer des parcours diplomants axés sur la fabrication additive, comme l'expertise *Materials and Additive Manufacturing* proposée à l'Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers [4], et les industriels proposent des formations pour les concepteurs. Cette ouverture aux connaissances spécifiques est fondamentale pour l'exploitation de la fabrication additive et son développement sur le marché industriel.

2. **Méthode de conception adaptée.** La connaissance avancée des caractéristiques de cette technologie n'en garantit pas une utilisation optimisée. Cela peut s'expliquer par l'interdépence de nombreux paramètres, la considération ponctuelle de certaines étapes, l'inertie psychologique associée aux techniques classiques de fabrication, etc. En ce sens, de nombreux acteurs de la fabrication additive consentent à dire que *« la fabrication additive débridera la conception dans les bureaux d'études [...] à condition que les concepteurs revoient leurs méthodes »* [13]. Des outils d'aide à la conception intégrant les différentes étapes majeures à considérer - aussi bien en termes d'avantages que de limites - pour concevoir une géométrie optimisée en fabrication additive doivent être développés. Dans le champ des méthodes de *Design for X*, ces outils sont représentés par les méthodes de *Design for Additive Manufacturing*. Seules la compréhension, l'intégration et la maîtrise de ces méthodes de conception permettront aux concepteurs de bénéficier des opportunités apportées par la fabrication additive.

3. **Chaînage Conception-Procédé-Application.** L'intégration de la chaine liant les domaines conception-procédé-application est l'un des plus gros défis au coeur de la démocratisation des procédés additifs dans les bureaux d'études. La qualité d'une pièce fabriquée étant dépendante d'une multitude de paramètres, à la fois associés à des choix de conception et aux caractéristiques du procédé utilisé, il est primordial de les prioriser par ordre d'influence sur les propriétés d'usage de l'application visée.

4. https ://artsetmetiers.fr/fr/materials-and-additive-manufacturing-madman

Dans le cas contraire, le développement se livre à des considérations déséquilibrées et engagent les performances souhaitées de la pièce.

1.3.2 Développement et amélioration des outils industriels

Concernant les outils industriels, les facteurs qu'il parait nécessaire d'améliorer en vue de l'intégration complète de la fabrication additive dans le paysage industriel s'articulent autour de deux points : maitrise des procédés et amélioration du ratio vitesse/coût de production.

1. **Maîtrise des procédés**. Il est évident aujourd'hui que le manque de maîtrise des phénomènes physiques impliqués lors de la fabrication additive est l'un des facteurs les plus pénalisants concernant cette technologie. Cela est d'autant plus vrai dans les procédés laser, où l'interaction entre la poudre et le faisceau entraine des gradients thermiques importants, responsables de potentielles distorsions et éjections de métal liquide, générant des inclusions et des porosités dans la pièce finale solidifiée. Du point de vue industriel, ce manque de maîtrise est très préjudiciable sur le plan économique. La répétabilité de fabrication ne pouvant être assurée sans une maitrise complète de la technologie, la fabrication additive ne peut pas s'ancrer durablement sur le marché industriel, bien qu'il existe de plus en plus d'abaques expérimentales permettant d'identifier les conditions paramétriques optimales. Cela impacte le coût et le temps de développement du produit comparé à l'utilisation maitrisée de techniques de fabrication classiques, ce qui représente un frein important sur le marché concurrentiel.

2. **Amélioration du ratio vitesse/coût de production**. Une adoption plus globalisée de la fabrication additive dans l'industrie doit inévitablement passer par une amélioration significative du coût unitaire pour des productions en série. En effet, bien que la fabrication additive soit avantageuse pour quelques centaines de pièces, elle n'est absolument pas compétitive comparée aux techniques classiques de fabrication sur des volumes de pièces plus importants [12]. Ainsi, le ratio vitesse/coût de production est un paramètre primordial à améliorer pour ancrer la technologie sur le marché industriel. Cela ne doit cependant pas se faire au détriment de la qualité des pièces, auquel cas la tendance du seuil de rentabilité risquerait de ne pas s'inverser.

1.4 Synthèse et organisation du manuscrit

Dans ce chapitre, nous avons présenté le contexte global dans lequel s'inscrit la fabrication additive dans le domaine industriel, et notamment l'intérêt qu'elle sucite pour le domaine radiofréquence. Ne nécessitant pas d'outillage ni de bruts de matière, elle présente de réels atouts concernant la conception de nouveaux produits, à travers une liberté de conception plus vaste, une réduction des assemblages et une possibilité de créer des pièces multifonctionnelles. D'un autre côté, la méconnaissance de la part des concepteurs des spécificités et des opportunités apportées par la technologie additive, la maitrise partielle des phénomènes physiques qui se manifestent lors de la fabrication et les coûts relativement élevés de production, constituent les principaux verrous nécessaires à lever pour généraliser son implantation sur la marché industriel.

Un tel constat nécessite de définir de nouvelles méthodes d'aide à la conception dédiées à la fabrication additive. Ces outils permettraient de :

1. encourager la créativité. La liberté de conception presque illimitée favorise l'émergence de produits encore plus performants et multifonctionnels ;
2. soutenir les concepteurs dans le but de tirer profit des avantages offerts par la fabrication additive. Cela implique de définir des étapes clés lors du processus de conception dans lesquelles des choix importants doivent être effectués ;
3. intégrer au plus tôt dans la démarche de conception les spécificités de fabrication dans le but de minimiser les écarts entre la pièce théorique et la pièce fabriquée.

Ces travaux de thèse s'inscrivent donc dans la thématique de la conception *pour* la fabrication additive - *Design for Additive Manufacturing (DfAM)* en anglais - appliquée aux composants hyperfréquences, utilisés dans le cadre des communications satellite.

Tout d'abord, nous commencerons par exposer une analyse des spécificités du procédé additif de fusion laser sur lit de poudre ainsi que les premiers résultats liés à son utilisation dans le domaine hyperfréquences dans le **chapitre 2**, consacré à l'état de l'art. Il sera complété par la présentation des méthodes existantes de conception orientées pour la fabrication additive en faisant apparaitre leurs avantages et leurs limites. De ce chapitre découlera la problématique de recherche de ces travaux de thèse et les hypothèses vers lesquelles nous nous sommes orientés pour tenter d'y répondre. Le **troisième chapitre** dévoilera les résultats obtenus conformément à l'une de ces hypothèses et qui permettront de quantifier les défauts électromagnétiques engendrés par les phénomènes physiques du procédé de fusion laser sur lit de poudre. Ces données serviront à bâtir la méthode de conception pour la fabrication additive de pièces hyperfréquences que nous proposons dans le **quatrième chapitre**. Les principales étapes décisionnelles seront présentées ainsi que les élements nécessaires pour en garantir une bonne utilisation. Le **cinquième chapitre** comportera un exemple industriel permettant d'illustrer la méthode dans son ensemble. Enfin, les conclusions relatives à l'ensemble de ces travaux de thèse et les perspectives qui en découlent clôtureront ce manuscrit.

Chapitre 2

Etat de l'art et problématique de Recherche

Ce deuxième chapitre a pour objectif de présenter les différents travaux qui ont été menés par la communauté scientifique, en lien avec notre étude. Nous allons analyser les différentes caractéristiques du procédé et leur(s) potentielle(s) influence(s) sur les composants hyperfréquences, mais également les différentes méthodes de conception *pour* la fabrication additive existantes, dans le but de positionner nos travaux.

La première partie servira à introduire les principales caractéristiques de la technologie de fusion laser sur lit de poudre. Cela nous permettra, d'une part, de spécifier le type d'approche à adopter lors de la phase de conception et, d'autre part, de comprendre les limites du procédé.

Nous rendrons compte dans un deuxième temps de l'état de maturité de la fabrication additive dans le domaine des hyperfréquences. Nous pourrons ainsi mettre en évidence le besoin d'établir une méthode de conception *pour* la fabrication additive *et* les hyperfréquences.

La troisième partie de ce chapitre se rapportera aux travaux de recherche relatifs à la conception pour la fabrication additive (DfAM). Cet état de l'art apportera une vision globale sur les outils et concepts déjà existants. De cette étude, nous dégagerons les intérêts et les limites de ces travaux qui serviront à orienter les nôtres.

Pour finir, une synthèse de cet état de l'art sera proposée. Nous extrairons ainsi les verrous des études déjà réalisées pour définir clairement la problématique de recherche et le positionnement de nos travaux de thèse.

2.1 La fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre

2.1.1 Introduction au procédé de Laser Beam Melting

Le procédé de Laser Beam Melting (LBM) est le procédé de fusion laser sur lit de poudre (Figure 2.1), le plus largement utilisé dans l'industrie de la fabrication additive.

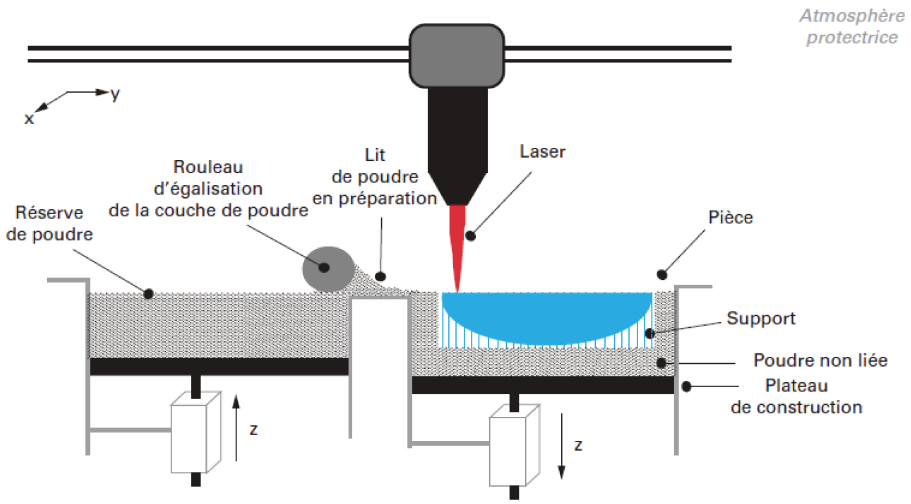

FIGURE 2.1 – Procédé de fusion laser sur lit de poudre [1]

Comme pour les autres procédés de cette même famille, la fusion par faisceau laser commence par la conversion des données de CAO en un fichier .STL (ou .OBJ, 3.MF). Ces informations numérisées sont transmises à la machine de fabrication afin que les coupes transversales 2D de l'objet souhaité soient fabriquées de manière séquentielle, couche par couche.

La machine de fabrication est constituée de deux bacs à déplacement vertical placés côte à côte, l'un étant rempli de la poudre métallique sélectionnée, l'autre correspondant à la zone de fabrication. Lors de la première étape, une couche de poudre métallique, dont l'épaisseur correspond à celle des coupes transversales 2D, est acheminée depuis le premier bac vers le second par un rouleau - ou une lame vibrante - et répartie de manière homogène sur un substrat (plateau de fabrication). Comme son nom l'indique, un faisceau laser à haute puissance deplacé par une tête scanner vient alors fondre et fusionner à grande vitesse (m/s) les particules métalliques constitutives du lit de poudre conformément au motif de la coupe transversale considérée. Une fois le motif balayé par le laser, le plateau de fabrication descend d'un incrément tandis que le bac de poudre effectue le mouvement inverse. Le rouleau déplace alors la seconde couche de matière et la fabrication reprend selon le même processus, en considérant la coupe transversale suivante. Lorsque la fabrication est terminée, la poudre qui n'a pas été fusionnée est alors recyclée.

L'ensemble du processus se déroule à l'intérieur d'une chambre fermée et remplie d'un gaz inerte tel que le diazote ou l'argon, en fonction de la réactivité de la poudre métallique employée, pour éviter toute contamination du lit de poudre par l'oxygène lors de la fabrication.

A tout nouveau procédé de fabrication correspondent certaines spécificités qui affecteront la qualité finale de la pièce, alors même que les exigences habituelles en matière de

performances demeurent inchangées. En particulier, la qualité finale d'une pièce réalisée par le procédé LBM repose sur une multitude de paramètres [5] ; il est alors crucial de les identifier et de définir leur degré d'influence. Mettre en évidence les paramètres de production les plus importants concernant la qualité finale d'une classe de produits contribue à une réduction significative du temps et du coût nécessaires à la création de nouveaux produits à hautes performances.

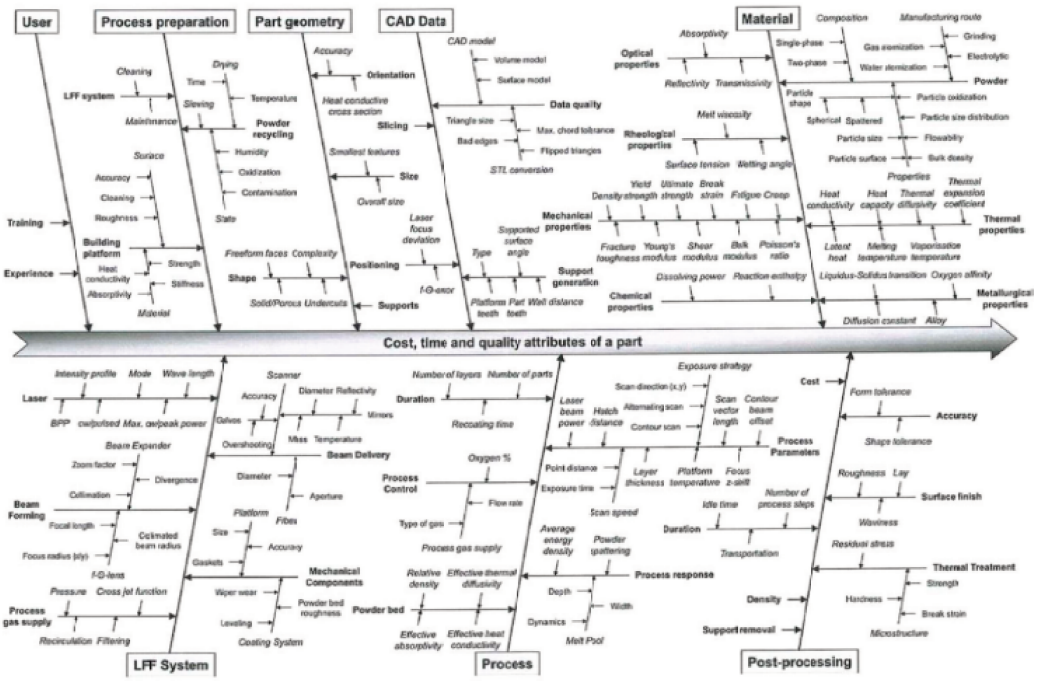

FIGURE 2.2 – Recensement des paramètres influant sur la qualité finale d'une pièce produite par fabrication additive métallique, d'après [5]

Nous introduirons dans la suite de ce chapitre les paramètres qui pourraient s'avérer décisifs concernant la qualité finale de pièces hyperfréquences réalisées par le procédé LBM. En particulier, les déformations thermiques et les états de surface engendrés sur les pièces fabriquées, qui s'écartent des valeurs couramment réclamées par les cahiers des charges hyperfréquences, à savoir quelques dizaines de microns d'écart vis-à-vis des cotes et une rugosité arithmétique de 1.6 microns, respectivement.

2.1.2 Déformations thermiques

Dans le cas des procédés de fabrication additive lit de poudre métal, la matière subit en chaque point un cycle thermique complexe au cours de la fusion des différentes couches de matière. Ce cycle thermique se compose d'au moins deux phases successives de fusion et de solidification - pour assurer la continuité métallurgique - suivies de cycles de recuit en phase solide. Il en résulte un échauffement moyen de la pièce fabriquée, avec d'importants gradients de température locaux à l'origine de l'apparition de contraintes et déformations résiduelles [14–16]. Le laser ne fondant qu'une petite quantité de poudre - correspondant approximativement au diamètre du laser - parmi une zone plus froide, cela aboutit à de forts gradients thermiques source d'une accumulation de contraintes résiduelles. Les contraintes résultant du cumul des contraintes résiduelles et des contraintes appliquées peuvent alors dépasser la limite d'élasticité du matériau, créant de la plasticité locale à l'origine de phénomènes d'endommagement-rupture anticipés. L'histoire

thermique de la pièce est donc essentielle à considérer en phase amont. En ce qui concerne l'influence des propriétés matériaux, une importante diffusivité thermique, de faibles dilatations thermiques, limite d'élasticité et module d'Young, tout comme un bas point de fusion, s'accompagnent de contraintes résiduelles atténuées, en l'absence de transformations allotropiques ou d'autres phénomènes métallurgiques. D'autres moyens conduisent à une limitation des contraintes résiduelles : par positionnement de structures de supportage pour diminuer les gradients thermiques G (K/mm) en cours de fabrication, par post-traitement thermique, par augmentation de la température du lit de poudre ou encore par diminution de la densité d'énergie volumique apportée lors de la fusion.

L'orientation de la pièce dans la chambre de fabrication joue également un rôle essentiel dans la déformation finale de la pièce. Puisque le lit de poudre métallique, composé à 50% de gaz d'inertage, est 50 à 100 fois moins conducteur thermiquement que le métal fondu, la dissipation de la chaleur dans la pièce se fait par conduction dans le métal. Il arrive donc fréquemment que la zone de déformation maximale soit concentrée sur une zone périphérique de la pièce (Figure 2.3). Pour éviter que les contraintes résiduelles ne subsistent après le refroidissement et que les contraintes thermiques à l'intérieur du composant n'augmentent, des structures de support peuvent être mises en contact avec la pièce et agissent comme un dissipateur de chaleur vers le plateau de fabrication [17].

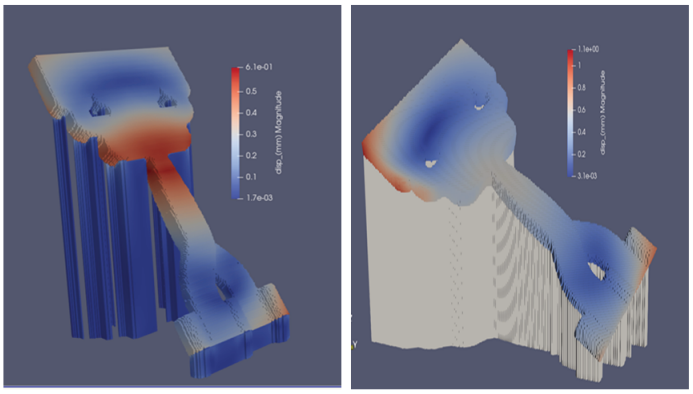

FIGURE 2.3 – Influence de l'orientation sur les zones de déformations thermiques (en rouge) : (gauche) orientation à 45 par rapport à (xy) ; (droite) orientation à 45 par rapport à (xy) et (xz)

D'autre part, les choix des paramètres de fabrication ont une large influence sur les contraintes résiduelles dans la pièce finale. La puissance laser, la vitesse de lasage et l'épaisseur de couche paraissent être les paramètres procédé les plus influents concernant les contraintes résiduelles [18, 19]. Globalement, un procédé plus chaud (obtenu pour des vitesses de lasage réduites et des puissances de laser élevées) entraîne plus de déformations thermiques à l'échelle de la pièce ainsi qu'à l'échelle locale (contraintes internes). Ces quatre paramètres sont tous liés à la densité d'énergie par volume de matière fabriquée (VED), selon la formule :

$$VED = \frac{P}{v.h.t} \qquad J/mm^3 \tag{2.1}$$

où P est la puissance du laser (W), v la vitesse du laser (mm/s), h l'espacement des cordons (mm) et t l'épaisseur de couche (mm).

Les contraintes résiduelles, par nature, élastiques, peuvent être réduites grâce à des post-traitements thermiques de relaxation. Cependant, une fois que la pièce est plastique-

ment déformée, il n'existe pas de recours pour redonner à la pièce sa forme initiale.

La maitrise des déformations n'étant pas totale, il est encore difficile de connaitre et d'anticiper les variations dimensionnelles dues à la fabrication. Des informations fiables et complètes sur les tolérances pour les procédés de fabrication additive ne sont ni établies dans la littérature ni dans les normes applicables. Bien qu'elles soient de plus en plus spécifiées par les utilisateurs, ces valeurs proviennent principalement de l'expérience individuelle et ne sont pas justifiées empiriquement [20]. De plus, ces tolérances sont limitées dans la pratique car elles reposent sur un grand nombre de facteurs influents (forme, orientation, paramètres laser, poudre, etc.). Toutefois, il est de coutume de considérer, lors de la phase de conception, que la précision dimensionnelle atteinte par LBM en aluminium et titane est de l'ordre de 100 et 50 microns [21], respectivement.

2.1.3 Etats de surface

L'état de surface atteignable par le procédé de fusion laser sur lit de poudre est un sujet assez largement discuté dans la communauté scientifique ces dernières années. La raison est simple : le procédé LBM dégrade davantage l'état que d'autres procédés alternatifs plus conventionnels, tel que l'usinage. Or, un état de surface de moindre qualité peut s'avérer très préjudiciable dans l'intérêt d'utiliser les procédés additifs pour une production industrielle. Cela peut entrainer une chute des propriétés mécaniques de résistance en fatigue et de longues/coûteuses opérations de post-traitement - souvent effectuées à la main compte tenu de la complexité des pièces fabriquées. Voire, de manière plus rédhibitoire lorsque la complexité des pièces est trop importante, l'incapacité totale d'utiliser ce procédé. Cette limitation du procédé LBM peut s'expliquer par la présence de plusieurs phénomènes.

Tout d'abord, dans tous les procédés de fabrication additive - à des dégrés différents toutefois - la qualité de l'état de surface est fortement influencée par « l'effet escalier », qui est une approximation géométrique des surfaces inclinées et courbes par les différentes couches d'épaisseur finie. Cet effet est d'autant plus important pour des surfaces n'étant ni orthogonales ni parallèles à l'orientation de fabrication. La rugosité arithmétique, R_a, engendrée par ce phénomène géométrique peut être modélisée suivant la formule [22] :

$$\begin{cases} \frac{1}{L}\int_0^L |y(x)|\mathrm{d}x = \frac{1}{4}L_t\cos(\alpha) & \text{si } \alpha \in]0;\frac{\pi}{2}] \\ 0 & \text{si } \alpha = 0 \end{cases} \tag{2.2}$$

où L_t représente l'épaisseur de couche et α l'angle formé entre le plateau de fabrication et la surface de la pièce, comme représenté sur la figure 2.4.

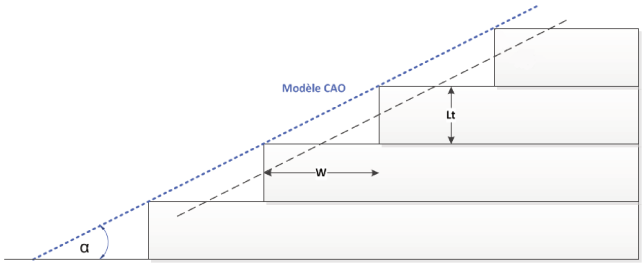

FIGURE 2.4 – Représentation de l'effet escalier

En considérant cet effet escalier, le meilleur état de surface est ainsi obtenu pour une épaisseur de couche minimale et des surfaces plates ou verticales. Entre ces deux orientations, l'effet escalier suit une variation cosinusoidale et décroit donc sur l'intervalle $]0\,;\pi/2]$.

Dans le cadre de la fusion laser sur lit de poudre, ce modèle théorique semble loin de représenter l'état de surface réel obtenu sur une pièce fabriquée. De nombreuses études, dont les modèles étaient purement basés sur la prédiction de l'effet escalier, ont souvent atteint leur limite ; l'état de surface mesuré sur une surface réelle n'ayant pas la valeur attendue [23]. Cela s'explique par le fait que les phénomènes physiques mis en jeu lors de la fusion et de la solidification de la poudre métallique n'y sont pas pris en compte [24].

Plusieurs études ont montré qu'un nombre important de particules sphériques non fusionnées accrochées en surface a pu être observé, entrainant l'apparition de rugosités R, quelle que soit l'inclinaison des surfaces et le matériau utilisé [25–27]. Plus particulièrement, Strano et al. ont montré que pour des surfaces verticales pour lesquelles l'état de surface est censé être nul en l'absence d'effet escalier, l'état de surface réel mesuré atteignait une valeur de 14 microns en raison d'une forte concentration de particules du lit de poudre fusionnées en surface. Aussi, nous avons observé que pour une même orientation et à conditions de lasage identiques, la surface dont la normale est orientée vers le haut (upskin) présentait un nombre plus faible de particules agglomérées que la surface opposée (downskin) [28, 29](figure 2.5). Ce phénomène s'explique par la forte concentration de chaleur qui s'accumule en périphérie de la pièce, c'est à dire proche des zones en contact avec le lit de poudre, qui agit comme isolant thermique. Les particules du lit de poudre proches de ces zones de balayage laser vont atteindre une fusion partielle et ainsi venir se fixer sur la surface [30, 31]. Dans le cas particulier des surfaces en downskin, qui ne surplombent aucune couche précédemment fusionnée, lorsque le laser éclaire directement la contre-dépouille, la conduction dans le métal y est nettement plus délicate, causant une rétention de chaleur plus conséquente.

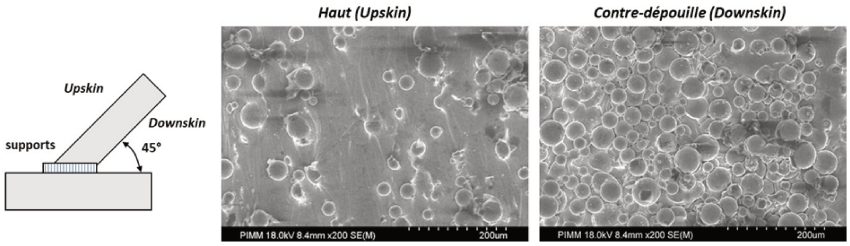

FIGURE 2.5 – Analyse MEB de surfaces fabriquées à 45 degrés : l'agglomération de particules est deux fois plus élevée en downskin et entraîne des rugosités supérieures

La paramétrie machine utilisée lors de la fabrication joue donc un rôle essentiel sur la qualité de surface obtenue [24, 32, 33]. Il existe un certain nombre de paramètres d'entrée, dans les phases de contour et de remplissage, qui peuvent être contrôlés et modifiés afin d'améliorer l'état de surface des pièces. De fait, Calignano et al. ont réussi à travers un plan d'expérience de Taguchi, à améliorer l'état de surface en utilisant une paramétrie de lasage (puissance, vitesse, cordon) adaptée : la rugosité arithmétique R_a a été réduite de 24 à 6 microns dans le cas de l'alliage d'aluminium AlSi10Mg [34].

Les états de surfaces, exprimés en R_a, atteints par le procédé LBM se situent couramment entre 10 et 25 microns, sans post-traitement [35–37]. Les connaissances actuelles

de la communauté scientifique concernant ces phénomènes complexes ne permettent pas, à l'heure actuelle, de bâtir un modèle mathématique qui puisse prédire avec précision la qualité de l'état de surface. Il est toutefois possible d'améliorer l'état de surface : (1) lors de la conception, en minimisant le nombre et l'angle des surfaces inclinées (réduction de l'effet escalier et diminution du nombre de surfaces en downskin) ; (2) en optimisant la paramétrie de la machine ; (3) en effectuant des traitements de surfaces mécaniques - comme le sablage ou l'écoulement de pâte abrasive (AFM) [38] - ou chimiques.

2.1.4 Orientation de fabrication

L'orientation de la pièce dans la chambre de fabrication joue un rôle triple sur la qualité finale de la pièce. Tout d'abord, comme exposé précédemment, les technologies additives, par l'ajout de matière couche par couche, induisent un effet escalier qui augmente à la fois les erreurs dimensionnelles et dégrade l'état de surface de la pièce finale.

Deuxièmement, les volumes en contre-dépouille nécessitent la présence de support pour éviter un effondrement par gravité de la première couche et de ses couches supérieures [39]. Le support peut être constitué des couches précédentes (support fonctionnel) ou, le cas échéant, par un volume supplémentaire non fonctionnel qui nécessitera d'être retiré après la fabrication (Figure 2.6). Selon le procédé et le matériau sélectionnés, la valeur critique d'angle d'autosupportage varie autour de 35-50°par rapport à la verticale. Le support permet également de réduire les déformations thermiques dans la pièce pendant et après la fabrication, en dissipant une partie la chaleur créée par le laser. A la différence d'autres technologies additives, en LBM les structures de support sont fabriquées dans le même matériau que la pièce : il n'est alors pas possible de les retirer par dissolution mais uniquement par voie manuelle. Pour les composants hyperfréquences, apparentés à des tuyaux et difficiles à ré-usiner, il est donc primordial que les **canaux internes demeurent autosupportés lors de la fabrication** (ou du moins que les supports soient faciles à retirer) au risque d'obstruer complètement la propagation du champ électromagnétique à l'intérieur de la pièce.

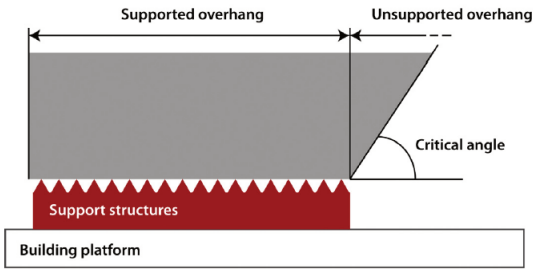

FIGURE 2.6 – Structures en porte-à-faux autosupportée et non supportée en fonction de l'angle critique formé avec le plateau de fabrication [6]

Troisièmement, le coût. Il est principalement lié à deux paramètres : le nombre de couches de poudre utilisé et la quantité de matériau consommée pour bâtir la pièce. Plus la pièce est volumineuse et occupe une hauteur importante dans la chambre de fabrication et plus le coût de réalisation est élevé. Le choix de l'orientation de la pièce dans la chambre de fabrication joue ainsi un rôle déterminant. Une étude menée par Tagore montre que le coût de fabrication peut varier de près de 50% en fonction de l'orientation de fabrication choisie [40].

2.1.5 Synthèse de la fabrication additive

Le procédé LBM est un procédé de fabrication additive qui permet de fusionner de multiples couches de poudre métallique à partir de l'énergie fournie par un laser. Les différents gradients thermiques générés conduisent à l'apparition de contraintes résiduelles, qu'il est possible de relaxer en post-traitement, mais surtout à des **déformations irréversibles** et une **dégradation de la qualité surfacique**. En fonction de la densité d'énergie apportée au lit de poudre et de l'**orientation de fabrication choisie au cours de la phase de conception**, la précision dimensionnelle peut alors varier de quelques dizaines à quelques centaines de microns tandis que l'état de surface, exprimé en R_a, se situe généralement entre 10 et 25 microns. Alors que les structures hyperfréquences exigent couramment une précision de quelques dizaines de microns et que les états de surfaces atteints par les procédés classiques sont de l'ordre du micron (en R_a), le procédé LBM affiche certaines limites dans ces domaines. Pour en évaluer les potentielles conséquences, la section suivante a pour but de présenter les performances atteintes par de telles structures fabriquées suivant ce même procédé.

2.2 Composants guidés hyperfréquences en fabrication additive

A partir des connaissances actuelles, de multiples industriels et institutions ont entrepris la fabrication de composants hyperfréquences à propagation guidée en fabrication additive. Le but de cette section est d'en présenter un état de l'art. Au préalable, le domaine hyperfréquences sera présenté succintement.

2.2.1 Caractéristiques de propagation guidée

2.2.1.1 Spectre hyperfréquence

Le terme d'hyperfréquence est couramment utilisé pour désigner une bande de fréquences appartenant à la gamme supérieure du spectre radio, tel que défini par la convention de l'Union Internationale des Télécommunications UIT [41]. Bien que l'étendue du domaine des hyperfréquences puisse prêter à contestation dans la littérature, nous le considèrerons étendu de 3 à 300 GHz [42]. Cela correspond à des ondes électromagnétiques dont la longueur d'onde λ (λ=c/f où c est la célérité de la lumière et f la fréquence) est de l'ordre de 10 cm à 1 mm et qui appartiennent aux plages SHF (*Super High Frequency*) et EHF (*Extremely High Frequency*) du spectre radio.

Bande	Abbréviation	Bande fréquence	Longueur d'onde
Extremely low	VLF	< 3 kHz	> 100 km
Very low	VLF	3 - 30 kHz	10 - 100 km
Low	LF	30 - 300 kHz	1 - 10 km
Medium	MF	300 - 3000 kHz	100 m - 1000 m
High	HF	3 to 30 MHz	10 - 100 m
Very high	VHF	30 - 300 MHz	1 - 10 m
Ultra high	UHF	300 - 3000 MHz	10 - 100 cm
Super high	**SHF**	**3 - 30 GHz**	**1 - 10 cm**
Extremely high	**EHF**	**30 - 300 GHz**	**1 - 10 mm**
Terahertz	THz	300 - 3000 GHz	< 1 mm

Table 2.1 – Bandes de fréquences du spectre radio selon l'UIT [41]

Ces plages sont subdivisées, selon la norme IEEE [43], en gammes de fréquences correspondant à des bandes standards d'utilisation. Dans le cadre de nos travaux de thèse et de ses applications pratiques, les bandes hyperfréquences majoritairement considérées seront les bandes K et Ka (λ_K~15 mm et λ_{K_a}~10 mm), utilisées pour les communications satellite (Table 2.2). Comme les autres bandes hyperfréquences, présente la caractéristique de ne pas être soumise au phénomène d'absorption [1] et pour laquelle l'atmosphère est totalement transparente au rayonnement.

1. Lorsque l'onde traverse la couche atmosphérique, elle entre en collision avec les molécules et les particules présentes dans l'atmosphère. Elle peut être déviée de sa trajectoire, c'est le phénomène de diffusion atmosphérique, ou bien être en totalité ou en partie absorbée. Dans ce dernier cas, il y a transfert d'énergie entre le rayonnement et les molécules avec lesquelles elle entre en collision. L'absorption de l'onde qui cède tout ou partie de son énergie conduit par conséquent à une atténuation du signal dans la direction de propagation de l'onde

L'emploi des hyperfréquences permet de faire face aux besoins croissants en canaux de télécommunications. Le débit d'information qui peut être transmis sur un canal étant directement proportionnel à la bande passante de celui-ci, un calcul simple montre que la bande qui s'étend de 3 GHz à 300 GHz permet d'acheminer 999 fois plus d'informations en un temps donné que toutes les bandes situées en dessous de 3 GHz [44]. Ainsi, les interférences entre les signaux hyperfréquences sont moins importantes que pour des gammes de fréquences plus faibles, où les plages sont surpeuplées. Cette propriété est directement liée à la fréquence du signal. Des quantités encore bien plus considérables d'informations pourraient, selon cet argument, être transmises à des fréquences encore supérieures telles que les bandes infrarouges.

Bande UIT	Bande IEEE	Bande fréquence (GHz)
SHF	S	2 - 4
	C	4 - 8
	X	8 - 12
	Ku	12 - 18
	K	18 - 27
	Ka	**27 - 30**
EHF	**Ka**	**30 - 40**
	V	40 - 75
	W	75 - 110
	G	110 - 300

Table 2.2 – Bandes de fréquence du spectre radio selon l'IEEE [43]

Les technologies hyperfréquences, à l'origine utilisées à des fins militaires (radar), sont de nos jours intégrées dans des applications civiles, et spécialement par la téléphonie cellulaire. Les communications demeurent le plus grand domaine d'application des hyperfréquences où, mis à part la téléphonie cellulaire et les communications satellites, on trouve les applications radio, de radiodiffusion (télévision), le Wi-Fi etc.

2.2.1.2 Propagation guidée

La propagation des ondes électromagnétiques peut généralement être classée selon deux catégories distinctes : la propagation guidée et la propagation non guidée. Dans le premier cas, les ondes sont transmises d'un point à un autre en suivant un chemin prescrit. Ces structures sont communément appelées guides d'ondes. Dans l'autre cas, les ondes sont rayonnées dans un espace complètement ouvert. Ces dispositifs sont appelés « structures à fuite » ou antennes.

La propagation guidée a subi un développement considérable ces dernières décennies. Outre les simples fils de cuivre, les câbles coaxiaux ou encore les tubes métalliques creux qui sont utilisés depuis de nombreuses années, de nouvelles technologies ont vu le jour, comme les circuits imprimés ou les populaires fibres optiques. Bien que la conception et les procédés de fabrication diffèrent, les objectifs restent identiques : transférer une information d'un bout à l'autre de la chaine avec les plus faibles atténuation et déformation du signal possibles.

Dans le cadre de ces travaux de thèse, nous nous intéresserons particulièrement aux structures à propagation guidée passives, assimilables à des tubes métalliques creux, pour

leurs excellentes performances électromagnétiques - capacité de puissance élevée, faibles pertes, robustesse et répétabilité - qui permettent ainsi une transmission de puissance *quasi-totale*.

2.2.1.3 Caractéristiques de la propagation guidée

On considèrera dans cette partie un guide d'onde à section rectangulaire dont le plus grand côté est noté a, et le petit b (Figure 2.7). Par convention, on choisit l'axe z selon la direction de propagation de l'onde. Nous supposerons également que le guide est un conducteur réel - de perméabilité magnétique μ, permittivité diélectrique ϵ et conducitivté électrique σ - et que le milieu dans lequel le champ électromagnétique se propage est l'air, considéré comme non magnétique, linéaire, homogène et isotrope.

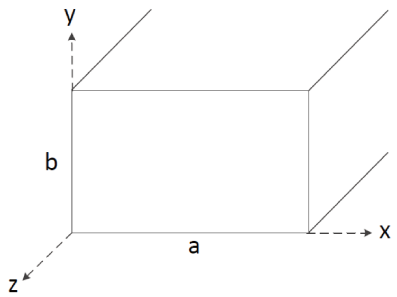

FIGURE 2.7 – Guide d'ondes rectangulaire de section ab

Les modes qui se propagent à l'intérieur de guides d'ondes (Figure 2.7) sont solutions des équations de Maxwell [45] lorsque les conditions aux limites appropriées y sont appliquées. En général, trois modes de propagation peuvent exister dans une ligne de transmission, d'après les représentations des champs électriques et magnétiques : les modes TE, TM et TEM. Dans le cas du mode TE (Transverse Electrique), il n'existe aucun champ électrique $\overrightarrow{E}$ dans la direction de propagation de l'onde ; alors que le mode TM (Transverse Magnétique) implique inversement qu'aucun champ magnétique $\overrightarrow{H}$ n'existe dans cette même direction. Dans le cas particulier des guides d'ondes rectangulaires, le mode TEM (Transverse ElectroMagnétique, c'est-à-dire à la fois TE et TM) ne peut se propager.

Après résolution des équations de Maxwell pour le mode TE (E_z=0), il apparait que les composantes du champ $\overrightarrow{H}$ suivent une variation sinusoïdale :

$$H_x \propto \sin\frac{m\pi x}{a}\cos\frac{n\pi y}{b} \tag{2.3}$$

$$H_y \propto \cos\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b} \tag{2.4}$$

$$H_z \propto \cos\frac{m\pi x}{a}\cos\frac{n\pi y}{b} \tag{2.5}$$

On pourrait également montrer que les composantes du champ $\overrightarrow{E}$ suivent les mêmes variations, en cela que les deux champs sont liés.

Dans les expressions précédentes, les composantes des champs montrent une dépendance aux entiers naturels m et n. Ces nombres peuvent prendre n'importe quelle valeur supérieure ou égale à 0, à la seule condition qu'ils ne soient pas nuls simultanément. Il existe alors une infinité de solutions aux équations de Maxwell. Chaque paire (m,n) considérée décrit un mode, c'est-à-dire une forme particulière de transmission de l'énergie

électromagnétique à l'intérieur du guide d'onde. De tels modes sont notés $TE_{m,n}$, où m et n correspondent au nombre de demi longueur d'onde qui s'établit sur les longueurs a et b du guide, respectivement.

Les résultats pour les modes TM (H_z=0) sont analogues. Les composantes du champ $\overrightarrow{E}$ varient de manière sinusoïdale, tout comme celles du champ $\overrightarrow{H}$. Ces modes sont notés $TM_{m,n}$, où m n sont deux entiers naturels qui ne peuvent être nuls simultanément.

$$E_x \propto \cos\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b} \tag{2.6}$$

$$E_y \propto \sin\frac{m\pi x}{a}\cos\frac{n\pi y}{b} \tag{2.7}$$

$$E_z \propto \sin\frac{m\pi x}{a}\sin\frac{n\pi y}{b} \tag{2.8}$$

Les modes TE_{mn} et TM_{mn} sont donc les seuls modes susceptibles de pouvoir se propager dans une guide d'onde qui agit fréquentiellement comme un filtre passe-haut : seules les ondes dont la fréquence est supérieure à une fréquence caractéristique f_c (appelée fréquence de coupure) se propagent, tandis que les ondes de fréquence inférieure sont atténuées. Pour résumer, une onde peut se propager dans un guide selon les modes TE_{mn} et TM_{mn} si et seulement si sa fréquence f dans l'espace libre est supérieure à la fréquence de coupure $f_{c,mn}$ soit :

$$f \geq f_{c,mn} = \frac{c}{2}\sqrt{\left(\frac{m\pi}{a}\right)^2 + \left(\frac{n\pi}{b}\right)^2} \tag{2.9}$$

où c est la célérité de la lumière.

En dessous de cette fréquence, qui dépend du matériau diélectrique, des dimensions a et b et du mode de propagation considéré, aucune énergie électromagnétique ne se propage. Le premier mode à pouvoir se propager est celui pour lequel la fréquence de coupure est la plus basse : c'est le mode fondamental (ou dominant). Dès lors que la fréquence augmente et devient légèrement supérieure à la deuxième fréquence de coupure, plusieurs modes se propagent à l'intérieur du guide d'onde, avec des vitesses de propagation différentes. Ce régime est nommé multimodes et induit une distorsion du signal en fonction du temps : le milieu est dispersif. Pour éviter une telle déformation, il est donc nécessaire de dimensionner le guide en régime monomode, où seul le mode fondamental se propage.

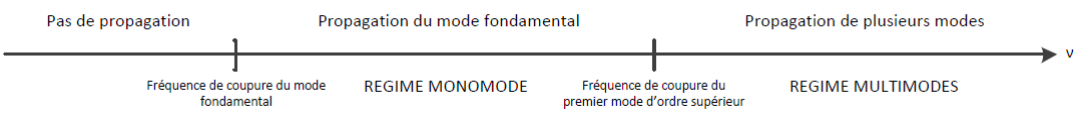

FIGURE 2.8 – Mode de propagation selon la fréquence utilisée

Pour que le régime monomode soit le plus stable possible, il convient d'avoir une fréquence de coupure du premier mode d'ordre supérieur la plus élevée possible. Les fréquences de coupure étant fonction des dimensions a et b du guide, la bande utilisable en régime monomode est nettement plus large pour un guide rectangulaire pour lequel a $\geq$ 2b. Pour optimiser la taille du guide lors du dimensionnement, il est d'usage de considérer une section pour laquelle a = 2b. Dans la pratique, les guides d'ondes ne sont pas dimensionnés spécialement pour chaque application. Il existe des normes dimensionnelles

définies en fonction de la bande passante opérationnelle (Table 2.3). Les normes EIA (norme américaine) et RCSC (norme britannique) sont les plus largement employées.

Norme EIA	Norme RCSC	Bande passante (GHz)	Dimensions (inches)
WR42	WG19	15,0 - 22,0	0,510 - 0,255
WR51	WG20	18,0 - 26,5	0,420 x 0,170
WR28	WG22	26,5 - 40,0	0,280 x 0,140
WR22	WG23	33 - 50	0,224 x 0,112

Table 2.3 – Dimensions de guides d'ondes rectangulaire en fonction de la bande passante en régime monomode pour la bande Ka

Pour finir, il est important de mentionner les phénomènes d'atténuation, c'est-à-dire les pertes par transmission, qui se produisent lors de la propagation du courant électrique. En dessous de la fréquence de coupure, les modes ne sont pas aptes à se propager puisqu'ils sont évanescents. Au-delà de la fréquence de coupure, l'atténuation est la conséquence de la conductivité électrique finie du matériau conducteur, σ. On pourrait montrer que la densité de courant électrique j dans un conducteur décroit exponentiellement à partir de sa valeur j_s en surface :

$$j = j_s \, e^{-\frac{z}{\delta}} \qquad A/m^2 \tag{2.10}$$

où z est la profondeur mesurée à partir de la surface à l'intérieur du conducteur et δ est appelée épaisseur de peau, définie comme l'épaisseur de pénétration au-delà de laquelle la densité de courant électrique chute d'un facteur 1/e (environ 0.63) par rapport à sa valeur en surface j_s (figure 2.9). Elle peut-être approximée suivant la formule :

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu \sigma}} \qquad m \tag{2.11}$$

où ω est la pulsation de l'onde telle que ω=2πf.

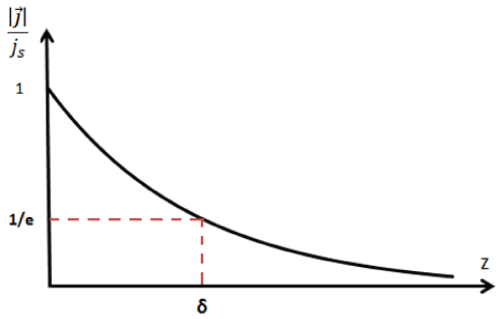

Figure 2.9 – Densité du courant électrique en fonction de sa profondeur de pénétration à l'intérieur des parois conductrices

L'effet de peau est la tendance d'un courant électrique à se répartir dans un conducteur, de sorte que sa densité est plus élevée en surface. Le courant électrique circule principalement au niveau de la « peau » du conducteur, entre la surface extérieure et un niveau appelé « profondeur de peau ». Plus les fréquences sont élevées et la conductivité du matériau est grande, et plus δ diminue, provoquant une augmentation de la résistance effective du conducteur et réduisant ainsi la section efficace traversée par le courant. Toutefois, il

est important de signaler que cette épaisseur n'est pas une limite absolue, mais plutôt une approximation indiquant que la majorité de la densité de courant s'y propage. Une faible intensité de courant parcourt toujours le reste du conducteur. A titre d'exemple, à 20 GHz, un guide d'ondes induit une épaisseur de peau de l'ordre de 0.5 micromètre pour un alliage d'aluminium, contre 2.5 micromètres pour un alliage de titane.

L'atténuation des champs dans un conducteur réel due à l'apparition de l'épaisseur de peau entraine des pertes de puissance lors de la propagation du mode fondamental, sous forme d'effet Joule. La constante d'atténuation α_c pour le mode fondamental TE_{10} vaut :

$$\alpha_{c,TE10} = 8,668\frac{R_s}{b\eta}\frac{1+\frac{2b}{a}\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \qquad dB/m \tag{2.12}$$

où R_s=$\sqrt{\frac{\pi\mu f}{\sigma}}$ est la résistance surfacique du conducteur et η=$\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}$.

Comme pour l'épaisseur de peau, l'atténuation est inversement proportionnelle à la conductivité σ du matériau dans lequel se déplace le courant électrique. Pour des matériaux peu conducteurs, comme le titane Ti6Al4V, le courant se déplace à l'intérieur des parois sur une large épaisseur de peau, conduisant à une forte atténuation des champs et donc, d'importantes pertes. Pour s'en prémunir, il est courant de métalliser les surfaces peu conductrices sur quelques micromètres avec un autre matériau très conducteur, comme l'argent ou l'or. Le courant électrique se propagera à l'intérieur de cette nouvelle couche très conductrice, sur une plus faible épaisseur de peau et réduira ainsi les pertes engendrées lors de la propagation.

2.2.1.4 Moyens de caractérisation des pertes

La caractérisation des propriétés de propagation se fait par la mesure des paramètres-S. Les paramètres-S (de l'anglais Scattering parameters) sont utilisés dans le domaine des hyperfréquences pour caractériser expérimentalement le comportement électrique de lignes de transmission en fonction des signaux d'entrée. Ils permettent d'évaluer les pertes de puissance d'un signal lors de son passage dans une ligne de transmission. Les paramètres classiques (impédance, admittance, transmittance) de caractérisation nécessitent la réalisation de court-circuit ou de circuit ouvert pour les déterminer, ce qui n'est pas possible à de très hautes fréquences. Pour ce faire, il est préférable de réaliser les mesures avec des quadripôles adaptés à une résistance de normalisation (ici 50Ω).

