



Fabrication additive de pièces multimatériaux

Pierre Muller

► To cite this version:

Pierre Muller. Fabrication additive de pièces multimatériaux. Génie mécanique [physics.class-ph]. Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2013. Français. NNT : . tel-00918030

HAL Id: tel-00918030

<https://theses.hal.science/tel-00918030>

Submitted on 12 Dec 2013

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.

Ecole Centrale de Nantes

ÉCOLE DOCTORALE

Sciences Pour l'Ingénieur, Géosciences, Architecture

Année 2013

N° B.U. :

Thèse de DOCTORAT

Spécialité : GENIE MECANIQUE, PRODUCTIQUE TRANSPORT

Présentée et soutenue publiquement par :

PIERRE MULLER

le 9 juillet 2013
à l'École Centrale de Nantes

TITRE

FABRICATION ADDITIVE DE PIECES MULTIMATERIAUX

JURY

Président :	Claire LARTIGUE	Professeur des Universités, IUT de Cachan, Université Paris Sud 11
Rapporteurs :	Emmanuel DUC Patrice PEYRE	Professeur des Universités, IFMA, Clermont-Ferrand Directeur de Recherche CNRS, Arts et Métiers ParisTech, Paris
Examineurs :	Jean-Yves HASCOËT Pascal MOGNOL	Professeur des Universités, École Centrale de Nantes Professeur des Universités, ENS Cachan - Antenne de Bretagne
Invité :	Franck HENRIROUX	Ingénieur Recherche et Développement, Dassault Aviation (invité)

Remerciements

Je souhaite, tout d'abord, remercier mes directeurs de thèse Pascal Mognol et Jean-Yves Hascoët pour m'avoir offert l'opportunité de réaliser cette thèse. Ces trois années ont été très enrichissantes grâce à un subtil équilibre entre l'autonomie que vous m'avez laissée et l'encadrement que vous m'avez apporté. Le temps que vous m'avez consacré, vos conseils et votre soutien m'ont permis, après un début légèrement difficile, de m'épanouir dans mon travail de recherche.

Je souhaite adresser mes remerciements aux membres du jury qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'évaluer ce travail de thèse. Je remercie tout particulièrement Emmanuel Duc et Patrice Peyre pour avoir accepté de rapporter ce mémoire et pour les retours constructifs qu'ils ont pu formuler.

Pendant ces trois années, j'ai passé la majorité de mon temps à l'antenne de Bretagne de l'ENS Cachan. Je tiens à remercier l'ensemble du personnel de cet établissement que je quitte avec un peu de tristesse après sept belles années. Je remercie particulièrement l'ensemble des enseignants du département mécatronique qui m'ont d'abord accueilli en tant qu'élève avant de m'intégrer dans le département en tant qu'enseignant. Je voudrais remercier également l'équipe des "chasseurs" en commençant par Régis, Philippe & Philippe, Sébastien, Cécile et Patrick. Olivier, merci également pour tous les conseils que tu as pu m'apporter. Florent, Benoît, bon courage pour votre dernière année. Renan, Charles, Tugdual, merci d'avoir accepté à tour de rôle d'être mes co-bureau. Rémi, merci d'avoir partagé l'avancement de cette thèse. Je pense que c'est avec toi que j'ai le plus discuté de mon travail. En même temps, je pense également connaître pas mal de chose sur le tien !

Même si mes passages à Nantes étaient plus rares, ils ne furent pas moins importants dans le déroulement de cette thèse. C'est pourquoi je souhaite remercier l'ensemble des membres de l'équipe MO2P de l'IRCCyN pour les conseils qu'ils ont pu m'apporter lors des différentes

présentations de mon travail en réunion équipe. Je tiens à remercier tout particulièrement Gilles et Thierry pour leur accueil chaleureux lors des journées d'expérimentation. Merci également à Coko et David, pour les petits Nespresso - entre autres - à chaque passage à Nantes.

Je voudrais maintenant remercier tous les gens qui m'ont soutenu en dehors des heures de travail. Je pense tout particulièrement à mes parents qui ont commencé à me soutenir bien avant le début de cette thèse. Je pense également à mes grand-parents qui ont suivi l'évolution de ma thèse à distance. Merci à Antoine, Léa et Hélène pour le temps passé en cuisine.

Je vais aussi dédier quelques lignes à mes amis sans qui ces trois années auraient été bien différentes. Je pense notamment à Rémi (eh oui encore toi ! !), Marion, Delphine, Cyril, Laura, Pepete, Ema, Yann, Elodie, Vincent...

Je vais finir cette page en remerciant Claire qui a vécu au plus proche les bons moments comme les passages plus délicats de cette thèse. Merci pour tout.

Table des matières

Remerciements	iii
Table des matières	vii
Liste des figures	xii
Glossaire	xiii
Principales notations	xv
1 Contexte général de l'étude	1
1.1 Pièces multimatériaux à gradient fonctionnel	2
1.1.1 Principe	2
1.1.2 Applications	2
1.1.3 Fabrication des pièces multimatériaux	3
1.2 Fabrication additive	6
1.2.1 Principe	6
1.2.2 Évolution des techniques de fabrication additive	6
1.2.3 Applications	8
1.3 Fabrication additive des pièces multimatériaux	10
1.3.1 Procédés pour les pièces multimatériaux	10
1.3.2 Apport de la fabrication additive	10
1.3.3 La réalité des pièces multimatériaux en fabrication additive	11
1.4 Synthèse et plan du manuscrit	14
2 État de l'art et positionnement	17
2.1 Description numérique des pièces multimatériaux	18
2.1.1 Outils CAO et pièces multimatériaux	18
2.1.2 Modèles mathématiques de description	18

2.1.3	Synthèse	23
2.2	Détermination d'une stratégie de fabrication	24
2.2.1	Méthodes de détermination de stratégies de fabrication	24
2.2.2	Paramètres de stratégie en fabrication additive	25
2.2.3	Synthèse	27
2.3	Fabrication de pièces multimatériaux	28
2.3.1	Propriétés des pièces multimatériaux	28
2.3.2	Modélisation du procédé de fabrication	30
2.3.3	Optimisation du procédé de fabrication	33
2.3.4	Synthèse	34
2.4	Méthodologie de fabrication : du concept à la pièce	35
2.5	Synthèse et positionnement de nos travaux de recherche	39
2.5.1	Synthèse	39
2.5.2	Positionnement de nos travaux de recherche	40
3	Modélisation et optimisation du procédé	43
3.1	Intérêt et objectifs de la modélisation du procédé	44
3.1.1	Méthodologie de fabrication : du concept à la pièce	44
3.1.2	Importance du choix de la stratégie de fabrication	49
3.1.3	Objectifs de la modélisation du procédé	53
3.2	Modélisation du procédé	54
3.2.1	Modélisation de la pièce fabriquée	54
3.2.2	Modélisation des cordons de matière	55
3.2.3	Modélisation du fonctionnement du procédé	55
3.2.4	Simulation et analyse de la fabrication d'une pièce multimatériau	58
3.3	Optimisation du procédé	62
3.3.1	Intérêt de l'optimisation du procédé	62
3.3.2	Mise en place du dispositif d'optimisation	62
3.3.3	Réglage du dispositif d'optimisation	66
3.4	Indices de performance	68
3.4.1	Définition des indices de performance	68
3.4.2	Retour sur l'importance du choix de la stratégie de fabrication	69
3.4.3	Retour sur l'intérêt du dispositif d'optimisation	72
3.5	Validation expérimentale	73
3.5.1	Objectif de l'étude	73
3.5.2	Simulation de la fabrication	74
3.5.3	Analyse de la fabrication	76
3.5.4	Synthèse de l'étude	79
3.6	Synthèse	80
4	Génération de trajectoires	83
4.1	Problématique et solutions envisagées	84
4.1.1	Problématique	84
4.1.2	Solutions envisagées	87

4.2	Génération de trajectoires par sélection de stratégies	89
4.2.1	Principe de la méthode proposée	89
4.2.2	Classification des répartitions des matériaux	89
4.2.3	Sélection de stratégies et génération de trajectoires	91
4.3	Génération automatique de trajectoires	92
4.3.1	Principe de la méthode proposée	92
4.3.2	Ordonnancement des points de passage	93
4.3.3	Génération de trajectoires à partir des points de passage	96
4.4	Validation expérimentale	98
4.4.1	Objectif de l'étude	98
4.4.2	Génération de la trajectoire et simulation de la fabrication	99
4.4.3	Analyse de la fabrication	100
4.4.4	Synthèse de l'étude	102
4.5	Intérêts des méthodes à travers quelques exemples	103
4.5.1	Intérêt de la génération automatique de trajectoires	103
4.5.2	Intérêt de l'utilisation des travaux de modélisation du procédé	106
4.5.3	Intérêt de la génération de trajectoires par sélection de stratégies	108
4.5.4	Intérêt d'une trajectoire hybride	111
4.6	Synthèse	115
5	Maquette informatique	119
5.1	Présentation générale de la maquette informatique	120
5.2	Description de la pièce	121
5.3	Génération automatique de trajectoires	124
5.3.1	Choix des paramètres	124
5.3.2	Génération de la trajectoire et simulation de la fabrication	125
5.3.3	Analyse des résultats	126
5.4	Génération des instructions de fabrication	129
5.5	Synthèse	131
6	Synthèse et perspectives	133
6.1	Synthèse et apports des travaux effectués	134
6.2	Perspectives	137
A	Spécificités du procédé CLAD®	139
B	Étude du comportement mécanique	141
B.1	Objectif de l'étude	141
B.2	Procédure expérimentale	142
B.3	Résultats	142
B.4	Synthèse de l'étude	144
C	Documentation pour la maquette informatique	145
	Bibliographie	147