Lorsque l'on envoie une onde de puissance a_1 à l'entrée du port 1 d'un quadripôle – l'entrée du port 2 étant fermée par une résistance de normalisation - une partie b_1 est réfléchie et une partie b_2 est transmise (Figure 2.10). Pour caractériser la répartition de l'onde incidente entre ondes réfléchie et transmise qui dépend de nombreux paramètres (géométrie, matériau, qualité surfacique, etc.), on introduit les paramètres S_{ij} – où i correspond au port de l'onde transmise et j au port de l'onde incidente. Ainsi, l'équation devient :

$$b_1 = S_{11}a_1 + S_{21}a_2 \tag{2.13}$$

De la même manière, lorsqu'un signal est envoyé à l'entrée du port 2 – l'entrée du port 1 étant fermée – on peut écrire :

$$b_2 = S_{22}a_2 + S_{12}a_1 \tag{2.14}$$

On définit alors la matrice S par :

$$\begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \end{bmatrix} \tag{2.15}$$

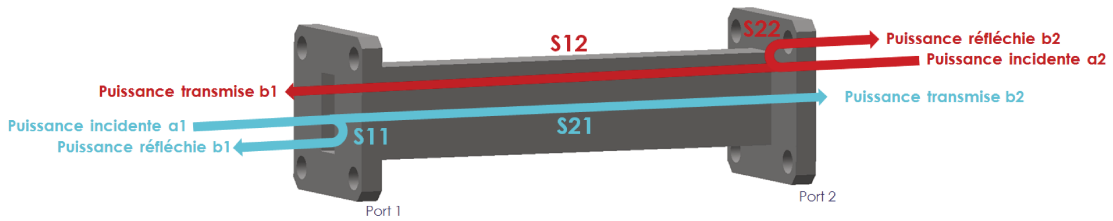

FIGURE 2.10 – Représentation des ondes incidentes a_i et réfléchies b_i aux ports d'un guide d'ondes

Pertes d'adaptation. Les paramètres Sii correspondent aux coefficients de réflexion mesurés sur le port i lorsque tous les autres ports sont terminés par des charges adaptées. Ils sont négatifs, d'après la convention de signe utilisée pour le courant, et compris entre 0 et 1. Ils s'écrivent :

$$S_{ii} = \frac{b_i}{a_i} \tag{2.16}$$

Si S_{ii}=0, alors toute la puissance est réfléchie par le quadripôle et rien n'est rayonné. Lorsque S_{ii}<0, cela signifie qu'une partie du signal est transmise : elle est soit rayonnée, soit absorbée par des pertes au sein du quadripôle (pertes par transmission). Le coefficient de réflexion S_{ii} ne permet pas d'obtenir cette information, seule la détermination des coefficients de transmission $S_{ij,i\neq j}$ l'autorise.

Le *return loss* ou *pertes d'adaptation*, représente la quantité de puissance réfléchie par un quadripôle, plutôt liée à des considérations géométriques (mauvais alignement aux interfaces, écart dimensionnel, etc.). Mathématiquement, c'est le ratio de la puissance réfléchie par le quadripôle, bi, et de la puissance incidente, ai.

$$Return\,loss\,(dB) = 10\,log_{10}\left|\frac{b_i}{a_i}\right| = 10\,log_{10}\,|S_{ii}| \tag{2.17}$$

$|S_{ij}|$ étant compris entre 0 et 1, le logarithme est donc négatif. Ainsi, **plus la valeur en dB des pertes d'adaptation est faible et plus la réflexion le sera également**.

Pertes par transmission. Les paramètres S_{ij} correspondent au coefficient de transmission entre le port i et le port j lorsque tous les autres ports sont terminés par des charges adaptées. Ils sont négatifs et compris entre 0 et 1. Ils sont définis par :

$$S_{ij} = \left.\frac{b_i}{a_j}\right|_{i\neq j} \tag{2.18}$$

Si S_{ij}=0, cela signifie qu'aucune partie de l'onde de puissance n'est transmise au port i. Cela n'est pas nécessairement dû à une réflexion totale au port j (S_{jj}=0), mais peut provenir des pertes (ohmiques, diélectriques, etc.) qui se produisent à l'intérieur du quadripôle. En considérant les pertes dans le quadripôle PQ, l'équation devient :

$$a_1 = S_{11}b_1 + S_{21}b_2 + PQ \tag{2.19}$$

Lorsque S_{ij}<0, une partie de l'onde de puissance émise au port i est donc transmise au port j.

L'*insertion loss* ou *pertes par transmission*, est le ratio de la puissance transmise par la ligne de transmission, b_i, et de la puissance incidente a_j. Il permet de quantifier les pertes PQ dans le quadripôle lorsque la mesure de puissance de l'onde réfléchie a été effectuée au préalable. Elles correspondent au coefficient d'**atténuation** exprimé dans l'équation 2.12.

$$Transmission\,loss\,(dB) = 10\,log_{10}\left|\frac{b_i}{a_j}\right| = 10\,log_{10}\,|S_{ij}| \tag{2.20}$$

$|S_{ij}|$ étant compris entre 0 et 1, le logarithme est donc négatif. Ainsi, **plus la valeur en dB de l'« insertion loss » tend vers 0, et plus la transmission du quadripôle est de qualité**. Egalement, il est habituel de parler d'« insertion loss » pour le paramètre S_{ij} et inversement.

2.2.2 Composants hyperfréquences réalisés en fabrication additive

Compte tenu des avantages que présente la fabrication additive pour les composants hyperfréquences énumérés dans la section 1.2.2 (suppression d'assemblage, liberté géométrique, intégration multifonctionnelle), de nombreuses recherches ont été effectuées pour évaluer les performances électromagnétiques des composants guidés passifs hyperfréquences issus de fabrication additive.

2.2.2.1 Fonctions élémentaires à géométries classiques

Dans un premier temps, les études se sont portées sur des fonctions élémentaires à géométries classiques, c'est-à-dire telle qu'elles sont conçues pour les procédés conventionnels de fabrication (usinage, moulage). Les guides d'ondes rectangulaires (figure 2.11), géométrie somme toute la plus simple des fonctions élémentaires passives, ont fait l'objet des premières investigations. Des mesures réalisées sur des alliages d'aluminium AlSi7Mg0.6 et de titane Ti6Al4V montrent que les pertes à l'intérieur du guide sont doubles par rapport aux simulations de la bande X [8-12] GHz à la bande Ka [27-40] GHz [46, 47] et quadruples à des fréquences encore plus élevées, pour un alliage de cuivre $CuSn_{15}$, par rapport aux pertes établies sur des guides usinés en bande V [40-75] GHz [48].

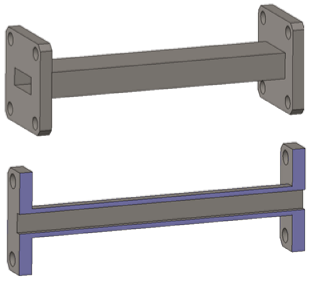

FIGURE 2.11 – Guide d'onde rectangulaire en bande K couramment conçu pour l'usinage

Par la suite, les recherches se sont portées sur des structures semblables aux guides d'ondes, mais plus complexes et bien plus sensibles : les filtres (figure 2.12). Les filtres sont un type de guides d'ondes permettant de réaliser une fonction de filtrage de bande de fréquence. Avec l'utilisation de cette fonction, on donne la capacité à un guide d'onde de ne laisser passer le signal que dans une certaine bande de fréquence, encore plus faible

que la bande passante du régime monomode induite par les dimensions du guide. Dans le contexte des communications par satellite, pour éviter que le récepteur ne soit perturbé par les signaux émis par d'autres systèmes, on utilise des filtres, notamment en guide, de sorte que les signaux traités par le récepteur satellite soient principalement ceux de la bande de fréquence opérationnelle. En émission, le filtrage permet quant à lui de n'émettre des informations que dans la bande utile et d'éviter de perturber les récepteurs dans les autres bandes. Pour réaliser de tels filtrages, des discontinuités sont placées et dimensionnées très précisément à l'intérieur du guide de manière à créer des cavités résonantes (figure 2.12). S'instaurent alors des phénomènes de couplage entre les différentes cavités qui, en fonction de leur taille, influent sur les fréquences filtrées.

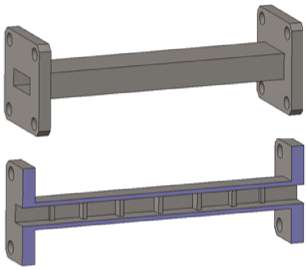

FIGURE 2.12 – Filtre à iris du 6e ordre en bande K couramment conçu pour l'usinage

Les études de filtres rectangulaires ont porté sur des alliages d'aluminium AlSi10Mg0.6 et AlSi7Mg0.6 comme de titane Ti6Al4V. Ici encore, les pertes observées varient d'un facteur deux à un facteur quatre [47, 48] entre les bandes X (8-12 GHz) et E (60-90 GHz). D'autre part, la sélectivité des filtres (c'est-à-dire la bande passante) a été réduite, avec des diminutions entre 20 et 50% et des décalages de 0,15 GHz à 4 GHz de la bande passante pour ces mêmes bandes [47, 49–51] par rapport aux simulations. Pour ce type de fonction, la précision dimensionnelle du procédé est fréquemment citée comme responsable, les cavités résonnates nécessitant en général des précisions de l'ordre de quelques dizaines de micromètres pour ces géométries.

D'autres fonctions élémentaires, telles que l'orthomode et le duplexeur ont fait l'objet de mesures [46, 52] et présentent des conclusions similaires aux fonctions passives élémentaires précédemment évoquées.

Finalement, l'ensemble de ces études peut se résumer par des décalages de fréquence pour les fonctions filtrantes et des pertes supérieures aux valeurs théoriques quel que soit le type de composant, plus ou moins importantes selon la bande de fréquence utilisée. Pour tenter d'expliquer ces résultats, de nombreux facteurs - plus ou moins vérifiés - sont évoqués. Parmi eux, l'état de surface est largement mis en cause, son influence sur les pertes supplémentaires engendrées semble être tout particulièrement partagé par l'ensemble de la communauté [4, 47, 50, 51, 53].

Etat de surface. D'un point de vue pratique, Lorente et al. [50] ont constaté une convergence des mesures réelles et des simulations, lorsque ces dernières étaient réalisées en y intégrant l'état de surface relevé sur les pièces fabriquées. Par la suite, un traitement de polissage a permis aux performances mesurées de tendre vers celles prédites initialement par simulation sur surfaces *parfaites*. De leur côté, Tchoffo et Turpault [47] ont effectué des

attaques chimiques sur des guides d'ondes depuis la bande X à la bande Ka, qui ont permis de diminuer les pertes en transmission par rapport à celles mesurées avant traitement. Zhang et al. [48] ont relevé une aggravation des pertes à mesure que la rugosité arithmétique mesurée augmentait. Wang [54] et Braunisch [55] ont montré qu'un état de surface dégradé entrainait une diminution de la conductivité électrique sur la surface considérée. De fait, la résistance surfacique R_s croît, ce qui a pour conséquence une augmentation de l'atténuation des champs dans un conducteur réel (equation 2.12). D'autre part, la résistance surfacique étant proportionnelle à la pulsation ω et donc à la fréquence f, cette atténuation est d'autant plus importante que la fréquence d'utilisation est élevée (et la longueur d'onde faible), ce qui correspond aux constatations des différentes études menées dans la littérature.

D'un point de vue théorique, la plupart des modèles existants pour caractériser l'influence de l'état de surface portent sur la conductivité électrique [7, 56–58]. Précisémment, les pertes induites sont indirectement liées à l'état de surface à travers une diminution de la conductivité réelle de la surface conductrice :

$$\sigma_{théorique} = K\ \sigma_{réelle} \tag{2.21}$$

où K est un coefficient de correction supérieur ou égal à 1 dépendant de l'état de surface du matériau conducteur.
Par exemple, Morgan [56] a défini ce paramètre K suivant la moyenne quadratique de rugosité R_q et l'épaisseur de peau δ, tel que :

$$K = \left[1 + \frac{2}{\pi}\ arctan\left[1,4\left(\frac{R_q}{\delta}\right)^2\right]\right] \tag{2.22}$$

Cependant, ce modèle sature lorsque le rapport R_q/δ devient environ supérieur à 5. Cela signifie par exemple qu'à 20 GHz pour un alliage d'aluminium ($\delta \sim 0.5$ micron), le modèle ne considère plus les évolutions de R_q au-delà de 2.5 microns ; alors que la fabrication additive présente fréquemment des valeurs supérieures à 15 microns pour ce paramètre. Hall et al. [57] ont modélisé la surface par des hémisphères accrochés sur la surface lisse d'une surface conductrice. Ici encore, l'étude se base sur le paramètre R_q et se limite à des fréquences inférieures à 30 GHz. Enfin, le modèle «boule de neige» de Huray [7], sur la base d'un calcul analytique de la perte supplémentaire due à la présence de sphères empilées (figure 2.13) - modèle proche du profil surfacique observé en fabrication additive par fusion laser sur lit de poudre - amène également à un coefficient de correction. Les paramètres requis pour ce modèle sont les diamètres et la densité des sphères, difficilement quantifiables par la mesure.

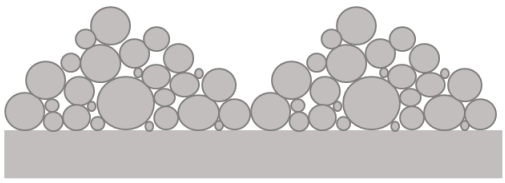

FIGURE 2.13 – Modèle boule de neige d'après [7]

D'un point de vue phénoménologique, Hammerstad et Jenser [58] tout comme Groiss et al. [59], relient l'augmentation des pertes linéiques observées sur un conducteur rugueux au

fait que le courant, qui se déplace en surface du conducteur sur l'épaisseur de peau, doive suivre le profil surfacique déformé, causant une *indirection* du courant et une augmentation de la longueur qu'il parcourt (via les variations d'amplitude). Les pertes étant linéiques, plus le profil sera déformé et plus le trajet du courant sera allongé ce qui induira une inflation des pertes (équation 2.12).

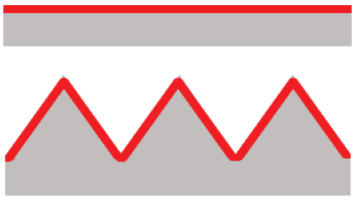

FIGURE 2.14 – Représentation du déplacement du courant électrique en surface du conducteur sur l'épaisseur de peau : (en haut) pour une surface lisse, (en bas) pour une surface rugueuse

Ces différents résultats et interprétations concernant l'influence de l'état de surface sur les propriétés propagatoires de puissance, montrent qu'une dégradation de la qualité surfacique provoque une augmentation des pertes, soit à travers une augmentation de la longueur de propagation du courant électrique, soit indirectement à travers une baisse de la conductivité électrique. Malgré tout, les modèles développés ne permettent pas, dans le cas de la fabrication additive, d'obtenir des résultats théoriques exploitables qui permettraient d'évaluer le degré d'influence de l'état de surface sur les résultats électromagnétiques obtenus et ce, pour les raisons suivantes :

1. Les modèles de conductivité sont basés sur le caractère homogène de l'état de surface. Or, nous avons vu dans la section 2.1.1 que les états de surface générés par le procédé de fusion laser sur lit de poudre dépendaient fortement de l'orientation de fabrication et des phénomènes thermiques. Si l'on souhaitait appliquer un des modèles à un guide rectangulaire, quelle serait alors la valeur d'état de surface à considérer ?
2. Le paramètre utilisé pour caractériser la qualité surfacique varie d'une étude à l'autre : tantôt le R_q, tantôt le R_a. Ces paramètres sont-ils pertinents pour qualifier le profil d'une surface issue de fabrication additive ?
3. Les particules du lit de poudre *collées* en surface, qui apportent un caractère singulier à l'état de surface, ont-elle une influence sur les pertes ? et lorsqu'elles sont *fusionnées* à la surface ?

Quoi qu'il en soit, les principaux intérêts de la fabrication additive identifiés pour les composants hyperfréquences dans la section 1.2.2 (assemblage, liberté géométrique et intégration multifonctionnelle) ne sont pas exploités dans ces études, qui se concentrent exclusivement sur des géométries classiques. Les spécificités du procédé ne sont pas considérées en phase de conception, ce qui pourrait justifier, totalement ou en partie, les résultats propres à ces géométries relatés dans la littérature.

2.2.2.2 Fonctions élémentaires à géométries optimisées

Quelques études se sont ainsi orientées vers la recherche de géométries optimisées, soit en cherchant à accroitre les performances électromagnétiques en mettant à profit les capacités de la fabrication additive - et qui seraient extrêmement difficiles à réaliser par des

techniques classiques - soit en adaptant les géométries aux contraintes du procédé.

Sur ce premier point, Booth et al. [4] se sont penchés sur la forme des cavités résonnantes, par comparaison avec les performances atteintes par un résonateur rectangulaire classique. L'investigation est poussée à une forme super-ellipsoidale qui permet aux structures de couplage d'être plus compactes. Basé sur trois résonateurs super-ellipsoidaux à dépression, un filtre en bande Ku [12-18 GHz] a été réalisé en alliage d'aluminium AlSi10Mg0.6, puis argenté. Un décalage de 25 MHz ainsi qu'une réduction de 10 MHz de la bande passante ont été relevés. La qualité du filtre finalement obtenu est comparable à celle d'un guide d'onde rectangulaire conventionnel analogue. Pour finir, un filtre comportant 5 résonateurs du même type (Figure 2.15) et argenté a montré une légère augmentation des pertes en transmission conformément à la simulation, mais une qualité de sélectivité accrue, ce qui représente une amélioration par rapport aux conceptions de filtres classiques.

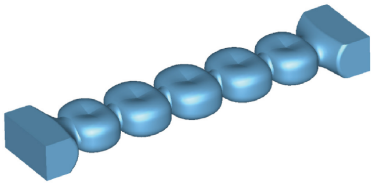

FIGURE 2.15 – Filtre Rx du 5e ordre en bande Ku conçu pour la fabrication additive [4]

Dans l'optique d'améliorer les performances des filtres classiques, Lorente et al. [50] ont également procédé à une optimisation de la forme des résonateurs (figure 2.16). La qualité de sélectivité du filtre a été considérablement augmentée théoriquement. Après fabrication et polissage, les pertes en transmission ont été largement réduites par rapport à la forme rectangulaire, mais le décalage en fréquence observé plus important en raison de la précision dimensionnelle du procédé.

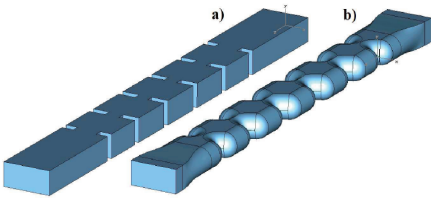

FIGURE 2.16 – Filtre Rx du 5e ordre en bande X : (a) rectangulaire classique (b) pour la fabrication additive [50]

Sur le second point, Peverini et al. [60] ont orienté leurs recherches géométriques vers des conceptions adaptées aux contraintes induites par le procédé (orientation des surfaces, optimisation des paramètres laser) en gardant la forme rectangulaire classique. Pour éviter d'incliner le filtre lors de la fabrication de manière à autosupporter l'intérieur du canal de propagation et d'obtenir des états de surfaces dégradés (upskin/downskin), les cavités résonantes en épi ont remplacé les cavités orthogonales pour garantir une fabrication du filtre à la verticale. Un très léger décalage de fréquence, néanmoins réduit par rapport à la forme classique, est observé. Quant aux pertes, elles semblent identiques entre les deux géométries et conformes aux simulations. Le traitement de surface appliqué permet de les réduire de moitié.

En résumé, bien que les qualités théoriques soient augmentées avec ces nouvelles géo-

métries, des décalages de fréquence et une augmentation globale des pertes sont encore relevés par rapport aux simulations, mais dans une moindre mesure. Sur les trois avantages identifiés pour les hyperfréquences, la liberté géométrique est exploitée dans ces nouvelles études. Cela semble montrer qu'une partie des pertes et des décalages induits peuvent être compensés par la conception mais que les contraintes de fabrication ne sont pas toujours assez contrôlées.

2.2.2.3 Systèmes complexes hyperfréquences

Au-délà de la création d'une pièce monolithique à partir de trois composants élémentaires (filtre, twist et virage) en supprimant uniquement les interfaces, Peverini et al. [61] se sont attachés à réduire la longueur de la pièce en procédant à une intégration multifonctionnelle. Les trois fonctions élémentaires sont alors regroupées sous la coupe d'un seul et unique composant (Figure 2.17.b). Suite à une optimisation de la géométrie (rayon de courbure, cavités résonantes), les performances électromagnétiques présentent des capacités accrues, avec en particulier des pertes en transmission divisées par deux, ainsi que des réductions de la masse et du volume de l'ordre de 60 à 70%. Les mesures effectuées sur des réalisations en AlSi10Mg0.6 ont permis de constater un très bon accord avec les simulations.

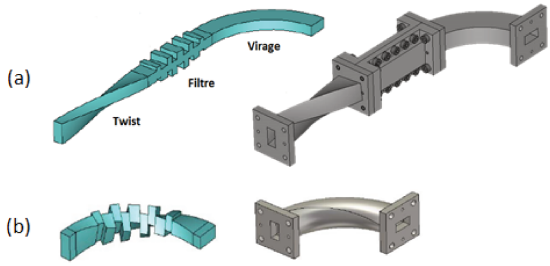

FIGURE 2.17 – Conception d'une pièce comportant les fonctions de filtrage, virage et twist : (a) la version usinée (b) la version pour la fabrication additive [61]

Finalement, un projet de démonstration de pièce d'essai impliquant une reconception complète d'un réseau d'antennes de suivi directionnel à large bande pour les avions (connu sous le nom de matrice monopulse 4x4 de la bande Ka) a été présenté par l'entreprise Optisys (Figure 2.18). Ce travail de reconception pour la fabrication additive a permis de passer d'un assemblage discret de 100 pièces à une seule et unique pièce complexe remplie de cavités et intégrant des structures organiques à sa base. Conséquence directe de la suppression des multiples interfaces, ajoutée à la réduction drastique de la longueur de propagation grâce à la fabrication additive, les pertes en transmission ont été largement réduites et ce, malgré des états de surfaces dégradés. Les performances électromagnétiques deviennent alors équivalentes voire meilleures que celles obtenues par assemblage conventionnel. Surtout, la masse a été réduite de 95%, le temps de fabrication diminué par 5 et les coûts de production réduits de 20-25%.

On observe dans ces deux études des performances électromagnétiques comparables aux simulations et surtout, à celles de pièces réalisées par les procédés conventionnels. Malgré des états de surface dégradés et des tolérances dimensionnelles plus grandes, il semblerait que les opportunités de conception apportées par la fabrication additive et identifiées dans la section 1.2.2 parviennent à les compenser ; mais également à réduire significativement les volumes, masses, temps de fabrication et coût de production de pièces hyperfréquences.

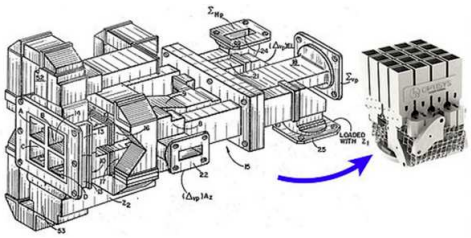

FIGURE 2.18 – Conception d'une antenne monopulse 4x4 en bande Ka : la conception pour l'usinage à gauche, pour la fabrication additive à droite

2.2.3 Synthèse des composants guidés hyperfréquences réalisés en fabrication additive

Les études concernant la réalisation de pièces hyperfréquences en fabrication additive ont mis en valeur certaines limites du procédé vis-à-vis de la propagation d'ondes. **L'état de surface semble dégrader les performances électromagnétiques d'autant plus que la fréquence d'utilisation est élevée**. Seulement, il n'est pas possible de déterminer son degré d'influence réel sur les pièces puisque les **modèles théoriques existants ne s'accomodent pas particulièrement aux profils surfaciques réels** issus de fabrication additive. Alors que la paramétrie de la machine (puissance laser, vitesse de balayage, etc.) peut être révisée pour réduire ces défauts - jusqu'à une certaine limite néanmoins - ces limitations, dépendantes également de paramètres de conception, ne sont **pas toujours pleinement intégrées** en phase de conception, ce qui expliquerait en partie les performances observées. La technologie étant relativement récente, les concepteurs n'en connaissent pas toujours les spécificités en relation avec les propriétés de propagation.

Or, il a été constaté qu'en tirant **profit des atouts de la fabrication additive** lors de la phase de conception, notamment sur la notion de suppression d'assemblage, de complexité géométrique et d'intrégation multifonctionnelle, les limites du procédé parvenaient à être **contrepesées**, débouchant sur des géométries dont les performances électromagnétiques sont à la fois améliorées, convergentes avec les simulations et comparables à celles obtenues par des moyens classiques de fabrication. Seulement, l'une des principales difficultés dans le domaine hyperfréquences réside dans l'impossibilité d'aboutir, à partir des équations de Maxwell, à *la* forme géométrique optimale pour la propagation, le filtrage ou la polarisation des ondes. Au contraire, la théorie électromagnétique permet uniquement de décrire le comportement du champ électromagnétique depuis une géométrie donnée.

Pour intégrer au maximum les particularités de la technologie, il est donc important d'inscrire le processus de conception dans un **contexte méthodologique** dont le but est de fournir au concepteur une trame à suivre, en indiquant les étapes décisionnelles, les outils à utiliser et à quel moment. Comparativement aux procédés classiques, les méthodes de type *Design for Additive Manufacturing* sont aujourd'hui peu nombreuses mais apparaissent indispensables compte tenu des résultats constatés. A notre connaissance, **il n'existe aucune méthode de conception pour la fabrication additive appliquée aux composants hyperfréquences**. La partie suivante a pour objectif de présenter les travaux portant sur les différentes démarches de *Design for Additive Manufacturing* existantes ainsi que, selon nous, leurs principales limites.

2.3 Méthodes de conception pour la fabrication additive

Dans cette section, les différentes approches de conception liées à la fabrication additive, les méthodes de type *Design for Additive Manufacturing* sont introduites. Nous nous appuierons sur la classification de Laverne et al. [62] qui recensent 2 catégories : les méthodes de type contrainte et celles de type opportunité.

2.3.1 Méthodes de type contrainte

Pour prendre en compte les opportunités et limites induites par les technologies additives, des *design guidelines* et des *design rules* ont été établies pour accompagner les concepteurs dans leurs prises de décisions. Ces méthodes générales sont pour la plupart qualitatives et nécessitent une interprétation spécifique pour chaque cas d'étude.

2.3.1.1 Règles de conception

Les *design guidelines* s'intègrent dans une philosophie générale de conception pour les technologies additives. Elles sont facilement compréhensibles par les concepteurs, mais demeurent très génériques. Becker [63] et Atzeni [64] proposent les lignes directrices majeures pour la conception de pièces en fabrication additive telles que « *ne pas fabriquer les mêmes pièces que celles conçues pour les processus conventionnels de fabrication* », « *ne pas penser à l'outillage* » ou encore « *ne pas considérer les principes de conception mécaniques traditionnels* ». D'autres travaux, menés par Teitelbaum [65], ont établi huit directives permettant de réduire le temps de fabrication et le volume de matériau utilisé grâce, par exemple, à la minimisation de la hauteur ou une rotation de 45 degrés de la pièce sur le plateau de fabrication. Filippi et Cristofolini [66] ont également réalisé des études s'inscrivant dans la même philosophie. Seulement, ces *design guidelines* ne prennent en compte ni les spécificités liées au processus de fabrication utilisé ni celles du domaine d'application, ce qui ne garantit pas, *in fine*, la fabricabilité et la qualité de la pièce.

2.3.1.2 Règles de fabrication

Au contraire, les *design rules*, s'inscrivent dans une philosophie plus spécifique, en fournissant une aide à la conception par identification des limites des procédés additifs. Emmelmann [67], Krantz [68] et Thomas [69] ont étudié les limitations géométriques (taille des trous, épaisseur des murs, orientation de fabrication, etc.) du procédé LBM et proposent des catalogues suggérant pour chaque élément les cas les plus favorables et défavorables. Seulement, l'ensemble de ces travaux a été réalisé pour un procédé additif précis, avec des matériaux précis, sans objectif défini d'optimisation, ainsi que des machines et des paramètres de fabrication précis ce qui, par conséquent, limite fortement leur application transversale. Bien qu'utiles dans certaines approches, elles demandent d'être actualisées constamment en fonction du matériel utilisé pour la fabrication.

Il existe également deux autres approches : l'optimisation paramétrique et l'optimisation de forme. La première s'effectue à partir d'une structure existante de la pièce et contribue à modifier la forme en se basant sur différents paramètres tels que l'épaisseur, la courbure etc. [70]. Ainsi, la géométrie obtenue après optimisation est très peu différente de la géométrie initiale. Dans un même degré de similitudes, l'optimisation de forme cherche à améliorer les contours de la pièce, en générant des formes plus complexes, mais sans en changer réellement la topologie globale.

Dans les faits, ces différentes approches ne constituent qu'une aide pour tenter d'optimiser une géométrie déjà déterminée, en vue de sa fabrication en technologie additive. Elles n'ont donc pas vocation à concevoir ou à reconcevoir, sinon à optimiser une géométrie souvent conçue, par inertie psychologique, pour les procédés conventionnels de fabrication. En aucun cas, elles ne permettent de tirer pleinement profit des opportunités offertes par la fabrication additive en amont de la conception. Elles ne constituent pas une méthode qui puisse, à partir du cahier des charges, aboutir à une pièce conçue strictement *pour* la fabrication additive et dont la forme est très loin du cadre cognitif des concepteurs. Toutefois, d'après Ponche [71], il pourrait être intéressant d'utiliser ces règles métiers à partir des surfaces et, plus communément, des entités fonctionnelles avant que la topologie générale de la pièce ne soit encore définie.

2.3.1.3 Coût et orientation

De nombreuses études ont porté sur la détermination de l'orientation idéale pour la fabrication vis-à-vis de différents paramètres d'optimisation. Arni et Paul [72, 73] ont établi des modèles pour déterminer la relation avec le défaut de planéité de la pièce finale, Sanatinezhad [74] a étudié le lien avec le temps de fabrication et le volume de support nécessaire, Cheng [75] a développé une fonction d'optimisation en fonction du temps de fabrication et de la précision que Xu [76] a complété en y ajoutant le paramètre de stabilité, Lynn-Charney [77] s'est intéressé au rapport avec les variables de surfaces, de tolérances et de procédé.

D'autre part, d'autres recherches ont contribué à caractériser le support optimal pour la fabrication. Strano [30] a conclu que les structures lattices utilisées dans les supports présentaient l'avantage de réduire le volume de matériau et le temps de fabrication comparé à une structure pleine et favoriser l'enlèvement du support. Majhi [78] a développé un algorithme pour minimiser la surface de contact entre la pièce et le support. Das [79] a déterminé une routine afin de connaitre l'orientation optimale pour satisfaire aux tolérances de planéité, de cylindricité, de perpendicularité et de parallélisme pour une pièce donnée. Dans le même temps, le support est optimisé dans le but d'en minimiser le volume et la surface de contact avec la pièce tout en maximisant la quantité de matériau retirable.

Pour finir, la plupart des études sont concentrées sur l'optimisation du temps et du coût de fabrication en y distillant d'autres paramètres tels que la qualité de surface ou le volume du support. Des paramètres primordiaux comme l'accessibilité à l'outillage pour retirer le support dans des zones inaccessibles ou les zones qui nécessitent d'être autosupportées sont très peu prises en compte dans les modèles. Aussi, le choix de l'orientation et du positionnement des supports s'effectuent une fois la géométrie finale déterminée ce qui semble arriver tardivement dans le processus de conception. La topologie de la pièce étant figée, l'orientation est déterminée par rapport au volume global et non par rapport aux exigences de finition attendues pour les surfaces fonctionnelles. Cela aboutit donc à une optimisation partielle. Puisque l'orientation de fabrication a un impact déterminant sur la qualité finale de la pièce, il parait nécessaire de définir une pré-orientation au début de la phase de conception afin de positionner les surfaces fonctionnelles en conséquence. D'autre part, presque aucun modèle d'implémentation du support ne prend en compte le facteur de dissipation thermique, rôle pourtant essentiel.

2.3.1.4 Fabricabilité

Certaines méthodes sont destinées à analyser la conception finale d'un produit vis-à-vis de sa fabricabilité. Kerbrat [80] a conçu une analyse comparant la fabricabilité d'un composant selon deux procédés : la fabrication soustractive et la fabrication additive. Pour ce faire, des paramètres relatifs à la géométrie, au matériau et à des informations spécifiques sont définis et permettent de calculer des indexes – globaux et locaux – de fabricabilité. Suivant le résultat obtenu, le modèle CAO est divisé en structures modulaires, dont les pièces sont fabriquées séparément puis assemblées. Cependant, cette analyse multi procédés en aval de la conception ne permet pas de prendre en compte les spécificités de fabrication du procédé choisi lors de la conception ; la pièce n'est conçue pour aucune fabrication précise. Par conséquent, il se pourrait que cette méthode d'analyse de fabricabilité ne puisse garantir une pièce optimisée.

Zhang [81] a développé une méthode en deux étapes. La première consiste à analyser la conception finale ainsi que la concordance avec le cahier des charges puis de procéder aux choix des paramètres du procédé. La seconde considère l'orientation de fabrication et les stratégies de slicing pour la conversion du fichier .stl. En fonction des résultats obtenus pour chaque indicateur, l'opérateur peut choisir de fabriquer directement la pièce ou d'en réviser la conception. Il semblerait toutefois que certains paramètres comme l'analyse de la géométrie de la pièce ou le choix de l'orientation de fabrication arrivent tardivement dans le processus global de conception. L'analyse de la topologie devrait se faire continuellement durant la phase de conception en fonction des contraintes de la fabrication additive et du cahier des charges. A notre sens, cette méthode n'optimise pas le temps de conception.

De nombreuses analyses algorithmiques ont été développées dans la littérature par Nelaturi [82], Telea [83] ou encore Chen [84]. Cependant, ces analyses ne s'inscrivent pas dans un cadre méthodologique.

Les méthodes d'analyse de fabricabilité proposées interviennent bien tardivement dans le processus global de conception. En effet, les spécificités induites par la fabrication additive ne sont analysées qu'une fois la topologie finale obtenue ce qui induit une notion empirique, opposée au concept de méthodologie. L'analyse de la fabricabilité devrait s'inscrire, au contraire, de manière continue tout au long de la conception (ou du moins à des étapes charnières), afin de s'assurer déjà que la solution finale soit fabricable.

2.3.2 Méthodes de type opportunité

Les méthodes précédentes de type contrainte fournissent au concepteur des outils, des connaissances générales lui permettant respectivement, de connaitre l'influence globale de la fabrication additive sur la conception et d'en ajuster la topologie existante. Cependant, basées sur des modèles simplistes, ces méthodes s'inscrivent dans un cadre théorique trop éloigné des réalités physiques du processus de fabrication. Elles n'encouragent pas la créativité ni ne garantissent la fabrication d'une pièce optimisée. C'est pourquoi, des méthodes d'approches de type opportunité, caractérisées par l'intégration simultanée des caractéristiques des procédés additifs et du cahier des charges fonctionnels, semblent plus à même de tirer profit des opportunités de la fabrication additive.

En ce sens, Ponche [71] propose une méthode englobant à la fois les contraintes liées au cahier des charges et à la machine pour des pièces métalliques utilisant la technologie de projection de poudre. Elle permet de générer un modèle CAO réaliste accompagné d'une

optimisation paramétrique en minimisant les écarts entre le modèle théorique et la pièce imprimée. Toutefois, la méthode est axée uniquement sur la projection de poudre ce qui restreint sa portée et l'orientation de fabrication est déterminée exclusivement par rapport au volume de la chambre et non sur l'état de surface ou la résistance mécanique visés. Vayre [85] a établi une méthode basée sur l'analyse du cahier des charges, de la géométrie initiale, de l'optimisation paramétrique et de la fabricabilité. Toutefois, les analyses de la géométrie initiale et de l'optimisation paramétrique en vue de la fabrication sont assez génériques. De son côté, Yang [86] a intégré dans sa méthode les aspects liés aux contraintes du procédé, au cahier des charges ainsi qu'au processus de conception. Il apparait que cette approche, très générale, ne donne pas au concepteur d'information précise sur les sous-étapes nécessitant l'intégration de contraintes de différentes natures. De ce fait, ces trois premières approches de *DfAM* n'intègrent pas les aspects d'assemblage, d'intégration de fonctions et de performances structurelles.

Leary [87] présente une méthode associant les *design rules* à l'optimisation topologique dans l'optique de concevoir des pièces autosupportées. Il identifie aussi une orientation optimale pour minimiser le temps de fabrication et la masse du produit. Comme précédemment, cette approche est focalisée sur les céramiques et compte tenu des gradients thermiques bien plus importants pour les métaux, la fabricabilité n'en est pas assurée. Aussi, la notion de surface fonctionnelle n'est ici pas évoquée. L'orientation est, quant à elle, optimisée exclusivement par rapport au coût. Dans la même lignée, Tang [88] a développé une approche combinant les *design rules* à l'intégration de structures lattices à partir des surfaces et des volumes fonctionnels. A terme, l'épaisseur des lattices est idéale pour la fabrication. Néanmoins, la méthode démarre à partir d'une géométrie initiale libre au concepteur et la cellule unitaire des lattices n'est pas conseillée vis-à-vis de l'orientation et des déformations thermiques. Ainsi, l'optimisation du modèle n'est pas garantie. Cette approche s'inscrit davantage dans une méthodologie d'optimisation structurelle - vue précédemment - que dans une méthodologie de DfAM. Sossou [89] présente une démarche plus amont permettant de définir la géométrie initiale en intégrant une analyse fonctionnelle ainsi que les contraintes liées à la fabrication additive et au post-traitement. Elle se décompose en trois étapes majeures qui consistent à :

1. décrire la fonctionnalité du produit et comprendre les relations entre, d'une part, le produit et son environnement et, d'autre part, les liens entre les composants ;
2. structurer le produit dans le contexte de la technologie additive ;
3. concevoir les géométries des composants.

La première étape peut réellement permettre une connaissance approfondie des différents flux fonctionnels et ainsi déboucher sur une analyse complète du cahier des charges bien que la seconde étape de contextualisation du procédé additif soit assez fuyante (par exemple, les choix de l'orientation et des matériaux sont focalisés sur la minimisation des étapes de post-traitement, l'analyse de la fabricabilité n'est pas évoquée et les règles métier pas clairement définies) et la troisième étape très générale. Cette décomposition de l'analyse fonctionnelle forme une assise méthodologique très profitable.

Dans ses travaux de thèse, Boyard [90] suggère une procédure de DfAM également en trois blocs distincts :

1. établissement de la géométrie primaire à partir du cahier des charges ;
2. optimisation du solide ;
3. maîtrise de la fabricabilité.

Cette méthode est l'une des plus complètes que l'on puisse trouver actuellement dans la littérature, à la fois précise pour le concepteur et comportant la plupart des étapes du processus de conception. A noter toutefois que l'analyse de la fabricabilité ne se fait ici qu'à partir du positionnement des supports, sans différentiation entre les surfaces d'appui et les surfaces fonctionnelles, ni considération des déformations. Aussi, les étapes de post-traitements ne sont pas anticipées lors de la phase de conception. Il est donc possible que la pièce finale ne soit pas optimisée.

Kumke s'est inspiré de l'approche de conception systématique établie par Pahl and Beitz [91, 92]. Cette méthodologie de DfAM est, à notre connaissance, la plus complète actuellement dans la littérature avec celle de Boyard [90] ; elle regroupe à la fois les méthodes d'optimisation pour la fabrication, d'optimisation structurelle et d'analyse de la fabricabilité en partant du cahier des charges. Bien qu'elle soit très générale et n'apporte pas d'informations très précises sur les contraintes du procédé ou les règles métier, elle intègre l'ensemble des étapes et sous-étapes du *DfAM*. Il appartient donc à chacun d'apporter ces renseignements en fonction de l'environnement de conception.

Nous aurions également pu évoquer l'optimisation topologique dans ce paragraphe. Cependant, par rapport à l'intérêt majeur qu'elle représente pour les pièces de structures, son utilisation pour les composants hyperfréquences demeure restreinte. D'une part car les surfaces sont pour la plupart toutes fonctionnelles et d'autre part, car il n'existe aujourd'hui aucun logiciel qui permette d'effectuer une telle optimisation en respectant les critères de propagation.

2.3.3 Synthèse méthodologique

Les limites soulevées démontrent la nécessité d'une méthodologie complète pour exploiter pleinement les avantages de la fabrication additive. **Aujourd'hui, aucune méthodologie de type *DfAM* n'est appliquée aux composants hyperfréquences**. Cependant, une revue de la littérature a permis de mettre en lumière les 5 principales limites des méthodes existantes liées à la fabrication additive et utilisées dans d'autres domaines.

1. Insuffisance de méthodes efficaces d'assistance à la conception pour la fabrication additive. La plupart d'entre elles proposent une **approche séquentielle** : processus de conception, stratégie de fabrication puis fabrication. La connaissance du processus est examinée indépendamment à chaque étape, à travers l'utilisation de règles génériques, favorisant l'effet de **cloisonnement**. Par conséquent, ces méthodes compartimentées ne peuvent pas profiter pleinement de la fabrication additive ;
2. Certaines catégories, telles que le post-traitement, les règles métier et les considérations du procédé utilisé sont soit absentes, soit sous-développées, ce qui conduit à des **considérations déséquilibrées au cours du processus de conception** ;
3. Parmi toutes les spécificités du procédé utilisé pouvant affecter la qualité finale d'une pièce, aucune méthode n'**identifie clairement celles auxquelles il faudra porter une attention particulière, conformément à la nature de la pièce développée** ;
4. Les méthodes se concentrent souvent sur un **seul paramètre d'optimisation**, comme la réduction de poids ou la rugosité de surface, alors que les technologies additives ont la capacitié d'en optimiser beaucoup plus simultanément ;

5. La **créativité n'est pas suffisamment encouragée** lors du développement de la conception ; elle est par conséquent limitée par l'inertie psychologique de la restriction de processus conventionnelle [62, 93]. De ce fait, les géométries spécifiques dues aux limitations de la fabricabilité ne devraient pas être considérées trop tôt dans la phase de conception [91].

Actuellement, seules les méthodes amenées par Kumke [91], Boyard [90] et Sossou [89] permettent théoriquement de considérer à la fois les contraintes et les opportunités offertes par la fabrication additive. Bien qu'elles n'intègrent pas le chaînage **conception-procédé-propriétés d'usage** identifié dans le Chapitre 1 comme primordial pour une méthode de *DfAM*, nous pensons néanmoins que l'association de ces trois approches de *DfAM* peut constituer une base solide de méthode de conception.

Pour conclure, l'analyse des travaux existants à travers cet état de l'art a permis de mettre en lumière les principaux verrous liés à la conception pour la fabrication additive de composants hyperfréquences et d'introduire, dans le chapitre suivant, la problématique de Recherche qui en découle.

2.4 Problématique de Recherche

Le procédé de fusion laser sur lit poudre intègre une multitude de paramètres qui influent directement sur la qualité et le coût de la pièce fabriquée. En particulier, les déformations et les états de surface induits paraissent fortement déteindre sur les performances électromagnétiques des composants fabriqués, qui se montrent souvent en-dessous de celles relevées à partir des procédés conventionnels. Ces observations résultent couramment d'une méconnaissance associée aux limites de la technologie et aux avantages qu'elle présente pour les hyperfréquences : suppression d'assemblage, liberté géométrique et intégration multifonctionnelle. La fabrication additive n'est ainsi pas pleinement exploitée, et les barrières cognitives associées à l'utilisation des procédés classiques représentent un frein à la créativité. Surtout, l'une des principales difficultés dans le domaine hyperfréquences réside dans l'impossibilité d'aboutir, à partir des équations théoriques, à *la* forme géométrique optimale. Pour autant, de rares études ont révélé que la connaissance des opportunités offertes par la fabrication additive pouvait aboutir à la réalisation de systèmes hyperfréquences opérationnels - notamment grâce à de nouvelles géométries qui permettent d'améliorer les performances électromagnétiques - moins coûteux et allégés, et ainsi compenser les limites du procédé lorsqu'elles sont correctement appréhendées en phase de conception. La question suivante se pose alors :

Q1 : Comment bénéficier, lors de la phase de conception, des avantages de la fabrication additive tout en intégrant les spécificités liées au procédé et aux règles métier hyperfréquences

L'hypothèse que nous avançons pour tenter de répondre à cette question concerne le développement d'une méthode de conception pour la fabrication additive appliquée aux composants hyperfréquences, intégrant le chaînage conception-procédé-hyperfréquences. L'analyse de ceux existants à travers la littérature a permis de constater l'insuffisance de méthodes performantes d'aide à la conception pour les technologies additives. A notre connaissance, aucune méthode de *DfAM* ne considère l'ensemble des étapes liées au procédé de conception et/ou des informations précises pour chacune d'elles. Celles proposées n'autorisent qu'une prise en compte partielle et cloisonnée des connaissances du procédé. La plupart adoptent une approche de type séquentiel : processus de conception, stratégie de fabrication puis fabrication. Les connaissances liées au procédé sont examinées indépendamment à chaque étape, à travers l'emploi de règles génériques, favorisant l'effet « over the wall ». Par conséquent, les méthodologies de type séquentiel ne permettent pas de tirer pleinement profit des opportunités apportées par la fabrication additive.

Au contraire, l'approche de type intégré semble correspondre à la technologie additive car elle est assez flexible pour accepter l'interdépendance des règles spécifiques. La géométrie idéale est issue à la fois des contraintes du cahier des charges et des connaissances du procédé en lien avec le domaine d'application. Alors que les avantages de la fabrication additive pour les hyperfréquences ont été identifiés - suppression des assemblage, liberté géométrique et intégration multifonctionnelle - les principales limites du procédé à scruter au cours de la phase de conception en lien avec les propriétés de propagation restent floues. Cela amène à la seconde question, dont les résultats serviront à bâtir la méthode de conception :

Q1.1 : Quelle(s) spécificité(s) du procédé de fusion laser sur lit de poudre, en lien avec les propriétés de propagation des champs électromagnétiques, doit-on

considérer avec une attention particulière pendant l'étape de conception ?

Au vu des résultats pratiques exposés dans la littérature, la dégradation de l'état surfacique généré par les procédés additifs laser par rapport aux procédés conventionnels est avancée par la communauté comme étant le paramètre le plus influant concernant les pertes de puissance, ne permettant pas aux pièces d'être opérationnelles. Toutefois, il est très difficile d'anticiper le comportement d'un composant hyperfréquences de manière théorique, car rares sont les modèles qui décrivent des comportements aux fréquences étudiées, et ceux s'y réfèrent ne considèrent que des surfaces dont la qualité est homogène. Or, il a été constaté en fabrication additive sur lit de poudre, d'une part que les surfaces produites présentaient des qualités différentes selon leur orientation de fabrication et, d'autre part, qu'il était complexe de les anticiper en raison du nombre important de paramètres dont elles dépendent. Il est alors impossible de connaitre l'influence réelle de l'état de surface sur les performances électromagnétiques par rapport à d'autres paramètres. Malgré tout, les évolutions de ces performances, suite à l'application de traitements de surfaces, nous portent à croire que la qualité surfacique est le facteur principal à considérer en conception, à travers une orientation de fabrication judicieuse de la pièce (dont dépendront également le coût et la caractère autosupporté).

Ces travaux s'inscrivent dans une démarche méthodologique. L'objectif est de développer une méthode qui permette au concepteur de tirer profit de la fabrication additive grâce à la connaissance de ses avantages, mais aussi des spécificités de la fusion laser sur lit de poudre qui affecteront les performances électromagnétiques de la pièce une fois fabriquée. Pour ce faire, une expérimentation a été réalisée en amont pour quantifier le degré d'influence réelle de l'état de surface sur les pertes de puissance à des fréquences comprises entre 28 et 35 GHz, et présentée dans le Chapitre 3. Les données récoltées serviront à répondre à la Problématique Q1.1 et seront intégrées à la méthode de *DfAM* proposée au Chapitre 4 en réponse à la Problématique Q1 (Table 2.4). Elle sera ensuite appliquée à la conception d'un guide d'ondes au chapitre 5.

	Problématique Q1.1	Problématique Q1
Hypothèse	Etats de surface	Méthode *DfAM*
Chapitre	3	4

Table 2.4 – Expérimentations identifiées pour répondre aux problématiques de Recherche d'après les hypothèses formulées

Chapitre 3

Expérimentations

L'état de l'art nous a permis de mettre en évidence les spécificités du procédé de fusion laser sur lit de poudre qui semblent affecter majoritairement les performances électromagnétiques atteintes par les composants passifs hyperfréquences. En particulier, l'état de surface produit a été identifié par la communauté scientifique comme étant le principal acteur des pertes par transmission engendrées sur de telles pièces, sans pour autant pouvoir en quantifier précisément l'influence. L'objectif de ce chapitre est donc d'évaluer le lien entre les qualités surfaciques produites par le procédé LBM et les propriétés propagatoires électromagnétiques.

La première partie de ce chapitre récapitulera les différents objectifs fixés pour cette étude, et notamment la Problématique de Recherche à laquelle elle se rattache.

La deuxième partie présentera la démarche expérimentale que nous avons établie pour cette expérimentation, en préambule de la troisième partie qui exposera le protocole expérimental que nous avons suivi.