Liste des figures

1.1	Pièces multimatériaux dans le domaine aérospace	2
1.2	Pièces multimatériaux dans le domaine biomédical	3
1.3	Techniques de fabrication dites conventionnelles	4
1.4	Évolution des techniques de fabrication additive	6
1.5	Procédé de fabrication additive par projection de poudre	7
1.6	Applications des procédés de fabrication additive [Wohlers2012]	8
1.7	Évolution de la fabrication additive et de la fabrication directe	9
1.8	Comparaison des méthodes de fabrication	11
1.9	Pièces multimatériaux réalisées à l'aide de procédés de fabrication additive	12
1.10	Chaîne numérique en fabrication additive	14
2.1	Description par voxels	19
2.2	Description par éléments finis	19
2.3	Description par entités de contrôle	21
2.4	Description par points de contrôle	21
2.5	Description par assemblage	22
2.6	Comparaison des modèles mathématiques de description	23
2.7	Détermination d'une stratégie de fabrication [Xu2005]	24
2.8	Microstructure le long d'un gradient de matériaux [Collins2003]	28
2.9	Dureté le long d'un gradient de matériaux [Banerjee2003]	29
2.10	Phénomènes physiques mis en jeu pendant la fabrication	31
2.11	Dimensions d'un cordon en fonction des paramètres du procédé [El Cheikh2012]	32
2.12	Asservissement du système de distribution de la poudre [Tang2007]	33
2.13	Volant d'inertie [Morvan2001]	35
2.14	Organigramme pour la génération du fichier d'instructions [Morvan2001]	36
2.15	Canal sous pression [Shin2003]	37
2.16	Modèle de description d'une pièce multimatériau [Shin2003]	37
2.17	Méthode de discrétisation de la répartition des matériaux [Shin2003]	38

2.18	Optimisation de la géométrie et de la répartition des matériaux [Xia2008] . . .	39
2.19	Chaîne numérique : état de l'art	40
2.20	Chaîne numérique : positionnement de nos travaux de recherche	41
3.1	Chaîne numérique : du concept à la pièce	44
3.2	Objectif de l'étape de description de la pièce	44
3.3	Description d'une pièce multimatériau	45
3.4	Objectifs de l'étape de détermination d'une stratégie de fabrication	46
3.5	Description d'une trajectoire	47
3.6	Description d'une trajectoire avec information sur le matériau	47
3.7	Objectif de l'étape de programmation commande numérique	48
3.8	Discretisation de la fonction matériau en fonction de la trajectoire	50
3.9	Évolution de la fonction matériau en fonction de la trajectoire	51
3.10	Fonction matériau en fonction de l'orientation de tranchage	52
3.11	Chaîne numérique : boucle d'optimisation de la stratégie de fabrication	53
3.12	Objectifs de l'étape de génération des instructions de fabrication	53
3.13	Modélisation de la fonction matériau dans la pièce fabriquée	54
3.14	Fonctionnement du procédé : débits de poudres	55
3.15	Procédure expérimentale pour la modélisation du procédé	56
3.16	Comportement dynamique du système : fonctions de transfert	57
3.17	Description de la pièce et de la trajectoire	59
3.18	Simulation de la fabrication	60
3.19	Analyse de la géométrie de la pièce fabriquée	60
3.20	Coupe de la pièce fabriquée	61
3.21	Analyse de la composition de la pièce fabriquée	61
3.22	Description de la pièce et de la trajectoire	63
3.23	Simulation de la fabrication	63
3.24	Simulation de la fabrication avec compensation du retard	64
3.25	Représentation de l'asservissement prédictif du système	65
3.26	Simulation de la fabrication avec optimisation des débits	66
3.27	Simulation de la fabrication avec optimisation des débits	67
3.28	Influence des paramètres des correcteurs sur l'erreur	67
3.29	Matériau simulé en fonction de la trajectoire	70
3.30	Indice de performance en fonction de la trajectoire	71
3.31	Données statistiques sur l'indice de performance	71
3.32	Indice de performance en fonction de l'optimisation des débits	72
3.33	Description de la répartition des matériaux et des trajectoires	73
3.34	Simulation de la fabrication avec la première stratégie	74
3.35	Simulation de la fabrication avec la seconde stratégie	75
3.36	Indice de performance en fonction de la trajectoire	76
3.37	Analyse de la géométrie de la pièce fabriquée	76
3.38	Analyse de la composition de la pièce fabriquée avec la première stratégie . . .	77
3.39	Analyse de la composition de la pièce fabriquée avec la seconde stratégie . . .	78

3.40	Indice de performance sans optimisation des débits	79
3.41	Méthodologie de détermination d'une stratégie de fabrication	80
4.1	Classification des stratégies de tranchage	84
4.2	Stratégies de tranchage	85
4.3	Classification des stratégies de trajectoire de remplissage	85
4.4	Stratégies de trajectoire	86
4.5	Principe de la génération de trajectoires par sélection de stratégie	89
4.6	Répartition des matériaux avec un gradient parallèle	90
4.7	Classification des répartitions des matériaux	91
4.8	Sélection des stratégies de trajectoire	91
4.9	Points de passage pour la génération automatique de trajectoires	92
4.10	Ordonnancement des points de passage	93
4.11	Organigramme pour l'ordonnancement des points de passage	94
4.12	Démarrage d'une nouvelle suite de points	95
4.13	Modification de l'ordonnancement pour supprimer les points isolés	96
4.14	Génération des trajectoires à partir des points ordonnancés	97
4.15	Description de la trajectoire générée	98
4.16	Simulation de la fabrication avec la trajectoire générée	99
4.17	Indice de performance avec la trajectoire générée	100
4.18	Analyse de la géométrie de la pièce fabriquée	100
4.19	Analyse de la composition de la pièce fabriquée	101
4.20	Données statistiques sur l'indice de performance	102
4.21	Description de la répartition des matériaux	103
4.22	Description de la trajectoire générée automatiquement	104
4.23	Simulation de la fabrication	104
4.24	Indices de performance avec la trajectoire générée	105
4.25	Description de la répartition des matériaux	106
4.26	Description des trajectoires	106
4.27	Fonction matériau souhaitée et simulée	107
4.28	Indice de performance	107
4.29	Données statistiques sur l'indice de performance	108
4.30	Description de la répartition des matériaux	109
4.31	Description des trajectoires	109
4.32	Fonction matériau souhaitée et simulée	110
4.33	Indice de performance	110
4.34	Données statistiques sur l'indice de performance	110
4.35	Description de la répartition des matériaux	111
4.36	Description des trajectoires	111
4.37	Indice de performance avec la trajectoire générée	112
4.38	Description de la trajectoire hybride	112
4.39	Indice de performance avec la trajectoire générée	113
4.40	Données statistiques sur l'indice de performance	113

4.41	Méthode de génération de trajectoires par sélection de stratégies	115
4.42	Méthode de génération automatique de trajectoires	116
5.1	Interface pour la fabrication de pièces multimatériaux	120
5.2	Interface pour la description des pièces multimatériaux	121
5.3	Description d'une pièce	122
5.4	Interface pour le choix des paramètres de génération de la trajectoire	124
5.5	Interface pour l'analyse des résultats de simulation	126
5.6	Description de la répartition des matériaux et de la trajectoire	127
5.7	Simulation de la fabrication avec la trajectoire générée	127
5.8	Indice de performance avec la trajectoire générée	128
A.1	Procédé de fabrication additive CLAD®	139
B.1	Configurations de l'éprouvette de traction	141
B.2	Courbes de traction des éprouvettes multimatériaux	142
B.3	Courbes de traction des éprouvettes en acier inoxydable	143
B.4	Courbes de traction des éprouvettes en acier inoxydable	144
C.1	Interface pour la description des pièces multimatériaux	145
C.2	Interface pour le choix des paramètres de génération de la trajectoire	146