Les résultats hyperfréquences et surfaciques obtenus paraîtront dans la quatrième partie, talonnés par l'avant-dernière partie qui portera sur les discussions qui en découlent.

Enfin, une synthèse de cette étude sera réalisée dans la dernière partie, accompagnée des informations qui seront intégrées à la méthode proposée au chapitre 4.

3.1 Objectif de l'étude

Comme nous l'avons évoqué dans les paragraphes 2.1.3 et 2.2.2 du chapitre 2 consacré à l'état de l'art, les baisses de performances observées dans les structures passives à propagation guidée fabriquées en fabrication additive métallique semblent trouver un écho particulier dans l'état de surface produit par un tel procédé, comme paraissent l'indiquer les résultats obtenus, avant et après traitements de surfaces. Les rares modèles mathématiques déployés dans la littérature traitant cette thématique atteignent leur limite dans le cadre de la fusion laser sur lit de poudre en cela que les états de surfaces achevés ne sont pas homogènes le long d'une structure, chaque surface de propagation ayant son orientation propre. Pour finir, les états de surfaces obtenus en fabrication additive sur lit de poudre sont fortement assujettis à la machine de fabrication utilisée et aux paramètres de lasage adoptés. Pour une même structure, les résultats de propagation ne sont donc pas transverses d'une étude à l'autre.

L'objectif de cette étude est triple. Le premier consiste à répondre à la problématique de Recherche *Q1.1 : Quelle(s) spécificité(s) du procédé de fusion laser sur lit de poudre, en lien avec les propriétés de propagation des champs électromagnétiques, doit-on considérer avec une attention particulière pendant l'étape de conception ?* pour laquelle nous avons formulé l'hypothèse que l'état de surface constituait la priorité. Le deuxième, à trouver un paramètre pertinent d'évaluation de l'état de surface pour le procédé de fusion laser sur lit de poudre. Enfin, le dernier, à obtenir des résultats propres à la machine de fabrication utilisée dans le cadre de ces travaux. De cette manière, les données d'entrées pour la méthode de conception seront précises et non génériques.

3.2 Démarche expérimentale

Pour évaluer l'influence de l'état de surface sur les performances électromagnétiques, l'idée a été de réaliser des composants au comportement *simple* - c'est-à-dire avec peu de paramètres influant sur ses propriétés propagatoires - suivant de multiples orientations de fabrication, de manière à générer des états de surface différents à l'intérieur du canal de propagation pour chacune d'elles. Une fois les pièces confectionnées, leurs propriétés propagatoires ont été évaluées sur le matériau brut de fabrication. Chaque orientation a été déclinée en 3 exemplaires, d'une part pour évaluer la répétabilité des informations électromagnétiques relevées, et d'autre part pour être en mesure de réaliser des traitements de surface. Pour chaque orientation, après que les comportements propagatoires sur chaque exemplaire brut de fabrication aient été mesurés, l'un d'eux a été découpé pour évaluer son état de surface brut tandis que les deux autres ont subi des traitements de surfaces avant d'être à nouveau mesurés d'un point de vue électromagnétique, puis découpés et analysés.

Cette démarche, basée sur l'hypothèse que trois exemplaires d'une même orientation qui présentent les mêmes propriétés électromagnétiques affichent des caractéristiques surfaciques similaires, a permis de recueillir une quantité importante de données et d'observer l'évolution des performances électromagnétiques en fonction des états de surfaces affichés par les parois conductrices du canal de propagation, sur matériau brut et traité. Elle est résumée sur la figure 3.1.

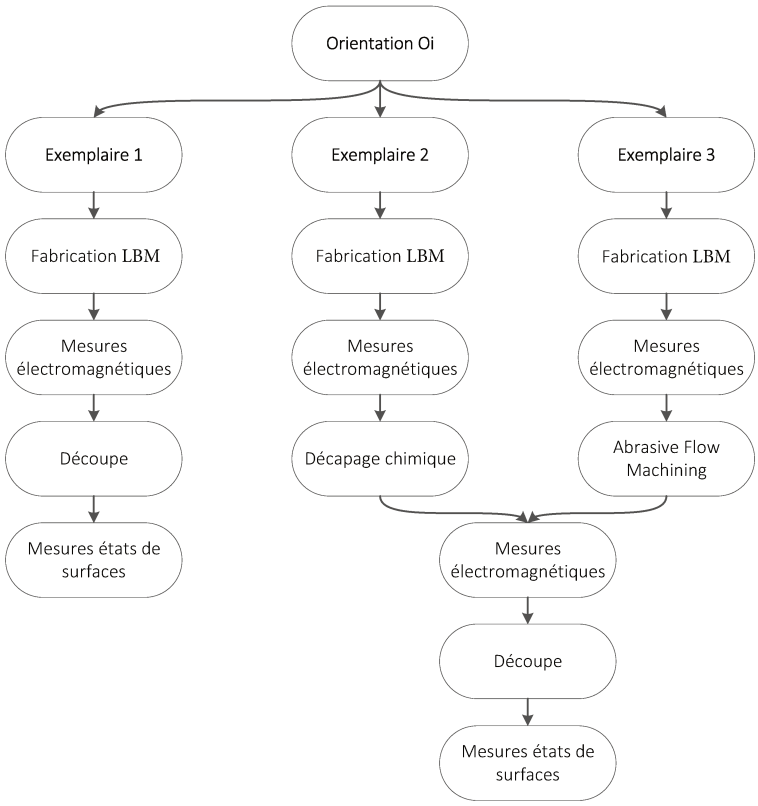

FIGURE 3.1 – Démarche expérimentale pour chaque orientation Oi

3.3 Protocole expérimental

3.3.1 Choix des composants

La pièce hyperfréquence mise à profit pour cette étude concerne le guide d'onde à géométrie rectangulaire. Elle représente assurément, avec la géométrie circulaire, la structure la plus étudiée et la plus renseignée de la littérature, théorique comme pratique. Néanmoins, les tendances recueillies lors de cette étude pourront être appliquées à tout composant passif conducteur, au-delà du guide d'ondes rectangulaire.

D'un point de vue dimensionnel, afin d'assurer une quantité de pertes suffisante et éloignée de l'erreur liée à la mesure, le plan d'expérience a été mené sur des pièces de 200 mm de long et opérant sur une bande relativement élevée en fréquence, à savoir la bande Ka qui se situe entre 28 et 35 GHz. D'après la norme EIA (Table 2.3), de tels guides suivent la dénomination WR-28.

3.3.2 Orientations et quantités

Rappelons que l'orientation globale de fabrication donnée à une structure, peut impliquer l'édification de structures de support pour empêcher l'effondrement de surface par gravité. Dans le cas de guide d'ondes, la présence de support ne peut être envisagée à l'intérieur du canal car elle obstruerait la propagation des ondes et serait impossible à retirer par des moyens non destructifs. Ainsi, 5 orientations auto-supportées ont été considérées pour cette étude (Figure 3.2), avec des angles de 0, 45 et 90° par rapport aux plans (xy) du plateau (en vert) et (xz). La qualité de finition des surfaces étant fortement dépendante de l'orientation donnée à celles-ci, ces 5 orientations devraient conférer aux guides des états de surfaces différents et donc, des propriétés de propagation distinctes. Il sera alors possible d'établir un lien de corrélation entre l'orientation, l'état de surface et les performances électromagnétiques.

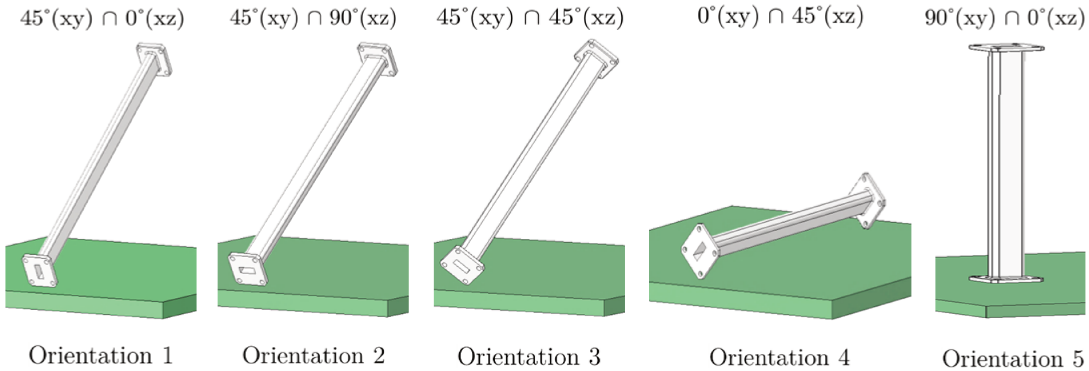

FIGURE 3.2 – Orientations autosupportées choisies pour la fabrication des guides WR-28

Pour chacune des 5 orientations, 3 exemplaires ont été fabriqués. L'un a servi à réaliser des analyses sur le matériau brut de fabrication, alors que deux autres ont subi des traitements de surface (voir paragraphe 3.3.4).

3.3.3 Matériau et fabrication

L'ensemble des pièces a été fabriqué en alliage d'Aluminium AlSi7Mg0.6, dont la composition chimique à l'état de poudre, conformément à la norme EN 1706, est présentée

dans la table 3.1. La granulométrie de la poudre est comprise entre 10 et 90 microns avec une masse volumique[1] vaut 2.66 g/cm^3 ± 1.

Fe	Si	Mn	Zn	Ti	Mg	Cu	O	Al
≤ 0.19	6.5 - 7.5	≤ 0.10	≤ 0.07	≤ 0.25	0.45 - 0.70	≤ 0.05	≤ 0.1	Reliquat

Table 3.1 – Composition chimique de l'alliage d'aluminium AlSi7Mg0.6 (en %)

La machine de fusion laser sur lit de poudre exploitée pour la fabrication est une PROX 300 SN développée par 3D Systems, dotée d'un volume de fabrication de 250 x 250 x 330 mm. La fusion de poudre est effectuée sous atmosphère contrôlée (Argon) pour éviter une oxydation de la poudre par des particules d'oxygène constitutives de l'air. Pour restreindre le nombre de paramètres liés à l'état de surface produit lors de la fabrication, tels que les paramètres machine, la fabrication des pièces se fera à isoparamétrie machine (vitesse et puissance du laser, espacement des cordons, épaisseur de couche, etc.). D'autre part, les guides ont tous été orientés dans la direction de propagation du flux de gaz, pour discriminer l'influence que pourrait avoir le flux d'Argon sur l'état de surface.

Une fois la fabrication terminée, l'ensemble des pièces a reçu un post-traitement relativement *classique* à savoir, successivement :

1. Evacuation de la poudre non fusionnée à l'intérieur de la pièce fabriquée, à l'aide d'une souflette à air ;
2. Traitement de relaxation des contraintes résiduelles : 2h à 300°C$^{-6/+6}$ avec un refroidissement en four ;
3. Enlèvement des supports extérieurs à l'aide d'une découpe fil ;
4. Usinage des brides (Figure 3.4) à un niveau de Ra = 1.6 μm (Ra défini selon la NF EN ISO 1302 :3.2) et un parallélisme des brides de 0.2 μm. Ce surfaçage est habituel en hyperfréquences pour minimiser les pertes induites aux interfaces pièce-connecteur.

A noter que le choix de ne pas effectuer un sablage à l'intérieur du canal de propagation des pièces se justifie par la volonté d'obtenir des résultats sur un matériau à l'état brut d'élaboration LBM. De plus, dans l'optique de la réalisation de pièce monolithique très complexe, il n'est pas certain que ce type de traitement soit réellement envisageable en l'état.

3.3.4 Traitements de surface

Concernant les guides WR-28, certains d'entre eux ont reçu des traitements de surface après mesures de leurs propriétés de propagation sur matériau brut.

3.3.4.1 Décapage chimique

Le traitement par décapage chimique consiste à immerger le guide dans un bain composé d'acides (Table 3.2) et qui, grâce à un système de pompage, s'écoulent à l'intérieur du canal de propagation. La température du bain se situe entre 20 et 30°.

1. Mesure de la masse voluminque selon ISO 3369

Acide fluohydrique HF	Acide nitrique HNO_3	Eau déminéralisée
5	95	$\leq 15\ \mu S$

Table 3.2 – Composition du bain utilisé pour le décapage chimique (en %)

3.3.4.2 Abrasive Flow Machining (AFM)

L'AFM [94] est un procédé de traitement de surface par voie mécanique. Le principe consiste à écouler un fluide abrasif - sous forme de pâte plus ou moins visqueuse - d'un bout à l'autre de la pièce, sous la pression exercée par deux béliers hydrauliques (Figure 5.51). Les particules abrasives, de granulométrie plus ou moins importante, polissent les surfaces avec lesquelles elles entrent en contact lors de l'écoulement de la pâte à l'intérieur de la pièce. La pression exercée par le fluide sur toutes les surfaces en contact permet d'obtenir une finition uniforme.

Orientation	Nombre de cycle	Vitesse de l'écoulement	Temps total
1	0.5	11 mm/min	35 min
2	0.5	10 mm/min	35 min
3	0.25	9 mm/min	9 min
4	0.5	11 mm/min	35 min
5	1	12 mm/min	62 min

Table 3.3 – Paramètres d'essais utilisés lors du traitement AFM

Ce traitement a été effectué par la société Micro Technica. Les paramètres d'essais utilisés pour chaque orientation de fabrication sont présentés dans la table 3.3. Une fois le traitement terminé, les pièces ont été dégraissées dans un bain à ultrasons au Ph neutre pendant 5 minutes.

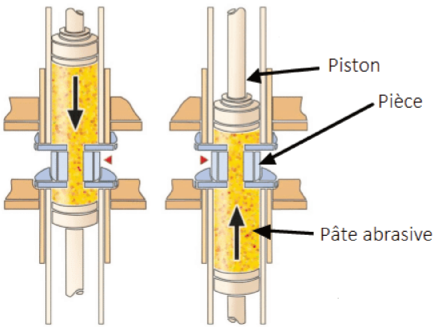

Figure 3.3 – Principe de l'Abrasive Flow Machining d'après [8]

3.3.5 Découpage des échantillons

Une fois les propriétés de propagation relevées - avant et après post-traitement éventuel, les guides d'ondes WR-28 ont été découpés selon le protocole suivant.

Tout d'abord, à l'aide d'une tronçonneuse, les pièces ont été sciées perpendiculairement au sens de propagation, en 9 tronçons d'environ 20 mm auxquels d'ajoutent les deux

brides. Les tronçons sont alternativement nommés soit par un chiffre - de 1 à 5 - soit par une lettre - de A à D (Figure 3.4). Les mesures d'état de surface ont été effectuées sur les tronçons chiffrés tandis que les tronçons lettrés feront l'objet de mesures relatives au dimensionnement lors d'une étude ultérieure. Cette alternance a permis de récolter des informations sur toute la longueur du guide. A noter que le tronçon 1 représente le point de départ de fabrication (hormis pour l'orientation 4).

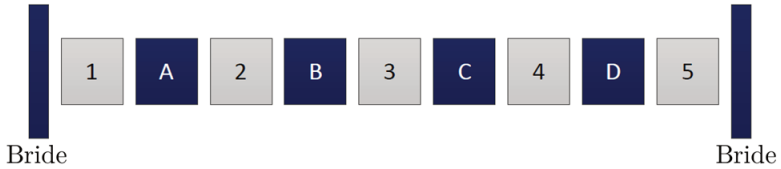

FIGURE 3.4 – Découpage des guides WR-28 en 9 tronçons de 20 mm

Pour être en mesure de relever des profils de surface, les tronçons chiffrés ont été redécoupés, à la découpe fil, selon deux plans longitudinaux (figure 3.5). Cette opération permet d'obtenir les 4 surfaces du tronçon de manière indépendante.

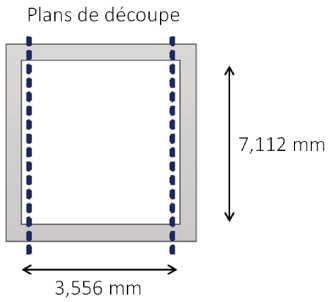

FIGURE 3.5 – Découpage des tronçons chiffrés selon deux plans longitudinaux (vue en coupe) pour un WR-28 de dimensions 3,556x7,112 mm^2

3.3.6 Mesures hyperfréquences

Les mesures de pertes en adaptation et par transmission (section 2.2.1.4) se font à l'aide d'un analyseur de réseau (VNA). Le modèle utilisé dans le cadre de cette étude présente les caractéristiques suivantes :

MODÈLE	Rohde & Schwarz – ZVK
RÉFÉRENCE CONSTRUCTEUR	10 MHz - 40 GHz
RÉSOLUTION EN FRÉQUENCE	100 μHz
IMPÉDANCE	50 Ω
TEMPS DE MESURE	$<$ 0.7 ms/point
BANDE PASSANTE	27-38 GHz
ERREUR DE MESURE - ADAPTATION	2 dB
ERREUR DE MESURE - TRANSMISSION	0.2 dB
NOMBRE DE POINTS	406
DATE DE RÉVISION	13/12/2019

TABLE 3.4 – Caractéristiques de l'analyseur de réseau utilisé

Les mesures ont été effectuées à température ambiante - entre 20°C et 26°C - et lorsque l'instrument a atteint l'équilibre thermique, soit environ 1 heure après sa mise en marche. La calibration de l'appareil a été réalisée à partir d'une puissance de 0 dBm, une bande passante de 1 kHz et 272 points de mesure.

3.3.7 Mesures des états de surfaces

Selon la norme NF EN ISO 4287, trois grandes catégories existent pour caractériser l'état de surface des surfaces internes du canal de propagation : le profil primaire S, l'ondulation W et la rugosité R. Comme nous l'évoquions dans le paragraphe 2.1.3, la présence aléatoire de particules de poudre partiellement fusionnées et agglomérées en surface rend les mesures de rugosité R plus difficiles. Sur des longueurs de mesure de quelques millimètres, l'existence de singularités peut entrainer une variation importante du paramètre mesuré. En témoignent les mesures préalables de paramètres de rugosité souvent utilisés dans la littérature - tels que Ra, Rt et Rq - qui ont chacun présenté, pour une même surface, des évolutions divergentes (Figure 3.6). Par exemple, la rugosité arithmétique R_a varie entre 15 et 28 microns selon la zone de mesure.

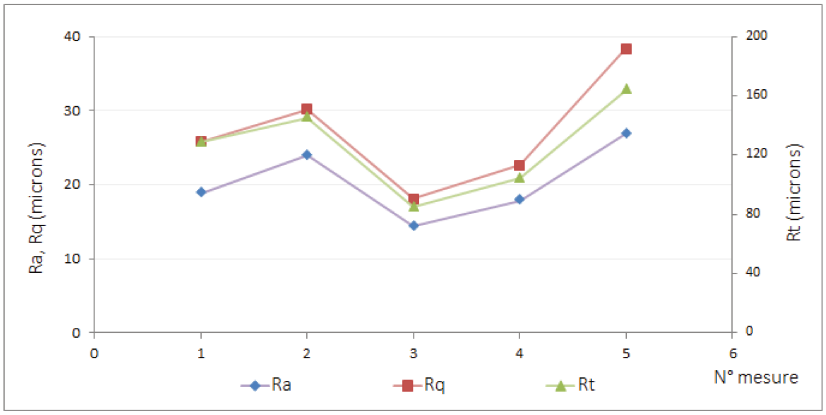

FIGURE 3.6 – Evolution des paramètres Ra, Rt et Rq sur la surface upskin de l'Orientation 3

Il serait difficile d'établir des liens de corrélation entre les propriétés de propagation et les états de surface avec de telles divergences sur les mesures. D'autant plus que ces paramètres R et W ne trouvent pas spécialement de résonnance ou de signification physique en lien avec les phénomènes propagatoires. Les pertes dans un conducteur étant phénoménologiquement associées à la longueur parcourue en surface du conducteur par le courant électrique [56], sur une épaisseur de quelques microns (l'épaisseur de peau est d'environ 0,5 microns à 30 GHz), un état de surface dégradé devrait entrainer une longueur de propagation plus importante et, de surcroit, des pertes supplémentaires.

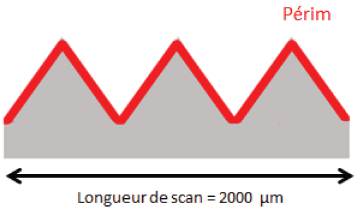

FIGURE 3.7 – Représentation du paramètre « périm » relevé au profilomètre mécanique

Pour ces raisons théoriques, il semblait légitime de s'intéresser à la longueur réellement

parcourue par le courant électrique sur les surfaces des guides WR-28 issus de fabrication additive, comparativement à la longueur théorique d'une surface *parfaite*. La mesure de la longueur de propagation *effective* favorisait également la corrélation physique de l'influence de l'état de surface sur les phénomènes électromagnétiques. Une telle caractérisation s'est traduite par la mesure du périmètre d'un profil, qui correspond à sa longueur déployée (Figure 3.7).

Le profilomètre mécanique utilisé pour cette campagne affiche les caractéristiques présentées dans la table 3.5. Puisque la dimension limitante du guide est b=3.556 mm, la longueur de scan choisie a été 2000 microns. Cette longueur, qui devrait être théoriquement celle relevée sur une surface *parfaite*, a été comparée au périmètre réel relevé par le stylet.

Modèle	Veeco – Dektak 150
Temps de mesure	20 s
Longueur de scan	2000 μm
Erreur de mesure	50 μm/mesure
Gamme de mesure	1000 μm
Force du stylet	1.00 mg
Rayon pointe du stylet	2.5 μm

Table 3.5 – Caractéristiques du profilomètre optique utilisé

Comme exposé au paragraphe 3.3.5, pour chaque tronçon de 20 mm, les 4 surfaces de la section seront analysées. Pour chacune d'elles, 10 relevés seront effectués de manière aléatoire sur la surface, dont 5 dans le sens longitudinal et 5 dans le sens transversal (figure 3.8). Chaque surface présentera alors 50 mesures, soit un total de 200 par guide WR-28.

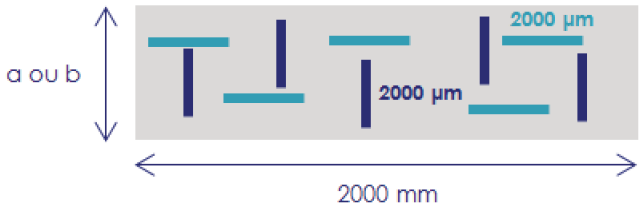

Figure 3.8 – Représentation des relevés de périmètre effectués sur une surface du tronçon n : 5 mesures longitudinales (bleu) et 5 mesures transversales (turquoise) sur une longueur de scan de 2000 microns

L'objectif de ces mesures n'est pas de déterminer le périmètre réel des surfaces au micron près, mais simplement d'identifier des tendances d'évolution de l'état de surface en fonction de leur orientation, et de les associer aux pertes constatées à l'intérieur des guides. Ces résultats contribueront à déterminer l'influence de l'état de surface sur les performances électromagnétiques et à former une base de connaissances pour assister le concepteur en phase amont.

3.4 Influence de l'état de surface sur les propriétés de propagation

3.4.1 Performances électromagnétiques

Dans la suite de ce manuscrit, seules les pertes en transmission seront discutées. Les pertes en adaptation de tous les guides qui ont été fabriqués dans le cadre de ces travaux, montrent un niveau au maximum de -15 dB (c'est-à-dire qu'au maximum 3% de la puissance introduite est perdue) ce que nous estimons suffisamment adapté pour ne pas en faire état. Aussi, rappelons que les pertes par transmission dont nous allons parler dans la suite de ces travaux traduisent, en dB, le ratio entre la puissance transmise par le guide et la puissance introduite. Pour en faciliter la compréhension, le tableau 3.6 apporte une équivalence entre pertes par transmission et pourcentage de puissance non transmise d'après l'équation 2.20.

Pertes par transmission (dB)	Puissance non transmise (%)
0	0
-0,2	4,5
-0,4	8,8
-0,6	12,9
-0,8	16,8
-1,0	20,6
-1,2	24,1
-1,4	27,6
-3,0	50

Table 3.6 – Equivalence entre les pertes par transmission et le pourcentage de puissance non transmise

3.4.1.1 Pièces brutes

Les mesures des paramètres-S ont été réalisées sur les 20 guides WR-28 issus de fabrication, sans traitement de surface, et conformément au protocole présenté au paragraphe 3.3.6. Pour favoriser la lecture des résultats, les pertes en transmissions obtenues entre 28 et 35 GHz sur les 3 exemplaires d'une même orientation ont été moyennées et présentées sur la figure 3.9. Pour témoigner des écarts observés entre les 3 guides, le delta, c'est-à-dire la différence entre les valeurs maximale et minimale mesurées pour une même orientation, a été calculée. Tous les guides fabriqués dans le cadre de ce plan d'expérience révèlent des écart-types inférieurs à 0.1 dB et des enveloppes inférieures à 0.2 dB. Ces valeurs indiquent que pour chaque orientation, les 3 exemplaires offrent des performances électromagnétiques convergentes et dont les disparités sont inférieures à l'erreur de mesure de l'analyseur de réseau (0.2 dB). Par conséquent, nous faisons l'hypothèse que les propriétés métallurgiques des 3 guides sont identiques, à orientation donnée. Il nous est alors possible de comparer les états de surfaces d'un guide brut de fabrication et d'un autre ayant subi un traitement de surface, sans pour autant que ce soit le *même* guide.

Les guides WR-28 affichent des pertes en transmission comprises entre -1.38 dB à 28 GHz pour l'orientation O5 et -0.60 dB à 35 GHz pour l'orientation 3, ce qui représente environ 13 et 28% de puissance perdue sur 200 mm, respectivement. A titre de comparaison, de tels guides fabriqués par procédés classiques et avec une conductivité électrique

de 3,77.10^7 S/m, produisent entre -0.17 dB à 28 GHz et -0.13 dB à 35 GHz de pertes par transmission, soit entre 3 et 4% de puissance perdue sur une même longueur.

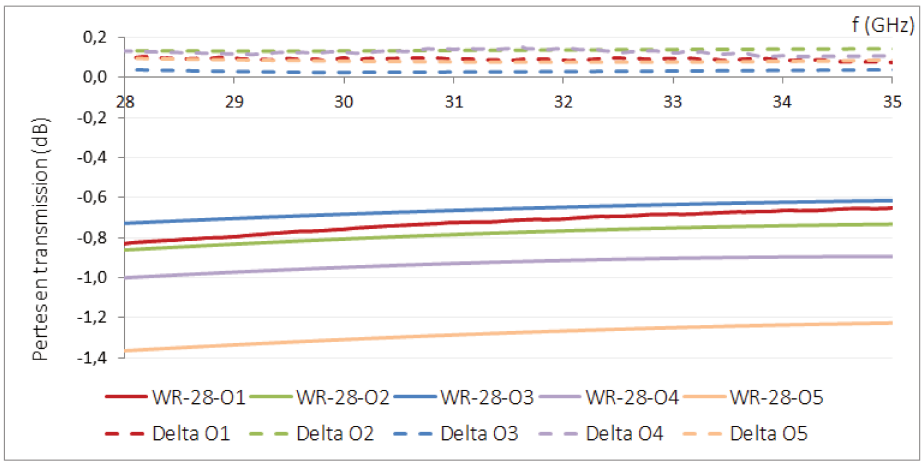

FIGURE 3.9 – Pertes en transmission et delta (pointillés) pour les 5 orientations en fonction de la fréquence obtenus sur les guides WR-28 matériau brut

L'orientation 3 (double 45°) est l'orientation pour laquelle le guide WR-28 produit le moins de pertes, en moyenne -0.63 dB sur la bande 28-35 GHz (Table 3.7). Elle est aussi celle qui affiche la plus forte convergence des mesures réalisées sur les 3 exemplaires comme l'attestent le faible écart-type (0.02 dB) et l'enveloppe moyenne (0.04 dB) calculés sur la bande passante.

La série WR-28-O1 présente des pertes moyennes de l'ordre de -0.71 dB soit environ 12% de plus que l'orientation 3. Ce niveau de pertes se traduit par environ 15% de puissance perdue sur 200 mm par rapport à la puissance introduite. Bien que l'orientation 2 soit identique à l'orientation 1, à la position des grandes et petites surfaces près, elle dévoile des pertes moyennes entre 28 et 35 GHz de -0.78 dB soit 9% de pertes supplémentaires.

ORIENTATION 1	ORIENTATION 2	ORIENTATION 3	ORIENTATION 4	ORIENTATION 5
-0.71 ± 0.03	-0.78 ± 0.04	-0.63 ± 0.02	-0.93 ± 0.06	-1.3 ± 0.04

TABLE 3.7 – Moyenne sur la bande 28-35 GHz des pertes relevées (en dB) et l'écart type sur les 3 exemplaires selon l'orientation de fabrication

Avec 4 surfaces inclinées par rapport au plateau lors de la fabrication, l'orientation 4 apporte en moyenne -0.93 dB de pertes sur 200 mm soit plus de 30% par rapport à l'orientation 3. Cependant, cette série WR-28-4 est la moins coûteuse (réductions de 55% par rapport à O1/O2/O3 et 72% par rapport à O5), en raison du plus faible nombre de couches nécessaire à leur réalisation. A l'opposé, l'orientation 5 est celle qui génère le coût de fabrication le plus élevé. Elle est aussi celle qui engendre le plus de pertes entre 28 et 35 GHz, avec une moyenne de -1,3 dB soit plus de 25% de puissance perdue sur seulement 200 mm. Comparée à l'orientation 3, les pertes sont presque doublées.

Bien que les écarts de pertes obtenus entre certains guides ne paraissent pas si importants à première vue, il est intéressant de noter qu'ils sont établis sur une longueur de 200 mm. Dans des équipements SatCom, il arrive fréquemment que la longueur totale de propagation de l'onde soit supérieure au mètre. Les pertes étant linéiques, sur une

longueur d'un mètre par exemple, les écarts obtenus sont par conséquent quintuplés. Le ratio de puissances entre la sortie et l'entrée s'élève alors à $10^{pertes*5}$ ce qui ne devient plus négligeable.

Finalement, par ordre de performances en transmission sur matériau brut, les orientations de fabrication pour les guides WR-28 peuvent être classées comme suit :

1. Orientation 3
2. Orientation 1
3. Orientation 2
4. Orientation 4
5. Orientation 5

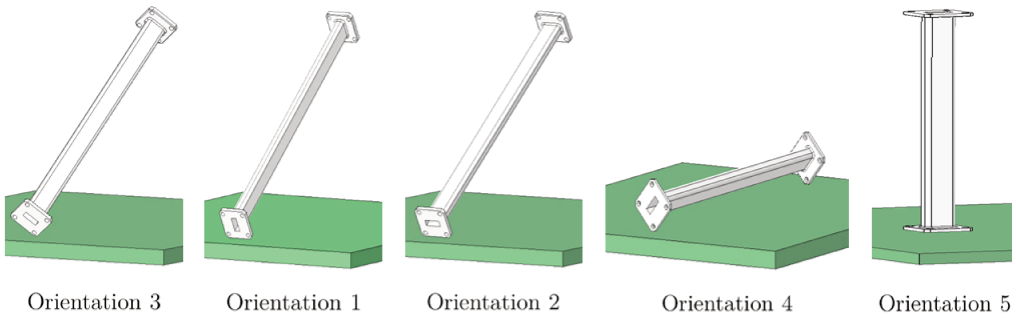

FIGURE 3.10 – Classement, par ordre de performances en transmission sur matériau brut, des orientations de fabrication pour les guides WR-28

A ce stade, en considérant que l'état de surface s'améliore sur l'intervalle d'orientation $]0\,;\pi/2[$ [69], le résultat des mesures paraît quelque peu surprenant. L'orientation 5 aurait dû occuper la première place de ce classement, suivie des orientations 1-2, 3 et 4.

3.4.1.2 Pièces traitées

Décapage chimique. Les mesures des pertes en transmission effectuées sur les guides traités par attaque chimique sont présentées sur la figure 3.11.

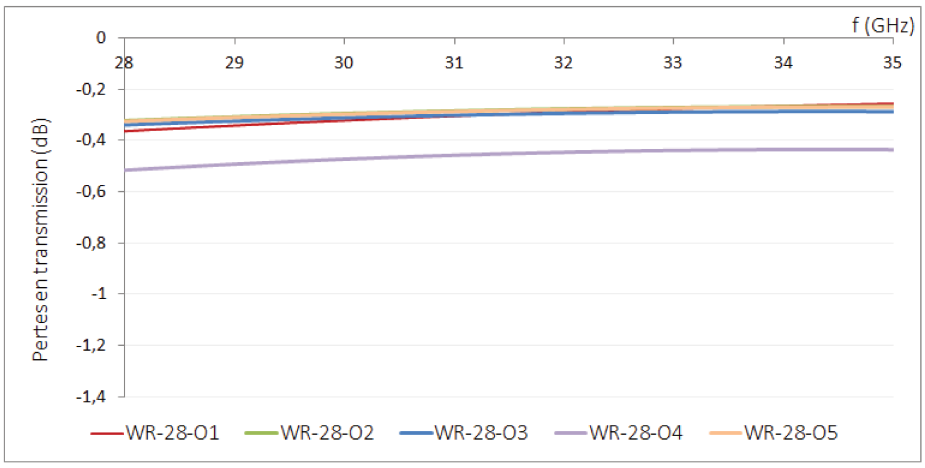

FIGURE 3.11 – Pertes en transmission en fonction de la fréquence obtenues sur les guides WR-28 traités par décapage chimique

Après décapage, les pertes ont largement été diminuées par rapport aux niveaux relevés sur pièces brutes. Elles se retrouvent toutes concentrées aux alentours de -0.3 dB avec un écart-type nettement inférieur à l'erreur de mesure estimée à 0.2 dB, exception faite pour l'orientation 4 qui est la seule affichant des pertes de l'ordre de -0.45 dB. Il se pourrait que le temps de décapage chimique, identique pour tous les guides, n'ait pas permis à l'orientation 4 - qui présente les états de surface les plus dégradés - d'agir entièrement sur les qualités surfaciques. Pour juger de l'influence du décapage chimique, les pertes moyennes, avant et après traitement sur la bande 28-35 GHz, sont présentées dans la table 3.8. Il est alors aisé de constater que les pertes ont toutes été divisées par un facteur 2 (hormis l'orientation 5 qui présente un facteur 4) après une telle opération.

Orientation	Pertes brutes	Pertes après traitement	Ratio
1	-0.71	-0.30	2.4
2	-0.78	-0.30	2.4
3	-0.63	-0.29	2.2
4	-0.93	-0.44	2.1
5	-1.3	-0.28	4.6

Table 3.8 – Moyenne sur la bande 28-35 GHz des pertes (en dB) mesurées avant et après traitement de surface en fonction de l'orientation de fabrication

D'autre part, il est intéressant de noter la convergence de 4 des 5 guides vers une même valeur de pertes et ce, quelles que soient celles qu'ils affichaient sur matériau brut. Il est probable que cette valeur atteinte soit une valeur limite intrinsèque à certaines caractéristiques de propagation pour ce matériau, telle que la conductivité électrique.

Abrasive flow machining. Pour ce traitement, seuls les résultats obtenus sur les guides O1, O2 et O3 sont présentés (figure 3.12). Les résultats recueillis après le traitement de surface mécanique sur 2 guides (O4 et O5) sont inexploitables, en raison de fortes déformations géométriques observées au niveau des brides induites par l'écoulement de la pâte abrasive et imputables à un outillage défaillant.

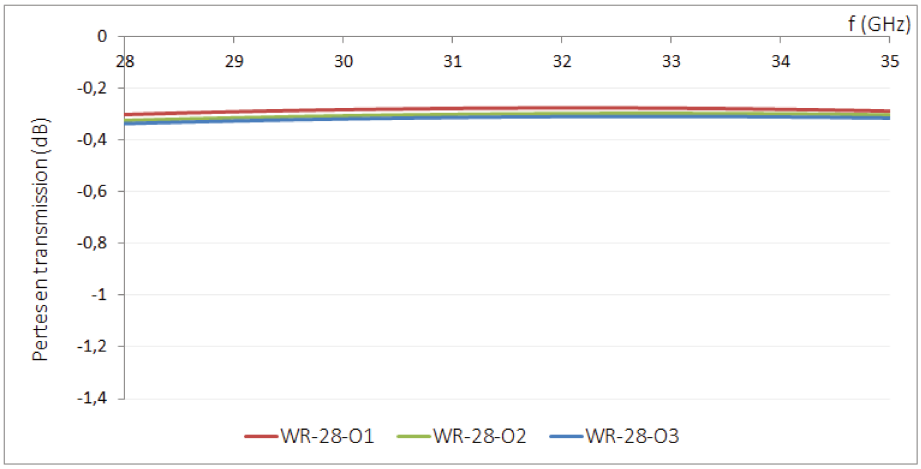

Figure 3.12 – Pertes en transmission en fonction de la fréquence obtenues sur les guides WR-28 traités par traitement AFM

Ici encore, les pertes ont été drastiquement diminuées comparées à celles obtenues

après fabrication. Sur les 3 guides, les pertes atteignent une valeur d'environ -0.3 dB avec un écart-type inférieur à l'erreur de mesure, et ce quelles que soient les conditions utilisées pour le traitement (Table 3.3). La théorie amorcée dans le paragraphe précédent, selon laquelle une valeur limite serait atteinte, corrobore d'autant plus que la valeur obtenue est identique après les deux différents traitements subis.

3.4.1.3 Résumé

Pour faciliter la compréhension de la section suivante, les résultats électromagnétiques peuvent se résumer, en plus de la figure 3.13, selon les trois points suivants :

1. Les pertes obtenues sur les guides bruts sont dépendantes de l'orientation utilisée lors de la fabrication. O3 affiche les meilleures performances tandis qu'O5 présente les plus dégradées ;
2. Les traitements de surfaces améliorent considérablement les niveaux de performances en transmission : l'attaque chimique permet de diviser les pertes d'un facteur 2 à 4 et l'AFM d'un coefficient 2 minimum (manque de données sur 2 orientations) ;
3. Quel que soit le traitement utilisé, il semblerait que les pertes atteignent une limite maximale située aux alentours de -0.3 dB (~6% de puissance non transmise sur 200 mm), qui pourrait correspondre à une conductivité électrique plus faible du matériau LBM, comparativement à un matériau classique d'usinage.

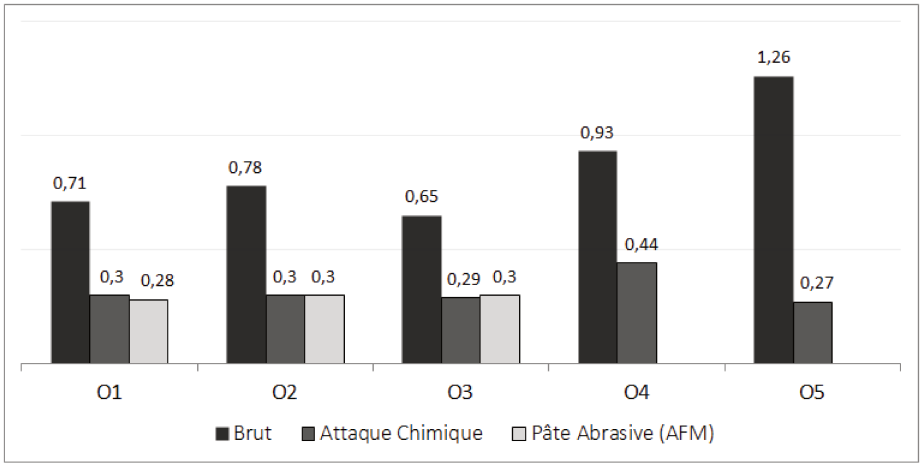

FIGURE 3.13 – Pertes en transmission moyennes (en dB) relevées entre 28 et 35 GHz en fonction de l'orientation de fabrication, avant et après traitement de surface

3.4.2 Mesures des états de surfaces

3.4.2.1 Guides bruts

Afin de garantir une meilleure compréhension, les résultats suivants seront présentés sous forme d'histogrammes (figure 3.14) pour éviter la superposition sur un même graphique de 20 courbes différentes. Contrairement aux résultats hyperfréquences, nous ne pouvons exposer une moyenne de l'état de surface relevé sur une orientation donnée, en raison de fortes disparités observées entre les différentes natures de surfaces considérées (uspkin, downskin, verticale).

En premier lieu, il nous parait important de mentionner les écarts-types relatifs aux périmètres moyens présentés sur la figure 3.14. Pour des périmètres moyens compris entre 2230 et 2700 microns, ces derniers varient entre 30 et 77 microns. Par ailleurs, les valeurs relevées dans le sens longitudinal sont identiques à celles obtenues dans le sens transversal, témoignant du caractère isotrope de l'état de surface. Pour plus de simplicité, nous ne présenterons que les résultats des mesures longitudinales.

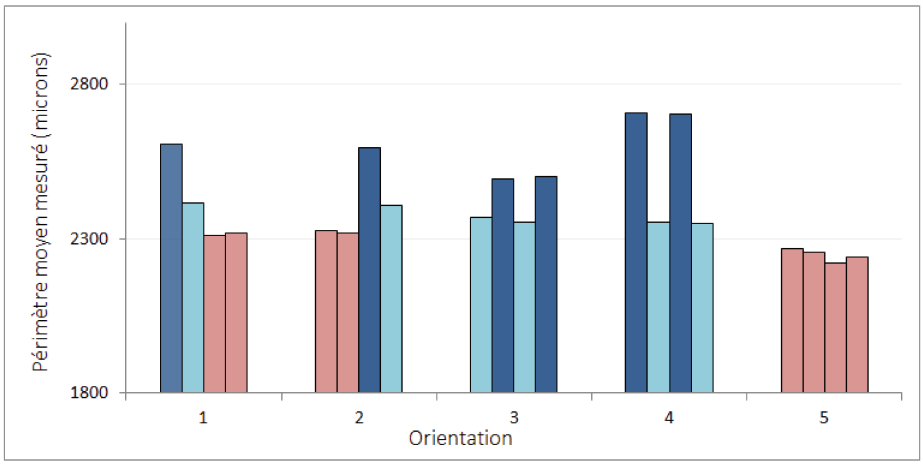

FIGURE 3.14 – Moyennes des périmètres des profils mesurés, en fonction de l'orientation de fabrication, sur les 4 surfaces constitutives du guide d'ondes brut : surface verticale (rouge), surface upskin (turquoise) et surface downskin (bleu)

Premièrement, il est aisé de constater que chaque orientation génère, sur les 4 parois du guide, des états de surfaces qui lui sont propres. Cette observation confirme la dépendance de l'état de surface à l'orientation de fabrication. Toutes surfaces confondues, les périmètres moyens varient de 2230 microns (sur une surface verticale de l'orientation 5) à 2709 microns (sur la petite surface en downskin de l'orientation 4), ce qui représente des augmentations d'environ 10 à 30% respectivement, par rapport à des surfaces *parfaitement lisses*.

Plus précisément, on observe majoritairement trois ordres de grandeur de périmètre : 2300, 2450 et 2650 microns. Le premier affecte les surfaces verticales (en rouge), le deuxième les surfaces upskin [2] (turquoise) tandis que le dernier s'attache sur les surfaces downskin [3] (bleu). Suivant l'orientation de fabrication considérée pour un guide - et de surcroît la nature des différentes surfaces, le guide aura des états de surfaces plus ou moins dégradés. Par exemple, l'orientation 5 est celle qui présente les plus faibles périmètres mesurés en raison des 4 surfaces bâties verticalement qui la constituent (pas d'effet escalier ni d'échauffement de contre-dépouille). A contrario, l'orientation 4 formée, entre autres, par deux surfaces en downskin, affiche les plus importants. Ces tendances peuvent s'expliquer par des considérations thermiques liées au procédé de fabrication (Figure 3.15). En raison de la diffusivité thermique réduite du lit de poudre comparé à l'aluminium massif, l'énergie se dissipe essentiellement à l'intérieur du métal vers les zones plus froides, c'est-à-dire vers les couches précédemment fusionnées. Cependant, lorsque la densité d'énergie laser fournie est excessive, comparée à la capacité de dissipation thermique du matériau, une forte concentration de chaleur s'accumule en périphérie de la pièce, c'est à dire proche des zones en contact avec le lit de poudre, isolant thermique (selon les modèles, le lit de poudre

2. Surface dont la normale est orientée entre 0 et π
3. Surface dont la normale est orientée entre π et 2π

est entre 20 et 100 fois moins conducteur que les grains de poudre qui le constituent).

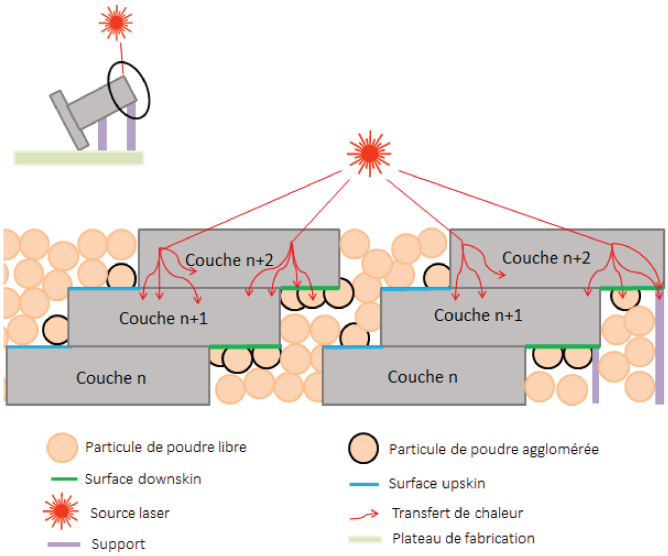

FIGURE 3.15 – Phénomène d'agglomération des particules de poudre sur les surfaces downskin, et upskin, engendré par le transfert de chaleur de l'énergie laser dans le lit de poudre à l'intérieur d'un guide d'onde

Ce phénomène est particulièrement prononcé sur les surfaces en downskin qui ne surplombent aucune couche précédemment fusionnée et qui sont directement éclairées par le laser, causant une rétention de chaleur plus conséquente. Ainsi, au-delà de fusionner les particules du lit de poudre avoisinantes, l'énergie apportée y est suffisamment importante pour fondre les particules plus lointaines et former, par coalescence, des agglomérats volumineux en surface (Figure 3.16, surface downskin). Sur les surfaces upskin, ce phénomène est limité car la chaleur est plus facilement dissipée vers les couches inférieures. Des agglomérats sont tout de même fusionnés en surface, mais en moins grande quantité (Figure 3.16, surface upskin). Sur les surfaces verticales, on remarque, non pas la fusion d'agrégats, mais l'adhésion de fines particules de lit poudre qui forment une couche superficielle homogène (Figure 3.16, surface verticale). A la différence des deux types de surface précédents, la chaleur accumulée n'est pas suffisante pour aboutir au phénomène de coalescence et donc à la formation d'agglomérats fusionnés avec la surface.

Ce phénomène thermique pourrait expliquer les différences périmétriques, observées selon la nature de la surface considérée. L'effet escalier est rapidement dominé par cet aspect thermique pour certains angles de fabrication, épaisseur de couche et granulométrie de poudre choisis. Pour des angles α de fabrication compris entre 0 et 90°et une épaisseur de couche de 40 microns, la largeur l de l'effet escalier induit est définie par :

$$l = \frac{40}{tan\ \alpha} \tag{3.1}$$

Pour des inclinaisons comprises entre 45 et 90°, la largeur l est inférieure aux diamètres de 50 et 90 microns des particules de poudre utilisées pour la fabrication. Les particules/agglomérats collées/formés sur les surfarces downskin ou upskin sont donc prédominant(e)s. De fait, lorsque $l < \mathrm{D}_{particules/agglomérats}$, l'état de surface est drastiquement influencé par les particules/agrégats développé(e)s. Cette distribution en surface étant isotrope, cela explique que les mesures longitudinales et transversales de périmètres soient identiques. A l'inverse lorsque $l > \mathrm{D}_{particules/agglomérats}$, l'effet escalier demeure prédominant.

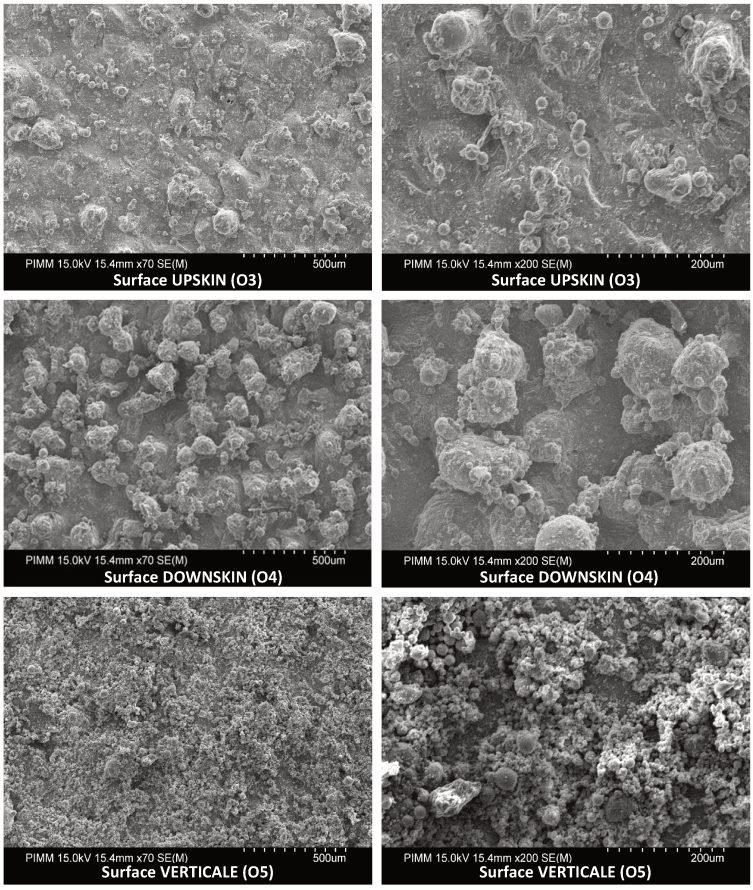

FIGURE 3.16 – Imageries au MEB des différents types de surfaces fabriquées en Al7SiMg0.6 sans traitement de surface : upskin, downskin et verticale. Grandissement x70 (gauche) et x200 (droite)

3.4.2.2 Décapage chimique

Les périmètres moyens mesurés après décapage chimique sont exposés sur la figure 3.17. Ils s'élèvent en moyenne à 2238 ± 58 microns avec des extrema situés à 2181 microns (surface verticale de l'orientation 1) et 2401 microns (surface downskin de l'orientation 4).

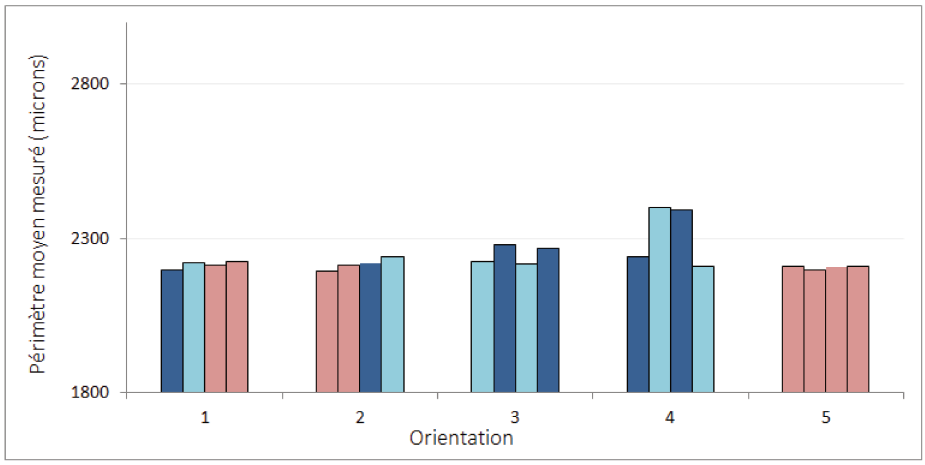

FIGURE 3.17 – Périmètres moyens mesurés, selon l'orientation de fabrication, sur les 4 surfaces constitutives du guide d'ondes après décapage chimique : surface verticale (rouge), surface upskin (turquoise) et surface downskin (bleu)

Cette hétérogénéité apparente révèle en réalité une limite inférieure d'état de surface atteignable après attaque chimique : quel que soit le périmètre mesuré après traitement, il n'est inférieur à une valeur située aux environs de 2200 microns. Ainsi, le décapage chimique aura peu d'incidence sur les surfaces verticales de l'orientation 5 qui présentent des surfaces d'approximativement 2250 microns avant fabrication (Table 3.9). Au contraire, son effet sera largement plus marqué pour les surfaces en downskin des orientations 1, 2 et 4 dont les périmètres se situent entre 2595 et 2709 microns sur les surfaces brutes.

Orientation	Guide brut	Après décapage chimique
1	2607	2236
2	2595	2242
3	2501	2281
4	2709	2401
5	2269	2198

Table 3.9 – Evolution du périmètre limitant mesuré sur chaque orientation avant et après décapage chimique, pour la même surface considérée

Lorsque les pièces sont immergées dans le bain composé d'acides, le fluide dissout progressivement les particules/agglomérats d'Al7SiMg0.6 positionné(e)s en surface des couches (Figure 3.18). La surface finalement obtenue est ainsi nettoyée de la majorité de ces particules/agglomérats, et conduit à une qualité de surface améliorée.

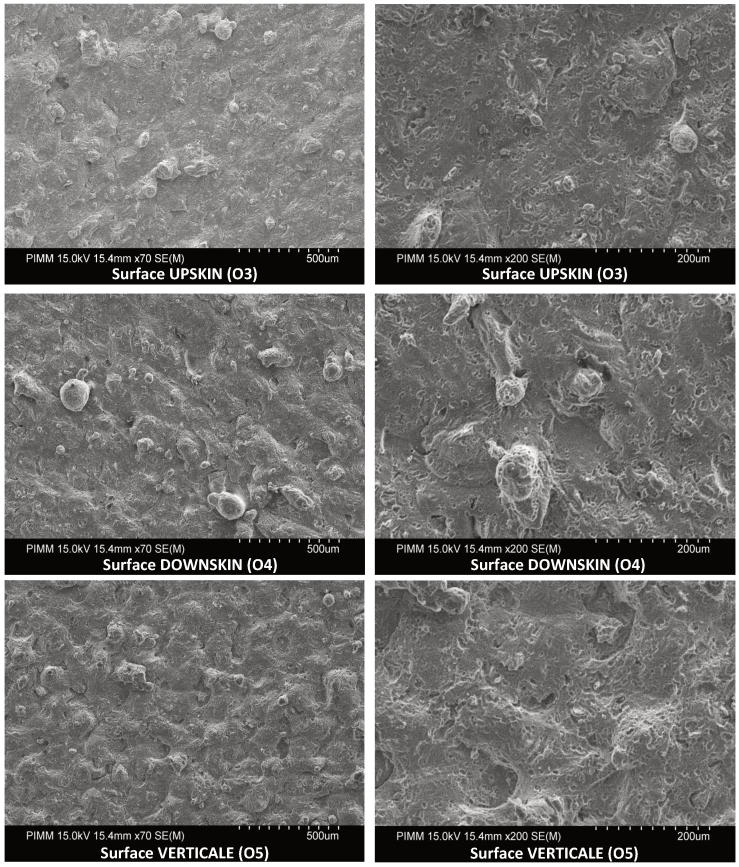

Figure 3.18 – Imageries au MEB des différents types de surfaces fabriquées en Al7SiMg0.6 traitées par décapage chimique : upskin, downskin et verticale. Grandissement x70 (gauche) et x200 (droite)

Le temps de submersion étant invariable pour les 5 guides traités, il est probable qu'il ait été insuffisant pour nettoyer *complètement* la surface downskin de l'orientation 4, qui affichait initialement un nombre important et volumineux d'aggrégats fusionnés en surface. Pour autant, allonger le temps de l'attaque n'aboutirait pas nécessairement à de meilleurs états de surface puisque les acides commenceraient à dissoudre les couches elles-mêmes, ce qui intensifierait l'amplitude entre les pics et les vallées, synonyme de dégradation de la qualité surfacique.

3.4.2.3 Abrasive flow machining

Les relevés de périmètres après traitement AFM sur les différentes surfaces des guides d'ondes sont représentés sur la figure 3.19. Sur les trois exemplaires exploitables, les périmètres sont compris entre 2031 microns (sur la surface verticale de l'orientation 1) et 2002 microns (sur la surface verticale de l'orientation 1) avec une valeur moyenne située à 2015 ± 10 microns.

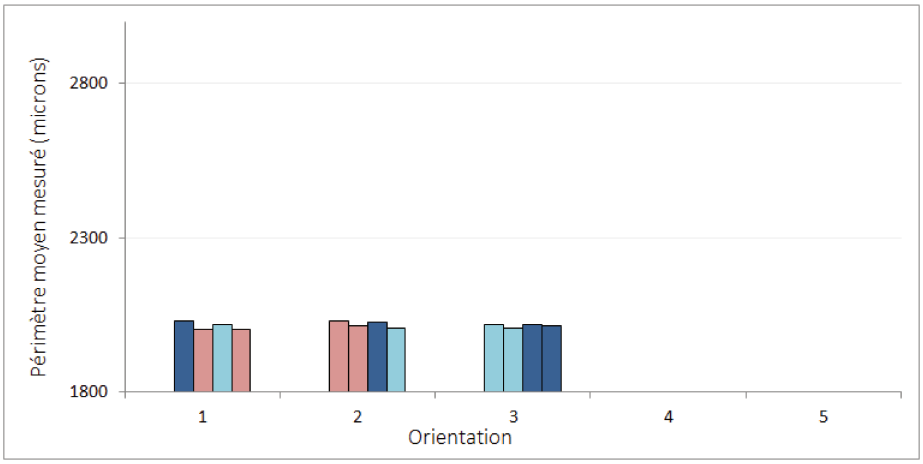

FIGURE 3.19 – Périmètres moyens mesurés, selon l'orientation de fabrication, sur les 4 surfaces constitutives du guide d'ondes après traitement AFM : surface verticale (rouge), surface upskin (turquoise) et surface downskin (bleu)

Contrairement au décapage chimique, l'amélioration de l'état de surface apportée par la pâte abrasive ne semble pas plafonnée à une certaine valeur (2200 microns environ pour l'attaque chimique). Quel que soit l'état de surface initial, de 2313 à 2607 microns, l'AFM donne lieu à des états de surface au plus proche des 2000 microns, synonymes de surface *parfaite* (Table 3.10). Il est également intéressant de noter que la paramétrie AFM employée dans chacun des cas (Paragraphe 3.3.4) aboutit aux mêmes résultats surfaciques.

ORIENTATION	GUIDE BRUT	APRÈS TRAITEMENT AFM
1	2607	2031
2	2595	2026
3	2501	2017
4	2709	-
5	2269	-

TABLE 3.10 – Evolution du périmètre le plus long mesuré sur chaque orientation avant et après traitement AFM, pour la même surface considérée

Sous une pression de 100 bars, l'écoulement le long de la pièce d'un fluide visqueux chargé d'abrasif érode les aspérités avec lesquelles il est en contact. Les particules/agglomérats attaché(e)s en surface sont rapidement éliminé(e)s par le passage de la pâte, qui entre alors en contact direct avec les surfaces elles-mêmes. Au cours des différents cycles, les parois sont alors polies par érosion et atteignent une qualité de surface au plus proche des 2000 microns (Figure 3.20). L'uniformité relevée sur les différentes surfaces (Figure 3.19) le long des guides est la conséquence de l'homogénéité de la pression exercée par le fluide sur toutes les surfaces en contact.

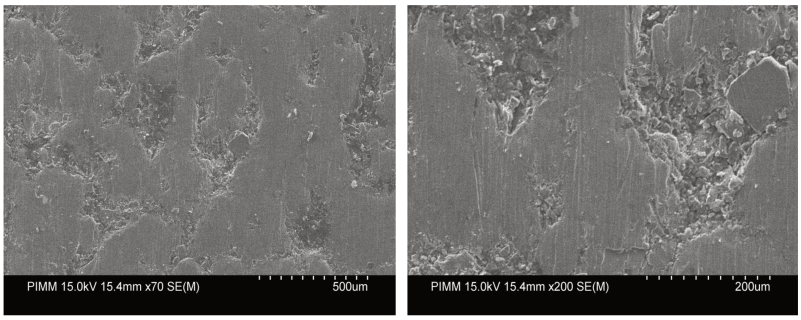

FIGURE 3.20 – Imagerie au MEB représentative d'une surface fabriquée en Al7SiMg0.6 et traitée par AFM (présence de stries d'abrasion), quelque soit sa nature avant traitement. Grandissement x70 (gauche) et x200 (droite)

Malgré l'efficacité de ce traitement, nous ne pouvons négliger sa difficulté de mise en oeuvre, notamment au niveau de la conception de l'outillage. En raison de la pression exercée par la pâte abrasive sur les parois du guide d'ondes lors de son écoulement, il faut s'assurer :

— d'une part, que la pâte s'introduise correctement dans le canal sans entrer en contact avec les brides, dans le but d'empêcher une déformation de l'interface (défaillant pour les orientations 4 et 5). Il aurait fallu pour cela créer un entonnoir ;
— et d'autre part, que la pièce ne subisse pas des efforts de compression (défaillant pour l'orientation 2) en y intégrant un outillage de supportage le long du guide.

Pour des pièces simples rectilignes comme les guides d'ondes, un tel outillage peut-être aisément conçu. En revanche, dans le cadre d'équipements complexes visés dans ces travaux, concevoir un outillage adapté peut devenir extrêmement compliqué. D'autant plus que les fonctions hyperfréquences, telles que les polariseurs ou les filtres, caractérisées par la présence d'irrégularités dans le canal de propagation (mur, lame, escalier), ne semblent pas être en mesure de résister à la pression exercée par la pâte abrasive.

3.4.2.4 Résumé

Pour résumer, les mesures d'état de surfaces avant et après traitement de surfaces peuvent, en plus de la figure 3.21, être résumées selon les 5 points suivants :

1. les profils surfaciques, à travers le paramètre « périmètre », sont homogènes sur une même surface tout le long du guide ;
2. 3 types de surfaces se distinguent par l'ordre de grandeur de l'état de surface relevé sur matériau brut : downskin (2600-2700 microns), upskin (2350-2500 microns) et vertical (2200-2300 microns) ;
3. ces différences résultent de l'orientation de ces mêmes surfaces lors de la fabrication et qui engendrent une dissipation thermique inégale ;

4. le décapage chimique réduit les périmètres dans une limite de 2200 microns grâce à la dissolution des entités présentes en surface ;
5. le traitement AFM permet d'obtenir des rapports de longueurs proches de 1 malgré sa difficulté de mise en oeuvre.

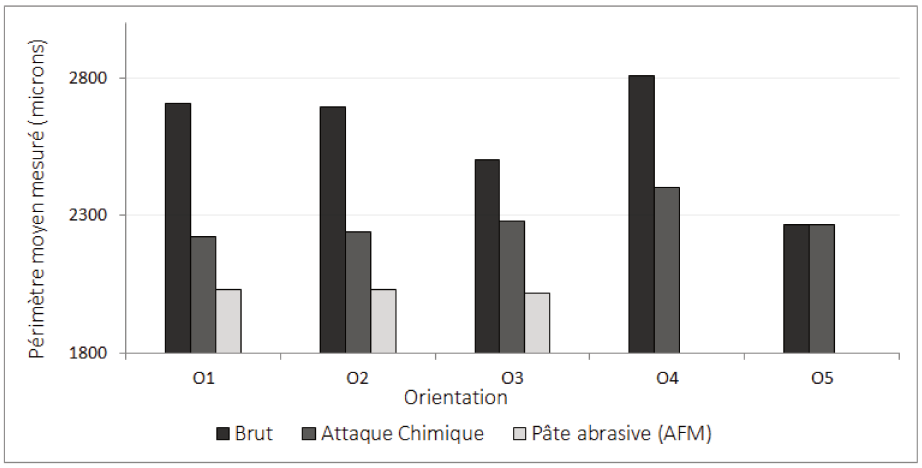

FIGURE 3.21 – Périmètre le plus long mesuré sur les 4 surfaces du guide d'ondes, pour chaque orientation de fabrication, avant et après traitement de surface

3.5 Discussions

Les données collectées et présentées dans les sections 3.4.1 et 3.4.2 ont permis de constater des évolutions, tant électromagnétiques que surfaciques, en fonction de l'orientation de fabrication, du type de surface considéré ou des traitements de surfaces réalisés. Globalement, à mesure que les surfaces s'améliorent, les pertes diminuent. Précisément, ces évolutions conjointes suggèrent une relation de cause à effet entre les états de surfaces d'un guide d'ondes et les propriétés de propagation.

La principale difficulté réside dans l'identification, parmi les 4 parois du guide d'ondes, de l'état de surface associé à l'évolution des pertes (le plus détérioré ? le moins détérioré ? une moyenne ? une somme des inverses ? etc.). Il semblerait que les pertes en transmission soient liées à l'état de surface le plus degradé relevé parmi les 4 parois constitutives du guide d'ondes et qui, en tant que paramètre limitant, confère sa valeur au système (figure 3.22). C'est pour cette raison que l'orientation 4, étant pourtant la seule à présenter 2 surfaces très dégradées, n'affiche pas de pertes signficativement plus élevées que les autres.

La figure 3.22, qui dépeint donc l'évolution des pertes en transmissions suivant le périmètre de la surface limitante, révèle deux tendances distinctes. Les pertes moyennes sur la bande 28-35 GHz sont égales à -0.3 dB, indépendamment de la qualité de surface lorsque le périmètre limitant se situe en dessous de 2300 microns. Au-delà, les pertes augmentent linéairement à mesure que la qualité de la surface limitante se dégrade.

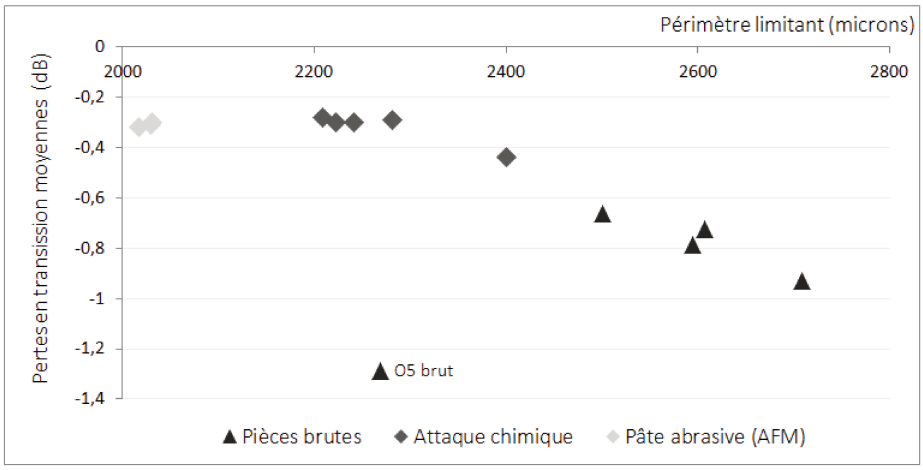

FIGURE 3.22 – Périmètre moyen limitant mesuré sur chaque guide d'onde en fonction des pertes en transmission moyennes sur la bande 28-35 GHz relevées sur celui ci

Or, comme nous l'évoquions précédemment dans le chapitre 2 consacré à l'état de l'art, les pertes $\alpha_{c,TE10}$ mesurées sont en fait liées indirectement à la qualité surfacique à travers la conductivité électrique $\sigma_{réelle} = \mathrm{K}_r \sigma_{théorique}$ du matériau - où K_r est un coefficient dépendant de l'état de surface - suivant l'équation 3.2 :

$$\alpha_{c,TE10} = 8,668 \, \frac{\sqrt{\pi f \epsilon}}{\sqrt{K_r \sigma_{théorique}} \, b} \, \frac{1 + \frac{2b}{a}\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \qquad dB/m \tag{3.2}$$

où a et b sont les dimensions de la section du guide, f_c la fréquence de coupure, μ la

perméabilité magnétique et ϵ la permittivité du matériau. En supposant que les variations dimensionnelles induites par le procédé sont isotropes - le rapport 2b/a est alors présumé invariable et égal à 1 (Table 2.3) - l'équation 3.2 peut s'écrire pour un guide WR-28 de 200 mm de long :

$$\alpha_{c,TE10} \simeq 0,002571 \frac{\sqrt{f}}{\sqrt{K_r \sigma_{théorique}}} \frac{1+\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}{\sqrt{1-\left(\frac{f_c}{f}\right)^2}} \quad dB \tag{3.3}$$

Pour tous les guides dont les périmètres limitants sont inférieurs à 2300 microns, les pertes $\alpha_{c,TE10}$ moyennes mesurées sur la bande 28-35 GHz sont identiques et égales à -0.3 ± 0.02 dB (figure 3.22). Autrement dit, les pertes sont indépendantes de l'état de surface lorsque celui-ci est inférieur à un certain seuil. Dans ce cas, le coefficient Kr est égal à 1 et $\sigma_{théorique} = \sigma_{réelle}$. D'après l'équation 3.2, la conductivité électrique théorique $\sigma_{théorique}$ de l'aluminium AlSi7Mg0.6 peut alors être évaluée entre 8,6.10^6 et 1,02.10^7 S/m, contre 2,26x10^7 S/m pour un alliage AlSi7Mg0.3 de fonderie [95]. A titre de comparaison, Silbernagel et al. [96] ont estimé à 1,68.10^7 S/m la conductivité électrique d'un alliage AlSi10Mg0.6 LBM poli. Ces valeurs plus faibles pourraient s'expliquer par :

1. **Méthode de calcul utilisée**. Couramment employée en hyperfréquences, la détermination de la conductivité électrique suivant l'équation 3.2 à partir des pertes réelles mesurées, pourrait conduire à des imprécisions de par (i) l'ensemble des approximations faites dans l'équation 3.3 (ii) les erreurs de mesures de pertes par transmission sur la bande [28-35] GHz (iii) la dépendance, dans cette équation, de la conductivité électrique à la fréquence d'utilisation alors qu'elle en est indépendante dans la réalité.

2. **Microstructures.** Sur l'alliage de fonderie, on observe la formation de dentrite de silicium de plusieurs centaines de microns à l'intérieur de la matrice d'aluminium (Figure 3.23). Le procédé LBM induit quant à lui une microstructure à réseau cellulaire très fin pour lequel chaque cellule d'aluminium - de l'ordre du micromètre - est entourée de silicium, isolant électrique (Table 3.11). Dans une telle microstructure, la capacité des charges électriques à se déplacer librement est potentiellement plus limitée, en raison de la distribution homogène du silicium tout autour des cellules d'aluminium, causant une baisse de la conductivité électrique pour l'alliage LBM.

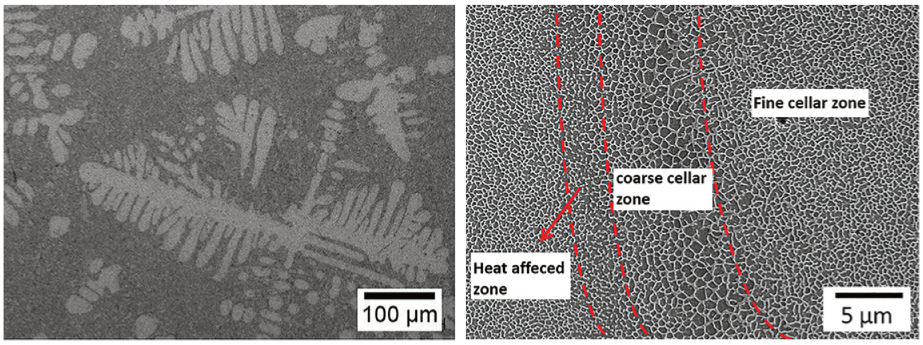

FIGURE 3.23 – Microstructures d'alliage Al-Si d'après [9] : (à gauche) issue de fonderie (à droite) issue du procédé LBM

Matériau	Conductivité électrique (% IACS [4])
Cu pur	100
Al pur	64
Si pur	$< 10^{-9}$
AlSi7Mg0.6 (Fonderie) [95]	39
AlSi10Mg0.6 (LBM - poli) [96]	29
AlSi7Mg0.6 (LBM)	15.3 - 18.1

Table 3.11 – Conductivités électriques

Au-delà du seuil, la conductivité électrique $\sigma_{réelle}$ devient affectée par la qualité surfacique limitante - Kr est alors différent de 1 - ce qui se traduit par une augmentation des pertes par transmission. A partir des données récoltées et de l'équation 3.3, le coefficient K$_r$ a été calculé en fonction du périmètre limitant p. Il peut être approximé, pour un guide WR-28 en AlSi7Mg0.6 issu de fabrication additive, par la formule :

$$\begin{cases} Kr & \approx & \left[\dfrac{p_{théorique}}{10(p+p_{seuil})}\right]^2 \\ p & \geq & 2300 \end{cases} \tag{3.4}$$

La conductivité réelle s'exprime alors :

$$\begin{cases} \sigma_{réelle} & \approx & \left[\dfrac{p_{théorique}}{10(p+p_{seuil})}\right]^2 \sigma_{théorique} \\ p & \geq & 2300 \end{cases} \tag{3.5}$$

On observe donc une évolution de la conductivité réelle inversement proportionnelle au carré de la longueur du périmètre limitant. Ainsi, plus l'état surfacique se dégrade et plus la conductivité électrique du matériau diminue ce qui aboutit, d'après l'équation 3.2 à une augmentation des pertes, comme observé sur la figure 3.22. L'hypothèse que nous formulons ici revient donc à dire que l'état de surface affecte directement la conductivité électrique du matériau et conditionne les pertes associées.

Il serait également possible d'interpréter ces résultats différemment, plutôt d'un point de vue phénoménologique, en reliant directement les pertes à l'état de surface. A ce titre, le plus intéressant à noter est sans doute l'évolution linéaire qui relie les pertes et la longueur du périmètre limitant (figure 3.22), comme nous le supposions dans le paragraphe 3.3.7 pour justifier la mesure du paramètre « périmètre », en dépit des paramètres d'états de surface normés. Les pertes par transmission produites par un guide d'ondes WR-28 en AlSi7Mg0.6 issu de fabrication additive peuvent être approximées, en fonction du périmètre p :

$$\alpha_{c,TE10} \approx \begin{cases} -0.3 & \text{si } 2000 < p < 2300 \\ \dfrac{10(p+p_{seuil})}{p_{théorique}} & \text{si } p > 2300 \end{cases} \tag{3.6}$$

En dessous du seuil de 2300 microns, il semblerait que l'état de surface ne perturbe pas le déplacement du courant électrique en surface du conducteur, ou du moins suffisamment peu pour que cette perturbation ne soit observable par la mesure. Les pertes résultantes

équivalent alors à celles calculées par l'équation 3.2 avec une conductivité intrinsèque du matériau comprise entre $8{,}6.10^6$ et $1{,}02.10^7$ S/m. Au delà du seuil, la perturbation devient prépondérante et linéique. Dans ce cas, l'hypothèse que nous émettons équivaut à dire que l'état de surface affecte directement les pertes à travers une augmentation de la longueur de parcours du courant électrique, ce qui implique une variation de la conductivité électrique *apparente* du matériau.

La présence d'un point singulier est notable sur la figure 3.22. Il correspond au WR-28-O5 sans traitement de surface, pour lequel les pertes générées sont les plus élevées de ce plan d'expérience (-1.2 dB), alors même que le périmètre limitant s'élève seulement à 2269 microns (de loin le plus faible sur matériau brut). D'après les discussions précédentes, un tel état surfacique aurait dû produire des pertes proches de -0.3 dB.

Maxwell [97] postule que la présence de rayures peut entrainer une modification de la distribution de courant, surtout lorsqu'elles sont orientées perpendiculairement aux lignes de courant. Les rayures pourraient éventuellement se comporter comme des constrictions dans la section efficace, causant ainsi une augmentation de la résistance. Elles pourraient s'apparenter ici aux différentes couches de fabrication, orientées orthogonalement à la direction de propagation du courant pour l'orientation 5. Les résultats obtenus après traitement de surface, amènent le niveau de pertes à -0.3 dB alors même qu'aucune modification n'a été apportée de ce point de vue, balayent cette hypothèse.
Bien que la même conclusion puisse être apportée à l'hypothèse selon laquelle l'orientation 5 génèrerait plus de porosités au niveau de l'épaisseur de peau, perturbant ainsi la propagation du courant électrique, une analyse du taux de porosité a tout de même été réalisée. Pour cela, un polissage et une attaque chimique préalables ont permis d'évaluer le taux de porosité de deux surfaces - une de l'orientation 3 qui présente les meilleures performances et une de l'orientation 5. La technique de binarisation du logiciel ImageJ a été employée. Les résultats montrent que le taux de porosité reste très faible dans les deux cas (0.073% pour l'orientation 3 et 0.106% pour l'orientation 5) ne pouvant donc justifier les différences de propriétés hyperfréquences observées.

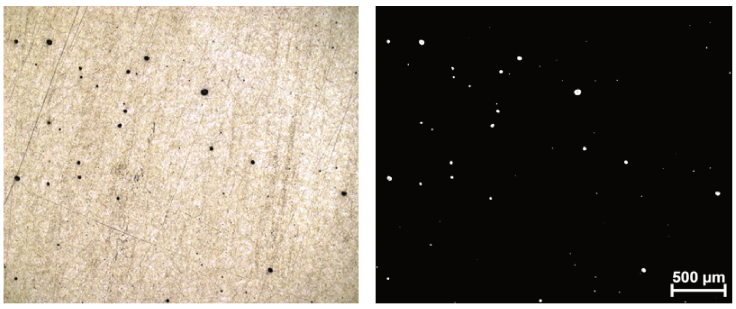

FIGURE 3.24 – Analyse du taux de porosité généré suivant O5 par binarisation de la surface (coupe (xz))

Cette singularité pourrait en fait s'expliquer par la distribution de particules fines observée en surface, et spécifique à l'orientation 5 (Figure 3.25), en raison de la faible quantité de chaleur accumulée en périphérie, qui les empêche de coalescer et s'agglomérer. Or, aucune autre surface n'affiche une telle distribution, pas même les surfaces verticales des orientations 1 et 2 pour lesquelles la chaleur semble avoir favorisé la formation de petits agrégats indissociables de la surface (Figure 3.25). Il est donc possible que cette distribution singulière formée d'un ensemble de particules discrètes, inhérente à l'orienta-

tion 5 et dissimulée sous une faible valeur de périmètre, soit responsable de la quantité de pertes supplémentaire observée.

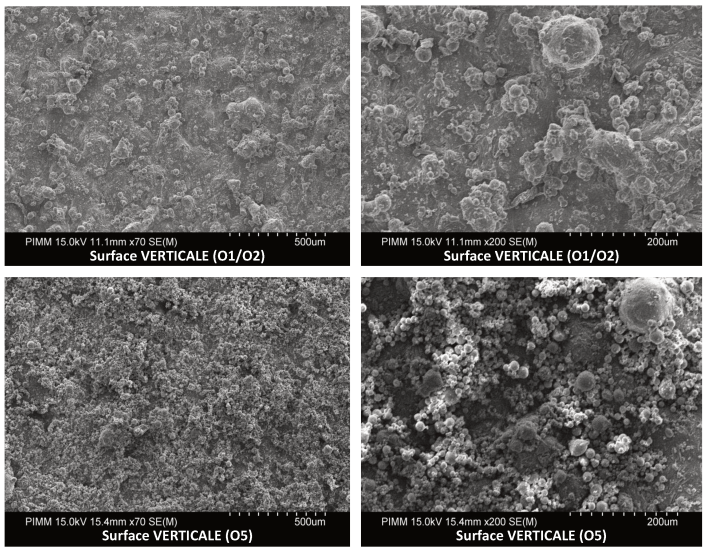

FIGURE 3.25 – Imageries au MEB des surfaces verticales fabriquées en Al7SiMg0.6 des orientations O1/O2 et O5. Grandissement x70 (gauche) et x200 (droite)

En effet, cette couche superficielle poreuse créée par des particules de poudre non fusionnées pourrait être celle dans laquelle le courant électrique, qui se propage en surface du conducteur sur 0,5 micron environ, est entièrement contenu. Pour une telle distribution, il se pourrait que le périmètre ne traduise pas réellement le chemin parcouru par le courant électrique, en cela que la pointe du palpeur n'a pas accès à la contre-dépouille (Figure 3.26). L'écart entre le périmètre mesuré et le trajet du courant est alors d'autant plus grand que la couche superficielle est composée de particules nombreuses et fines (ce qui est le cas de la surface O5 issue de la paramétrie la plus froide). En considérant que les particules ne sont pas fusionnées, mais simplement fixées les unes aux autres par des points de contact ponctuels, le déplacement du courant électrique est alors fortement perturbé et allongé. Il est donc important de définir une paramétrie machine qui apporte suffisamment de chaleur pour éviter la formation d'une couche superficielle, et qui permettrait plutôt de faire coalescer et fondre les particules, à volume de poudre collé ou refondu équivalent.

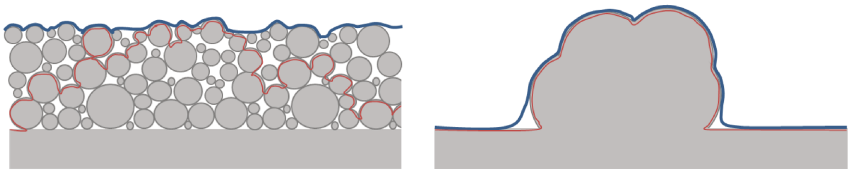

FIGURE 3.26 – Représentation de l'écart entre le périmètre mesuré (en bleu) et le trajet du courant électrique (en rouge) : (à gauche) dans la couche superficielle de O5 (à droite) dans le cas d'agrégat coalescé

Après le traitement de décapage chimique, la seule évolution surfacique constatée concerne la disparition de cette couche superficielle qui est dissoute, permettant au courant électrique de se propager dans les couches d'aluminium fusionnées, ce qui conduit à l'amélioration considérable de ses propriétés de transmission (Table 3.17). A contrario, toutes les autres surfaces - y compris les surfaces verticales des orientations 1 et 2 - présentent des aggrégats de particules coalescées et fusionnées, formant une structure indissociable avec la surface. La conductivité électrique évolue alors selon le profil surfacique résultant,

comme décrit précédemment.

3.6 Synthèse et intégration en phase de conception

3.6.1 Synthèse

Ces travaux expérimentaux ont permis de récolter une **quantité significative d'informations** sur le comportement des propriétés électromagnétiques vis-à-vis des états surfaciques engendrés par le procédé de fusion laser sur lit de poudre. Elle servira de **donnée d'entrée** en phase amont de conception, pour permettre au concepteur de tirer profit des avantages offerts par la fabrication additive à travers une connaissance *quantifiée* de la technologie. Avant d'introduire les préceptes de conception retenus pour la réalisation de pièces hyperfréquences, une synthèse de l'étude est présentée.

Dans les conditions de fabrication adoptées, l'état de surface engendré par le procédé de fusion de laser sur lit de poudre est **homogène et isotrope** le long d'une même paroi conductrice - en dépit de l'effet escalier - à travers le relevé du paramètre « périmètre ». L'isotropie est le résultat de l'agglomération en surface de particules du lit de poudre, rendue possible grâce à la chaleur apportée par le laser qui s'emmagasine en périphérie de la pièce au cours de la fabrication. Suivant l'orientation des surfaces lors de la fabrication, les périmètres relevés sur matériau brut se situent globalement aux alentours de 2200-2300 microns sur les surfaces bâties verticalement, de 2350-2500 microns pour les surfaces upskin et de 2600-2700 microns pour les surfaces downskin. Les traitements de surface, tant par la voie mécanique que chimique, permettent d'améliorer significativement les qualités surfaciques : le décapage chimique permet de dissoudre les particules/aggrégats en surface tandis que la pâte abrasive, malgré sa difficulté de mise en oeuvre, les transforment en surfaces *quasi miroirs*.

Suivant les conditions surfaciques, les pertes par transmission mesurées présentent des niveaux différents, entre -0.3 dB (~6.8% de puissance non transmise) et -1.2 dB (~24%), témoignant de la **forte influence de l'état de surface sur les propriétés électromagnétiques en transmission**. Précisément, elles convergent vers la valeur minimale octroyée par la **conductivité électrique intrinsèque** à l'alliage AlSi7Mg0.6, portée à -0.3 dB, **indépendamment de la valeur périmétrique tant que celle-ci reste inférieure à 2300 microns. Au delà de cette valeur, les pertes subissent une augmentation proportionnelle à l'état de surface limitant** induit par le procédé. Exception faite pour les surfaces localement *trop* froides sur lesquelles de fines particules en grande quantité se fixent ponctuellement et dans lesquelles le courant électrique va se déplacer avec de fortes perturbations, causant d'importantes pertes malgré un état de surface mesuré en dessous du *seuil*.

L'orientation de la pièce et des surfaces joue donc un rôle crucial lors de la phase de conception. Elle **agit directement sur les performances électromagnétiques** des pièces réalisées, le caractère crucial autosupporté des canaux internes et sur les coûts engagés, à la fois liés à la fabrication et aux traitements de surface. Pour accompagner au mieux le concepteur, il est nécessaire de l'informer sur les spécificités du procédé, en lien avec l'application hyperfréquence, à prendre en considération au cours de la phase amont de conception, pour conférer à la pièce les meilleures performances possibles.

3.6.2 Intégration en phase de conception

A partir de la machine PROX DMP 300, les **données expérimentales recueillies** au cours de cette expérimentation seront intégrées dans la **méthode de conception** -

en plus de celles déjà existantes. En particulier, elles ont permis d'identifier des priorités [5] concernant le **choix des orientations surfaciques** lors du développement géométrique de composants hyperfréquences en phase de conception, pour en optimiser les performances électromagnétiques (Table 4.1). Nous pensons que ces tendances sont applicables à la fois à l'**aluminium et au titane** qui, bien que présentant des caractéristiques métallurgiques différentes, se comportent de manière similaire vis-à-vis des états de surface produits par le procédé selon des orientations définies, aux ordres de grandeur près.

Priorité conception	Orientation surface
1	90°(xy) ∩ 0°(xz)
2	45°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin
3	0°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin
4	45°(xy) ∩ 0°(xz) Upskin
5	45°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin
6	45°(xy) ∩ 0°(xz) Downskin
7	0°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin

Table 3.12 – Priorités des orientations surfaciques

D'autre part, pour l'alliage AlSi7Mg0.6, des données précises ont été récoltées sur la PROX DMP 300 (Table 3.13). Les états de surfaces et les conductivités électriques équivalentes (calculées grâce à l'équation 3.3 à partir des pertes et imputées à l'état de surface limitant) liées à une orientation et induits par le procédé permettront d'**anticiper au mieux les pertes réelles** qui en découleront, par rapport à l'utilisation de la conductivité électrique des bibliothèques de simulations qui introduit des écarts importants entre la simulation et la réalité. Ces données constituent des informations précises et seront donc intégrées à la méthode de conception et exploitées pour le développement de composants en AlSi7Mg0.6.

Orientation surface	Périmètre (microns)	Conductivité électrique (S/m)
90°(xy) ∩ 0°(xz)	2223 - 2329 μm	
45°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin	2355 - 2368 μm	
0°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin	2347 - 2379 μm	
45°(xy) ∩ 0°(xz) Upskin	2417 - 2409 μm	
45°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin	2493 - 2501 μm	$2{,}15.10^6$
45°(xy) ∩ 0°(xz) Downskin	2595 - 2607 μm	$1{,}52.10^6$
0°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin	2705 - 2709 μm	$1{,}15.10^6$

Table 3.13 – Etats de surfaces moyens et conductivité électrique équivalente obtenus coformément à une orientation de fabrication donnée pour l'alliage AlSi7Mg0.6 pour une paramétrie machine donnée

Par ailleurs, pour répondre à des exigences particulières en conception ou pour toute autre raison, il est plausible que la paramétrie machine adoptée pour la fabrication (puissance et vitesse laser, hatch, etc.) soit différente de celle utilisée dans le chapitre 3. Dans de tels cas, les états de surface produits pourraient évoluer tout comme les informations de

5. A l'état d'hypothèse pour la priorité 1. Il faudrait démontrer que, moyennant un ajustement de la paramétrie, les surfaces verticales de l'orientation 5 permettent d'obtenir des périmètres de l'ordre de 2200-2320 microns **et** des performances par transmission de l'ordre de -0.3 dB

la table 3.13. Néanmois, si la nouvelle paramétrie employée respecte certaines considérations (présentées dans le chapitre 4) et dont l'objectif vise à optimiser les états de surface, les nouvelles données expérimentales **resteront *très proches*** de celles affichées dans la table 3.13, acquises avec une paramétrie machine déjà satisfaisante vis-à-vis des qualités surfaciques. Quoi qu'il en soit, une modification de la stratégie de fabrication **ne modifie en rien les priorités d'orientations surfaciques** de la table 4.1.

Enfin, partant du principe qu'une pièce a très peu de chance de voir le jour **si son coût de revient n'est pas compétitif** vis-à-vis des procédés conventionnels de fabrication, la priorité est donnée à l'orientation globale de la pièce. La deuxième exigence concerne **l'orientation des parois conductrices de manière à optimiser les performances électromagnétiques** sans traitement additionnel. Pour autant, le choix de l'orientation par rapport aux états de surface ne doit pas constituer un frein à la créativité. Le développement de formes qui permettraient d'améliorer les performances électromagnétiques pourraient conduire à compenser ces défauts surfaciques. La dernière porte sur l'anticipation des traitements de surface à mener post-fabrication, moyennant une augmentation du coût de la pièce, dès lors que les performances exigées ne peuvent être atteintes sur le matériau brut. Pour y répondre, **les paramètres d'orientation, de géométrie et de procédé seront adaptés**.

La méthode de DfAM dédiée aux composants hyperfréquences, présentée au chapitre 4, a donc été structurée autour de l'ensemble des informations et des données recueillies dans ces expérimentations (Tables 4.1 et 3.13 en particulier). La base de connaissances qui associe choix de conception, spécificité du procédé et influence sur les hyperfréquences, a pu être considérablement élargie et consitue un support solide sur lequel le concepteur pourra s'appuyer pour développer des pièces de qualité.

Chapitre 4

Proposition d'une méthode de DfAM dédiée aux composants hyperfréquences

Ce quatrième chapitre porte sur la présentation de la méthode de *Design for Additive Manufacturing* que nous proposons, en réponse à celles déjà existantes dans la littérature et dont les limites identifiées ont été présentées au chapitre 2. Les données expérimentales reliant les spécificités du procédé aux propriétés électromagnétiques, recueillies au chapitre 3, y seront intégrées de manière à ériger la méthode autour du chaînage conception-procédé-hyperfréquences.

La première partie donnera la vision générale de la méthode, avec notamment les quatre modules dont elle est composée, ainsi que les données d'entrée nécessaires à son utilisation.

La deuxième partie détaillera la structure de la méthode, à travers la présentation des sous-étapes constitutives de chaque module.

La dernière partie conclura sur les apports de la méthode au regard des verrous identifiés au chapitre 2, en particulier sur l'intérêt d'y intégrer des données liées à la fois aux domaines de la conception, du procédé et des hyperfréquences.

4.1 Vision générale

A partir des informations récoltées dans la littérature, à travers l'expérimentation ainsi que de l'expérience acquise, l'objectif est ici de **définir une méthode de DfAM qui intègre les caractéristiques procédé-conception-hyperfréquences**. Pour ce faire, nous nous sommes basés sur la méthode de conception pour les procédés traditionnels de composants hyperfréquences, qui peut se résumer à deux modules principaux (Figure 4.1). A partir du cahier des charges, les concepteurs hyperfréquences définissent le « Vide » de la structure électromagnétique, c'est-à-dire le volume dans lequel se propage le champ électromagnétique de manière à remplir les exigences fonctionnelles. Par la suite, le fichier CAO correspondant est transmis au bureau d'études mécaniques qui procède à un « habillage » conformément aux exigences mécaniques.

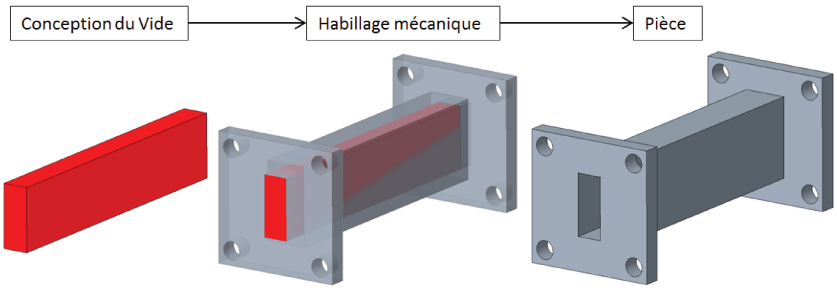

FIGURE 4.1 – Conception pour les procédés traditionnels de composants hyperfréquences

A ces deux modules *classiques*, que nous avons choisi de conserver et qui ont servi de structure à la méthode proposée, deux autres ont été créés et ajoutés. Notre méthode de DfAM dédiée aux composants hyperfréquences s'articule donc autour de 4 modules principaux, à savoir : définition d'une structure modulaire orientée, conception du vide, habillages et analyses finales. Chaque module est subdivisé en un certain nombre de groupes de travail au sein desquels des outils et des données expérimentales propre à la fabrication additive ont été intégrés. D'après la classification de DfAM établie par Laverne [62], la méthode proposée s'inscrit dans le cadre du *DfAM for concept assessment*.

L'étape relative à la clarification des tâches et définition des exigences ne sera pas évoquée dans cette méthode. Les spécifications techniques - par exemple l'arborescence fonctionnelle, les études préliminaires, l'analyse du milieu extérieur, etc. - les spécifications structurelles - à travers les interfaces fonctionnelles, les flux fonctionnels, l'organigramme produit, etc. - et l'organigramme des tâches - tâches induites, moyens associés, liste des exigences et spécifications - sont très largement renseignés dans la littérature existante et au sein des bureaux d'études [92, 98–100]. Comme tout projet, elle y figurera en tant que donnée d'entrée à la méthode que nous proposons.

Pour favoriser la compréhension de la **méthode de DfAM procédé-conception-hyperfréquences** et de la nature des caractéristiques d'entrée associées, les **données procédé** figureront en vert, les **données conception** en orange, les **données domaine** (hyperfréquences, mécanique, thermique) en rouge, les **données expérimentales** en jaune et les **données issues du cahier des charges** en bleu (Figure 4).

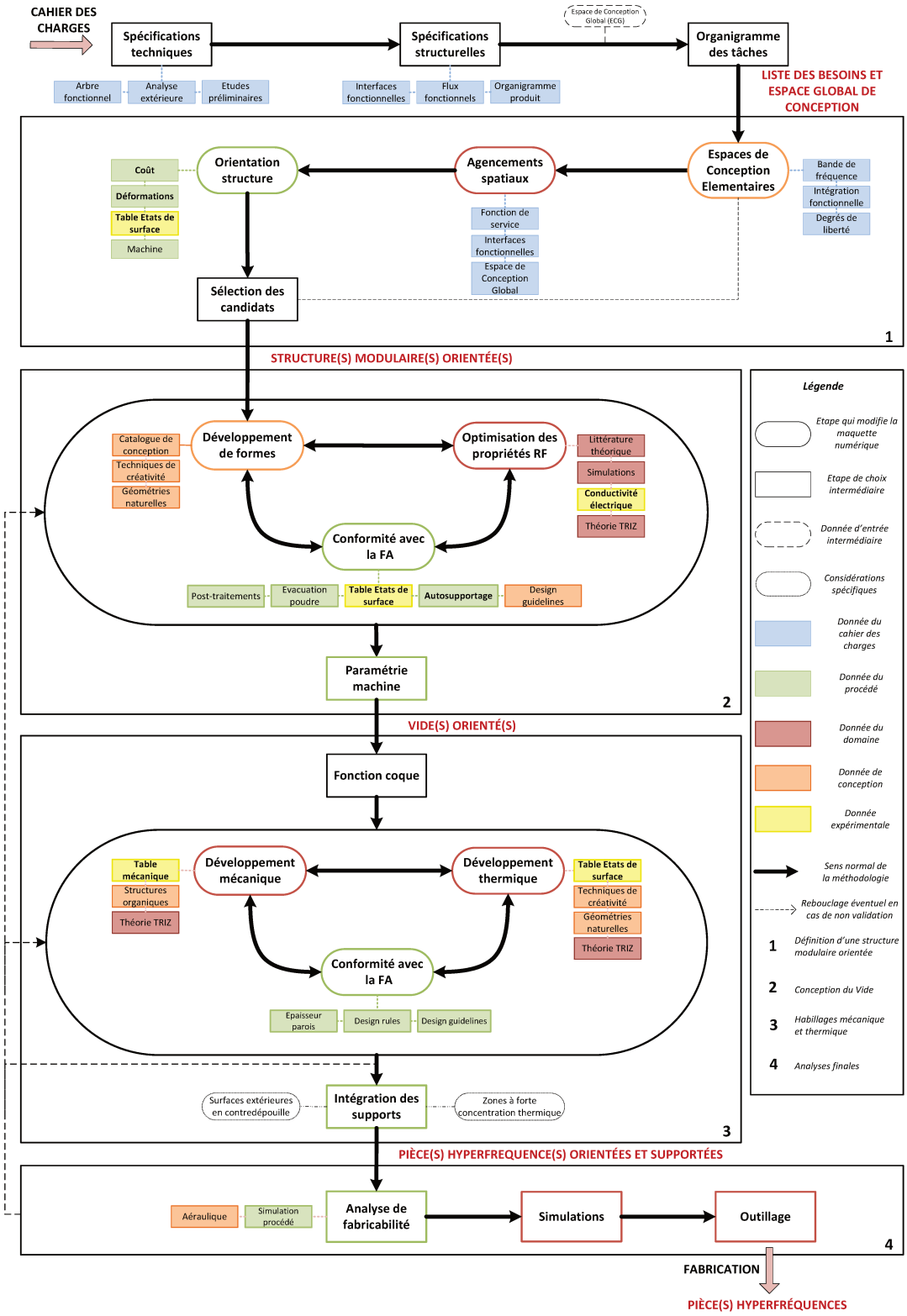

FIGURE 4.2 – Méthodologie DfAM proposée appliquée aux composants guidés hyperfréquences

4.2 Détails de la méthode

Dans cette partie nous expliciterons les différentes étapes de la méthode de DfAM proposée dans le cadre de nos travaux. En particulier nous détaillerons, pour chacune d'elles, la façon dont sont traitées les données d'entrée et ce qui en résulte. La compréhension purement théorique d'une méthode de DfAM pouvant s'avérer pointue, elle sera illustrée à travers le développement d'un guide d'ondes en bande K [18-22] GHz dans le chapitre 5.