Glossaire

CAO	Conception Assistée par Ordinateur. La CAO regroupe les logiciels et les techniques de modélisation géométrique qui permettent de représenter un produit en cours de conception
CN	Commande Numérique. Ensemble des matériels et logiciels ayant pour fonction de donner les instructions aux organes d'une machine-outil.
Dépôt de fil	Procédé de fabrication additive, l'apport de matière est réalisé par fusion d'un fil
FAO	Fabrication Assistée par Ordinateur. La FAO regroupe les logiciels ayant pour objectif de décrire et piloter d'une machine-outil à commande numérique
FGM	Functionally Graded Materials. Les FGM sont des structures multimatériaux composées d'au moins deux matériaux primaires distribués continuellement à l'intérieur de la structure
Fabrication additive	Ensemble des procédés permettant de fabriquer par ajout de matière - point par point ou couche par couche - un objet physique à partir d'un objet numérique
Fabrication directe	Fabrication additive de pièces répondant aux caractéristiques fonctionnelles attendues du produit final
Fusion laser	Procédé de fabrication additive utilisant une technologie lit de poudre et dans lequel la fusion de la poudre est réalisée par un laser
Fusion par faisceau d'électrons	Procédé de fabrication additive utilisant une technologie lit de poudre et dans lequel la fusion de la poudre est réalisée par un faisceau d'électrons

MEB	Microscope électronique à balayage. Technique de microscopie électronique capable de produire des images en haute résolution de la surface d'un échantillon en utilisant le principe des interactions électrons-matière.
MMC	Metal Matrix Composite. Les MMC sont des structures composites réalisées en dispersant un matériau de renforcement dans une matrice métallique
Projection de poudre	Procédé de fabrication additive, l'apport de matière est réalisé par fusion de poudre
Prototypage rapide	Fabrication additive de pièces prototypes ou de pièces réalisées dans le but de faire des essais
Stratégie de fabrication	Définition des choix de fabrication : la stratégie de fabrication regroupe, entre autres, la stratégie de trajectoire et la stratégie de tranchage.
Stratégie de trajectoire	Définition du type, de la direction et de l'enchaînement des trajectoires.
Stratégie de tranchage	Définition du type et de l'orientation des couches nécessaires pour une fabrication couche par couche.

Principales notations

$\mathcal{D}_P$	Description d'une pièce : domaine de l'espace occupé par la pièce
$M^*(x, y, z)$	Description d'une pièce : fonction matériau souhaitée
$M(x, y, z)$	Description d'une pièce : fonction matériau simulée
$\mathcal{C}_T(\lambda)$	Description d'une trajectoire : courbe paramétrique
$x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$	Description d'une trajectoire : coordonnées
$m^*(\lambda)$	Description d'une trajectoire : fonction matériau souhaitée
$m(\lambda)$	Description d'une trajectoire : fonction matériau simulée
$\phi_A^*(t), \phi_B^*(t)$	Modélisation du procédé : commandes des débits de poudre
$\phi_A^{**}(t), \phi_B^{**}(t)$	Modélisation du procédé : commandes optimisées des débits de poudre
$\phi_A(t), \phi_B(t)$	Modélisation du procédé : sorties simulées des débits de poudre
$\phi_{\max}$	Modélisation du procédé : débit de poudre nécessaire à la formation du cordon
τ_a, τ_d	Modélisation du système de distribution des poudres : constantes de temps
τ_r	Modélisation du système de distribution des poudres : retard
K_c, τ_c	Optimisation du procédé : paramètres du correcteur
$I_t(x, y, z)$	Indice de performance : erreur due aux trajectoires
$I_p(x, y, z)$	Indice de performance : erreur due au fonctionnement du procédé
$I_m(x, y, z)$	Indice de performance : erreur globale
$\vec{\nabla} M^*(x, y, z)$	Classification de la répartition des matériaux : vecteur gradient de la fonction matériau

$\mathcal{S}_E$	Classification de la répartition des matériaux : surfaces d'équicomposition
$\{\mathcal{P}_i\}$	Génération automatique de trajectoire : points de passage
$\{\mathcal{O}_i\}$	Génération automatique de trajectoire : ordre de passage

Contexte général de l'étude

Ce premier chapitre présente le **cadre général de nos travaux**. Il permet au lecteur d'avoir une vision du contexte dans lequel s'inscrivent les travaux de thèse.

Dans une première partie, nous définirons ce que sont les **pièces multimatériaux à gradient fonctionnel**. De plus, nous verrons quels sont leurs intérêts et comment elles sont fabriquées avec des techniques dites conventionnelles.

Les procédés de **fabrication additive** permettent de fabriquer avantageusement des pièces multimatériaux. Nous présenterons donc, dans une deuxième partie, ces procédés et leurs applications.

Dans une troisième partie, nous focaliserons notre attention sur la **réalisation des pièces multimatériaux par les procédés de fabrication additive**. Nous étudierons les apports possibles de ces procédés par rapport aux techniques dites conventionnelles. Nous analyserons également un panel des pièces fabriquées par ces procédés jusqu'à aujourd'hui.