4.2.1 Définition d'une structure modulaire orientée

Entrée : liste des besoins et Espace Global de Conception
Sortie : Structure(s) modulaire(s) orientée(s)

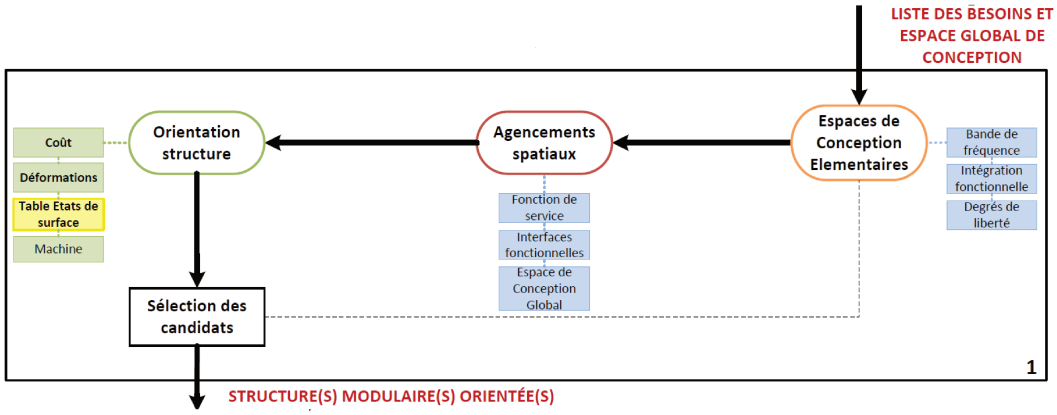

FIGURE 4.3 – Etape 1 : définition d'une structure modulaire orientée

A l'issue de la clarification des tâches, outre les spécifications techniques et structurelles, il est nécessaire de délimiter l'Espace Global de Conception (EGC), c'est-à-dire le volume alloué à la conception de la pièce, conformément à l'environnement dans lequel il doit être intégré.

4.2.1.1 Espaces Elementaires de Conception

A l'intérieur de cet EGC, la pièce doit être conçue de manière à remplir sa fonction globale, telle que définie par le cahier des charges, tout en coïncidant avec ses interfaces fonctionnelles (Figure 4.4). Par la décomposition en fonctions élémentaires (guide d'onde, filtre, polariseur, orthomode, etc.) de la fonction globale, il est possible de définir un Espace Elementaire de Conception (EEC) pour chacune de ces fonctions. Les dimensions de ces EEC sont dépendantes de la bande de fréquence d'utilisation - bien que certaines fonctions possèdent des degrés de liberté supplémentaires tels que la longueur ou le rayon de courbure.

L'objectif ici n'est pas de définir une géométrie précise et finale de ces fonctions, mais seulement d'en dessiner une représentation sommaire. Dans les étapes suivantes, ces EEC seront « taillés » en vue d'obtenir une géométrie optimisée - tant du point de vue électromagnétique que procédé. Pour bénéficier pleinement des avantages apportés par la fabrication additive (cf. section 1.8), les intégrations fonctionnelles doivent être considérées dans cette phase - plusieurs fonctions élémentaires figurent alors dans un même EEC.

4.2.1.2 Agencements spatiaux

Ensuite, les fonctions sélectionnées - et donc les EEC - sont agencées spatialement dans l'Espace Global de Conception pour former la fonction globale répondant au cahier des charges (Figure 4.4). Pour ce faire, certaines considérations doivent être prises en compte :

1. l'agencement entre les différentes fonctions élémentaires doit satisfaire la **fonction de service** définie précédemment ;
2. les correspondances avec les **interfaces fonctionnelles** doivent être respectées ;
3. la structure modulaire doit être contenue dans **l'Espace de Conception Global** ;
4. si un traitement mécanique de type AFM est envisagé, la structure modulaire doit **anticiper la conception et l'adaptation d'un outillage**.

Si toutes ces considérations sont satisfaites, l'objectif est d'identifier les potentielles orientations de fabrication.

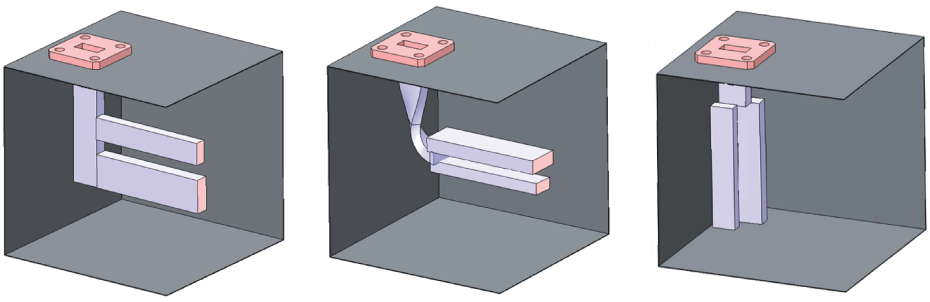

FIGURE 4.4 – Illustration de différents agencement spatiaux dans l'EGC (boite grise) de 3 ECC (mauve clair) pour remplir la fonction globale de duplexeur et respectant les interfaces fonctionnelles (rose)

4.2.1.3 Orientation de fabrication

Comme nous le décrivions dans la section 3.6 et plus largement dans le chapitre 3, l'orientation constitue un choix déterminant sur la qualité finale de la pièce en raison de son influence sur le coût de revient, les états de surface et les déformations.

1. **Coût de fabrication.** Il peut être évalué selon trois critères : la surface projetée de la pièce sur le plateau de fabrication, la hauteur dans la machine et le nombre de pièces à réaliser. Pour un nombre de pièces important, il serait préférable de minimiser la surface projetée en augmentant la hauteur. Un plus grand nombre de pièces pourrait ainsi être réalisé sur le même plateau ce qui réduirait, de surcroît, le coût de réalisation unitaire. Au contraire, pour une faible quantité à fabriquer, il serait à priori plus judicieux de réduire au maximum la hauteur dans la machine en augmentant la surface projetée sur le plateau. Il n'existe pas de *loi* concernant le nombre de pièces à partir duquel il serait plus judicieux d'orienter la pièce verticalement ou à plat, simplement car ce choix est fortement régi par l'Espace Global de Conception et les interfaces fonctionnelles, propres à chaque projet.

2. **Surfaces.** Conformément aux résultats présentés au chapitre 3, les surfaces fonctionnelles doivent être pré-orientées de manière à converger vers le meilleur état de surface atteignable, c'est-à-dire tendre vers 90 degrés relativement à l'orientation de fabrication adoptée. L'objectif est de concevoir une structure dont toutes les surfaces auraient un périmètre mesuré inférieur au *seuil* de manière à permettre aux propriétés électromagnétiques d'atteindre leur niveau optimal de performances. Pour épauler le concepteur au cours de cette phase et de la suivante, la table 4.1

quantifie les états de surfaces conformément à une orientation de fabrication donnée pour l'alliage AlSi7Mg0.6.

Priorité conception	Orientation surface
1	90°(xy) ∩ 0°(xz)
2	45°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin
3	0°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin
4	45°(xy) ∩ 0°(xz) Upskin
5	45°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin
6	45°(xy) ∩ 0°(xz) Downskin
7	0°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin

Table 4.1 – Priorités des orientations surfaciques

Outre l'inclinaison, les surfaces de type downskin - et dans une moindre mesure les surfaces upskin - se prêtent difficilement à cette exigence. Au cours de l'étape suivante, il appartiendra au concepteur de réduire l'influence de ces types de surface sur la propagation du champ, soit en les positionnant dans des zones *mortes*, à savoir où le champ électromagnétique se propage très peu (dans les angles généralement), soit en réduisant leurs dimensions, ou encore en modifiant leur inclinaison conformément à l'orientation de fabrication choisie.

3. **Déformations.** Au-delà des règles de conception génériques proposées dans la littérature pour minimiser les déformations (éviter les pièces denses et volumineuses, les angles vifs, etc.), une pièce dotée d'un ou plusieurs axes de symétrie doit être orientée de manière à le(s) conserver lors de la fabrication. Dans le cas contraire, l'apparition de déformations dissymétriques dans la pièce pourraient engendrer des décalages de phase et donc, une dégradation des performances électromagnétiques.

4. **Machine.** Il va de soi que l'orientation choisie pour la structure modulaire doit être en conformité avec les dimensions de la chambre de fabrication.

Dans le cas où aucune orientation ne puisse satisfaire simultanément les 4 considérations, il appartiendra au concepteur de les classer par ordre de priorité au regard des exigences du cahier des charges, tant d'un point de vue financier que technique.

4.2.1.4 Sélection des candidats

Au moyen de ces représentations, des structures modulaires sont sélectionnées pour poursuivre le développement. Ceci peut être fait en considérant des dimensions incompatibles avec les machines présélectionnées, des caractéristiques spécifiques souhaitées dans certaines régions incompatibles avec la technologie additive, des matériaux différents pour certaines parties de la pièce, etc. S'il n'y a pas d'incompatibilités évidentes, l'objectif est de considérer toutes les fonctions qui composent la fonction globale pour bénéficier du caractère monolithique de la fabrication additive.

Finalement, cette étape initiale mène à des structures modulaires agencées et orientées. Les structures de supportage ne sont pas discutées pour la simple raison que les surfaces - et donc la conception - demeurent virtuelles jusqu'à l'étape 4.2.3 où elles deviennent tangibles grâce à l'habillage mécanique.

4.2.2 Conception du vide

Entrée : Structure(s) modulaire(s) orientée(s)
Sortie : Vide(s) orienté(s)

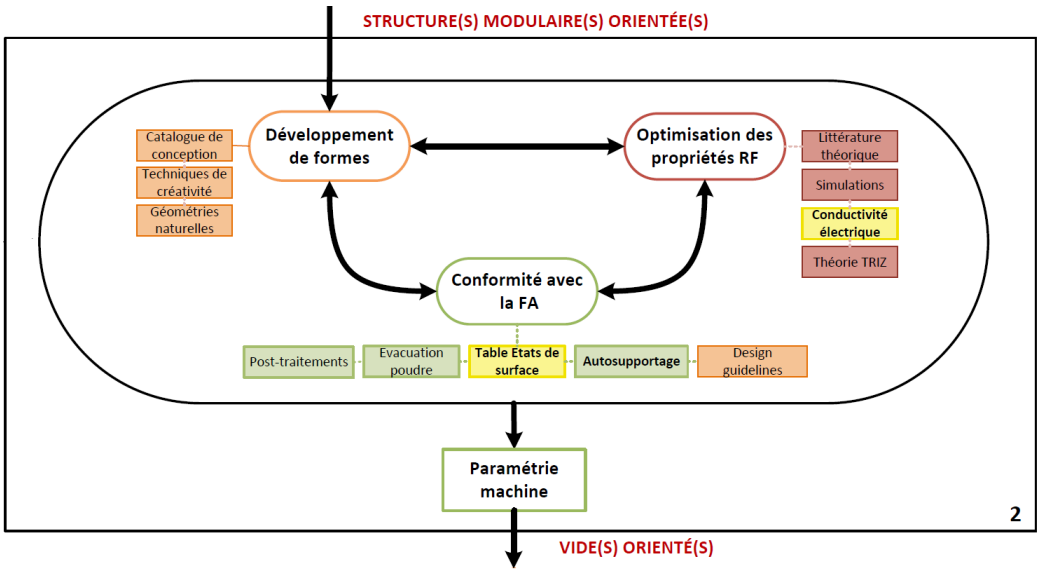

FIGURE 4.5 – Etape 2 : Conception du Vide

Le but est maintenant de concevoir « le Vide », c'est à dire le volume de propagation. Il s'agit d'une étape cruciale dans la conception de tous les composants à propagation guidée car la plus grande partie de la géométrie finale du produit y est définie. A la manière d'un sculpteur qui taillerait un bloc de pierre, les Espaces Elementaires de Conception sont modelés de façon à atteindre les performances électromagnétiques requises tout en intégrant au mieux les spécificités (structures de support) et limites du procédé (état de surface, déformation), selon l'orientation de fabrication plébiscitée à l'étape précédente. Par conséquent, les opportunités créatives explicitées dans la section 1.8 apportées par la fabrication additive doivent être scrutées avec attention dans ce module. De ce fait, nous proposons trois aspects sur lesquels travailler simultanément pour concevoir un « vide » optimisé.

4.2.2.1 Développement de solutions de conception.

Pour outrepasser l'impossibilité d'obtenir *la* forme géométrique optimisée pour une fonction donnée (propagation, filtrage, polarisation, etc.) à partir de la théorie, il convient d'entreprendre la conception de silhouettes étrangères aux strictes géométries rectangulaire et circulaire couramment utilisées. Nous entendons ainsi nous concentrer exclusivement sur les formes/solutions sans penser aux performances radiofréquences qui pourraient en découler. Il s'agit, dans un premier temps, de réduire l'inertie psychologique. Pour ce faire, les techniques de créativité [101, 102], les catalogues de conception [103], le retour d'expérience, l'observation de la nature, etc. sont encouragés.

4.2.2.2 Optimisation des propriétés radiofréquences.

L'optimisation des propriétés radiofréquences permet de garantir les performances électromagnétiques, soit à partir de géométries théoriques, d'une optimisation des solutions de conception développées/existantes ou d'une application de la théorie TRIZ [104].

Pour permettre aux résultats de simulations de s'approcher au plus des résultats qui seront obtenus une fois la pièce fabriquée, **les données expérimentales récoltées concernant les conductivités électriques équivalentes** seront utilisées (Table 4.2). C'est une information cruciale pour le concepteur puisqu'elle permet, à partir de l'orientation de la surface la plus défavorable d'un point de vue surfacique, de déterminer les pertes qui seront engendrées de manière plus réaliste que celles issues de la conductivité électrique de l'aluminium des bibliothèques.

Orientation surface	Alliage AlSi7Mg0.6	Alliage Ti6Al4V
90°(xy) ∩ 0°(xz)	-	-
45°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin	-	-
0°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin	-	-
45°(xy) ∩ 0°(xz) Upskin	-	-
45°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin	$2{,}15.10^6$	-
45°(xy) ∩ 0°(xz) Downskin	$1{,}52.10^6$	-
0°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin	$1{,}15.10^6$	-

Table 4.2 – Conductivité électrique équivalente en fonction de l'orientation de la surface limitante pour les alliages AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V pour une paramétrie de fabrication donnée

Par ailleurs, dans l'hypothèse où la géométrie considérée au cours de ce module soit exposée à un *conflit* entre l'optimisation des propriétés radiofréquences et la conformité avec la fabrication additive, il est préconisé de satisfaire la seconde.

4.2.2.3 Conformité FA

Le dernier aspect proposé concerne la conformité des géométries avec la technologie additive. Les outils existants tels que les *design guidelines* et les *design rules* peuvent permettre aux solutions de conception imaginées de coïncider avec les contraintes de la fabrication additive, mais également aider à générer des approches de solutions basiques pour être optimisées par les outils préalablement introduits. Plus particulièrement, il est absolument nécessaire que la solution géométrique résultante soit en adéquation avec les **exigences en termes de qualité surfacique** définies dans la table 4.1 et qu'elle leur permette d'être **autosupportées (ou à minima que les structures de support puissent être retirés après la fabrication)**. En effet, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, **l'orientation des surfaces de propagation représente un choix crucial lors de la phase de conception puisque les pertes qui résulteront de la géométrie finale en dépendent étroitement**. A noter également que les **post-traitements** - traitement de surface (possibilité de concevoir un outillage adéquat) et évacuation de la poudre - doivent être pris en compte dans ce module de conception. S'il est de nature mécanique, il est conseillé de dessiner des changements de section lisses, de grands angles arrondis, etc. au lieu de modifications brutales, d'angles vifs, de cavités, etc.

4.2.2.4 Paramétrie machine

La paramétrie machine, et notamment la densité d'énergie laser apportée au lit de poudre, joue un rôle important sur l'histoire thermique de la pièce et donc, sur les **déformations** et les **états de surface**. Plus la **chaleur emmagasinée par la pièce est importante**, plus la température de paroi est élevée, et plus les particules du lit de poudre ont tendance à **coalescer et former des agglomérats** fixés en surface, responsables d'un

état de surface dégradé. Au contraire, lorsque la **chaleur n'est pas suffisamment forte**, les particules de lit de poudre se fixent directement sur la paroi conductrice, moyennant un état de surface peu détérioré, mais provoquant une **baisse significative de la conductivité électrique**. Des directives sont proposées pour optimiser l'histoire thermique de la pièce, de manière à maximiser les qualités surfaciques tout en minimisant les déformations thermiques.

Chaque couche est constituée d'une zone de « remplissage » et d'une zone de « contour », comme le montre la figure 4.6. Les contours sont eux-mêmes divisés en trois catégories : (i) les contours dits « downskin » pour les surfaces dont la normale est orientée vers le plateau avec un angle compris entre 0 et α (angle critique d'autosupportage) par rapport à l'horizontale (ii) les contours dits « uspkin » pour les surfaces dont la normale est orientée dans le sens opposé au plateau avec un angle compris entre 0 et α par rapport à l'horizontale (iii) les contours « simples » pour le reste. Chaque contour a sa propre paramétrie.

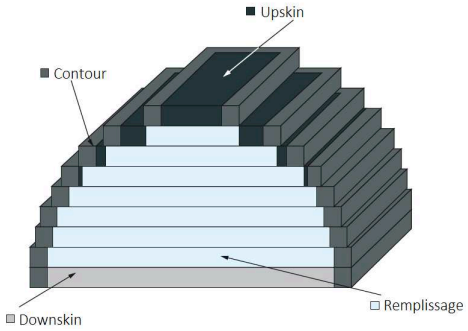

FIGURE 4.6 – Représentation des notions de remplissage et contour selon l'orientation des surfaces d'après [10]

L'objectif est donc de déterminer des paramètres machine qui minimisent l'accumulation de la chaleur dans la pièce, responsable d'états de surface dégradés et de déformations irréversibles. La densité d'énergie volumique (VED) apportée par le laser au lit de poudre (J/mm^3), qui conditionne l'échauffement de la pièce, doit être considérée :

$$VED = \frac{P}{v.h.t} \qquad J/mm^3 \tag{4.1}$$

où P est la puissance du laser (W), v la vitesse du laser (mm/s), h l'espacement des cordon (mm) et t l'épaisseur de couche (mm).

Outre la valeur intrinsèque de la densité laser, la capacité d'une surface à dissiper la chaleur induite en périphérie de la pièce varie selon la nature de la surface (downskin, upskin, verticale). Par conséquent, les paramètres P, v et h doivent être adaptés pour chaque type de contour. A titre indicatif, Calignano et al. [34] ont observé, dans leurs conditions expérimentales, que l'état de surface minimal était atteint - sur une surface upskin d'un alliage AlSi10Mg - pour une densité d'énergie de 44.3 J/mm^3.

Déterminer une paramétrie machine visant à minimiser les états de surface pour chaque type d'orientation (downskin, upskin, vertical), nécessite donc de procéder à des essais expérimentaux pour s'assurer de sa pertinence, qui peuvent s'avérer longs et coûteux. Dans la pratique, une fois cette paramétrie machine optimisée et déterminée, vis-à-vis des qualités surfaciques engendrées, il est rare qu'elle soit adaptée pour chaque nouvelle conception.

D'autre part, à chaque changement de paramétrie, les données expérimentales procédé-hyperfréquences sont alors susceptibles d'évoluer. Bien que les valeurs resteront du même ordre de grandeur (les conductivités électriques équivalentes - qui constituent les données d'entrées pour les simulations électromagnétiques - varient *peu* en fonction des états de surface), les simulations pourraient ne plus être en mesure d'évaluer les performances avec autant de réalisme.

Une fois les solutions géométriques du Vide et la paramétrie machine déterminées, des simulations électromagnétiques sont réalisées. Si elles sont conformes aux exigences, les habillages mécanique et thermique peuvent débuter. Sinon, d'autres solutions doivent être envisagées. Il est essentiel de rappeler qu'il n'y a pas d'ordre spécifique entre ces trois groupes de travail et qu'ils méritent d'être traités simultanément ou du moins de façon itérative.

4.2.3 Habillages mécanique et thermique

Entrée : Vide(s) orienté(s)
Sortie : Pièce(s) hyperfréquences orientée(s) et supportée(s)

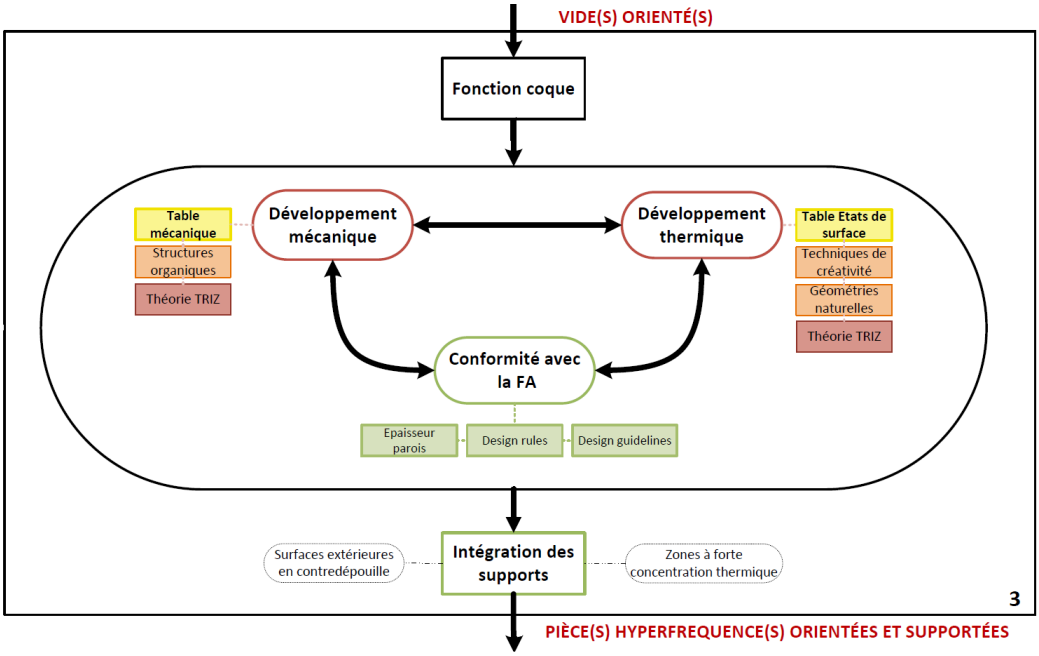

FIGURE 4.7 – Etape 3 : Habillages mécanique et thermique

Le but de l'habillage est de passer d'un objet virtuel, « le Vide », composé de surfaces, à un objet physique, constitué de parois issues de la création d'éléments coque ou d'une soustraction booléenne. Or, cette notion induit inévitablement les notions déterminantes de masse, de volume et d'accumulation de chaleur (à la fois lors de la fabrication et en cours d'utilisation). Pour minimiser ces caractéristiques et satisfaire les exigences mécaniques revendiquées par le cahier des charges, trois perspectives sont suggérées dans ce module.

4.2.3.1 Développement mécanique

L'objectif du développement mécanique est premièrement de répondre favorablement aux contraintes auxquelles la pièce sera soumise. Pour cela, le concepteur peut se référer à

la table 4.3 qui indique **les caractéristiques mécaniques obtenues** [1] **sur les alliages AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V**, qualifiés sur la machine PROX 300 DMP avec la paramétrie machine utilisée pour l'expérimentation (Chapitre 3). Deux états matériaux sont considérés : (i) l'état « stress released » pour une pièce ayant subi un traitement thermique de relaxation des contraintes à 200°pendant 3h avec un refroidissement en four (ii) l'état « T6 » pour une pièce ayant subi une mise en solution de 8h à 543°, une trempe à l'eau suivie d'un revenu de 6h à 160°et d'un refroidissement ambiant.

Matériau	Etat		R_m (MPa)	R_{p02} (MPa)	A (%)	**Dureté (HBW)**
AlSi7Mg0.6	2h à 300°	xy	295	190	8	8
		z	295	185	10	
	T6	xy	285	230	1	8
		z	270	220	4	
Ti6Al4V	2h à 300°	xy	1110	1040	3	35
		z	1070	945	3	
	HIP	xy	985	870	10	25
		z	980	885	13	

Table 4.3 – Caractéristiques mécaniques minimales des alliages AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V qualifiés sur la machine PROX 300 DMP

Au-delà d'habiller la pièce comme il est coutume de le faire avec les procédés classiques de fabrication, la fabrication additive présente des avantages qui peuvent participer à l'optimisation de la structure. En particulier, les structures en treillis peuvent être introduites dans la coque pour alléger la structure, obtenir des propriétés mécaniques/thermiques spécifiques, etc. Elles peuvent même être extrudées sur l'épaisseur de la coque à condition que les motifs respectent un dimensionnement particulier pour éviter que les ondes électromagnétiques ne rayonnent (typiquement des grandeurs inférieures à $\lambda/15$). Dans un pareil cas, l'évacuation de la poudre en post-traitement et les traitements de surfaces seraient nettement facilités. Néanmoins, il convient de s'assurer que l'environnement dans lequel la pièce est tenue d'évoluer ne présente pas de risque de contamination du canal de propagation. Plus généralement, la théorie TRIZ peut aussi s'avérer utile pour résoudre les contradictions d'un problème technique [104].

4.2.3.2 Développement thermique

Compte tenu des puissances transmises dans les structures hyperfréquences en opération, la chaleur dégagée par effet Joule doit être dissipée pour garantir une utilisation optimale. Contrairement aux pièces réalisées par les procédés conventionnels pour lesquelles les systèmes thermiques sont ajoutés pendant la phase d'assemblage, la fabrication additive offre la possibilité de les inclure directement à la pièce hyperfréquence de manière monolithique, ce qui contribue à l'allègement et à la diminution du coût de revient et du temps de réalisation. Les architectures classiques, comme les ailettes, peuvent ainsi être positionnées sur les surfaces extérieures de la coque. L'état de surface dégradé étant favorable à la dissipation de chaleur par maximisation de la surface d'échange, leur inclinaison ne constitue pas une donnée déterminante, si ce n'est pour l'attribut d'autosupportage qui pourrait en découler. Le concepteur pourra toutefois se rapporter à la table 4.1 pour ce module. Comme pour le module de conception du vide, la manipulation des outils de

1. Propriétés mécaniques R_m, R_{p02} et A obtenues selon la norme ISO 6892-1 sur des éprouvettes LBM usinées et essais de dureté Brinell selon ISO 6508-1

développement de formes (catalogue de conception, techniques de créativité, géométries naturelles) et d'optimisation des propriétés (littérature théorique, optimisation logicielle, théorie TRIZ) est vivement encouragée pour la conception des dispositifs thermiques.

4.2.3.3 Conformité FA

Le degré d'exigence du procédé vis-à-vis des habillages mécanique et thermique est moins drastique que pour la conception du vide. Au cours du précédent module, la qualité des surfaces fonctionnelles sur lesquelles se propage le champ électrique et des propriétés électromagnétiques ont été optimisées par des considérations strictes liées l'orientation, l'inclinaison, l'absence de support, etc. Les surfaces extérieures générées par l'habillage mécanique n'étant pas fonctionnelles, elles ne nécessitent pas d'attention particulière en ce qui concerne leur état de surface ou leur caractère auto-supporté. En revanche, l'épaisseur de parois peut avoir une incidence sur la chaleur introduite dans la pièce lors de la fabrication et par conséquent, sur la qualité des surfaces fonctionnelles. Les règles de conception - *guidelines, design rules* - doivent être utilisées pour minimiser les concentrations de gradients thermiques (angles arrondis, épaisseur minimale, etc.).

4.2.3.4 Intégration des supports

La dernière étape consiste à générer les supports avant de débuter les simulations. Une fois les surfaces extérieures nécessitant des supports - du point de vue thermique et gravitationnel – identifiées, les structures de supportage peuvent être générées manuellement ou automatiquement. Bien que ces surfaces ne soient pas fonctionnelles, en cela que les ondes ne se propagent pas à leur contact, un manque de supportage de ces mêmes surfaces pourrait avoir des conséquences néfastes vis-à-vis des déformations induites, et donc indirectement sur les variations dimensionnelles et l'état de surface des surfaces internes.

Une fois l'habillage mécanique/thermique effectué en conformité avec les spécifications et les contraintes du procédé, une pièce radiofréquence orientée et supportée est obtenue.

4.2.4 Analyses finales

Entrée : Pièce(s) hyperfréquences orientée(s) et supportée(s)
Sortie : Pièce(s) hyperfréquences

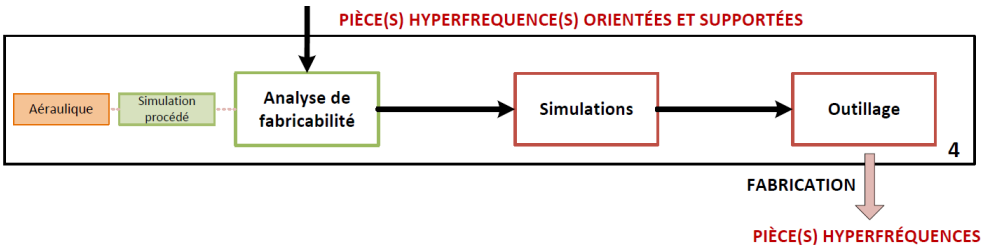

FIGURE 4.8 – Etape 4 : Analyses finales

Une fois la conception terminée, une pièce orientée et supportée est obtenue. S'agissant de la première fois au cours du processus de conception que la pièce est représentée avec ses supports, jouant un rôle déterminant sur la qualité finale de la pièce, il peut s'avérer judicieux de procéder à une analyse finale de la pièce, tant du point de vue fabricabilité que sur ses performances mécanico-thermico-électromagnétiques. Bien que la fabricabilité et les performances mécaniques/thermiques/électromagnétiques aient été normalement assurées

tout au long de la conception, les simulations restent essentielles pour donner le feu vert final avant fabrication.

4.2.4.1 Fabricabilité

L'analyse de la fabricabilité compte deux axes majeurs sur lesquels l'attention doit être majoritairement portée. La première concerne la simulation du procédé de fabrication pour identifier les potentielles zones de fortes déformations et leur degré de criticité vis-à-vis des performances. Selon les résultats obtenus, deux choix peuvent s'offrir au concepteur :

1. Le premier consiste à anticiper la déformation induite par le procédé : cette étape est alors orchestrée par le logiciel lui-même qui fournit une CAO compensée de la pièce. Fabriquée avec les déformations calculées, elle abordera les dimensions de la CAO initiale désirée. La simulation du procédé LBM est en réalité d'une très grande complexité, en raison de la multitude de phénomènes physiques mis en jeu pendant la fabrication. A notre connaissance, aucun logiciel commercial ne parvient aujourd'hui à simuler avec précision la fabrication de pièces par LBM. Les résultats doivent donc être considérés, non pas comme *absolus*, mais plutôt comme des indications sur les zones à forts gradients thermiques.

2. La seconde repose sur la réorganisation manuelle - si nécessaire - des structures de supportage conformément aux fortes zones de déformation identifiées. Si les déformations demeurent trop importantes après réajustement, l'habillage mécanico-thermique doit être revu ou alors les paramètres machine modifiés.

Le deuxième axe comprend l'analyse de l'évacuation de la poudre et des éventuels traitements de surfaces à venir. Pour ce faire, nous préconisons de réaliser un test aéraulique de la pièce pour évaluer le comportement d'un flux (l'air pour l'évacuation de la poudre, un liquide ou une pâte pour les traitements de surface) à l'intérieur du canal de propagation lorsque celui-ci est *géométriquement complexe*. Si les résultats ne sont pas concluants, l'habillage mécanique peut être ajusté en perçant des trous à travers la coque (si l'environnement opérationnel le permet). Le cas échéant, « le Vide » devra être révisé.

4.2.4.2 Simulations

Une fois l'analyse de fabricabilité et d'éventuels réajustements apportés, la validation des performances atteintes par la pièce orientée s'effectue à travers des logiciels de simulations électromagnétiques, mécaniques et thermiques de manière à donner le dernier feu vert avant la fabrication. Dans le cas où les simulations ne satisferaient pas les exigences, certaines modifications peuvent être opérées en renouvelant l'étape précédente. Sinon, les modules 2 et 3 devront être reconsidérés.

4.2.4.3 Outillage

La dernière étape avant la fabrication porte sur la conception de l'outillage au regard d'un éventuel traitement de surface. La faisabilité d'un outillage adéquat ayant été considérée préalablement au cours du module « Conception du Vide », il s'agit maintenant de le matérialiser.

Enfin, la fabrication permet d'obtenir des pièces hyperfréquences optimisées par le procédé de fusion laser sur lit de poudre **à travers des considérations procédé-conception-hyperfréquences** lors de la phase amont de conception.

4.3 Synthèse

Ce chapitre a permis de présenter la structure générale de la méthode de *Design for Additive Manufacturing* que nous proposons, basée sur une approche de type *intégré*.

La première étape vise à définir une **structure modulaire** à partir, d'une part, des exigences fonctionnelles et des caractéristiques globales du procédé LBM et, d'autre part, d'un choix d'orientation de fabrication. Comme nous l'avons vu dans le chapitre 2, de nombreux travaux méthodologiques déterminent l'orientation de fabrication une fois la géométrie de la pièce figée, limitant le nombre de choix viables pour la fabricabilité. Surtout, ce choix *imposé* par la fabricabilité empêche la différenciation de zones fonctionnelles, comme les surfaces de propagation. Or, nous avons vu que l'**orientation jouait un rôle déterminant sur le coût de revient, sur la dissymétrie des déformations et sur les pertes par transmission**. Le concept de structure modulaire orientée que nous présentons, permet d'une part de remplir la fonction de service et de satisfaire les relations avec les interfaces fonctionnelles, mais également de déterminer une orientation de fabrication assez tôt dans le processus de fabrication, sans pour autant que le reste de la conception ne soit contraint. De plus, elle sert à intégrer le **caractère multifonctionnel** apporté par la technologie, que nous avons qualifié d'avantage majeur pour les hyperfréquences.

La deuxième étape permet de passer d'une structure modulaire grossière à une géométrie réaliste. Cette étape est charnière car l'essentiel de la géométrie finale y est déterminé. Il est donc primordial que la géométrie développée **bénéficie des avantages de la technologie et remplisse les performances électromagnétiques exigées tout en respectant les spécificités du procédé**. Pour se démarquer des méthodes *compartimentées* existantes que nous jugions inadaptées pour ces travaux, les caractéristiques de conception, du procédé et du domaine hyperfréquences sont à nouveau **investiguées simultanément**. Pour ce faire, outre les outils classiques, des **données expérimentales précises et quantifiées** sur l'influence des spécificités critiques du procédé sur le propriétés de propagation, sont portées à la connaissance du concepteur (orientation-état de surface-pertes-conductivité électrique équivalente). La **paramétrie machine** dont l'importance sur les états de surface produits a été prouvée, est evoquée à travers des **considérations spécifiques à suivre pour garantir des états de surface optimaux**. Aussi, le caractère autosupporté, l'évacuation de la poudre et les post-traitements sont estimés lors de cette phase. Pour compléter, des outils de conception sont intégrés à la fois pour s'assurer que la liberté de conception soit considérée de manière à repenser les formes des différentes fonctions utilisées depuis près d'un siècle, et ainsi casser l'**inertie psychologique**.

Une fois la (les) géométrie(s) du vide établie(s), elle(s) passe(nt) du niveau conceptuel au niveau concret grâce aux habillages mécanique et thermique. Bien que les pièces hyperfréquences n'aient pas comme première vocation de subir de fortes contraintes mécaniques, une optimisation mécanique (lattice, raidisseur, etc.) peut aboutir à un **allègement de structure**, à faciliter les traitements de surface, voire à augmenter la résistance mécanique si le cahier des charges l'exige pour des besoins spécifiques. Aussi, étant donné que les structures hyperfréquences produisent un dégagement de chaleur important en opération en raison des fortes puissances transmises, l'intégration de **dispositifs thermiques** peut-être considérée. Cette étape permet en outre de développer des **pièces multifonctionnelles** répondant à des exigences hyperfréquences, mécaniques et thermiques que la

fabrication additive est capable d'optimiser de manière **simultanée**. Ici aussi, les **caractéristiques associées au procédé et à la conception sont considérées en parallèle**, à travers des données expérimentales ou des outils.

Avant la fabrication finale, une dernière analyse de fabricabilité est conseillée avec, pour la première fois, la présence des supports.

Cette démarche considère, en parallèle, **les contraintes et opportunités de la fabrication additive tout en répondant aux objectifs, globaux et locaux, issus du cahier des charges fonctionnel.** Cette méthode de *Design for Additive Manufacturing* de type intégré, permet donc de répondre aux **lacunes identifiées dans la littérature, conformément à la nature des pièces que nous étudions.** La c**onnaissance des caractéristiques du procédé, de conception et du domaine hyperfréquences sont examinées à chaque étape, dépendamment les unes des autres. L'orientation de fabrication** est déterminée à un moment opportun du cycle de conception, sans pour autant contraindre le reste de la conception. Des **données expérimentales précises et quantifiées reliant les spécificités du procédé aux propriétés électromagnétiques** sont ajoutées pour enrichir la connaissance du concepteur. Enfin, les **trois avantages de la fabrication additive identifiés** au chapitre 1 (suppression des assemblages, liberté géométrique et intégration multifonctionnelle), se trouvent sollicités par cette méthode qui allie **conception-procédé-hyperfréquences**.

Pour en illustrer plus concrètement l'utilisation et les apports, un guide d'ondes en bande K [18-22] GHz a été développé dans le chapitre 5.

Chapitre 5

Application à la conception d'un guide d'ondes en bande K

Cet avant-dernier chapitre vise à appliquer dans un cas concret la méthode proposée et présentée dans le chapitre 4. D'une part pour illustrer le déroulement des modules et sous-étapes qui la composent et, d'autre part, pour en valider les concepts.

L'introduction de ce chapitre a pour objectif de faire connaître les motivations relatives au choix de dérouler la méthode au développement d'un guide d'ondes en bande K [18-22] GHz.

Dans un deuxième temps, nous déroulerons la méthode de DfAM dédiée aux composants hyperfréquences que nous avons présentée dans le Chapitre 4, en détaillant l'ensemble des étapes de conception.

En troisième lieu, nous présenterons et discuterons les résultats de mesures hyperfréquences des pièces conçues et fabriquées par LBM.

Finalement, ce chapitre sera clôturé par une synthèse qui récapitulera les grandes lignes de la méthode et ses points forts.

5.1 Introduction

Pour illustrer la méthode de DfAM que nous avons proposée dans le chapitre 4, nous avons opté pour le développement du guide d'ondes et ce, pour plusieurs raisons :

1. **Fonction simple.** Le guide d'ondes est la fonction élémentaire la plus simple parmi toutes celles utilisées dans les équipements SatCom (filtre, polariseur, orthomode, etc.). Cela nous permettra donc de présenter la méthode sans apporter de difficulté supplémentaire liée à la compréhension de fonction hyperfréquence complexe ;
2. **Fonction principale.** La géométrie de section choisie pour le guide d'ondes est primordiale puisqu'elle est, dans la majorité des cas, la géométrie à la base de toutes les autres fonctions élémentaires d'un système complet ;
3. **Temps de développement.** La conception de systèmes hyperfréquences complets, tels que ceux déployés dans le cadre opérationnel, nécessite des années de développement, avec des ressources humaines et des connaissances importantes associées au domaine hyperfréquences. Ce chapitre ne constituant qu'une partie de l'ensemble des travaux que nous avons réalisés durant ces trois années de thèse, nous ne pouvions prétendre à la conception d'un tel système.

Par ailleurs, nous pensons que la géométrie rectangulaire, qui est la plus couramment employée dans les conceptions hyperfréquences, n'est pas la plus adaptée pour le procédé de fusion laser sur lit de poudre. Elle ne permet pas d'optimiser simultanément le coût de revient et les performances électromagnétiques tout en assurant le caractère autosupporté (ou à minima un enlèvement possible des supports post-fabrication), pour les raisons suivantes :

1. **Orientation à 0°.** L'orientation à 0°, c'est-à-dire dans le plan du plateau de fabrication, est celle qui permet de minimiser le coût de réalisation d'une pièce en raison du faible nombre de couches à fabriquer. Néanmoins, soit le canal de propagation rectangulaire nécessite la présence de support sur l'intégralité de sa longueur (Figure 2.3) soit il est orienté selon l'orientation 4 (Figure 5.2.a) auquel cas les performances électromagnétiques atteintes sont des plus dégradées comme nous l'avons observé dans le chapitre 3.

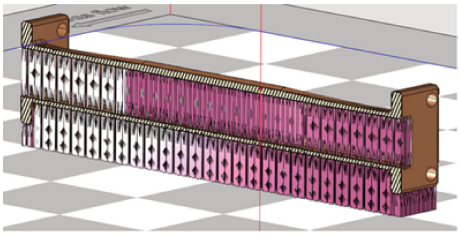

FIGURE 5.1 – Présence de supports à l'intérieur d'un canal de propagation rectangulaire orienté à 0°par rapport au plateau de fabrication

2. **Orientation entre α et 90°.** Pour une orientation comprise entre α - angle critique d'autosupportage - et 90°(Figure 5.2.b), le canal de propagation est autosupporté et les meilleures performances électromagnétiques sont atteintes. En revanche, le coût augmente significativement avec l'angle d'inclinaison et, dans le cadre d'équipements complexes et volumineux, il se peut que l'enceinte de fabrication ne puisse autoriser la réalisation suivant de telles orientations.

3. **Orientation à 90°.** L'orientation à 90°(Figure 5.2.c), bien qu'autosupportée, est celle qui affiche le coût de revient le plus élevé. De plus, pour conserver une orientation à 90°sur l'ensemble d'un système complet, il faudrait que (i) l'architecture globale soit linéaire, ce qui est très rarement le cas (ii) les enceintes de fabrication puissent accueillir une pièce d'une telle hauteur. Elle est également celle pour laquelle les performances électromagnétiques mesurées sont les plus dégradées, même si nous estimons qu'une optimisation de la densité d'énergie laser pourrait y remédier.

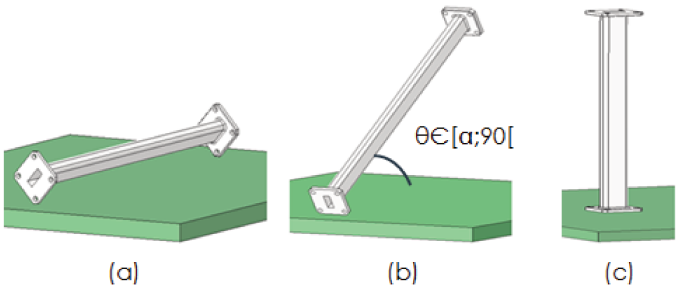

FIGURE 5.2 – Orientations de fabrication considérées pour la fabrication de guide d'ondes rectangulaires WR

Pour toutes ces raisons, il est intéressant, pour ce cas d'application, de développer un guide d'ondes adapté à la fabrication additive qui puisse optimiser ces trois critères simultanément.

Il est aussi important de mentionner que ce choix ne permet malheureusement pas d'intégrer les trois avantages de la fabrication additive identifiés dans le chapitre 1 : suppression d'assemblage, intégration multifonctionnelle et liberté géométrique. La décision d'appliquer la méthode au cas du guide d'ondes permettra seulement de tirer profit du dernier mentionné. Malgré cela, la géométrie issue de la méthode pourra servir de base au développement de toutes les autres fonctions élémentaires, dans le cadre de la conception de systèmes hyperfréquences complets pour lesquels les deux autres avantages, non exploités ici, pourront être considérés.

5.2 Application de la méthode de DfAM proposée

Pour cette application, l'objectif est donc de développer une nouvelle forme de guide d'ondes, mieux adaptée au procédé de fusion laser sur lit de poudre, de manière à pouvoir optimiser simultanément les 3 paramètres cités ci-dessus. Pour le cahier des charges électromagnétique, nous nous placerons plutôt dans un cadre comparatif, c'est-à-dire que les performances seront évaluées par rapport à celles d'un guide rectangulaire WR42 fabriqué par LBM **avec une paramétrie machine standard** selon l'orientation 1 (utilisée dans le chapitre 3), la plus couramment employée lors de la fabrication de composants hyperfréquences. Ces-dites performances sont récapitulées dans la table 5.1.

Bande de fréquence	K
Bande passante	18-22 GHz
Mode de propagation	TE_{10}
Pertes d'adaptation	< - 10 dB
Pertes par transmission AlSi7Mg0.6	> -0.52 dB
Pertes par transmission Ti6Al4V	> - 0.90 dB

Table 5.1 – Exigences électromagnétiques pour les guides d'ondes réalisés en LBM pour les alliages AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V

Deux matériaux seront considérés dans cette démarche : les alliages d'aluminium AlSi7Mg0.6 et de titane Ti6Al4V. Pour le premier, la fabrication sera réalisée chez Thales 3D Maroc à l'aide de la PROX 300 SN (**paramétrie machine standard**) développée par 3D Systems. La machine SLM125 HL (**paramétrie machine modifiable**) de SLM Solutions sera quant à elle utilisée au PIMM pour l'application en titane. Un traitement de surface de type AFM a été appliqué post-fabrication sur la pièce en titane ; d'une part pour montrer les considérations dont il fait l'objet en phase de conception et, d'autre part, pour témoigner du profit qu'apporte la méthode proposée en phase de conception.

D'un point de vue dimensionnel, l'Espace Global de Conception (EGC) alloué pour la conception est un parallélépipède de 30x30x186 mm pour le guide d'ondes en aluminium et de 30x30x120 mm pour celui réalisé en titane (Figure 5.3).

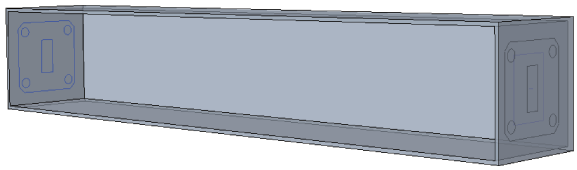

Figure 5.3 – Espace Global de Conception (en gris) et interfaces fonctionnelles WR-42 (en bleu)

Les interfaces fonctionnelles sont constituées de deux brides WR-42, dont les cotes selon la NF EN 60154-2 sont présentées sur la figure 5.4. Elles sont alignées à 186 et 120 mm l'une de l'autre, respectivement pour l'aluminium et le titane, et centrées sur la section 30x30 mm du parallélépipède de l'EGC (Figure 5.3).

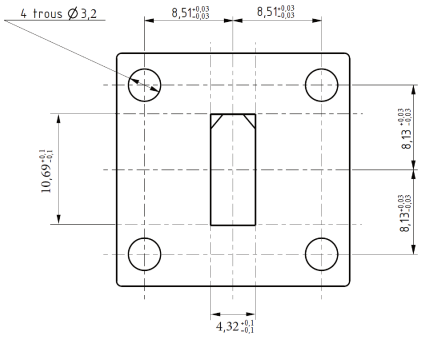

FIGURE 5.4 – Cotes et dimensions (en mm) des brides d'interfaces WR-28 selon NF EN 60154-2

5.2.1 Définition d'une structure modulaire orientée

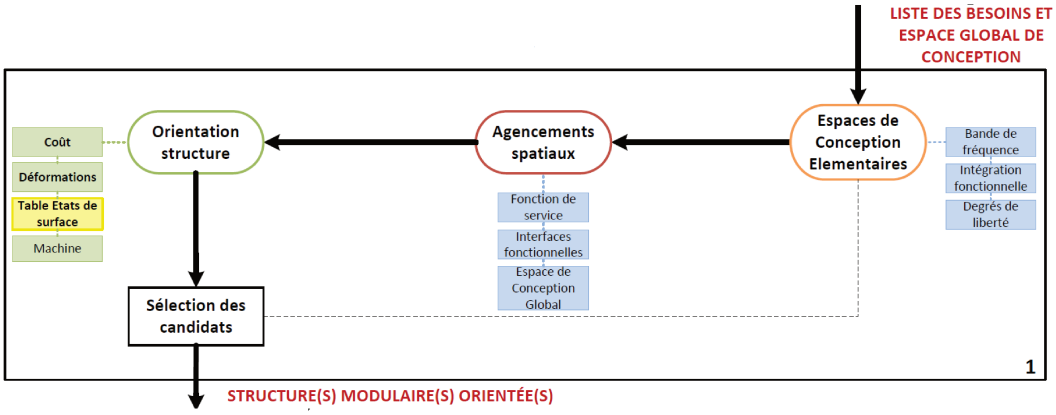

FIGURE 5.5 – Module 1 : Définition d'une structure modulaire orientée

5.2.1.1 Espace Elémentaire de Conception (EEC)

Le premier objectif consiste à déterminer l'Espace Elémentaire de Conception, c'est à dire le volume dans lequel s'inscrira le Vide. Il permettra, d'une part, de s'assurer que la pièce finale respecte le volume de conception alloué et, d'autre part, de définir une structure modulaire respectant les exigences de la fonction globale.

Pour définir un tel espace, la première considération est portée sur la bande de fréquence d'utilisation. Pour cette application, la bande K est spécifiée. Pour assurer une propagation soignée du mode fondamental TE_{10} en régime monomode, les normes EIA préconisent pour des guides rectangulaires standards une section de 10.668 x 4.318 mm et un diamètre de 11.56 mm pour des guides circulaires. Ces indications serviront d'ordre de grandeur pour déterminer les dimensions de l'EEC. Il ne serait toutefois pas judicieux de se rapporter directement à ces dimensions car cela pourrait resteindre injustement la liberté de conception. Dans un premier temps, nous pouvons ainsi affirmer que les dimensions de l'EEC doivent être inférieures à 45x45x184 mm, qui correspondent aux dimensions de l'EGC.

Pour restreindre le choix dimensionnel, il convient de s'assurer que l'EEC respecte les interactions avec les interfaces fonctionnelles définies par le cahier des charges. Ici, les interfaces d'entrée et de sortie sont spécifiées à travers le positionnement de brides WR-42 avec lesquelles le canal de propagation devra s'accorder (figure 5.4). Pour éviter que le

canal de propagation ne vienne obstruer les quatre trous de vis - espacées de 2C et 2E - nous décidons de restreindre les dimensions de l'ECC à 16x12 mm. La longueur de l'EEC est portée à 186 mm dans le cadre de l'aluminium AlSi7Mg0.6 et à 120 mm pour le titane Ti6Al4V.

Toutes ces considérations aboutissent à la délimitation d'un Espace Elémentaire de Conception (Figure 5.6).

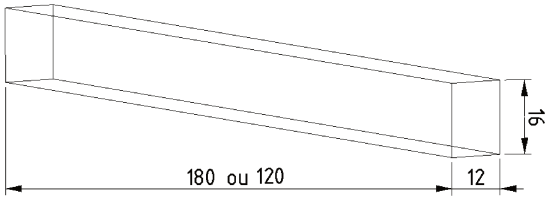

FIGURE 5.6 – Dimensions (en mm) de l'Espace Elémentaire de Conception

5.2.1.2 Agencement spatial

Dans cette étape, les Espaces Elémentaires de Conception doivent être agencés, à l'intérieur de l'Espace Global de Conception, afin de satisfaire la fonction globale définie par le cahier des charges tout en respectant les interfaces fonctionnelles. Ici, la fonction globale étant définie entièrement par un unique EEC, introduit au paragraphe précédent, l'agencement spatial se révèle trivial (Figure 5.7).

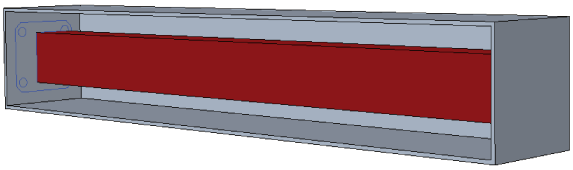

FIGURE 5.7 – Agencement spatial de l'Espace Elémentaire de conception à l'intérieur de l'Espace Global de Conception

5.2.1.3 Orientation

Coût de fabrication. Dans le but de réduire au plus le coût lié à la production d'une seule pièce, l'objectif est de minimiser la hauteur du guide d'onde à l'intérieur de la machine, en augmentant la surface projetée sur le plateau. Ainsi, le nombre de couches requis pour la fabrication est minoré, débouchant sur un coût de fabrication moindre. Une orientation à 0°est alors envisagée (Figure 5.8).

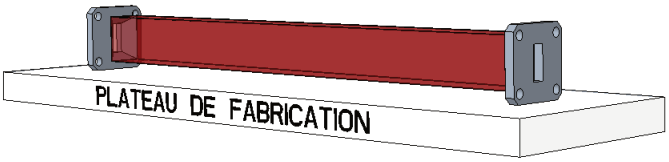

FIGURE 5.8 – Orientation choisie pour la fabrication

Surfaces. Vis-à-vis des surfaces fonctionnelles, cette orientation s'avère également favorable. Une orientation à la perpendiculaire de deux surfaces par rapport au plateau de

fabrication favorise un état de surface des moins dégradés, conformément aux résultats observés dans le Chapitre 3. Le déplacement du courant électrique sera facilité pour une telle orientation, limitant l'apparition des pertes en transmission supplémentaires. En revanche, la surface supérieure parallèle au plateau devra faire l'objet d'une étude au cours du module suivant pour lui permettre d'être fabriquée avec une telle orientation.

Déformations. Une telle orientation entretient les plans de symétrie de la pièce. En cas de déformations liées à la présence de gradients thermiques, la disymétrie serait limitée et permettrait au champ électrique de conserver une propagation quasi-homogène à l'intérieur du canal de propagation.

Machines de fabrication. Pour la fabrication en aluminium, la machine PROX 300 SN développée par 3D Systems est utilisée. Elle dispose d'une enceinte de 250x250x300 mm^3 permettant la réalisation de la pièce avec l'orientation souhaitée. La pièce en titane sera quant à elle fabriquée à partir de la machine SLM 125 du fabricant SLM Solutions, dotée d'un volume de fabrication de 125x125x125 mm^3 qui autorise également la fabrication selon l'orientation choisie.

Les trois critères majeurs identifiés au paragraphe 4.2.1 pour déterminer les orientations judicieuses - coût de fabrication, surface, déformations - convergent, dans ce cas, vers une orientation à 0°par rapport au plateau de fabrication. C'est donc celle-ci qui est plébiscitée.

5.2.2 Conception du vide

Une fois l'Espace de Conception Elémentaire et l'orientation de fabrication désignés, il s'agit de s'intéresser à la géométrie du canal de propagation, à savoir le Vide. Pour ce faire, trois modules méritent d'être considérés, idéalement de manière simultanée : le développement de formes (hors considérations spécifiques aux radiofréquences), l'optimisation des propriétés électromagnétiques et la conformité avec la fabrication additive.

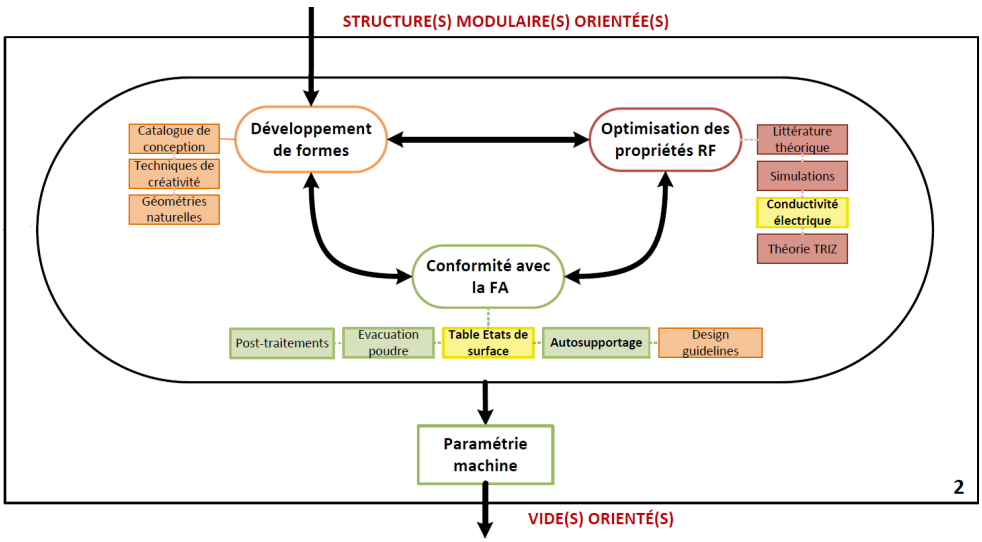

FIGURE 5.9 – Module 2 : Conception du Vide

Ce module étant particulièrement sujet à de nombreuses itérations entre les différentes considérations - développement de formes, optimisation des propriétés RF, conformité avec la FA - ainsi qu'aux outils qui leur sont dédiés, la figure 5.9 sera adaptée à chaque

nouvelle itération de manière à faciliter la compréhension du lecteur. En guise de point de départ dans ce module, nous avons décidé d'orienter nos premières considérations sur la conformité avec la FA, à travers les outils « Table Etats de surface » et « Autosupportage ».

5.2.2.1 Conformité FA

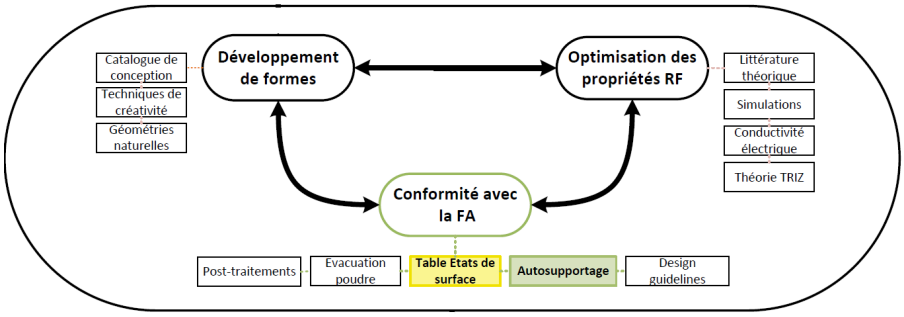

FIGURE 5.10 – Etape 2.1 : Conformité FA - Table états de surface et autosupportage

Etats de surfaces et Autosupportage. Compte tenu de l'orientation adoptée et en conformité avec les données procédé, il est décidé de fixer les grandes surfaces perpendiculairement au plateau (priorité 1 de la table 5.2), dans le but de minimiser la dégradation de l'état de surface. Ce faisant, il est nécessaire que les autres surfaces constitutives de la section soient inclinées d'un angle α, dont la valeur se situe aux alentours de 30°pour l'alliage de titane Ti6al4V et 45°pour l'aluminium [105], exemptant la présence de support.

PRIORITÉ CONCEPTION	ORIENTATION SURFACE
1	**90°(xy) ∩ 0°(xz)**
2	45°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin
3	45°(xy) ∩ 0°(xz) Upskin
4	0°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin
5	45°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin
6	45°(xy) ∩ 0°(xz) Downskin
7	0°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin

TABLE 5.2 – Priorités des orientations surfaciques

5.2.2.2 Développement de formes

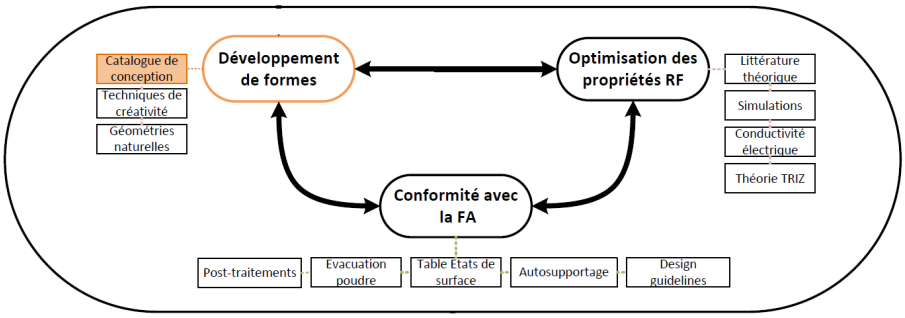

FIGURE 5.11 – Etape 2.2 : Développement de formes - Catalogue de conception

Catalogue de conception. A travers cet outil, des structures autosupportées sont recherchées, notamment dans le domaine architectural, et dénichées précisément dans l'art gothique. Soutenues par des murs verticaux, des surfaces au profil arqué permettent à la structure d'être autoportante lors de la fabrication, c'est-à-dire que la stabilité est assurée par la seule rigidité de leur forme. A titre d'exemple, l'édification du dôme de la cathédrale Santa Maria del Fiore de Florence de 87 m (Figure 5.12), en Italie, a été réalisée sans structure de soutien central : il était auto-portant grâce à son architecture particulière en forme d'ogive.

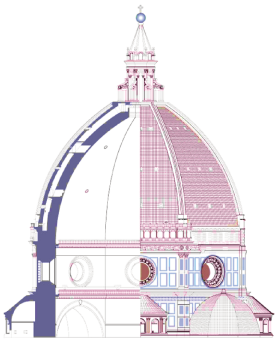

FIGURE 5.12 – Dôme de la cathédrale Santa Maria del Fiore de Florence

Assise sur ce principe, la section de la figure 5.13.A est développée. Par extension, la forme 5.13.B est obtenue en faisant converger tous les angles formés entre les tangentes en chaque point de l'arc et l'horizontale vers une unique valeur α. Par symétrie, la section 5.13.C vient enrichir le développement de formes. Enfin, la géométrie 5.13.D correspond à la forme 5.13.C à laquelle ont été ajoutés des « ridges » [106].

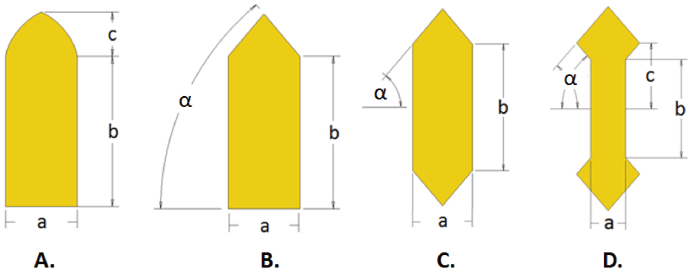

FIGURE 5.13 – Conception du Vide

5.2.2.3 Conformité FA

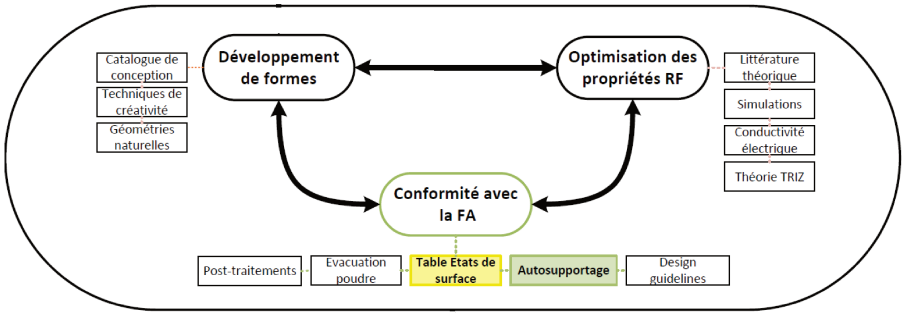

FIGURE 5.14 – Etape 2.3 : Conformité FA - Table états de surface et autosupportage

Etats de surfaces et Autosupportage. Pour garantir la conformité avec la fabrication additive et le caractère autosupporté, il est indispensable que la tangente en chaque point de l'arc forme un angle supérieur ou égal à α par rapport à l'horizontal, où α est l'angle critique d'autosupportage qui dépend de la nature du matériau utilisé pour la fabrication.

Les deux modules « Développement de formes » et « Conformité avec la FA » ont donc permis d'aboutir à quatre formes potentielles pour cette application. Avant d'entreprendre l'optimisation des propriétés électromagnétiques qui est un long processus, quelques considérations supplémentaires sont amorcées pour étayer notre choix :

1. La forme arquée définie dans la géométrie 5.13.A est définie par une spline passant par 4 points. L'optimisation des dimensions vis-à-vis des propriétés électromagnétiques porterait ainsi sur pas moins de 10 valeurs (a, b et le couple (x,y) de chaque point). Bien que les logiciels de simulations soient capables de satisfaire une telle optimisation, il n'en demeure pas moins que cela requiert un temps et une puissance de calcul non négligeables.
2. La présence de quatre surfaces inclinées dans les figures 5.13.C et 5.13.D seraient suceptibles de déteriorer plus sérieusement l'état de surface global de la pièce - et donc les performances électromagnétiques - par comparaison avec les géométries 5.13.A et 5.13.B où seules deux surfaces sont inclinées.

Pour ces raisons, la forme 5.13.B semble la plus opportune pour initier l'optimisation électromagnétique. Pour rappel, les caractéristiques de propagation de la forme 5.13.B devront, au terme de l'optimisation, se confronter aux performances mesurées sur un WR42, rappelées dans la table 5.1.

5.2.2.4 Optimisation des propriétés RF

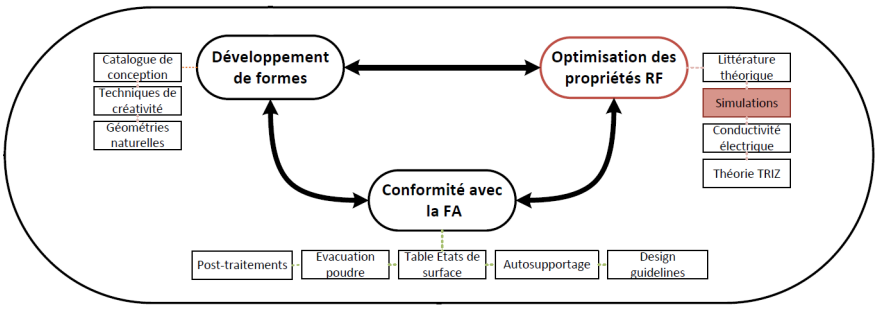

FIGURE 5.15 – Etape 2.4 : Optimisation des propriétés RF - Simulations

Simulations EM. La recherche d'une section optimisée est initiée avec les considérations géométriques spécifiées dans la table 5.3.

Conformité avec la fabrication additive	30 ou 45 $< \alpha <$ 90°
Conformité avec l'EEC	0 < a < 12 mm
Conformité avec l'EEC	0 < b < 16 mm

TABLE 5.3 – Caractéristiques géométriques exigées pour les conformités avec la FA et l'ECE

La recherche de solutions dimensionnelles est entreprise avec le logiciel ANSYS Electronics Desktop 2018.0, et paramétrée selon les contraintes affichées dans la table 5.3. Les simulations livrent finalement plusieurs combinaisons (a, b, α) qui satisfont les exigences énoncées dans la table 5.3, avec notamment un angle α qui varie entre 30°et 50°.

5.2.2.5 Conformité FA

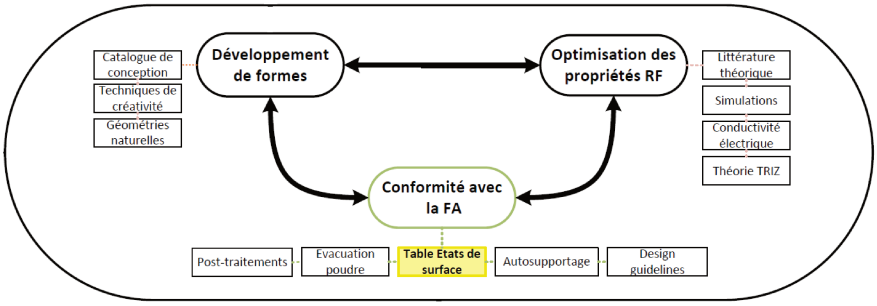

FIGURE 5.16 – Etape 2.5 : Conformité FA - Etats de surfaces

Etats de surface. Pour minimiser les dégradations d'état de surface (données expérimentales de la table 5.2) des surfaces inclinées, le choix s'oriente vers les combinaisons (a, b, 50°). Parmi elles, la largeur a de la section prend la valeur 4.32 mm, soit précisément la largeur du canal de propagation WR42 de l'interface fonctionnelle. Elle permettrait de conserver une continuité géométrique des surfaces latérales, favorable à la propagation des champs. A cette valeur est associée une hauteur b de 9.24 mm. Finalement, la combinaison (4.32, 9.24, 50°) est choisie pour remplir les exigences (Figure 5.17).

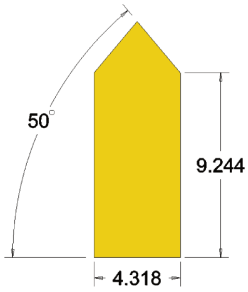

FIGURE 5.17 – Dimensions (en mm) de la section du Vide

5.2.2.6 Optimisation des propriétés RF

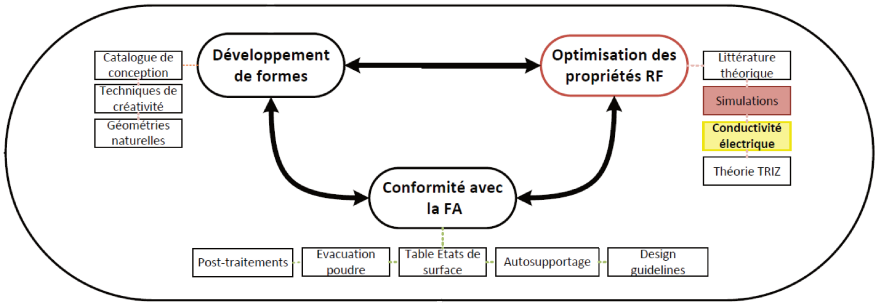

FIGURE 5.18 – Etape 2.6 : Optimisation des propriétés RF - Conductivité électrique et simulations

Conductivité électrique. D'après les résultats expérimentaux du chapitre 3, nous pouvons déduire la conductivité électrique équivalente de l'aluminium suivant les orientations surfaciques choisies, de manière à simuler avec réalisme le comportement de la structure. La surface limitante étant inclinée d'un angle 50°(xy) ∩ 0°(xz), la conductivité électrique équivalente s'élève à $1{,}15.10^6$ S/m pour cette géométrie (Table 5.4). Faute de données pour le titane, la conductivité électrique donnée par les logiciels de simulations sera employée par défaut.

Orientation surface	Alliage AlSi7Mg0.6	Alliage Ti6Al4V
90°(xy) ∩ 0°(xz)	-	-
45°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin	-	-
0°(xy) ∩ 45°(xz) Upskin	-	-
45°(xy) ∩ 0°(xz) Upskin	-	-
45°(xy) ∩ 45°(xz) Downskin	$2{,}15.10^6$	-
45°(xy) ∩ 0°(xz) Downskin	$1{,}52.10^6$	-
45°(xy) ∩ 0°(xz) Downskin	**$1{,}15.10^6$**	-

Table 5.4 – Conductivité électrique équivalente en fonction de l'orientation de la surface limitante pour les alliages AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V pour une paramétrie de fabrication donnée

Simulations. Les simulations associées à la combinaison (4.18, 9.24, 50°) sont présentées sur la figure 5.19, pour une longueur de 120 mm pour le Ti6Al4V et de 186 mm pour l'AlSi7Mg0.6.

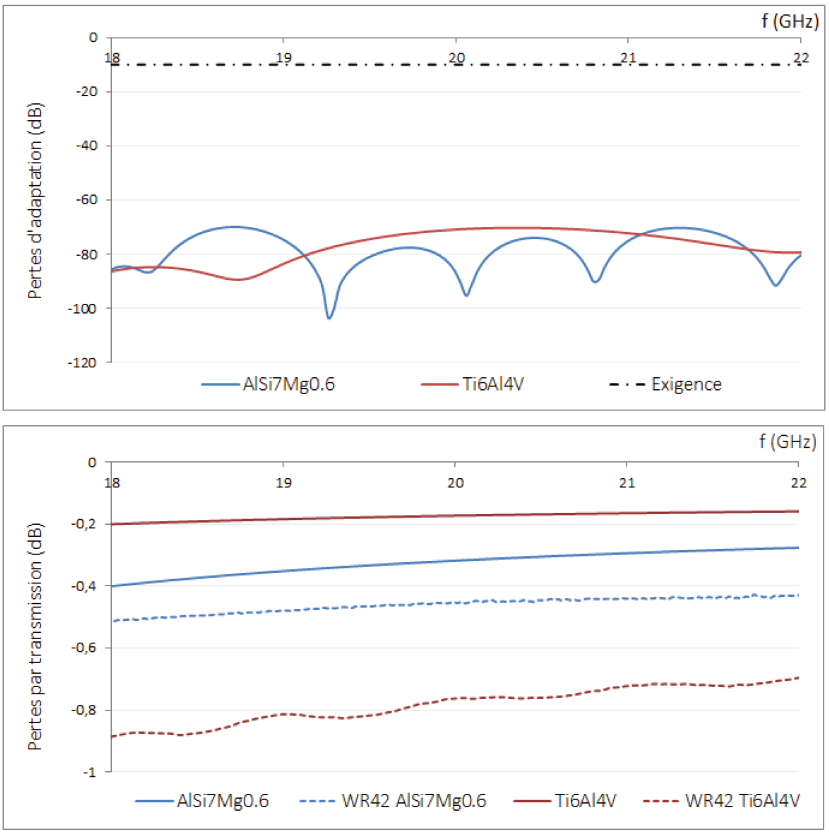

Figure 5.19 – Simulations HFSS des paramètres S obtenus pour la géométrie du Vide comparées aux paramètres-S mesurés sur les WR42 : (en haut) les pertes d'adaptation, (en bas) les pertes par transmission

Les pertes d'adptation se situent à des niveaux inférieurs à -70 dB (moins de 0.005% de puissance réfléchie) pour les deux alliages, autrement dit nettement moindres comparées au seuil maximal exigé et fixé à -10 dB (~9.6 %). En transmission, les pertes simulées sont comprises entre -0.4 et -0.3 dB (~6.8-8.9%) sur la bande [18-22] GHz pour l'alliage AlSi7Mg0.6, et entre -0.2 et -0.17 dB (~3.9-3.8%) pour le titane Ti6Al4V. Au regard des exigences exprimées dans table 5.1 - respectivement supérieures à -0.52 dB (~11.6%) et à -0.9 dB (~18.3%) - les performances théoriques atteintes par la géométrie issue de la méthode remplissent les critères électromagnétiques, pour les deux alliages.

On obtient finalement la géométrie affichée sur la figure 5.20 avec une longueur de 186 mm pour le cas de l'aluminium AlSi7Mg0.6 et 120 mm pour l'alliage Ti6Al4V.

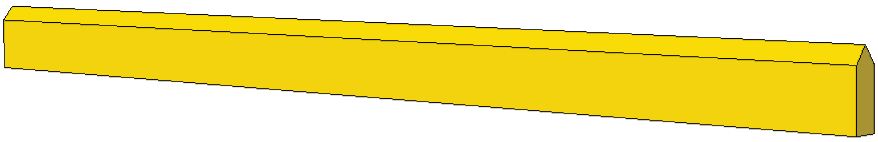

FIGURE 5.20 – Visualisation du Vide, dont les dimensions de la section sont celles affichées sur la figure 5.17, de longueur 186 mm pour l'aluminium AlSi7Mg0.6 et 120 mm pour le titane Ti6Al4V

Dans le cas d'interfaces fonctionnelles ayant la même géométrie que celle qui vient d'être développée, nous aurions pu passer directement au module suivant ; le développement de formes ayant permis d'aboutir à une géométrie autosupportée, dont l'optimisation RF couplée à une maitrise des états de surface mène à une géométrie satisfaisant le cahier des charges et les interfaces fonctionnelles. Or ici, les interfaces fonctionnelles étant rectangulaires WR-42, un changement de section brutal entre la géométrie Vide et le canal rectangulaire WR42 des interfaces fonctionnelles (Figure 5.21) entrainerait une augmentation significative des pertes en adaptation. Une zone de transition entre les deux géométries doit être ainsi aménagée avant d'obtenir la géométrie finale du Vide. On considère couramment que la longueur minimale pour permettre aux ondes de s'accomoder à un changement géométrique est d'environ $\lambda/4$, soit environ 4-5 mm aux fréquences utilisées.

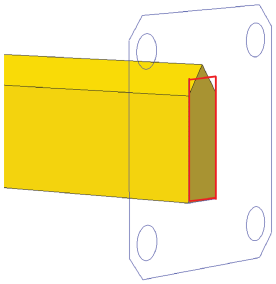

FIGURE 5.21 – Changement géométrique brutal entre le Vide et l'interface fonctionnelle rectangulaire WR42

Dans cette optique, **9 architectures de raccordement ont été imaginées et simulées**. Il en sort que la plus adaptée est une transition de type « lissage balayé » du logiciel Creo4 entre les deux sections. La longueur optimale à conférer à ce raccordement pour que les propriétés électromagnétiques atteignent leur meilleur niveau de performances se situe à 33 mm $> \lambda/4$ (Figure 5.22), indépendamment du matériau considéré. Les paramètres-S qui s'y rapportent sont présentés sur la figure 5.23. Les conductivités électriques utilisées pour l'aluminium et le titane sont les mêmes que celles exploitées pour les simulations

précédentes (Figure 5.19). On constate que l'intégration d'une zone de transition géométrique de 33 mm (T33) ne modifie presque pas les pertes en adaptation, qui passent de -80 dB (moins de 0.005% de puissance réfléchie) à -60 dB (moins de 0.005% de puissance réfléchie), ni les pertes par transmission, plutôt liées à la nature du matériau et à la longueur de propagation qu'à la géométrie. Comparées aux mesures du WR-42, les pertes théoriques induites par cette légère modification de conception demeurent satisfaisantes, conformément aux exigences exprimées dans la table 5.1.

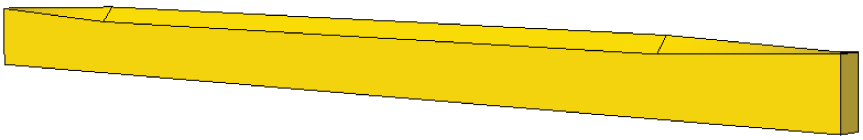

FIGURE 5.22 – Visualisation du Vide avec la zone de raccordement de type « lissage balayé » de 33 mm et de longueur totale 186 mm pour l'aluminium AlSi7Mg0.6 et 120 mm pour le titane Ti6Al4V

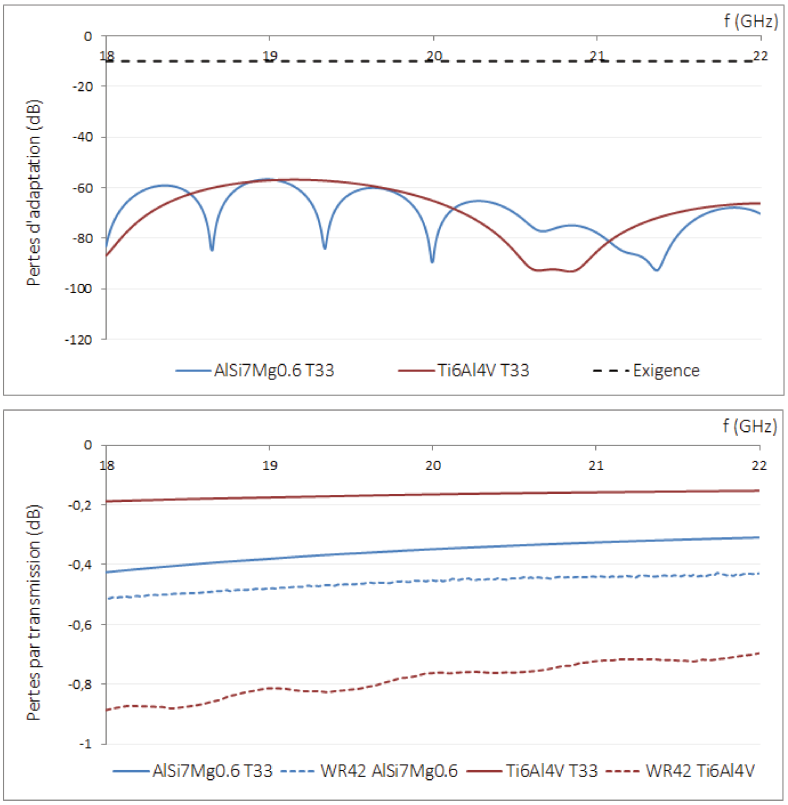

FIGURE 5.23 – Simulations HFSS des paramètres S obtenus pour la géométrie du Vide avec une zone de raccordement de 33 mm pour le titane et l'aluminium comparées aux paramètres-S mesurés sur les WR42 : (en haut) les pertes d'adaptation, (en bas) les pertes par transmission

5.2.2.7 Conformité FA

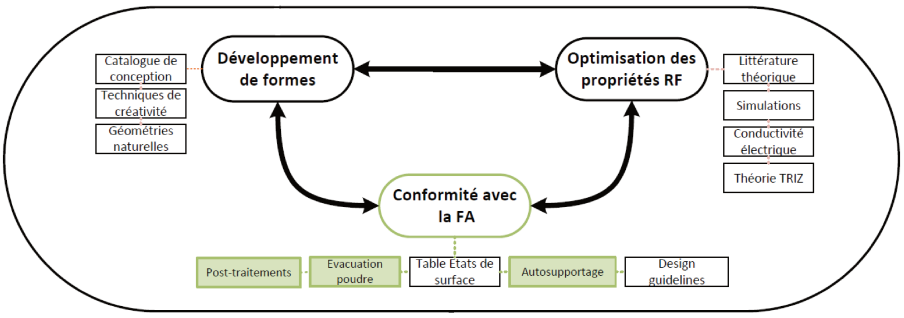

FIGURE 5.24 – Etape 2.7 : Conformité FA - Autosupportage et évacuation de la poudre

Autosupportage. La zone de raccordement de type « lissage balayé » permet donc de passer d'une section autosupportée, à savoir la géométrie 5.13.B développée, à une section non-autosupportée, en l'occurrence l'interface rectangulaire WR42. Cependant, en considérant un angle critique α=45°pour l'alliage AlSi7Mg0.6 et α=30°pour l'alliage Ti6Al4V, l'analyse de l'inclinaison des surfaces sur cette longueur indique que certaines portions ne sont pas autosupportées (Figure 5.25). Comme nous l'avons rappelé à de nombreuses reprises dans ce manuscrit, et inscrit dans la méthode, le caractère autosupporté est vital pour la fabrication de pièces hyperfréquences, surtout dans l'optique de systèmes cavitaires complets. Dans ce cas précis, les zones en contre-dépouille sont situées à proximité des entrée et sortie du canal de propagation et sur une faible longueur (33 mm maximum). L'outillage pourrait y accéder facilement une fois la fabrication terminée pour en retirer les supports, moyennant des structures optimisées. Considération faite, deux aspects sont alors à considérer :

1. **Performances RF.** Plus la longueur de raccordement est importante, plus la phase de transition entre les deux géométries de section sera aisée pour les ondes qui s'y propagent. Les pertes en adaptation présenteront donc de meilleures performances. En revanche, les structures de supportage seront plus nombreuses sur cette portion et les états de surfaces en contact risquent d'être détériorés lors de leur enlèvement, causant une augmentation des pertes par transmission. Dans ce cas, la longueur optimale théorique se situe à 33 mm avec des pertes en adaptation situées à -60 dB (Figure 5.23). Cette transition engage alors la présence de support sur une longueur de 27.7 mm pour l'alliage AlSi7Mg0.6 (Figure 5.25) et 15.6 mm pour l'alliage Ti6Al4V à partir de l'ouverture rectangulaire.

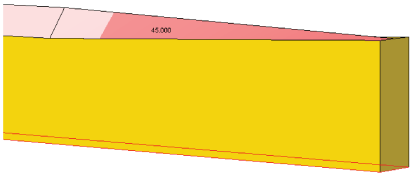

FIGURE 5.25 – Portion non autosupportée (en rouge foncé) de la zone de raccordement d'une longueur de 33 mm

2. **Conformité FA.** A contrario, plus la longueur de raccordement est faible (mais supérieure à $\lambda/4$ soit 4 mm environ dans cette bande de fréquence), plus la phase de transition entre les deux géométries sera brutale pour les ondes. Les pertes en

adaptation seront donc plus importantes théoriquement. Toutefois, les structures de supportage seront moins abondantes, voire absentes, ce qui éviterait une dégradation supplémentaire des états de surfaces et donc, des pertes par transmission. Selon cette configuration, la longueur minimale théorique que nous estimons *acceptable* pour les pertes d'adaptation se situe à 13 mm. *Acceptable* au sens où il est courant que les écarts entre les simulations et les mesures réelles soient conséquents en adaptation (entre autre en raison de l'alignement *imparfait* des brides pièce-montage de mesure). Par exemple, pour un WR-42 fabriqué par usinage en aluminium, il est fréquent que celles mesurées soient de l'ordre de -20 dB tandis que les simulations les situent à -80 dB. Il est donc important de conserver des pertes théoriques suffisamment faibles. Avec une transition de 13 mm, l'adaptation maximale théorique passe de -60 dB à -45 dB (Figure 5.27) et les structures de supportage sont mobilisées sur une longueur de 10.9 mm pour l'aluminium (Figure 5.26) et 4.8 mm pour le titane.

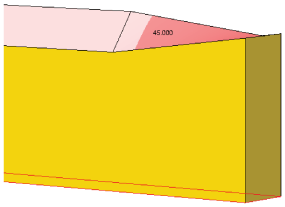

FIGURE 5.26 – Portion non autosupportée (en rouge foncé) de la zone de raccordement d'une longueur de 13 mm

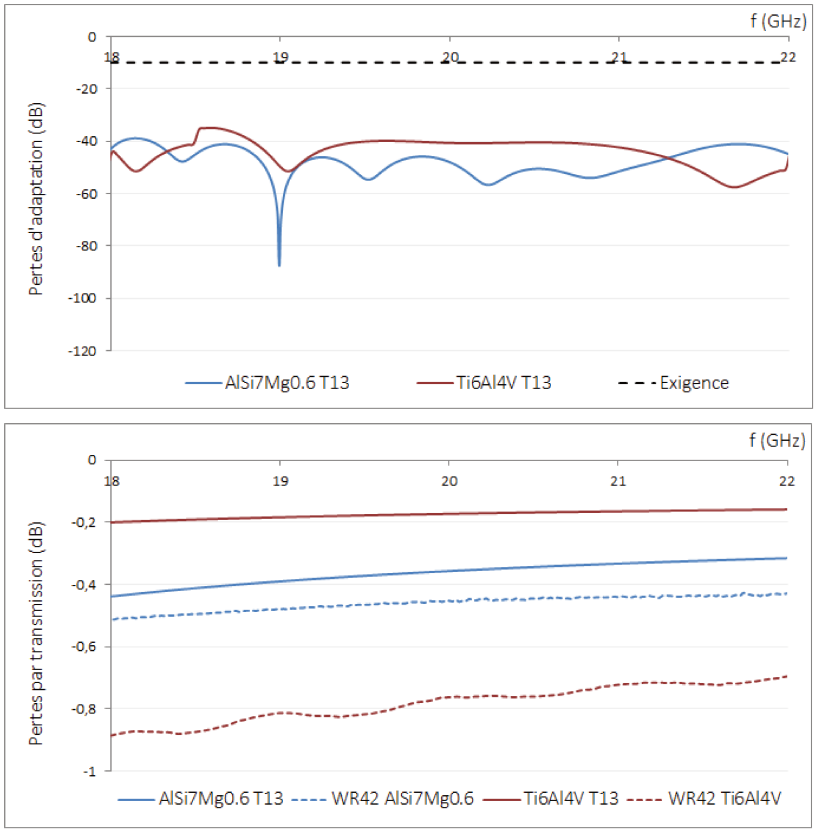

FIGURE 5.27 – Simulations HFSS des paramètres S obtenus pour la géométrie du Vide avec une zone de raccordement de 13 mm comparées aux paramètres-S mesurés sur les WR42 : (en haut) les pertes d'adaptation, (en bas) les pertes par transmission

Il est donc primordial de trouver un équilibre entre l'optimisation électromagnétique théorique et les contraintes induites par le procédé, pour que les performances réelles respectent les exigences. La difficulté réside dans l'incapacité d'anticiper, d'une part, les états de surfaces après enlèvement des supports et les pertes supplémentaires qui pourraient en découler et, d'autre part, les pertes d'adaptation réelles comparées à celles simulées. Ainsi, bien que la différence entre -45 et -60 dB en adaptation ne traduise en réalité qu'un écart infime - les deux correspondent à une puissance non transmise inférieure à 0.005% - il se pourrait que cet écart soit grandement amplifié sur les pièces réelles (écart géométrique, alignement des brides). Le choix est donc fait de poursuivre le développement avec des longueurs de raccordement de 13 et 33 mm pour l'alliage AlSi7Mg0.6. Pour le titane, les supports n'étant requis théoriquement que sur une longueur de 4.8 mm pour une transition de 13 mm, il est possible qu'ils ne le soient plus du tout en adoptant une paramétrie machine adaptée (**modifiable sur la SLM 125HL**). Pour cette raison, la transition de 13 mm est sélectionnée pour le Ti6Al4V.

Evacuation de la poudre. En considérant les géométries développées, nous estimons que l'évacuation de la poudre ne présente pas de difficulté majeure, l'architecture étant rectiligne sans irrégularité (murs par exemple) à l'intérieur du canal de propagation. La seule zone qui pourrait potentiellement y nuire se situe à l'intersection des deux surfaces en contre-dépouille. En analysant la propagation du champ électromagnétique (Figure 5.28), on remarque que l'amplitude du champ est particulièrement faible dans cette zone.

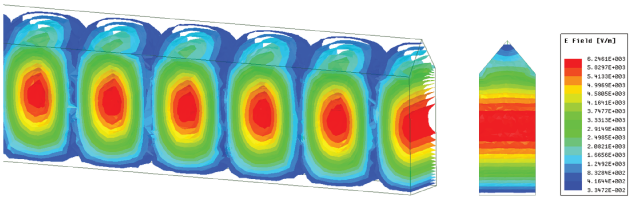

FIGURE 5.28 – Amplitude du champ électrique E à l'intérieur du canal de propagation pour le Vide en aluminium de 186 mm

Traitement de surface. Le traitement de surface par écoulement de pâte abrasive (AFM) est effectué à l'Ecole Nationale d'Ingénieurs de Saint-Etienne (ENISE) qui dispose de la machine VECTOR 200 développée par la société Extrude Hone. Le dispositif de circulation de la pâte comporte deux vérins opposés ; deux pistons et deux garnitures de piston. L'entraînement est réalisé par des vérins hydrauliques (Figure 5.29). Le serrage de la pièce se fait à l'aide de vérins de serrage hydrauliques.

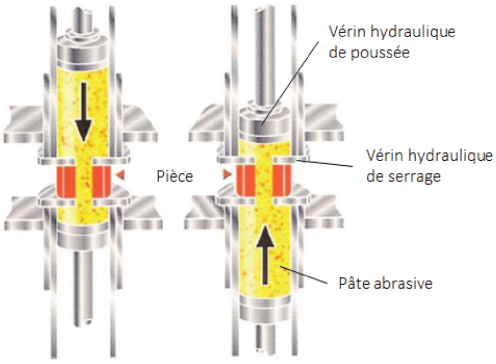

FIGURE 5.29 – Dispositif de circulation de la pâte abrasive

Pour apprécier la faisabilité du traitement, au regard de la géométrie développée pour l'alliage Ti6Al4V, les caractéristiques du dispositif sont consultées (Figure 5.5). En particulier, la linéarité du guide d'ondes favorise le positionnement de la pièce aux interfaces d'entrée et de sortie de la pâte abrasive. La longueur de 120 mm s'accorde avec la hauteur maximale que la machine autorise, laissant une marge suffisante pour l'intégration de l'outillage. Enfin, les dimensions des ouvertures rectangulaires du canal de propagation sont inférieures à l'orifice de 100 mm de diamètre par lequel la pâte est introduite dans la pièce, garantissant une pression suffisante sur les parois à traiter.

DIAMÈTRE DU CYLINDRE DE PÂTE	100 mm
HAUTEUR MAXIMUM D'UN OUTILLAGE	555 mm
VOLUME DE PÂTE	2,6 L
PRESSION DE LA PÂTE ABRASIVE MIN/MAX	44/276 bars
COURSE DU PISTON DE PÂTE	320 mm

TABLE 5.5 – Caractéristiques de la machine VECTOR 200

La géométrie issue du module « Conception du Vide » pour l'alliage Ti6Al4V est donc éligible au traitement de surface par écoulement de pâte abrasive. L'outillage correspondant sera déterminée une fois l'habillage mécanique effectué, de manière à le calibrer sur

la réponse mécanique de la pièce obtenue et de déterminer les paramètres de traitement adaptés (type de pâte, pression appliquée et nombre de cycles).

5.2.2.8 Paramétrie machine.

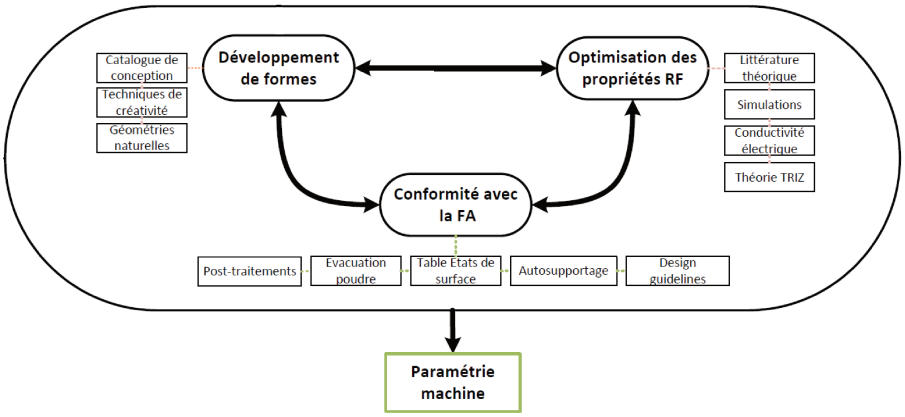

FIGURE 5.30 – Etape 2.8 : Paramétrie machine

Pour l'alliage de titane, l'objectif est de trouver une paramétrie machine qui, d'une part, minimise les états de surface conformément aux inclinaisons des surfaces de la géométrie considérer et, d'autre part, tolère l'absence totale de support sur 4.8 mm pour une longueur de raccordement de 13 mm. Pour ce faire, une campagne d'étude a été menée au PIMM sur des éprouvettes représentatives de la transition 13 mm (murs vertical et incliné à 50°avec une stratégie « contour puis remplissage ») selon les recommandations énoncées dans la méthode, fabriquées avec différentes densités d'énergie volumique (VED) laser. Les états de surface ont ensuite été mesurés à l'aide d'un profilomètre optique ALICONA sur des surfaces de 1x1 mm^2 (Figure 5.31).

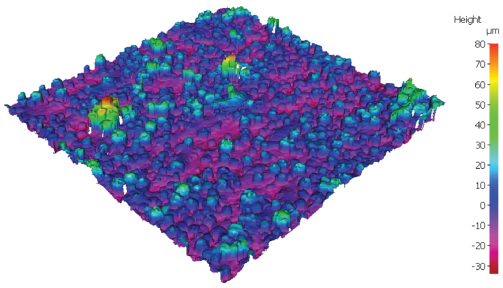

FIGURE 5.31 – Surface obtenue par profilométrie optique pour $P_{remplissage}$=225 W, $V_{remplissage}$=1100 mm/s, $P_{contour}$=100W, $V_{remplissage}$=450 mm/s et un diamètre de spot de 70μm. R_a mesuré 9,37 μm

1. **Surfaces verticales**. La rugosité moyenne Sa (sans filtrage spatial) des parois verticales est de l'ordre de 10 μm quelles que soient les puissances de contour utilisées. Une légère augmentation de la rugosité est observée avec l'augmentation de la puissance de remplissage. Des valeurs minimales de l'ordre de 8.5 μm ont été obtenues (Figure 5.32).