Enfin, dans une quatrième partie, nous annoncerons le **plan retenu pour ce manuscrit**.

1.1 Pièces multimatériaux à gradient fonctionnel

1.1.1 Principe

Le concept de pièce multimatériau à gradient fonctionnel (Functionally Graded Materials - FGM) fut proposé à la fin des années 1980 pour développer des pièces capables de résister aux sollicitations thermiques et mécaniques dans les systèmes de propulsion et le fuselage des navettes spatiales [Niino1988]. Une pièce peut être qualifiée de multimatériau lorsqu'elle est composée d'au moins deux matériaux ou alliages primaires qui sont distribués - continument ou discontinument - à l'intérieur de la structure. Lorsque la distribution est continue, on parle alors de pièce multimatériau à gradient continu [Kawasaki1997]. Dans ce cas, la composition et la microstructure du matériau changent graduellement à l'intérieur de la pièce. Cette distribution des matériaux permet de modifier les propriétés à l'intérieur même de la pièce. Des gradients de propriétés peuvent ainsi être réalisés au niveau mécanique, physique, chimique, etc.

1.1.2 Applications

Il existe de nombreux domaines d'application pour les pièces FGM [Mahamood2012]. Les deux principaux sont les domaines aérospatial et biomédical. Dans le domaine aérospatial, où le concept de FGM fit son apparition, les pièces multimatériaux sont en majorité développées dans le but de résister à la fois à des sollicitations thermiques et mécaniques. Le centre de recherche de la NASA propose, par exemple, de développer des pièces FGM pour des navettes spatiales [Domack2005]. Ces pièces sont des supports de fixation permettant de relier le réservoir au fuselage (Figure 1.1(a)). Des analyses thermiques montrent que pendant les phases de vol, la température du fuselage peut atteindre les 1000 °C tandis que celle du réservoir est proche des 400 °C. La conception de ces supports de fixation doit leur permettre de supporter ces contraintes thermiques en limitant les efforts de cisaillement et de flexion qui impactent leur durée de vie. Ici, l'utilisation d'un gradient de matériau - d'un alliage base titane à un alliage base nickel-chrome - peut permettre de réduire les concentrations de contraintes et d'augmenter la durée de vie par rapport à une pièce en alliage base nickel-chrome. Des problématiques similaires existent sur d'autres pièces aérospatiales telles que les pales de turbines [Qian2003a]. En effet, elles aussi

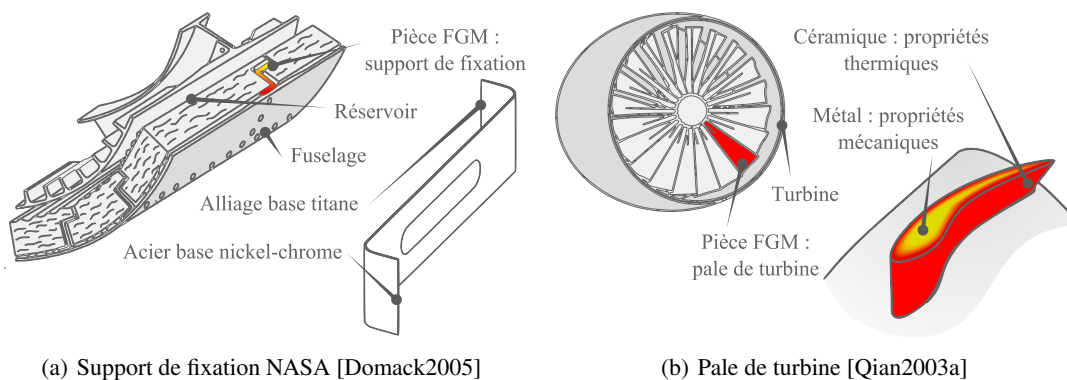


Figure 1.1 – Pièces multimatériaux dans le domaine aérospatial

sont soumises à des sévères sollicitations thermiques et mécaniques qui peuvent entraîner des déformations de la structure et des fissures. Dans ce cas, l'utilisation d'un gradient de matériau peut permettre de résoudre ces problèmes (Figure 1.1(b)).