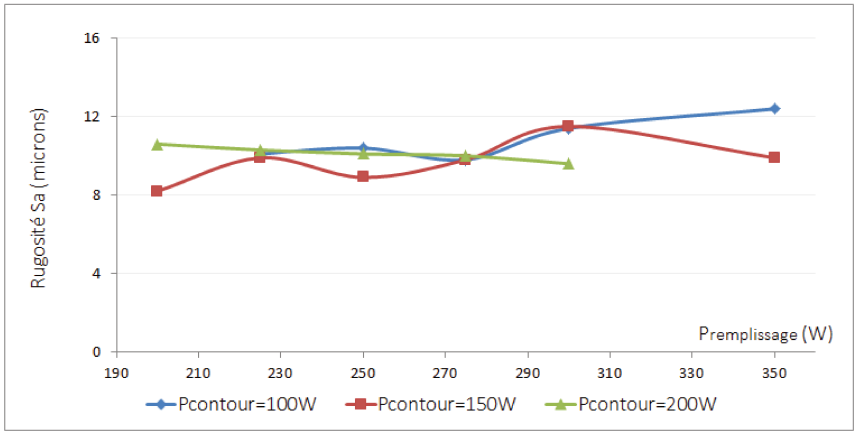

FIGURE 5.32 – Evolution de la rugosité Sa en fonction de la puissance de remplissage pour $V_{remplissage}$=1100 mm/s et $V_{contour}$=450 mm/s avec un diamètre de spot laser de 70 μm

Les essais réalisés à puissance de remplissage constante montrent une rugosité minimale pour une puissance de contour comprise entre 150 et 175 W (Figure 5.33)

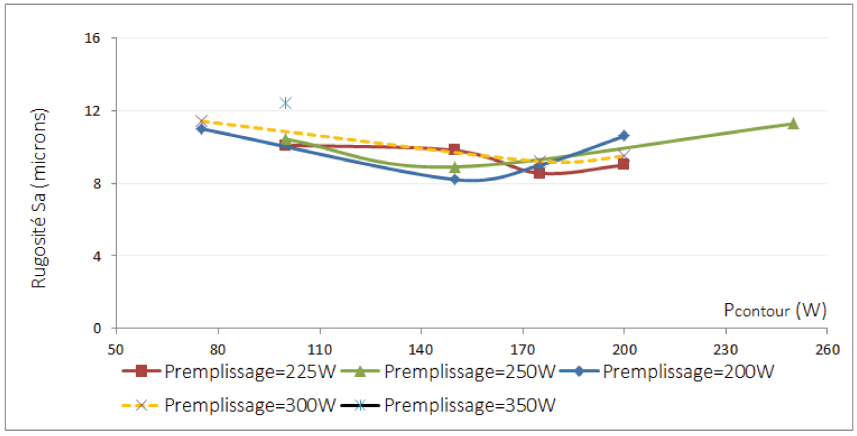

FIGURE 5.33 – Evolution de la rugosité Sa en fonction de la puissance de contour pour $V_{remplissage}$=1100 mm/s et $V_{contour}$=450 mm/s avec un diamètre de spot laser de 70 μm

Indépendamment des paramètres de contours employés, la courbe de la figure 5.34 révèle les valeurs de rugosité en fonction de la densité d'énergie volumique VED fournie par le laser au lit de poudre lors du remplissage. On note, sur la figure 5.34, une légère augmentation de la rugosité en fonction de l'augmentation de la VED de remplissage, qui traduit un échauffement plus important des pièces et de leurs parois externes en cours de fabrication et contribue à l'agglomération d'un plus grand nombre de particules, à l'origine de la dégradation de la qualité surfacique observée (Chapitre 3)..

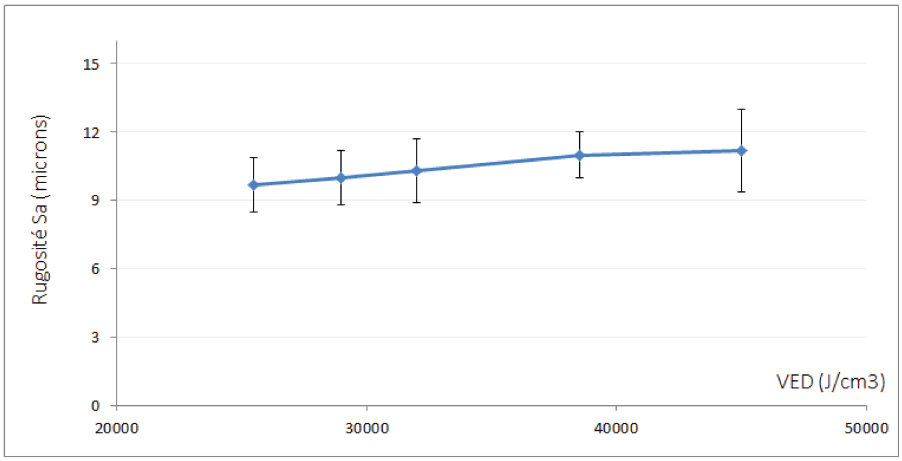

FIGURE 5.34 – Evolution de la rugosité Sa en fonction de la VED de remplissage

2. **Surfaces downskin 50°**. En contre-dépouille (downskin), l'état de surface est plus dégradé (Figure 5.35) en raison de la chaleur qui s'accumule à proximité des zones de balayage laser, comme nous l'expliquions dans le chapitre 3. Il est donc largement conditionné par la densité d'énergie de remplissage, notamment par l'augmentation du rapport P/V. Ainsi, l'état de surface relevé sur les parois en downskin, plus élevé que pour les contours droits, augmente avec la puissance de remplissage tandis que le pourcentage de porosités lui tend à diminuer (Figure 5.35). Plus la puissance augmente, plus les cordons sont larges, et meilleur est leur recouvrement cordon.

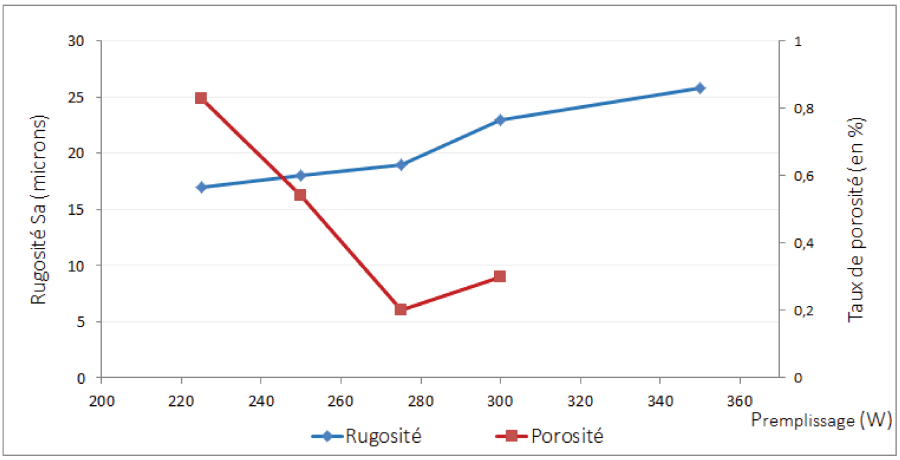

FIGURE 5.35 – Evolution de la rugosité Sa et du taux de porosité en fonction de la puissance de remplissage pour $V_{remplissage}$=1100 mm/s, $P_{downskin}$=100W et et $V_{downskin}$=1000 mm/s avec un diamètre de spot laser de 70 μm

A contrario, l'effet de la densité de puissance de remplissage vis-à-vis de la rugosité semble dominer l'effet de la VED de contour downskin (Figure 5.36). Ce résultat confirme la prévalence des paramètres de remplissage vis-à-vis de la détérioration des états de surface.

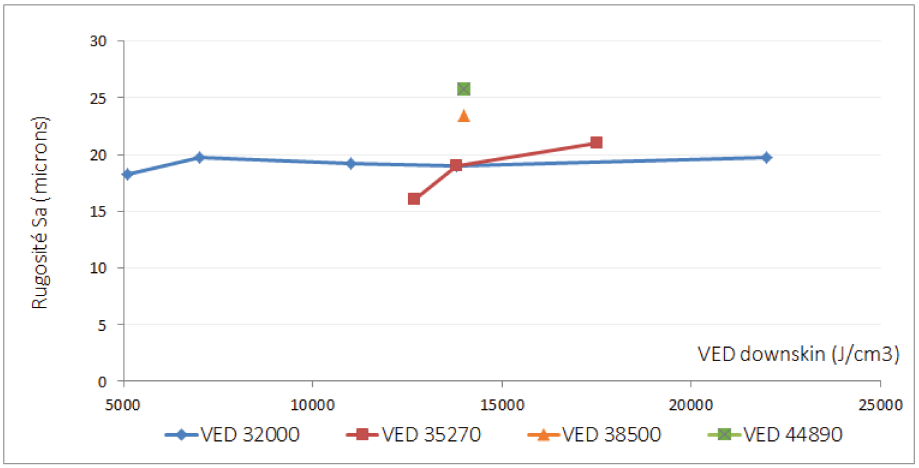

FIGURE 5.36 – Evolution de la rugosité Sa en fonction de la VED de downskin pour quatre VED de remplissage avec un diamètre de spot de 70 μm

Les résultats obtenus tendent à montrer que ce sont essentiellement les paramètres (puissance laser, vitesse de balayage et hatch) de remplissage, et en particulier avec de plus faibles puissances, qui améliorent les états de surface. Ce phénomène semble logique si l'on considère qu'une très forte proportion de volume fabriqué (autour de 90%) provient des passes de remplissage, qui sont donc les premières responsables de l'augmentation des gradients thermiques. Avec une granulométrie de 25-65 microns et une paramétrie de remplissage *froide*, l'état de surface obtenu sur les surfaces verticales est abaissé à un S_a moyen de 8 microns contre 15 microns sur les surfaces en contre-dépouille.

La paramétrie finalement sélectionnée est présentée dans la table 5.6. Elle permet donc de minimiser l'état de surface des parois sur lesquelles se propage le courant électrique et de s'affranchir de la présence de support pour la transition 13 mm, normalement nécessaire sur 4.8 mm avec une paramétrie standard.

	PARAMÈTRE	ETUDE	STANDARD
CONTOUR	Puissance laser (W)	150	275
	Vitesse balayage (mm/s)	450	760
	Hatch (μm)	-	-
REMPLISSAGE	Puissance laser (W)	225	275
	Vitesse balayage (mm/s)	1100	760
	Hatch (μm)	120	120
DOWNSKIN	Puissance laser (W)	100	275
	Vitesse balayage (mm/s)	1100	760
	Hatch (μm)	60	120

TABLE 5.6 – Paramétrie machine optimisée pour la fabrication du guide d'onde en Ti6Al4V et paramétrie standard fournie par le constructeur

Finalement, nous obtenons trois géométries : deux de 186 mm avec des longueurs de transition de 13 (Figure 5.37) et 33 mm (Figure 5.38) pour l'alliage d'aluminium AlSi7Mg0.6 et une de 120 mm avec une longueur de transition de 13 mm pour l'alliage Ti6Al4V.

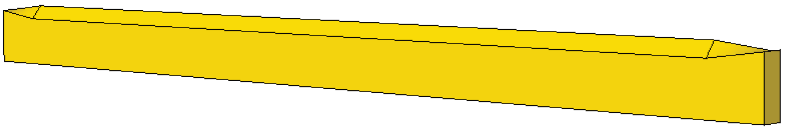

FIGURE 5.37 – Conception du vide pour un guide d'onde en bande K avec un raccordement de 13 mm et une longueur totale de 186 mm pour l'aluminium, 120 mm pour le titane

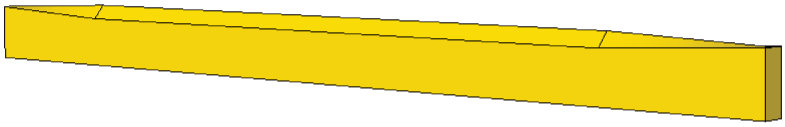

FIGURE 5.38 – Conception du vide pour un guide d'onde en bande K avec un raccordement de 33 mm et une longueur totale de 186 mm pour l'aluminium

5.2.3 Habillages mécanique et thermique

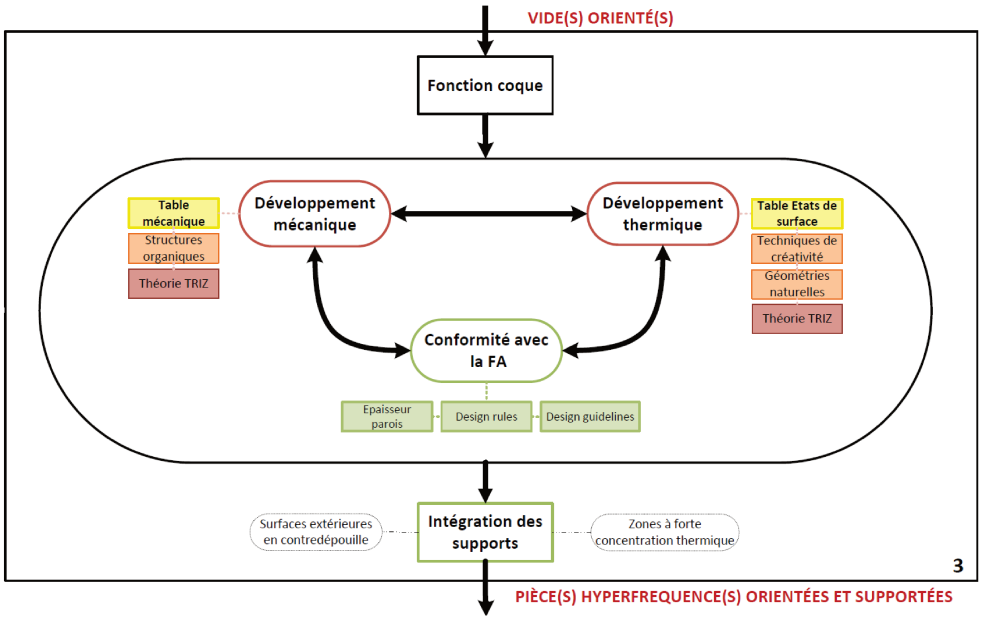

FIGURE 5.39 – Module 3 : Habillages mécanique et thermique

5.2.3.1 Fonction coque

La première étape de ce troisième module consiste à passer d'une conception abstraite, à savoir le Vide qui représente le volume de propagation, à une conception réelle, c'est-à-dire à la géométrie qui sera celle fabriquée. Pour ce faire, une fonction coque est générée (Figure 5.40) sur l'ensemble des trois géométries développées pour l'aluminium et le titane (Figures 5.37 et 5.38).

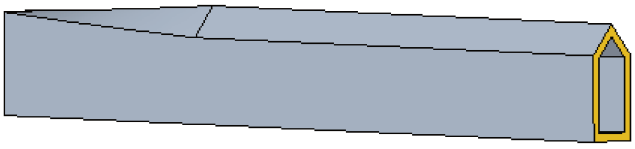

FIGURE 5.40 – Fonction coque générée à partir du Vide

5.2.3.2 Conformité avec la FA

Epaisseur de parois. Une fois la coque générée, il est nécessaire de se rapporter aux informations du procédé concernant l'épaisseur de cette coque, c'est-à-dire l'épaisseur des parois conductrices dans lequel se propage le courant électrique. Les machines de fabrication sélectionnées pour la réalisation des pièces - en l'occurence la PROX 300 SN et la SLM 125HN - exigent des épaisseurs minimales de 0.3 mm pour garantir la fabricabilité. D'un point de vue hyperfréquences, la norme EIA [107] préconise une épaisseur de paroi nominale de 1.015 mm. L'objectif est de la minimiser pour alléger la masse de la pièce conçue, sans pour autant compromettre sa qualité.

En raison des longueurs importantes des pièces en aluminium et afin d'éviter d'importantes fluctuations géométriques et/ou distorsions, l'épaisseur des parois est légèrement élevée et fixée à 1.5 mm en concertation avec le fabricant. Pour la pièce en titane, qui subira une force de compression de 50 bars (vérins hydrauliques) et une pression exercée sur les parois du canal de propagation (pâte abrasive) au cours du traitement AFM, l'épaisseur est également fixée à 1.5 mm pour réduire les risques de flambement. Le courant électrique se propageant en surface du conducteur sur une épaisseur de quelques micromètres, cette épaisseur choisie n'entâche donc pas la bonne propagation du courant électrique.

Pour cette application, aucune exigence mécanique ou thermique n'est exprimée. En revanche, avec les caractéristiques mécaniques minimales de l'alliage Ti6Al4V de la table 4.3, une simulation mécanique par élement finis a été effectuée par ANSYS sur le logiciel Mechanical 2020 R1 pour déterminer la pression maximale applicable à la géométrie développée avant flambement (Figure 5.41), en vue du traitement AFM. Les résultats affichent, après traîtement de relaxation des contraintes résiduelles, une valeur avoisinant les 70 bars.

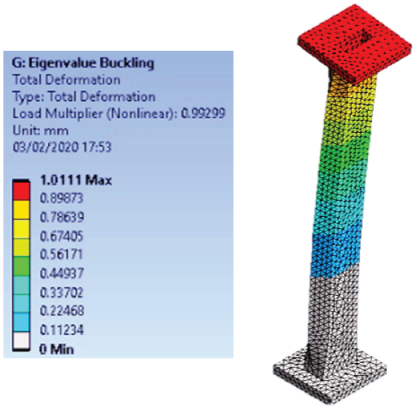

FIGURE 5.41 – Calcul de flambement avec ANSYS Mechanical 2020 R1 pour la géométrie développée en titane avec les caractéristiques mécaniques de la table 4.3

5.2.3.3 Intégration des supports

Pour rappel, la paramétrie machine sélectionnée pour l'alliage de titane dispense la présence de support dans la zone de raccordement de 13 mm. Seules les structures de supportage liées aux deux géométries aluminium seront donc faites ici.

Dans un premier temps, l'intégration des supports se fait en considérant les surfaces en contre-dépouille, qui nécessitent d'être étayées pour permettre leur fabricabilité (Figure 5.42). Sans surprise, nous retrouvons celles dont nous avons discuté au cours du module « Conception du Vide », mais également la surface inférieure du canal de propagation. Cette dernière étant une surface extérieure, non *fonctionnelle*, elle n'engage pas la qualité de propagation du courant électrique. Le positionnement de supports sur cette surface n'entraine donc ni perturbations électromagnétiques, ni problématique liée à leur enlèvement.

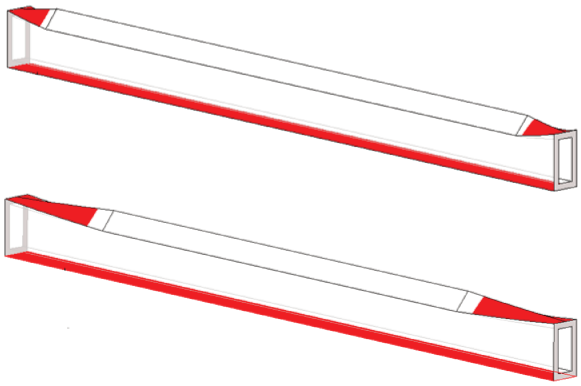

FIGURE 5.42 – Identification des surfaces en contre-dépouille par rapport à un angle α=45°pour l'alliage AlSi7Mg0.6 : (en haut) pour la transition 13 mm (en bas) pour la transition 33 mm

A l'aide du logiciel Magics, les supports sont automatiquement générés (Figure 5.43). Tandis que les supports extérieurs ne conduisent pas à des considérations particulières, les surfaces à l'intérieur du canal - sur 27.7 mm (transition 33 mm) ou 10.9 mm (transition 13 mm) - en méritent quant à elles quelques unes. Sur la coupe transversale, on note qu'une telle géométrie de supportage instaure de nombreux points de contact avec les surfaces de propagation, ponctuels sur les surfaces inférieures et supérieures et même continus sur les surfaces verticales. Une telle structure engendrerait une très forte détérioration des qualités surfaciques, dans les zones de transition, liée à sa grande difficulté d'enlèvement et ce, sur l'ensemble des parois conductrices. A cela s'ajoutent les importantes modifications dimensionnelles associées à une telle opération manuelle. Par conséquent, les supports générés automatiquement par Magics dans les zones de transition occasionneraient de fortes pertes supplémentaires, en adaptation comme en transmission.

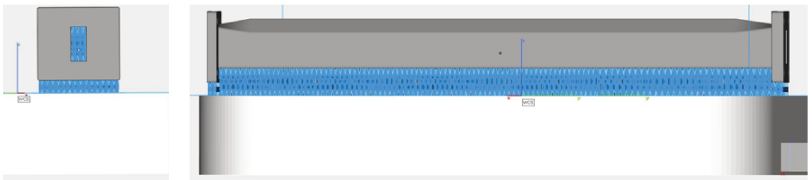

FIGURE 5.43 – Structures de supportage générées automatiquement par le logiciel Magics pour les géométries développées pour l'alliage AlSi7Mg0.6 : (à gauche) vue transversale (à droite) vue longitudinale

Par voie de conséquence, il est indispensable de modéliser manuellement de nouvelles structures de supportage à l'intérieur du canal de propagation qui puissent : (i) assurer l'étaiement des surfaces en contre-dépouille (ii) réduire au maximum les points de contact avec les surfaces pour faciliter leur enlèvement et minimiser les dégradations induites (iii) limiter les interactions avec les parois verticales pour conserver des qualités surfaciques optimales. Les supports externes générés automatiquement sont eux conservés.

En considérant qu'une surface d'1 mm^2 en contre-dépouille a la capacité de s'auto-supporter en AlSi7Mg0.6, nous avons donc imaginé des structures en forme d'arbre à 3 branches (Figure 5.44), avec un tronc et des branches rectangulaires de 0.7x0.7 mm^2, dont deux d'entre elles sont inclinées à 15°par rapport à la verticale. Elles sont positionnées le long de la zone de raccordement - sur 10.9 mm pour la transition de 13 mm et sur 27.7 mm sur celle de 33 mm - et espacées de 1 mm. Ce type de structure remplit alors les exigences exprimées dans le paragraphe précédent.

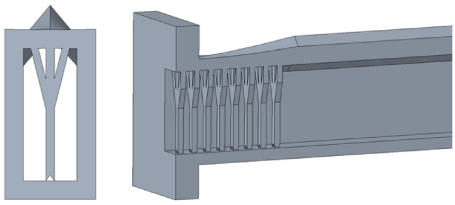

FIGURE 5.44 – Création manuelle des structures de supportage nécessaires à l'étaiement des surfaces en contre-dépouille ici pour la zone de raccordement de 13 mm

L'intégration des structures de supportage finalise le module 3, et plus globalement, la phase de conception. Avant d'entreprendre la fabrication des pièces, une dernière étape portant sur les analyses finales débute.

5.2.4 Analyses finales

5.2.4.1 Fabricabilité

Le positionnement des structures de supportage permet désormais de simuler le procédé LBM. Comme nous l'expliquions dans le chapitre 4, la précision atteinte par les logiciels commerciaux nécessite de prendre du recul sur les valeurs affichées, qui ne doivent pas être considérées comme *absolues* mais plutôt comme des indications sur les zones à forts gradients thermiques.

Les simulations par éléments finis des trois géométries développées (avec leurs supports pour celles fabriquées en aluminium) ont été réalisées par la société ANSYS sur le logiciel Mechanical 2020 R1. Les déformations induites, après enlèvement des supports, sont présentées sur la figure 5.45.

Au-delà des valeurs, on observe qu'elles sont similaires pour les deux géométries fabriquées en aluminium, avec des déformations maximales atteintes au niveau des brides. Les canaux de propagation semblent eux assez peu concernés, ce qui montre que les structures de supportage internes et externes suffisent à dissiper une grande partie de la chaleur introduite par le laser. Pour la pièce en alliage Ti6Al4V, apparaissent de fortes déformations sur la partie inférieure du canal de propagation qui pourraient être dues à la faible diffusivité thermique du titane. Comme la paramétrie adoptée pour la fabrication de cette pièce est *froide*, il est peu probable que cette forte concentration thermique se présente dans la

réalité, d'autant plus que les supports placés sous cette surface sont abondants.
Plus globalement, on note la symétrie des zones de déformations par rapport au plan de propagation, quel que soit le matériau et la géométrie considérés. Elle est la conséquence directe des choix d'orientation de fabrication et d'orientations surfaciques effectués en ce sens, au cours de la phase amont de conception.

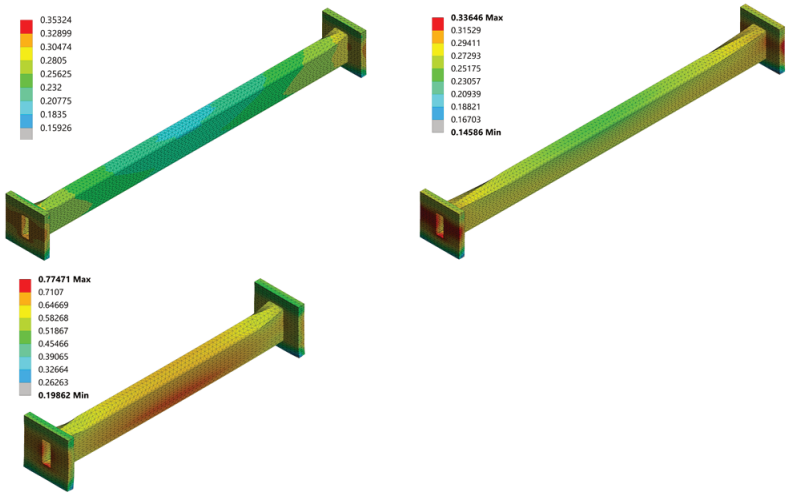

FIGURE 5.45 – Déplacements (en mm) induites par le procédé LBM d'après les simulations du logiciel ANSYS Mechanical 2020 R1 pour les géométries développées : (en haut à gauche) AlSi7Mg0.6 transition 13 mm (en haut à droite) AlSi7Mg0.6 transition 33 mm (en bas) Ti6Al4V transition 13 mm

Concernant l'évacuation de la poudre, comme explicité dans le module « Conception du Vide », nous estimons qu'elle ne fait pas l'objet d'une réflexion avancée pour les géométries développées, linéaires et sans discontinuités internes. Pour cette raison, la simulation aéraulique ne sera pas explicitée dans cette partie.

5.2.4.2 Simulations

Les géométries développées n'ayant pas subi de modifications majeures depuis les dernières simulations électromagnétiques et mécaniques, il ne semble pas nécessaire d'en réaliser de nouvelles.

5.2.4.3 Outillage

La dernière étape à réaliser avant la fabrication des pièces concerne l'outillage dédié au traitement AFM pour le guide en titane. Au terme du module « Conception du Vide », nous nous sommes assurés que la géométrie développée satisfaisait les contraintes liées à la machine utilisée. L'objectif ici porte sur la conception de cet outillage conformément à la pression exercée par les pistons hydrauliques - 50 bars - et aux caractéristiques mécaniques de la pièce (Table 4.3) qui lui confèrent une résistance de 70 bars au flambement. Dans ce cas, nous avons opté pour la réalisation d'un assemblage (Figure 5.46) constitué de :

1. deux couvercles chanfreinés en acier (en rose) dont l'ouverture supérieure correspond aux dimensions des orifices de la machine par lesquels sort la pâte abrasive sous la pression des bêliers hydrauliques. L'ouverture inférieure - au contact de la bride - coïncide, quant à elle, avec les dimensions de l'ouverture rectangulaire WR42. De cette manière, la pâte abrasive est conduite à l'intérieur du guide d'ondes de façon à appliquer une pression suffisante sur les parois du canal de propagation ;

2. deux corps cylindriques creux en acier (en bleu) dont les sections épousent la géométrie du guide d'ondes pour éviter un possible flambement de la pièce sous la forte pression exercée par la pâte abrasive sur les fines parois du guide d'ondes ;
3. un manchon en acier (jaune) dont le rôle est de fixer l'ensemble de l'assemblage et de résister à la force de serrage exercée par le cylindre supérieur de la machine.

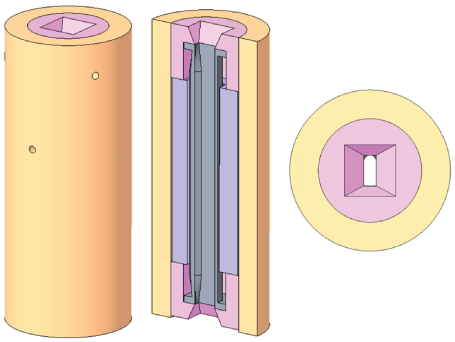

FIGURE 5.46 – Outillage conçu pour le traitement de surface par écoulement de pâte abrasive (AFM) : (à gauche) la vue d'ensemble (au milieu) une vue en coupe (à droite) une vue de dessus

On obtient finalement trois pièces hyperfréquences de 186 et 120 mm en aluminium et en titane (Figure 5.47) qui satisfont les exigences hyperfréquences (Table 5.1) et adaptées aux spécificités du procédé de fusion laser sur lit poudre mais également aux contraintes du traitement AFM.

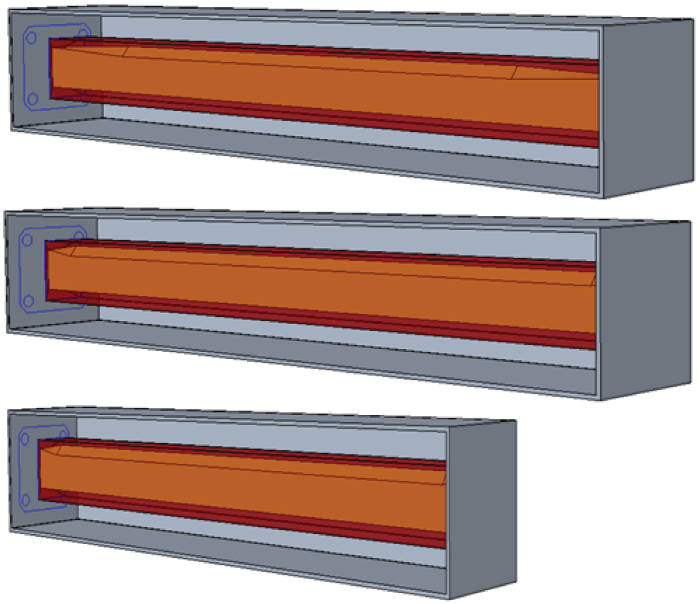

FIGURE 5.47 – Pièces hyperfréquences développées (en jaune) représentées à l'intérieur de leur EGC et EEC respectifs : (en haut) AlSi7Mg0.6 de 186 mm avec une transition de 33 mm (au milieu) AlSi7Mg0.6 de 186 mm avec une transition de 13 mm (en bas) Ti6Al4V de 120 mm avec une transition de 13 mm

5.3 Fabrication et traitement de surface

Une fois la phase de conception terminée en suivant la méthode DfAM dédiée aux composants hyperfréquences, les fichiers CAO des géométries développées ont été transmises à l'usine Thales 3D Maroc - pour les fabrications en aluminium - et au PIMM - pour la fabrication en titane (Figure 5.48). Post-fabrication, l'ensemble des pièces a reçu le post-traitement suivant :

1. Evacuation de la poudre non fusionnée à l'intérieur de la pièce fabriquée, à l'aide d'une souflette à air ;
2. Traitement de relaxation des contraintes résiduelles : 2h à 300°C$^{-6/+6}$ avec un refroidissement en four ;
3. Enlèvement des supports extérieurs à l'aide d'une découpe fil ;
4. Usinage des brides (Figure 3.4) à un niveau de Ra = 1.6 μm (Ra défini selon la NF EN ISO 1302 :3.2) et un parallélisme des brides de 0.2 μm. Ce surfaçage est habituel en hyperfréquences pour minimiser les pertes induites aux interfaces pièce-connecteur.

Le coût de revient de telles géométries développées suivant la méthode est réduit d'un facteur 4 par rapport au guide rectangulaire WR42 fabriqué selon l'orientation 1 (45°(xy)$\cap$ 0°(xz)), la plus couramment employée pour les composants hyperfréquences.

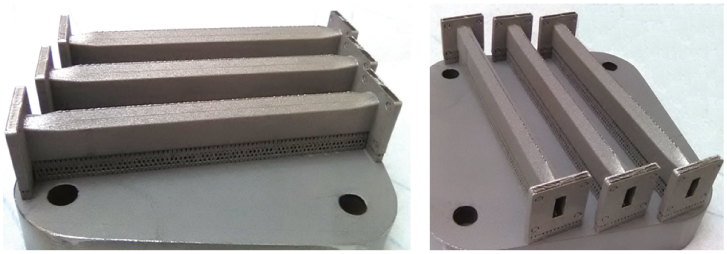

FIGURE 5.48 – Guides d'ondes en alliage Ti6Al4V développés suivant la méthode DfAM dédiée aux composants hyperfréquences et fabriqués au PIMM avec une paramétrie machine optimisée

Une des trois pièces titane a par la suite subi un traitement de surface par écoulement de pâte abrasive (AFM) à l'ENISE, avec l'outillage modélisé lors de la phase de conception (Figure 5.49).

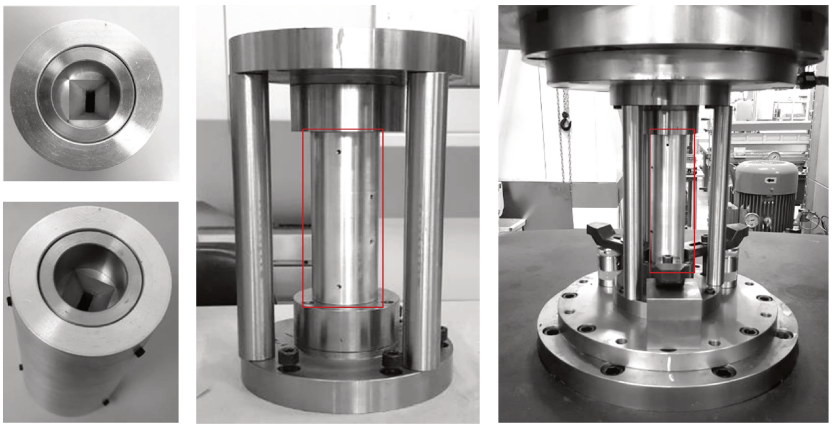

FIGURE 5.49 – Outillage conçu pour la géométrie développée en titane (en rouge) pour le traitement de surface AFM, intégré à l'outillage de la machine VECTOR 200

Pour ce traitement, les paramètres adoptés sont résumés dans la table 5.7.

	PARAMÈTRE	ETUDE
PÂTE ABRASIVE	Viscosité	Ultra Low Viscosity 50-54%
	Concentration abrasif	50% en masse de silicon carbide (SiC)
	Polymère porteur	Polyboroxane
	Granulométrie	54 grit (˜ 290 μm)
TRAITEMENT	Nombre de cycles	3
	Pression appliquée	50 bars

TABLE 5.7 – Paramètres adoptés pour le traitement AFM

5.4 Résultats et discussions

5.4.1 Matériaux bruts de fabrication

Les mesures des paramètres-S sur matériaux bruts sont présentées sur la figure 5.50. Elles correspondent à celles des deux pièces en aluminium AlSi7Mg0.6 de longueur totale 186 mm, avec pour l'un une transition de 13 mm et pour l'autre de 33 mm, ainsi qu'à la pièce en titane Ti6Al4V de longueur totale 120 mm, avec une longueur de transition 13 mm.

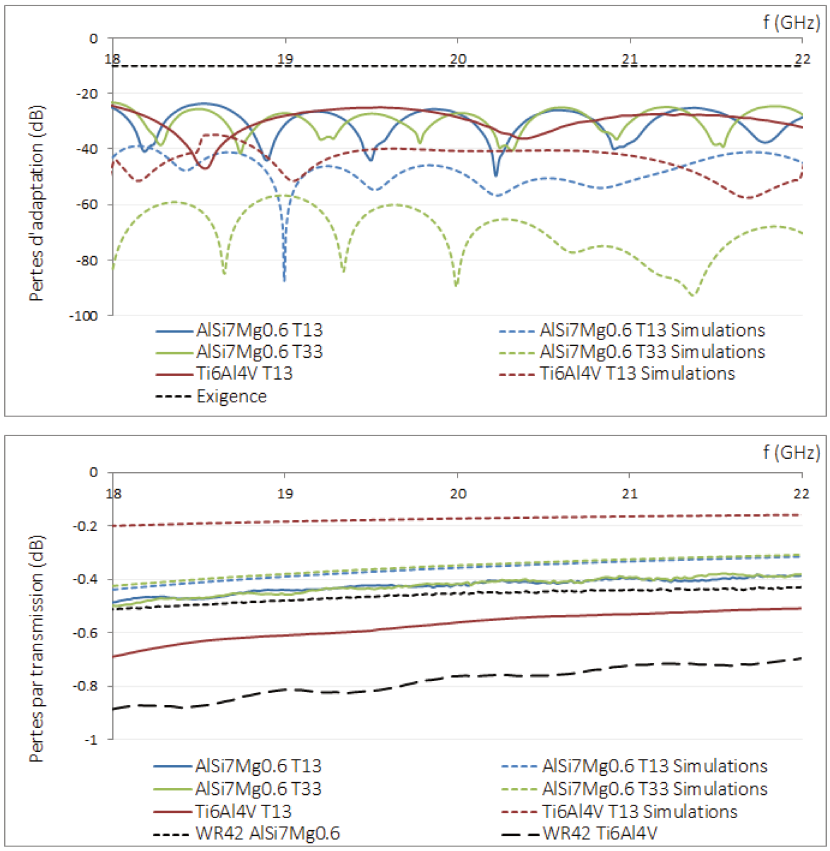

FIGURE 5.50 – Mesures des paramètres-S obtenus pour les trois géométries conçues et fabriquées en AlSi7Mg0.6 et Ti6Al4V comparées aux paramètres-S mesurés sur les WR42 : (en haut) les pertes d'adaptation, (en bas) les pertes par transmission

Adaptation. Les pertes mesurées se situent autour de -25 dB - correspondant approximativement à 0.3% de puissance non transmise - sur la bande 18-22 GHz et ce, **quels que soient la longueur de transition et le matériau**. **L'ensemble des pièces fabriquées satisfait donc les exigences en termes d'adaptation**, lesquelles requièrent une valeur maximale de -10 dB. D'autre part, on note ici la faible amplification des pertes dont nous faisions état précédemment entre les simulations - qui spécifiaient des puissances non transmises inférieures à 0.005% - et les performances réelles, très difficile à anticiper en phase de conception. En pratique, il s'avère donc que **la longueur de transition, comprise entre 13 et 33 mm, n'a pas d'influence notable sur les pertes d'adaptation.**

Transmission. En transmission, les performances atteintes par les géométries développées sont, pour les deux pièces en AlSi7Mg0.6 supérieures à -0.50 dB et, pour l'alliage Ti6Al4V supérieures à -0.69 dB. **Les trois pièces conçues et fabriquées satisfont**

donc également les exigences en transmission (Table 5.1). Ces résultats amènent à de nombreuses observations :

1. le **très faible écart**, observé entre les **simulations** - réalisées avec une conductivité électrique équivalente adaptée aux orientations surfaciques - et les **mesures** pour les deux pièces fabriquées en AlSi7Mg0.6 (~0.07 dB), montre l'**intérêt de disposer de données expérimentales procédé-hyperfréquences**. Il permet au concepteur d'évaluer, au plus proche de la réalité, l'efficacité de nouvelles formes géométriques. On pourrait penser que cet écart aurait pu être encore plus faible en l'absence de la dégradation des surfaces induite par l'enlèvement des supports dans la zone de raccordement, non considérée dans les simulations. Lorsque les simulations sont effectuées avec une conductivité électrique *par défaut* comme avec l'alliage Ti6Al4V, le décalage avec les performances réelles est important (~0.45 dB) ;
2. la différence, entre les pertes réelles produites par le WR42 et les géométries développées, varie selon le matériau utilisé pour la fabrication. En aluminium, les pertes sont légèrement inférieures à celles d'un WR42 (~0.05 dB), tandis qu'en titane elles le sont de plus 0.25 dB. Cette différence s'explique par la paramétrie machine utilisée. Pour les pièces fabriquées en aluminium, elle est identique pour le WR42 et les géométries développées, seule la géométrie les différencie. Au contraire, pour les pièces en titane, le WR42 a été fabriqué avec une paramétrie standard alors que la géométrie issue de la méthode a bénéficié d'une optimisation de la paramétrie machine pour obtenir **les meilleurs états de surface possibles**, en suivant pour cela les directives proposées dans la méthode. Cette constatation atteste donc du **profit de l'optimisation paramétrique** réalisée en phase de conception ;
3. **la longueur de transition**, comprise entre 13 et 33 mm, **ne paraît pas influer grandement sur le comportement en transmission** en cela que les pertes engendrées sont similaires. Il pourrait alors être intéressant de réduire davantage cette longueur de raccordement en vue d'exempter la présence de structures de supportage et réduire davantage les pertes par transmission.

5.4.2 Traitement AFM

Pour rappel, le traitement AFM a été appliqué au guide d'ondes issu de la méthode en Ti6Al4V de 120 mm de longueur avec une transition de 13 mm, et au WR42. Les mesures sont présentées sur la figure 5.51.

En adaptation, on note que le traitement de surface AFM n'implique pas de changement majeur. Situées à -25 dB avant traitement, les pertes demeurent à ce même niveau après l'écoulement de la pâte abrasive. Les modifications géométriques induites par le polissage ne semblent donc pas suffisantes pour conduire à des perturbations en adaptation.

En transmission, comme on le remarque aisément, les écarts avant et après traitement sont plus prononcés sur la géométrie rectangulaire que sur celle développée. Dans le premier cas, le traitement de surface permet en moyenne sur la bande 18-22 GHz, d'atteindre jusqu'à -0.4 dB de pertes tandis que sur le matériau brut elles se situent à -0.8 dB. Dans le second, la différence est bien plus faible puisque les pertes passent en moyenne de -0.6 dB à -0.4 dB. **Ces résultats prouvent que la maîtrise des inclinaisons surfaciques conformément aux données procédé-hyperfréquences (Table 5.2) couplée à une optimisation paramétrique, permettent d'aboutir à des performances sur matériau brut au plus proches de celles affichées pour la même géométrie avec des états de surface *miroirs* après traitement**.

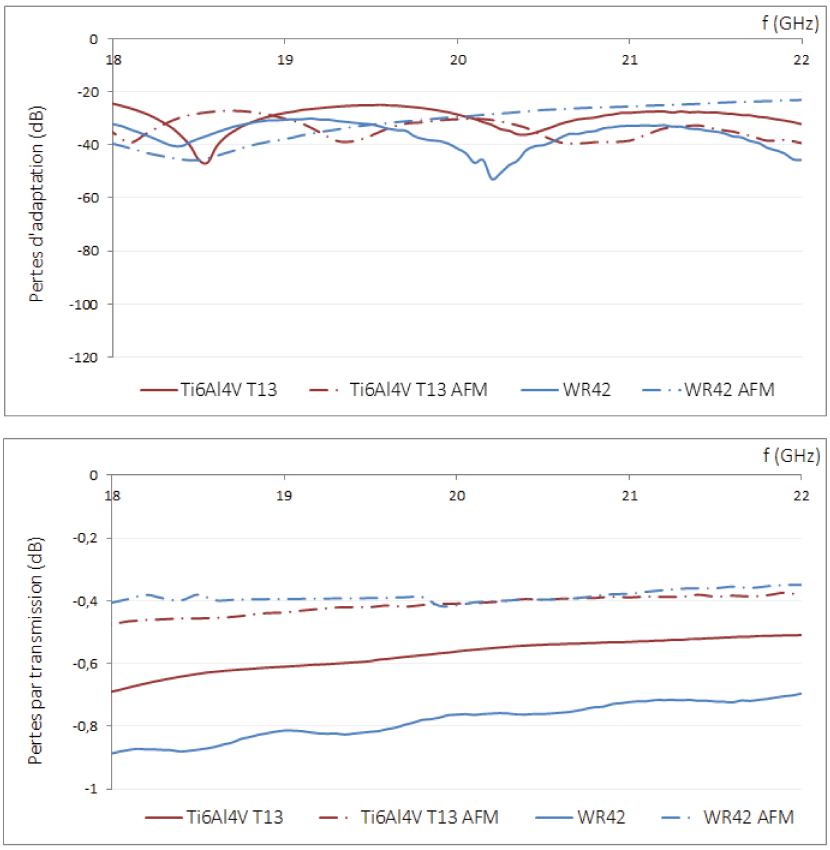

FIGURE 5.51 – Mesures des paramètres-S obtenus après traitement AFM pour la géométrie conçue et fabriquée en Ti6Al4V comparées aux paramètres-S mesurés sur le WR42 : (en haut) les pertes d'adaptation, (en bas) les pertes par transmission

5.5 Conclusions

L'application de la méthode proposée au chapitre 4 a donc permis de développer 3 géométries qui **optimisent simultanément les critères de coût, de performances électromagnétiques et de supportage**. Plus précisément, le **coût de fabrication d'un guide d'ondes a été divisé par 4** et les performances atteintes sont équivalentes - pour l'aluminium - sinon significativement améliorées - pour le titane - comparées à celles produites par un guide d'ondes rectangulaire WR42.

Ces résultats permettent de mettre en lumière les points forts de la méthode. **Les données expérimentales procédé-hyperfréquences recueillies au chapitre 3** ont conduit à des choix d'inclinaisons surfaciques judicieux, au regard des liens établis entre l'orientation et les états de surface produits qui affectent les propriétés propagatoires. Leur exploitation a également donné lieu à des **simulations au plus proche des performances réelles mesurées**, contrairement aux données rattachées aux outils de simulations qui ont largement montré leurs limites. L'**optimisation des paramètres machines**, conformément aux directives visant à limiter l'accumulation de chaleur dans la pièce pendant la fabrication, a contribué à une **réduction des états de surfaces des parois conductrices**, réduisant davantage les pertes induites par transmission. Elle a également participé à l'**absence de structures de supportage** dans la zone de transition, en réponse aux besoins de conception et électromagnétiques. L'ensemble de ces considérations a permis d'atteindre d'excellentes performances, **avoisinnant celles relevées une fois la pièce traitée composée de surfaces *miroirs***. La prise en compte, **à chaque étape**, des spécificités du procédé qui affectent au premier ordre les propriétés électromagnétiques des composants hyperfréquences, couplée à la liberté géométrique qu'offre la fabrication additive et aux exigences du cahier des charges fonctionnels, ont donc permis de **tirer avantage de la technologie**.

En particulier, en y ajoutant les atouts liés au caractère monolithique et à l'intégration multifonctionelle, il est légitime de penser que les performances pourraient être encore significativement améliorées. Seules la conception et la réalisation de fonctions complexes dans de futurs travaux permettront de mettre en valeur de telles géométries.

Chapitre 6

Conclusions

Les chapitres précédents ont permis d'exposer le contexte dans lequel ces travaux de Recherche s'inscrivent, d'identifier les verrous scientifiques et techniques, de décrire les problématiques qui en découlent et de détailler les solutions envisagées pour y répondre. Nous les avons par la suite concrétisées d'une part en menant une expérimentation qui nous a permis de déterminer l'influence de l'état de surface produit par le procédé sur les propriétés électromagnétiques et, d'autre part, de définir et décrire une méthode de conception pour la fabrication additive adaptée aux composants hyperfréquences. Ce dernier chapitre a pour objectif de synthétiser le travail réalisé, d'en présenter les apports industriels et scientifiques et d'en dégager les perspectives de Recherche.

La première partie de ce chapitre synthétise l'ensemble des travaux réalisés. L'objectif est de récapituler les différentes idées et concepts exprimés dans l'ensemble des chapitres, tout comme les résultats obtenus.

La deuxième débouche sur les contributions industrielles et scientifiques apportées par l'ensemble des concepts et résultats émis dans ce manuscrit.

La dernière partie ouvre sur les perspectives de Recherche qui mériteraient d'être explorées dans l'optique de futurs travaux.

6.1 Synthèse des travaux réalisés

Le chapitre 1 de ce manuscrit a abordé le contexte dans lequel s'inscrivent ces travaux de Recherche. Depuis le premier brevet déposé en 1984, le marché de la fabrication additive est en pleine expansion et ne cesse de croitre chaque année. Ne nécessitant pas d'outillage ni de bruts de matière, elle apporte de nouvelles perspectives concernant la conception de nouveaux produits dans le marché des produits manufacturés, toujours plus concurrentiel et contraint en terme de coût et de délais de production. En particulier, à travers une **liberté de conception presque infinie**, une **réduction des assemblages** ainsi qu'une possibilité de créer des **pièces multifonctionnelles**, elle suscite un réel intérêt pour les pièces hyperfréquences, à la fois **complexes** et produites en **petites séries**. Cependant, la méconnaissance des opportunités offertes par la technologie ainsi que la **maitrise partielle des phénomènes physiques** qui se manifestent lors de la fabrication, constituent des freins qu'il convient de lever pour généraliser l'implantation de la fabrication additive de manière durable sur la marché industriel. La fabrication additive apporte un **nouveau paradigme de conception** qu'il convient alors de définir et qui puisse :

— aider le concepteur à tirer profit des opportunités offertes par la fabrication additive, dans le but de répondre au mieux aux besoins fonctionnels ;
— lui permettre de prendre en compte au plus tôt, dans la démarche de conception, les spécificités de fabrication qui influeront directement sur les propriétés électromagnétiques.