Dans le domaine biomédical, les raisons pour utiliser un gradient sont plus variées [Pompe2003, Watari2004, Balla2010a, España2010]. Il est possible, par exemple, d'utiliser un gradient de matériaux pour combiner les propriétés mécaniques et la résistance à l'usure sur une prothèse de hanche [Bandyopadhyay2009]. Un acier inoxydable peut alors être utilisé pour la tige tandis qu'un alliage base chrome-cobalt peut être utilisé pour la tête (Figure 1.2(a)). L'acier inoxydable est utilisé pour ses caractéristiques mécaniques et l'alliage base chrome-cobalt pour sa meilleure résistance au frottement. Des applications sont aussi envisageables avec une évolution des propriétés mécaniques et de biocompatibilité, sur des implants dentaires par exemple (Figure 1.2(b)) [Watari1997].

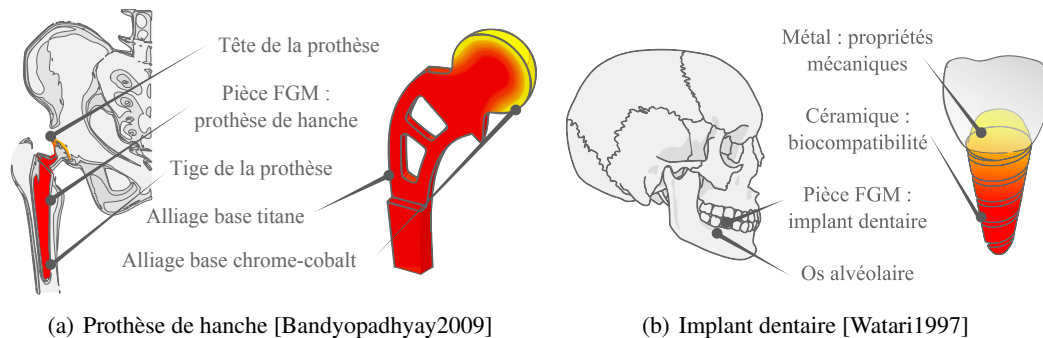


Figure 1.2 – Pièces multimatériaux dans le domaine biomédical

On trouve également des applications dans le domaine de l'électronique [Müller2003], de l'énergie nucléaire [Yadroitsev2007], de la défense [Lu2011] ou de la production d'outillage [Jiang2005]. Cette liste n'est évidemment pas exhaustive et on imagine qu'au fur et à mesure des avancées scientifiques l'appropriation de ce type de structure par les concepteurs permettra encore de l'élargir. Effectivement, les possibilités de combinaison sont en théorie quasiment illimitées et chaque combinaison forme une structure avec des propriétés spécifiques. On peut donc penser que les structures multimatériaux vont transformer en profondeur le monde de la conception en augmentant considérablement les possibilités dans l'étape stratégique du choix des matériaux.

1.1.3 Fabrication des pièces multimatériaux

Depuis plus de vingt ans, une partie importante de la recherche concernant les structures multimatériaux a été consacrée à leur fabrication. Une grande variété de méthodes de production a été mise au point ou adaptée en vue de produire ce type de pièces [Kieback2003, Erasenthiran2006].

Plusieurs techniques dites conventionnelles sont utilisées pour fabriquer des pièces multimatériaux. Le procédé par diffusion fut l'un des premiers à être utilisé. Avec cette technique, un composant est diffusé à haute température sur une pièce monomatériau fabriquée au préalable [Meng2012]. Comme pour le procédé par diffusion, les procédés de fonderie sont basés sur le transfert de composants (Figure 1.3(a)). Dans ce cas, le transfert est réalisé en phase liquide, par gravité ou par force centrifuge [Rajan2010]. Avec ces deux types de procédés, les possibilités de répartition des matériaux sont très restreintes et le contrôle de la répartition est souvent compliqué ou absent.

Plusieurs techniques sont, quant à elles, basées sur la déposition de matière. Ils permettent d'avoir un ou plusieurs revêtements sur une pièce existante (Figure 1.3(b)). Ce revêtement a une épaisseur de l'ordre du micromètre en ce qui concerne le dépôt en phase vapeur [Groves1997], tandis qu'elle est de l'ordre du millimètre pour les procédés d'électrodéposition [Put2003] et de projection thermique [Xinhua1997]. Avec ces techniques, les dimensions du gradient sont donc très limitées. De plus, le choix de la distribution des matériaux est souvent restreint. En effet, les surfaces d'équi-composition sont, dans la plupart des cas, parallèles à la surface extérieure de la pièce.