Suite à ces observations, une analyse des spécificités du procédé de fusion laser sur lit de poudre (LBM) a été menée dans le chapitre 2. Parmi tous les paramètres influant sur la qualité d'une pièce hyperfréquences produite, il semblerait que les **états de surfaces** induits et intrinsèques au procédé - fortement dépendants de l'orientation de fabrication et de la paramétrie machine employée - soient largement mis en cause et **dégradent significativement les performances électromagnétiques** d'autant plus que la fréquence d'utilisation est élevée. Néanmoins, il a été constaté qu'en **tirant profit des atouts de la fabrication additive lors de la phase de conception**, les limites du procédé parvenaient à être contrepesées, débouchant sur des géométries dont les performances électromagnétiques concurrencent celles obtenues par des moyens classiques de fabrication. Ainsi, la nécessité de bénéficier d'une **méthode de conception orientée fabrication additive LBM qui intègre les caractéristiques procédé-hyperfréquences-conception a été constatée**. Chacune de ces caractéristiques (les hyperfréquences étant remplacées par un autre domaine d'application) fait l'objet de quelques travaux séparés mais aucune méthode globale n'existe à ce jour. Cet état de l'art nous a amené aux deux problématiques de Recherche de ces travaux de thèse :

1. Quelle(s) spécificité(s) du procédé de fusion laser sur lit de poudre, en lien avec les propriétés des champs électromagnétiques, doit-on considérer avec une attention particulière pendant l'étape de conception ?
2. Comment bénéficier, lors de la phase de conception, des avantages de la fabrication additive tout en intégrant les spécificités liées au procédé et aux règles métier hyperfréquences ?

L'expérimentation du chapitre 3, qui portait sur l'influence de l'état de surface sur les propriétés électromagnétiques, comme suggéré par l'état de l'art, nous a permis d'une part, de constater sa **forte influence**, et d'autre part, de mettre en lumière **une valeur *seuil*** au-delà de laquelle les pertes subissent une augmentation proportionnelle à l'état de surface limitant induit par le procédé. Cette tendance peut s'expliquer par une baisse

de la conductivité électrique du matériau à mesure que l'état de surface se dégrade ou par l'allongement du trajet parcouru par le courant électrique en surface du conducteur lorsque la qualité surfacique se détériore. Quoiqu'il en soit, l'**orientation des surfaces et de la pièce lors de la phase de conception constitue une choix crucial** pour la qualité finale du produit (propriétés électromagnétiques), de la fabricabilité (caractère autosupporté) et du coût de fabrication. Les données récoltées tout au long de cette expérimentation (orientation-état de surface-conductivité électrique-pertes) ont été **intégrées dans la méthode de DfAM** que nous avons proposée pour permettre au concepteur d'intégrer au plus tôt, dans la démarche de conception, **les spécificités du procédé en lien avec les propriétés hyperfréquences**.

La-dite méthode permet de répondre à la seconde problématique de Recherche que nous avons émise. Organisée en 4 étapes majeures elle permet, à partir des exigences du cahier des charges et des spécificités du procédé utilisé, de définir une géométrie optimisée vis-à-vis des besoins fonctionnels (hyperfréquences et même thermique et mécanique). La première étape vise à définir une structure modulaire, intégrant le caractère multifonctionnel apporté par la fabrication additive. Orientée en fonction du nombre de pièces à fabriquer pour minimiser le coût de revient, cette architecture grossière de la pièce facilite le développement des surfaces et la gestion de la symétrie des déformations induites, tout en garantissant le respect des spécifications fonctionnelles. La deuxième étape permet de passer d'une structure modulaire à une structure réaliste grâce à des outils électromagnétiques, procédé et de conception, mais surtout aux données collectées lors de la phase expérimentale. Cette étape est décisive puisque l'essentiel de la géométrie finale y est déterminée. S'en suit l'étape consacrée aux habillages mécanique et thermique. Finalement, une fois les structures de supportage intégrées, les analyses finales sont entreprises afin de valider la fabricabilité et les performances théoriquement atteintes par la pièce conçue, en comparaison avec les exigences exprimées par le cahier des charges. La dernière étape concerne le choix de la stratégie de fabrication qui sera utilisée pour fabriquer la pièce, de manière à obtenir les meilleurs états surfaciques mais également les plus faibles déformations possibles. La méthode de DfAM proposée **intègre donc les caractéristiques conception-hyperfréquences-procédé nécessaires à considérer pour conférer à la pièce les propriétés exigées par le cahier des charges une fois la pièce fabriquée**.

L'utilisation de la méthode a été présentée au chapitre 5 à travers le développement d'un guide d'ondes en bande K. L'objectif était de développer une géométrie qui permette de réduire le coût de revient, tout en garantissant des propriétés électromagnétiques équivalentes au guide rectangulaire WR-42 couramment utilisé. Bien que le guide d'ondes développé n'intègre pas 2 des 3 avantages majeurs de la fabrication additive identifiés au chapitre 1 (suppression des assemblages et intégration multifonctionnelle), l'application a permis de présenter la manière dont devait être utilisée la méthode que nous avons proposée. La géométrie qui résulte de son application - qui a fait l'objet d'un dépôt de brevet - servira de base géométrique au développement ultérieur de systèmes complexes hyperfréquences.

6.2 Apports industriels et scientifiques

Le principal apport de ces travaux est la proposition de méthode de *Design for Additive Manufacturing.*

Du côté industriel, la définition de cette méthode de DfAM permet au concepteur, pas toujours familier avec les technologies additives, de concevoir des systèmes complexes hyperfréquences par le procédé de fusion laser sur lit de poudre. Elle lui apporte une connaissance des avantages qui se présentent à lui au cours de la phase de conception, qu'elles soient géométriques ou architecturales, mais également une appréhension des limites du procédé dont il faudra tenir compte vis-à-vis des propriétés électromagnétiques, à partir des exigences exprimées par le cahier des charges. Par le développement de nouvelles formes géométriques, l'intégration multifonctionnelle et la suppression des assemblages mais aussi par des considérations liées au coût, aux déformations, aux états de surface et à l'autosupportage, la méthode proposée prend en compte les opportunités et les contraintes du procédé LBM employé. La compréhension, l'intégration et la maîtrise de cette méthode favoriseront le développement des systèmes hyperfréquences opérationnels.

Scientifiquement, la contribution est double. Elle illustre d'abord l'influence des états de surface sur les caractéristiques électromagnétiques de propagation. Comme nous l'évoquions dans le chapitre 2, aucune étude n'avait jusqu'à présent démontré et quantifié l'influence des qualités surfaciques de composants guidés passifs hyperfréquences, bien que largement conjecturée et modélisée sur de simples surfaces *ouvertes.* La maîtrise des procédés classiques de fabrication et surtout des états de surface qui en résultent n'avaient pas permis de promouvoir les recherches dans ce domaine au rang de priorité, contrairement au procédé de fusion laser sur lit de poudre. Avec l'expérimentation présentée au chapitre 3, nous avons constaté la forte influence des états de surface sur les pertes par transmission d'un guide d'ondes en aluminium AlSi7Mg0.G en bande K [18-22] GHz. Surtout, nous avons pu les corréler et montrer l'existence d'un *seuil* au-delà duquel la *surdégradation* de l'état surfacique entraine une augmentation linéaire des pertes par transmission. A partir de l'équation d'expression des pertes, la conductivité électrique équivalente du matériau a ainsi pu être déterminée en fonction de l'orientation de la surface limitante, et intégrée aux logiciels de simulations. La connaissance approfondie du *quadriptyque* orientation-état de surface-pertes-conductivité électrique équivalente favorise la convergence des simulations électromagnétiques avec les pertes réellement mesurées, permettant une maîtrise approfondie du comportement *réel* en phase de conception. Plus globalement, ces résultats constituent un avancement significatif dans le domaine radiofréquence et sur la compréhension des phénomènes propagatoires électromagnétiques.

La seconde contribution scientifique concerne l'intégration, dans la méthode de DfAM développée, de connaissances clés tant liées au procédé utilisé qu'aux domaines de la conception et des hyperfréquences. Considérant à la fois les opportunités **et** les contraintes du procédé, elle apporte une contribution nouvelle sur plusieurs points.

1. **Définition d'une structure modulaire.** Comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, de nombreux travaux méthodologiques déterminent une fois la géométrie finale déterminée, ce qui a pour conséquence d'imposer une orientation en vue de sa fabricabilité. Or, le choix de l'orientation est déterminant pour le coût de revient, la disymétrie des déformations et les pertes par transmission. La définition d'une structure modulaire permet à la fois de déterminer une orientation de fabrication assez tôt en conception sans contraindre la liberté géométrique offerte par

la technologie, mais aussi de satisfaire la fonction de service et de respecter les interfaces fonctionnelles. Le choix de l'orientation s'effectue alors en fonction des caractéristiques du procédé - volume de fabrication, coût de revient - et du comportement hyperfréquences - état de surface, déformation - de manière à faciliter le développement géométrique ultérieur, certains choix cruciaux ayant été considérés.

2. **Données expérimentales.** L'état de l'art nous a également permis de constater que les spécificités du procédé utilisé étaient rarement intégrées à la méthode, mais surtout que leur lien avec le domaine d'application n'était jamais considéré. Ainsi, au-délà du simple fait d'avoir identifié les spécificités du procédé qui affectent au premier ordre les propriétés du domaine hyperfréquences, les données expérimentales acquises apportent des informations précises et quantifiées au concepteur. Ces données portent sur les trois domaines principalement impliqués à savoir la conception, le procédé et les hyperfréquences. En particulier, elles sont *interdomaine*, c'est-à-dire qu'elles ne portent pas exclusivement sur l'un ou l'autre domaine mais qu'elles dépendent des trois à la fois. Fournies au concepteur, ces informations confèrent à la méthode que nous proposons un caractère nouveau et essentiel pour obtenir une pièce de qualité remplissant les exigences fonctionnelles exprimées.

Pour conclure, notre approche de la conception pour la fabrication additive nous permet de prendre en compte l'ensemble des avantages identifiés pour les hyperfréquences (suppression d'assemblages, intégration multifonctionnelle, liberté géométrique) en y intégrant les connaissances et données expérimentales liées aux domaines de la conception, du procédé et des hyperfréquences qui s'y rapportent. Cependant, le réalisme des pièces conçues dépend fortement des connaissances apportées à la méthode. En plus de la structure, il est important d'enrichir la méthode de nouvelles données expérimentales et de proposer de nouveaux outils à intégrer. En effet, tous les verrous que nous avons rencontrés au cours de ces travaux n'ont pas pu être levés et les perspectives d'évolution découlant de ce travail sont multiples.

6.3 Perspectives de Recherche

Au cours de ces trois années de Recherche, nous avons pu constater l'étendue de la problématique que constitue la conception pour la fabrication additive de composants hyperfréquences. A mesure que le temps passe, de nouvelles idées naissent face aux différents verrous rencontrés eux-mêmes en mutation, qu'ils soient directement liés au processus de conception ou indirectement comme le sont par exemple les procédés de traitement de surfaces. Le travail précédemment exposé représente donc les axes de Recherche que nous avons estimés prioritaires. Certains points que nous avions identifiés n'ont pas pu être traités dans le temps imparti et mériteraient, par bien des aspects, de faire l'objet de futurs travaux dans le but de les enrichir. La liste de ces perspectives est donnée ci-dessous.

Données expérimentales. Comme nous l'avons vu dans ces travaux, les données expérimentales liées au procédé de fabrication et aux propriétés électromagnétiques constituent des informations cruciales à intégrer en phase de conception. Un travail important devrait être réalisé sur cet aspect pour enrichir davantage les connaissances du triptyque procédé-conception-hyperfréquences. A notre sens, cela concerne quatre points en particulier :

1. **Déformations.** Nous avons émis l'hypothèse que l'état de surface induit par le procédé de fusion laser sur lit de poudre était la cause principale des baisses de performances observées sur les pièces hyperfréquences fabriquées, comme le suggérait également la communauté scientifique. Nous le pensons toujours à mesure que nous rédigeons les conclusions de ces travaux, car l'état de surface influe sur les propriétés propagatoires quelle que soit la fonction hyperfréquence considérée. Néanmoins, pour des fonctions particulières (filtre par exemple) qui intègrent couramment dans leur géométrie des irrégularités (murs, escaliers), les déformations générées par le procédé sont souvent rédhibitoires. Ces irrégularités étant placées à des endroits précis (tolérance de l'ordre de quelques dizaines de microns) et leurs dimensions sur la bande Ka étant millimétriques, les déformations entrainent bien souvent une baisse de leur sélectivité (déplacement, réduction, augmentation de la bande passante) et conduisent à leur inexploitation. Comme nous l'avons largement évoqué jusqu'ici, les déformations sont causées par les gradients thermiques accumulés lors de la fabrication, si bien que l'orientation des surfaces, la stratégie de fabrication et les structures de supportage y jouent un rôle important. Nous pensons qu'il serait donc intéressant, dans l'optique de réaliser des équipements complexes dans lequel ce genre de fonction figure toujours, d'étudier l'influence des déformations sur les propriétés électromagnétiques à travers des orientations surfaciques différentes. Cela permettrait par conséquent de pouvoir anticiper ces déformations et de réduire leur empreinte au cours de la phase de conception.

2. **Conductivités électriques.** Les conductivités électriques équivalentes acquises au cours de l'expérimentation ont été déduites des pertes réelles grâce à l'équation 2.12, qui relie pertes et conductivité électrique. Considérant les erreurs liées aux mesures hyperfréquences et la dépendance artificielle de la conductivité électrique à la fréquence d'utilisation (équation 2.12), l'idéal serait de réaliser des mesures de conductivités électriques à l'aide d'un conductimètre pour plusieurs orientations de fabrication. Ces acquisitions permettraient alors d'apporter encore plus de réalisme aux simulations électromagnétiques, et de bénéficier plus rapidement de ces informations sans avoir à réaliser toute une campagne d'expérimentation, qui s'avère longue et coûteuse.

3. **Bandes de fréquences.** Les résultats que nous avons obtenus dans le chapitre 3 et les données expérimentales extraites de cette expérimentation ont porté sur une seule bande de fréquence, à savoir la bande Ka. Comme nous l'avons vu à ces fréquences, l'épaisseur de peau dans laquelle se déplace le courant électrique est de l'ordre de 0.5 micromètre, soit largement inférieur à la taille des irrégularités présentes en surface. Sur des plus faibles bandes de fréquences, l'épaisseur de peau étant plus importante et de l'ordre des-dites irrégularités, il se pourrait donc que l'influence de l'état de surface soit moins forte qu'à de plus hautes fréquences (valeur *seuil* plus élevée ?). Nous pensons donc que de nouvelles expérimentations devraient être menées aux différentes bandes de fréquences couramment utilisées dans les produits conçus pour apporter au concepteur des données précises en phase de conception : X [8-12] GHz, Ku [12-18] GHz, K [18-22] GHz.

4. **Stratégies de fabrication.** Les stratégies de fabrication utilisées pour la réalisation des composants issus de la phase de conception constituent un axe important de recherche et développement. En effet, les états de surface et les déformations produits par le procédé ayant une forte influence sur les performances électromagnétiques, comme nous l'avons vu dans le chapitre 3, il est essentiel de les contrôler pour réduire au mieux leurs répercussions sur les performances. Cela peut-être fait, d'une part, avec une conception judicieuse et, d'autre part, en adoptant des paramètres de lasage adaptés aux spécificités citées précédemment. Des campagnes d'essais devraient permettre de trouver des stratégies de lasage, locales et globales, ajustées à la nature de la surface lasée pour lui conférer la meilleure aptitude à propager des ondes électromagnétiques. Bien que nécessitant du temps et des ressources, ce développement est crucial pour maîtriser le procédé, atteindre les objectifs souhaités, réduire les écarts entre la conception et la pièce réelle et s'affranchir de traitements de surfaces coûteux.

5. **Titane.** Avec l'alliage d'aluminium AlSi7Mg0.6, l'alliage de titane Ti6Al4V est le matériau le plus utilisé dans le cadre des composants hyperfréquences. Cependant, ses propriétés métallurgiques diffèrent assez nettement de celles de l'aluminium. En particulier, les qualités surfaciques atteignables sont meilleures et les déformations produites lors de la fusion laser plus faibles. Dans ces travaux de thèse, les données expérimentales acquises ont concerné presque exclusivement l'alliage d'aluminium. Dans l'optique de futurs projets dans lesquels l'alliage de titane serait exigé par le cahier des charges, il est primordial de disposer de données expérimentales sur l'alliage Ti6Al4V équivalentes à celles de l'aluminium concernant les états de surface et les déformations, ainsi que leur(s) influence(s) sur les propriétés électromagnétiques à différentes fréquences. Elles serviraient à opérer des choix judicieux concernant la phase de conception et la stratégie de fabrication.

Métallisation. Souvent, une métallisation des surfaces est réalisée sur les composants hyperfréquences. L'objectif est de déposer une fine couche de métal très conducteur (argent, or) sur les surfaces fonctionnelles de la pièce réalisée. Le courant électrique se propageant en surface du conducteur, il se déplacera par conséquent à l'intérieur de cette fine couche à la conductivité électrique très élevée, permettant de limiter les pertes par transmission (équation 3.2). Cependant, le caractère monolithique de composants complexes issus de fabrication additive empêche la métallisation par la voie électrolytique couramment utilisée. Les électrodes sont en incapacité de se déplacer à l'intérieur de la structure cavitaire pour y déposer une couche métallique homogène de quelques microns sur toutes les surfaces fonctionnelles. Il est donc primordial de développer un procédé chimique capable de métal-

liser de manière uniforme les surfaces fonctionnelles de systèmes monolithiques cavitaires, en particulier pour ceux réalisés en titane, dont la conductivité électrique intrinsèque est insuffisante pour atteindre les niveaux de performances requis.

Développement de systèmes complexes. Comme nous l'avons largement abordé dans l'ensemble de ce manuscrit, nous pensons que l'intérêt de la fabrication additive pour les composants hyperfréquences porte précisément sur la réalisation de systèmes complexes pour lesquels la suppression de la notion d'assemblage, la liberté géométrique et l'intégration multifonctionnelle permettraient d'atteindre des niveaux des performances opérationnels, tout en réduisant leurs coûts, masses et volumes. En ce sens, une méthode de DfAM a été élaborée et présentée dans le chapitre 4. Nous n'avons pu la mettre en application sur un cas complexe, mais seulement sur le cas simple que représente le guide d'ondes. La conception de systèmes hyperfréquences complets, tels que ceux déployés dans le cadre opérationnel, nécessite des années de développement, avec des ressources humaines importantes et des procédés de fabrication largement maîtrisés. Néanmoins, la cible de ces travaux concerne précisément ce type de système et, bien que validés par une application relativement simple mais principale, la méthode proposée ne peut être améliorée et enrichie sans l'expérience de conception apportée par cette famille de composants visée.

Bibliographie

[1] F. Laverne, F. Segonds, and P. Dubois. Fabrication additive : principes generaux. *Techniques de l'ingenieur*, 2016.

[2] A. Holst. Global 3d printing market size forecast 2013-2021. Technical report, Statista, 2018.

[3] T.T. Wohlers and Wohlers Associates. *Wohlers Report 2017 : 3D Printing and Additive Manufacturing State of the Industry Annual Worldwide Progress Report.* Wohlers Associates, 2017.

[4] P. Booth and E.V. Lluch. Enhancing the performance of waveguide filters using additive manufacturing. *Proceedings of the IEEE*, 105(4) :613–619, April 2017.

[5] L. Berglund, F. Ivarsson, and M. Rostmark. Crucial parameters for additive manufacturing of metals : a study in quality improvement. page 35, 2019.

[6] F. Calignano. Design optimization of supports for overhanging structures in aluminum and titanium alloys by selective laser melting. *Materials & Design*, 64 :203 – 213, 2014.

[7] P. G. Huray, S. Hall, S. Pytel, F. Oluwafemi, R. Mellitz, D. Hua, and Peng Ye. Fundamentals of a 3d snowball model for surface roughness power losses. In *2007 IEEE Workshop on Signal Propagation on Interconnects*, pages 121–124, May 2007.

[8] P. Krajnik and F. Hashimoto. *CIRP Encyclopedia of Production Engineering*, chapter Finishing, pages 1–9. 01 2018.

[9] J. Zhang, B. Song, Q. Wei, D. Bourell, and Y. Shi. A review of selective laser melting of aluminum alloys : Processing, microstructure, property and developing trends. *Journal of Materials Science & Technology*, 35(2) :270 – 284, 2019. Recent Advances in Additive Manufacturing of Metals and Alloys.

[10] D. Manfredi, F. Calignano, M. Krishnan, R. Canali, E. Paola Ambrosio, and E. Atzeni. From powders to dense metal parts : characterization of a commercial alsimg alloy processed through direct metal laser sintering. *Materials*, 6(3) :856–869, 2013.

[11] T.T. Wohlers and Wohlers Associates. *Wohlers report 2015 : additive manufacturing and 3D printing state of the industry : annual worldwide progress report.* Wohlers Associates, 2015.

[12] M. Cotteleer and J. Joyce. 3d opportunity : additive manufacruting paths to performances, innovation, and growth. *Deloitte University Press*, 2015.

[13] A Grzesiak. La fabrication additive debridera les bureaux d'etudes. *L'usine nouvelle*, March 2012.

[14] S. Ghosh and J. Choi. Three-dimensional transient finite element analysis for residual stresses in the laser aided direct metal/material deposition process. *Journal of Laser Applications*, 17(3) :144–158, 2005.

[15] E. Foroozmehr and R. Kovacevic. Effect of path planning on the laser powder deposition process : thermal and structural evaluation. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 51 :659–669, 11 2010.

[16] D. Buchbinder, W. Meiners, N. Pirch, K. Wissenbach, and J. Schrage. Investigation on reducing distortion by preheating during manufacture of aluminum components using selective laser melting. *Journal of Laser Applications*, 26 :2004–, 02 2014.

[17] A. Hussein, L. Hao, C. Yan, R. Everson, and P. Young. Advanced lattice support structures for metal additive manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(7) :1019–1026, July 2013.

[18] I. Yadroitsev, I. Yadroitsava, P. Bertrand, and Smurov. Factor analysis of selective laser melting process parameters and geometrical characteristics of synthesized single tracks. *Rapid Prototyping Journal*, 18(3) :201–208, 2012.

[19] B. Vrancken. *Study of residual stresses in selective laser melting.* PhD thesis, Faculty of Engineering Science of Arenberg Doctoral School, 2016.

[20] J. Ilcik, D. Koutny, and D. Palousek. *Geometrical accuracy of the metal parts produced by selective laser melting : initial tests.* Springer International Publishing, Cham, 2014.

[21] L. Zhang, S. Zhang, H. Zhu, Z. Hu, G. Wang, and X. Zeng. Horizontal dimensional accuracy prediction of selective laser melting. *Materials & Design*, 160 :9 – 20, 2018.

[22] G. Strano, L. Hao, R.M. Everson, and K.E. Evans. Surface roughness analysis, modelling and prediction in selective laser melting. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(4) :589–597, 2013.

[23] R.I. Campbell, M. Martorelli, and H.S. Lee. Surface roughness visualisation for rapid prototyping models. *Computer-Aided Design*, 34 :717–725, 09 2002.

[24] I. Yadroitsev and I. Smurov. Surface morphology in selective laser melting of metal powders. *Physics Procedia*, 12 :264–270, 12 2011.

[25] A. Triantaphyllou, A.L. Giusca, G.D. Macaulay, F. Roerig, M. Hoebel, R.K. Leach, B. Tomita, and K.A. Milne. Surface texture measurement for additive manufacturing. *Surface Topography : Metrology and Properties*, 3(2) :024002, may 2015.

[26] J. C. Fox, S. P. Moylan, and B Lane. Effect of process parameters on the surface roughness of overhanging structures in laser powder bed fusion additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 45 :131 – 134, 2016. 3rd CIRP Conference on Surface Integrity.

[27] P. Hartunian and M. Eshraghi. Effect of build orientation on the microstructure and mechanical properties of selective laser-melted ti6al4v alloy. *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, 2 :69, 10 2018.

[28] A. Lerebours, P. Vigneron, S. Bouvier, A. Rassineux, M. Bigerelle, and C. Egles. Additive manufacturing process creates local surface roughness modifications leading to variation in cell adhesion on multifaceted tial6v4 samples. *Bioprinting*, 16, 2019.

[29] I. Koutiri, E. Pessard, P. Peyre, O. Amlou, and T. De Terris. Influence of slm process parameters on the surface finish, porosity rate and fatigue behavior of as-built inconel 625 parts. *Journal of Materials Processing Technology*, 255 :536 – 546, 2018.

[30] G. Strano, L. Hao, R.M. Everson, and K.E. Evans. A new approach to the design and optimisation of support structures in additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 66(9) :1247–1254, Jun 2013.

[31] C. Emmelmann, P. Scheinemann, M. Munsch, and Seyda. Laser additive manufacturing of modified implant surfaces with osseointegrative characteristics. *Physics Procedia*, 12 :375 – 384, 2011. Lasers in Manufacturing 2011 - Proceedings of the Sixth International WLT Conference on Lasers in Manufacturing.

[32] C.Y. Yap, C.K. Chua, Z. Dong, Z. Liu, D. Zhang, L.E. Loh, and S.L. Sing. Review of selective laser melting : Materials and applications. *Applied Physics Reviews*, 2 :041101, 12 2015.

[33] D.K. Do and P. Li. The effect of laser energy input on the microstructure, physical and mechanical properties of ti-6al-4v alloys by selective laser melting. *Virtual and Physical Prototyping*, 11 :1–7, 02 2016.

[34] F. Calignano, D. Manfredi, E. P. Ambrosio, L. Iuliano, and P. Fino. Influence of process parameters on surface roughness of aluminum parts produced by dmls. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 67(9) :2743–2751, Aug 2013.

[35] C.K. Chua, K.F. Leong, and C.S. Lim. *Rapid prototyping : principles and applications, third edition*. 01 2010.

[36] J-P. Kruth, G. Levy, F. Klocke, and T.H.C. Childs. Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 56 :730–759, 01 2007.

[37] J. Delgado Sanglas, J. Ciurana, and C. Rodriguez. Influence of process parameters on part quality and mechanical properties for dmls and slm with iron-based materials. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 60 :5–8, 05 2011.

[38] H.S. Mali and A. Manna. Current status and application of abrasive flow finishing processes : A review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B : Journal of Engineering Manufacture*, 223(7) :809–820, 2009.

[39] J. Majhi, R. Janardan, M. Smid, and Gupta. On some geometric optimization problems in layered manufacturing. *Computational Geometry*, 12(3) :219 – 239, 1999.

[40] G.R.N. Tagore, S.D. Anjikar, and A. Venu Gopal. Multi objective optimisation of build orientation for rapid prototyping with fused deposition modeling (fdm). In *18th Solid Freeform Fabrication Symposium, SFF 2007*, pages 246–255, Austin, 2007.

[41] International Telecommunication Union (ITU). Radio regulations - article 2, 2015.

[42] International Telecommunication Union. Recommendation itu-r v.431-8 - nomenclature of the frequency and wavelengh bands used in telecommunications.

[43] IEEE Standards Association. Ieee 521-2002 - ieee standard letter designations for radar-fequency bands.

[44] P-G. Fontolliet. *Systemes de telecommunications.* Traite d'electricite de l'Ecole polytechnique federale de Lausanne. 1996.

[45] J.C. Maxwell. A dynamical theory of the electromagnetic field. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, 1965.

[46] M. Kilian, C. Hartwanger, M. Schneider, and M. Hatzenbichler. Waveguide components for space applications manufactured by additive manufacturing technology. *IET Microwaves, Antennas & Propagation*, 11, 10 2017.

[47] F. Tchoffolo-Talom and S. Turpault. Additive manufacturing for rf microwave devices : design, performances and treatments improvement evaluations. In *2017 International Conference on Electromagnetics in Advanced Applications (ICEAA)*, pages 1473–1476, Sept 2017.

[48] B. Zhang, Y-X. Guo, and H. Zirath. Investigation on 3d-printing technologies for millimeter-wave and terahertz applications. *Proceedings of the IEEE*, 105 :1–14, 03 2017.

[49] O.A. Peverini, M. Lumia, F. Calignano, G. Addamo, M. Lorusso, E.P. Ambrosio, D. Manfredi, and Virone. Selective laser melting manufacturing of microwave waveguide devices. *Proceedings of the IEEE*, 105(4) :620–631, April 2017.

[50] J. A. Lorente, M. M. Mendoza, A. Z. Petersson, L. Pambaguian, A. A. Melcon, and Ernst. Single part microwave filters made from selective laser melting. In *2009 European Microwave Conference (EuMC)*, pages 1421–1424, Sept 2009.

[51] B. Zhang and H. Zirath. 3d printed iris bandpass filters for millimetre-wave applications. *Electronics Letters*, 51(22) :1791–1793, 2015.

[52] *Ku-band sidearm orthomode transducer manufactured by additive layer manufacturing*, April 2016.

[53] C. Guo, X. Shang, M. J. Lancaster, and F. Xu. A 3-d printed lightweight x-band waveguide filter based on spherical resonators. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 25(7) :442–444, July 2015.

[54] R. Wang and W. Cui. A rapid estimation of the conductor loss in the rectangular waveguide with rough surface. *2011 4th IEEE International Symposium on Microwave, Antenna, Propagation and EMC Technologies for Wireless Communications*, 11 2011.

[55] H. Braunisch, X. Gu, A. Camacho-Bragado, and L. Tsang. Off-chip rough-metal-surface propagation loss modeling and correlation with measurements. In *2007 Proceedings 57th Electronic Components and Technology Conference*, pages 785–791, May 2007.

[56] S.P. Morgan. Effect of surface roughness on eddy current losses at microwave frequencies. *Journal of Applied Physics*, 20 :352–362, 05 1949.

[57] S. Hall, S. G. Pytel, P. G. Huray, D. Hua, A. Moonshiram, G. A. Brist, and E. Sijercic. Multigigahertz causal transmission line modeling methodology using a 3-d hemispherical surface roughness approach. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 55(12) :2614–2624, Dec 2007.

[58] E. Hammerstad and O. Jensen. Accurate models for microstrip computer-aided design. In *1980 IEEE MTT-S International Microwave symposium Digest*, pages 407–409, May 1980.

[59] S. Groiss, I. Bardi, O. Biro, K. Preis, and K. R. Richter. Parameters of lossy cavity resonators calculated by the finite element method. *IEEE Transactions on Magnetics*, 32(3) :894–897, May 1996.

[60] O-A. Peverini, M. Lumia, F. Calignano, D. Manfredi, G. Addamo, M. Lorusso, E. Ambrosio, G. Virone, P. Fino, and R. Tascone. Manufacturing of waveguide components for satcom through selective laser melting. pages 563–566, 03 2017.

[61] O.A. Peverini, M. Lumia, G. Addamo, F. Paonessa, G. Virone, R. Tascone, F. Calignano, G. Cattano, and D. Manfredi. Integration of an h-plane bend, a twist, and a filter in ku/k-band through additive manufacturing. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, PP :1–10, 03 2018.

[62] F. Laverne, F. Segonds, N. Anwer, and M. Le Coq. Assembly based methods to support product innovation in design for additive manufacturing : an exploratory case study. *Journal of Mechanical Design*, 137, 2015.

[63] R. Becker, A. Grzesiak, and Henning. Rethink assembly design. *Assembly Automation*, 25(4) :262–266, 2005.

[64] E. Atzeni, L. Iuliano, P. Minetola, and Salmi. Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5) :308–317, 2010.

[65] G.A. Teitelbaum, L.C. Schimdt, and Y. Goaer. Examining potential design guidelines for use in fused deposition modeling to reduce build time and material volume. In *ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pages 73–82, August 2009.

[66] S. Filippi and I. Cristofolini. The design guidelines (dgls), a knowledge-based system for industrial design developed accordingly to iso-gps (geometrical product specifications) concepts. *Research in Engineering Design*, 18 :1–19, 05 2007.

[67] C. Emmelmann, D. Herzog, and J. Kranz. Design for laser additive manufacturing. In Milan Brandt, editor, *Laser Additive Manufacturing*, Woodhead Publishing Series in Electronic and Optical Materials, pages 259 – 279. Woodhead Publishing, 2017.

[68] J Kranz, D. Herzog, and Emmelmann. Design guidelines for laser additive manufacturing of lightweight structures in tial6v4. *Journal of Laser Applications*, 27(S1) :S14001, 2015.

[69] D. Thomas. *The development of design rules for selective laser melting.* PhD thesis, University of Wales Institute, Cardiff, 2009.

[70] M. P. Bendsoe, A. Ben-Tal, and J. Zowe. Optimization methods for truss geometry and topology design. *Structural optimization*, 7(3) :141–159, Apr 1994.

[71] Remi Ponche. *Methodologie de conception pour la fabrication additive, application a la projection de poudres.* PhD thesis, Ecole Centrale de Nantes, 2013.

[72] R. Arni and K.S. Gupta. Manufacturability analysis of flatness tolerances in solid freeform fabrication. *Journal of Mechanical Design*, 123, 03 2001.

[73] R. Paul and S. Anand. Optimization of layered manufacturing process for reducing form errors with minimal support structures. *Journal of Manufacturing Systems*, 36 :231–243, 2015.

[74] A. Sanati Nezhad, M. Vatani, F. Barazandeh, A.R. Rahimi, I. Rudas, M. Demiralp, and N. Mastorakis. Multi objective optimization of part orientation in stereolithography. In *Photonic North*, November 2010.

[75] W. Cheng, J.Y.H. Fuh, A.Y.C. Nee, Y.S. Wong, H.T. Loh, and T. Miyazawa. Multi objective optimization of part building orientation in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 1(4) :12–23, 1995.

[76] F. Xu, Y.S. Wong, H.T. Loh, J.Y.H. Fuh, and Miyazawa. Optimal orientation with variable slicing in stereolithography. *Rapid Prototyping Journal*, 3(3) :76–88, 1997.

[77] C. Lynn-Charney and D. Rosen. Usage of accuracy models in stereolithography process planning. *Rapid Prototyping Journal*, 6 :77–87, 06 2000.

[78] J. Majhi, R. Janardan, J. Schwerdt, M. Smid, and Gupta. Minimizing support structures and trapped area in two-dimensional layered manufacturing. *Computational Geometry*, 12(3) :241 – 267, 1999.

[79] P. Das, R. Chandran, R. Samant, and Anand. Optimum part build orientation in additive manufacturing for minimizing part errors and support structures. *Procedia Manufacturing*, 1 :343 – 354, 2015. 43rd North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 43, 8-12 June 2015, UNC Charlotte, North Carolina, United States.

[80] O. Kerbrat, P. Mognol, and J.Y. Hascoet. Manufacturability analysis to combine additive and subtractive processes. *Rapid Prototyping Journal*, 16(1) :63–72, 2010.

[81] I. Zhang, A. Bernard, R. Kumar Gupta, and R. Harik. Evaluating the design for additive manufacturing a process planning perspective. *Procedia CIRP*, 21 :144 –150, 2014. 24th CIRP Design Conference.

[82] S. Nelaturi, W. Kim, and T. Kurtoglu. Manufacturability feedback and model correction for additive manufacturing. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 137 :021015, 04 2015.

[83] A. Telea and A. Jalba. Voxel-based assessment of printability of 3d shapes. In Pierre Soille, Martino Pesaresi, and Georgios K. Ouzounis, editors, *Mathematical Morphology and Its Applications to Image and Signal Processing*, pages 393–404, Berlin, Heidelberg, 2011. Springer Berlin Heidelberg.

[84] Y. Chen and X. Xu. Manufactruability analysis of infeasible features in polygonal models for web-based rapid prototyping. In *2010 International Conference on Manufacturing Automation*, pages 120–127, Dec 2010.

[85] B. Vayre, F. Vignat, and Villeneuve. Designing for additive manufacturing. *Procedia CIRP*, 3 :632–637, 2012. 45th CIRP Conference on Manufacturing Systems 2012.

[86] S. Yang and Y.F. Zhao. Additive manufacturing-enabled design theory and methodology : a critical review. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 80(1) :327–342, Sep 2015.

[87] M. Leary, L. Merli, F. Torti, M. Mazur, and Brandt. Optimal topology for additive manufacture : a method for enabling additive manufacture of support-free optimal structures. *Materials and Design*, 63 :678 – 690, 2014.

[88] Y. Tang. Design method for lattice-skin structure fabricated by additive manufacturing. In *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings (IMECE)*, volume 2, November 2014.

[89] G. Sossou, F. Demoly, G. Montavon, and Gomes. An additive manufacturing oriented design approach to mechanical assemblies. *Journal of Computational Design and Engineering*, 5(1) :3– 8, 2018.

[90] Nicolas Boyard. *Methodologie de conception pour la realisation de pieces en fabrication additive.* PhD thesis, Arts et Metiers ParisTech, 2015.

[91] M. Kumke, K. Dutta, H. Watschke, and T. Vietor. A new methodological framework for design for additive manufacturing. *Virtual and Physical Prototyping*, 11 :3–19, 02 2016.

[92] G. Pahl and W. Beitz. *Engineering Design : a systematic approach.* Springer-Verlag London, 2007.

[93] A-L. Rias, C. Bouchard, F. Segonds, B. Vayre, and S. Abed. *Design for additive manufacturing : supporting intrinsic-motivated creativity*, pages 99–116. Springer International Publishing, Cham, 2017.

[94] M-S. Duval, S. Han, C. Claudin, F. Salvatore, J. Bajolet, and J. Rech. Experimental study on finishing of internal laser melting (slm) surface with abrasive flow machining (afm). *Precision Engineering*, 05 2018.

[95] J.R. Davis. *ASM Specialty Handbook Aluminum and Aluminum Alloys.* ASM International, 1993.

[96] C. Silbernagel, I. Ashcroft, P. Dickens, and M. Galea. Electrical resistivity of additively manufactured alsi10mg for use in electric motors, 03 2018.

[97] E. Maxwell. Conductivity of metallic surfaces at microwave frequencies. *Journal of Applied Physics*, 18(7) :629–638, 1947.

[98] V. Hubka and W.E. Eder. *Quality of design science*, pages 217–220. Springer London, London, 1996.

[99] J. Hirtz, R.B. Stone, D.A. McAdams, S. Szykman, and K.L. Wood. A functional basis for engineering design : reconciling and evolving previous efforts. *Research in Engineering Design*, 13(2) :65–82, Mar 2002.

[100] K. Ulrich and S. Eppinger. *Product design and development.* 01 2003.

[101] A-L. Rias, C. Bouchard, F. Segonds, and S. Abed. Design for additive manufacturing : a creative approach. volume Paper presented at Design 2016 the 14th International Design Conference, Dubrovnik-Croatia, 2016.

[102] T. Taura. *Creative design engineering : introduction to an Interdisciplinary approach.* Elsevier Science, 2016.

[103] K. Roth. *Design catalogues and their usage*, pages 121–129. Springer London, London, 2002.

[104] G. Altshuller and A. Seredinski. *40 principes d'innovation : TRIZ pour toutes applications.* Broche, 2004.

[105] M. Brandt. *Laser Additive Manufacturing- Materials, Design, Technologies and Applications.* 10 2016.

[106] S.B. Cohn. Properties of ridge waveguide. *Proceedings of the IRE*, 35(8) :783–788, Aug 1947.

[107] EIA-RS-261-B. Rectangular waveguides (wr3 to wr2300). *Standard of the Electronic Industries Association of the United States of America*, 1979.

Publications

Conférence

CONFERE 2018 - Budapest, Hongrie
25ème colloque des Sciences de la conception et de l'innovation
M. François. A design framework proposal for additively manufactured RF waveguide parts.

Article

M. François, F. Segonds, M. Rivette, P. Peyre, S. Turpault. Design for Additive Manufacturing (DfAM) methodologies : a proposal to foster the design of microwave waveguide components. *Virtual and Physical Prototyping* 14(2) : 175-187, 2019.

Brevet

M. François, S. Turpault, J-P. Aurez, F. Segonds, M. Rivette, P. Peyre. Guide d'onde obtenu par fabrication additive.*Demande France n°1801151.* 2018.

Mathieu FRANCOIS

Conception pour la fabrication additive, par fusion laser sur lit de poudre, de composants hyperfréquences

Résumé

PENDANT DE NOMBREUSES ANNEES, LES COMPOSANTS PASSIFS HYPERFREQUENCES ONT ETE UTILISES DANS DES SYSTEMES DE COMMUNICATION NOTAMMENT POUR DES CHAINES D'ALIMENTATION D'ANTENNE. CE TYPE D'EQUIPEMENT RADIOFREQUENCE EST DEJA LARGEMENT OPERATIONNEL DANS DIFFERENTS DOMAINES TELS QUE LES COMMUNICATIONS SATELLITE, LES RADARS, LES OBSERVATIONS SPATIALES ETC. EN RAISON DE LEURS AVANTAGES DE FAIBLES PERTES AINSI QUE DE LEUR CAPACITE ELEVEE DE GESTION D'ENERGIE. SEULEMENT, AVEC L'EMERGENCE DE NOUVELLES TECHNOLOGIES ET UNE CONCURRENCE CONSIDERABLE SUR LE MARCHE DE LA DEFENSE, LES CLIENTS SONT DE PLUS EN PLUS DEMANDEURS DE PRODUITS DE MOINS EN MOINS COUTEUX AVEC DES DELAIS D'OBTENTION TOUJOURS PLUS COURTS, AVEC DES EXIGENCES LIEES AUX PERFORMANCES TOUTES AUSSI ELEVEES.

CES DERNIERES ANNEES, DE NOMBREUX INDUSTRIELS ET GROUPES DE RECHERCHE SE SONT INTERESSES DE PLUS EN PLUS AUX PROCEDES DE FABRICATION ADDITIVE POUR LES COMPOSANTS A PROPAGATION GUIDEE. NE NECESSITANT PAS DE BRUT DE MATIERE NI D'OUTILLAGE DEDIE, LES TECHNOLOGIES ADDITIVES APPORTENT DE NOUVELLES PERSPECTIVES DE CONCEPTION. EN PARTICULIER, L'AJOUT DE MATIERE COUCHE PAR COUCHE AUTORISE LA FABRICATION DE PIECES MONOLITHIQUES, QUI PERMETTRAIENT D'ALLEGER LES EQUIPEMENTS ET DE REALISER DES ECONOMIES DE TEMPS ET DE COUTS. D'AUTRE PART, L'UNE DES PLUS GRANDS AVANTAGES DE LA FABRICATION ADDITIVE RESIDE DANS LES DEGRES DE LIBERTE SUPPLEMENTAIRES QU'ELLE OFFRE EN CONCEPTION, PERMETTANT DE CONCEVOIR DES ARCHITECTURES COMPLEXES ET INNOVANTES AUX PERFORMANCES ACCRUES, QUI SERAIENT IRREALISABLES PAR DES TECHNIQUES CONVENTIONNELLES. A CE TITRE, LA FABRICATION ADDITIVE A ETE IDENTIFIEE COMME POUVANT JOUER UN ROLE CRUCIAL DANS LE DEVELOPPEMENT DE CE TYPE DE PIECE.

CEPENDANT, COMME TOUT PROCEDE DE FABRICATION, LES PROCEDES ADDITIFS POSSEDENT LEURS PROPRES SPECIFICITES ET CONTRAINTES LIEES AUX PHENOMENES PHYSIQUES MIS EN JEU AU COURS DE LA FABRICATION ET DONT IL EST NECESSAIRE DE TENIR COMPTE AU COURS DE LA PHASE DE CONCEPTION POUR TIRER PLEINEMENT PROFIT DES AVANTAGES QU'ILS OFFRENT. AJOUTEES AUX EXIGENCES HYPERFREQUENCES, LE CONCEPTEUR DOIT ALORS ETRE EN CAPACITE D'IDENTIFIER LES LIENS QUI EXISTENT ENTRE LES DOMAINES DE LA CONCEPTION, DU PROCEDE ET DE L'ELECTROMAGNETISME POUR GARANTIR UNE PIECE DE QUALITE CONFORME AU CAHIER DES CHARGES.

L'OBJECTIF DE CES TRAVAUX DE THESE EST DOUBLE. LE PREMIER CONSISTE A IDENTIFIER LES SPECIFICITES DU PROCEDE DE FUSION LASER SUR LIT DE POUDRE INFLUANT MAJORITAIREMENT SUR LES PERFORMANCES ELECTROMAGNETIQUES, DE MANIERE A Y APPORTER UNE ATTENTION PARTICULIERE LORS DE LA CONCEPTION. LE SECOND PORTE SUR LA DEFINITION D'UNE METHODE QUI INTEGRE LES CONTRAINTES ET OPPORTUNITES DE LA FABRICATION ADDITIVE TOUT EN REPONDANT AUX OBJECTIFS, GLOBAUX ET LOCAUX, ISSUS DU CAHIER DES CHARGES HYPERFREQUENCES DE MANIERE A FABRIQUER DES COMPOSANTS OPERATIONNELS.

Mots clés : conception, DfAM, fabrication additive, fusion laser, SatCom, hyperfréquences

Abstract

FOR MANY YEARS, PASSIVE MICROWAVE WAVEGUIDE COMPONENTS HAVE BEEN USED IN COMMUNICATION SYSTEMS, PARTICULARLY FOR ANTENNA FEED CHAINS. THIS KIND OF RADIOFREQUENCY EQUIPMENT IS ALREADY WIDELY OPERATIONAL IN VARIOUS FIELDS SUCH AS SATELLITE COMMUNICATIONS, RADARS, SPACE OBSERVATIONS, ETC. BECAUSE OF THEIR LOW LOSS AS WELL AS THEIR HIGH ENERGY MANAGEMENT CAPACITY. HOWEVER, THE EMERGENCE OF NEW TECHNOLOGIES AND THE SIGNIFICANT DEGREE OF COMPETITION THAT OCCURS WITHIN THE DEFENSE MARKET, CUSTOMERS ARE INCREASINGLY CALLING FOR LOWER-COST PRODUCTS, SHORTER LEAD TIMES, WITH REQUIREMENTS EQUALLY HIGH.

OVER THE PAST YEARS, SEVERAL INSTITUTIONS AND INDUSTRIES HAVE BECOME MORE AND MORE INTERESTED IN ADDITIVE MANUFACTURING PROCESSES FOR PASSIVE WAVEGUIDE COMPONENTS. WITHOUT ANY NEED FOR RAW MATERIAL OR DEDICATED TOOLS, ADDITIVE TECHNOLOGIES BRING SOME NEW DESIGN PERSPECTIVES. IN PARTICULAR, THE ADDITION OF MATERIAL LAYER BY LAYER PROMOTES THE MANUFACTURE OF MONOLITHIC PARTS, WHICH WOULD CONTRIBUTE TO LIGHTEN THE WEIGHT OF ANTENNAS AND SAVE TIME AND COSTS. ON THE OTHER HAND, IT OFFERS ADDITIONAL DEGREES OF FREEDOM DURING THE DESIGN STAGE, ENCOURAGING THE DEVELOPMENT OF COMPLEX AND INNOVATIVE ARCHITECTURES, RESULTING IN INCREASED PERFORMANCE, WHICH WOULD BE UNACHIEVABLE BY CONVENTIONAL TECHNIQUES. AS SUCH, ADDITIVE MANUFACTURING HAS BEEN IDENTIFIED AS BEING ABLE TO PLAY A CRUCIAL ROLE IN THE DEVELOPMENT OF THIS TYPE OF PART.

HOWEVER, LIKE ANY OTHER MANUFACTURING PROCESS, ADDITIVE PROCESSES INVOLVE SEVERAL PHYSICAL PHENOMENA AND SO HAVE THEIR OWN MANUFACTURING SPECIFICITIES AND CONSTRAINTS TO CONSIDER DURING THE DESIGN PHASE TO BENEFIT FULLY FROM ALL THE POTENTIAL OF ADDITIVE MANUFACTURING. COMBINED WITH THE MICROWAVE REQUIREMENTS, THE DESIGNER MUST THEN BE ABLE TO IDENTIFY THE CORRELATION BETWEEN DESIGN, PROCESS AND ELECTROMAGNETIC TO GUARANTEE A QUALITY PART CONFORMING TO THE SPECIFICATIONS.

THE OBJECTIVE OF THIS STUDY IS TWOFOLD. THE FIRST ONE CONSISTS IN IDENTIFYING THE SPECIFICITIES OF THE LASER BEAM MELTING PROCESS WITH A MAJOR INFLUENCE ON ELECTROMAGNETIC PROPERTIES, IN ORDER TO BE ABLE TO PAY SPECIAL ATTENTION DURING THE DESIGN PHASE. THE SECOND CONCERNS THE DEVELOPMENT OF A METHOD THAT INCORPORATES THE CONSTRAINTS AND OPPORTUNITIES OF ADDITIVE MANUFACTURING WHILE MEETING THE OBJECTIVES ARISING FROM THE MICROWAVE SPECIFICATIONS.

Keywords : design, DfAM, additive manufacturing, laser beam melting, SatCom, microwave