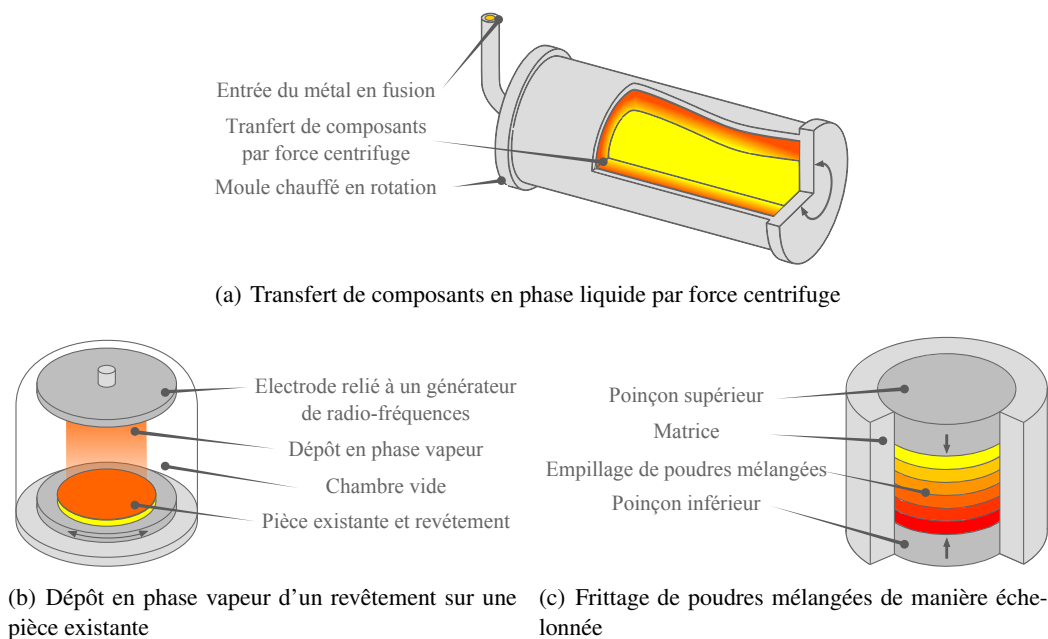


Figure 1.3 – Techniques de fabrication dites conventionnelles

Une dernière technique conventionnelle est utilisée pour la fabrication de pièces multimatériaux, il s'agit de frittage de poudre [Jin2005]. Pour cela, les poudres sont mélangées puis empilées de manière échelonnée ou continue en fonction de la répartition des matériaux souhaitée (Figure 1.3(c)). La poudre est ensuite consolidée par frittage pour obtenir la pièce multimatériau. Avec cette technique, la variation de la composition ne peut se faire que dans une seule direction.

Des pièces multimatériaux peuvent donc être fabriquées avec ces différentes techniques. On remarque tout de même que les possibilités sont très restreintes au niveau de la distribution des matériaux. Tout d'abord, les dimensions du gradient sont souvent limitées au micromètre ou au millimètre. Ces dimensions sont suffisantes lorsqu'il s'agit, par exemple, de réaliser des revêtements mais sont insuffisantes pour la majorité des applications. Ensuite, les types de répartitions des matériaux qu'il est possible de fabriquer sont peu nombreux. Finalement, le contrôle du procédé pour obtenir la distribution des matériaux souhaitée est souvent compliqué, voire impossible. C'est pour ces raisons que l'utilisation des procédés innovants tels que les procédés de fabrication additive semble indispensable pour la réalisation de pièces complexes [Gibson2009c]. Nous verrons, par la suite, ce que peuvent apporter ces procédés pour la fabrication de pièces multimatériaux. Nous constaterons, d'ailleurs, qu'ils n'offrent pas tous les mêmes possibilités et que certains ont des limitations similaires aux techniques conventionnelles. Nous étudierons, en particulier, les procédés permettant la fabrication de pièces fonctionnelles avec des matériaux métalliques et céramiques puisque une grande majorité des applications utilise ces matériaux.

1.2 Fabrication additive

1.2.1 Principe

La fabrication additive regroupe l'ensemble des procédés permettant de fabriquer, point par point ou couche par couche, par ajout de matière, un objet physique à partir d'un objet numérique. D'abord réservées au prototypage, les technologies de fabrication additive permettent aujourd'hui de réaliser des pièces répondant aux caractéristiques fonctionnelles attendues du produit final [Hopkinson2006b, Gibson2009b].

1.2.2 Évolution des techniques de fabrication additive

Les origines de la fabrication additive remontent à la fin du XIX^{ème} siècle au cours duquel Blather proposa une méthode de fabrication couche par couche pour réaliser des cartes topographiques [Blather1892]. La méthode consiste à imprimer des courbes topographiques sur une série de plaques de cire puis de découper les plaques suivant ces courbes. Après empilement

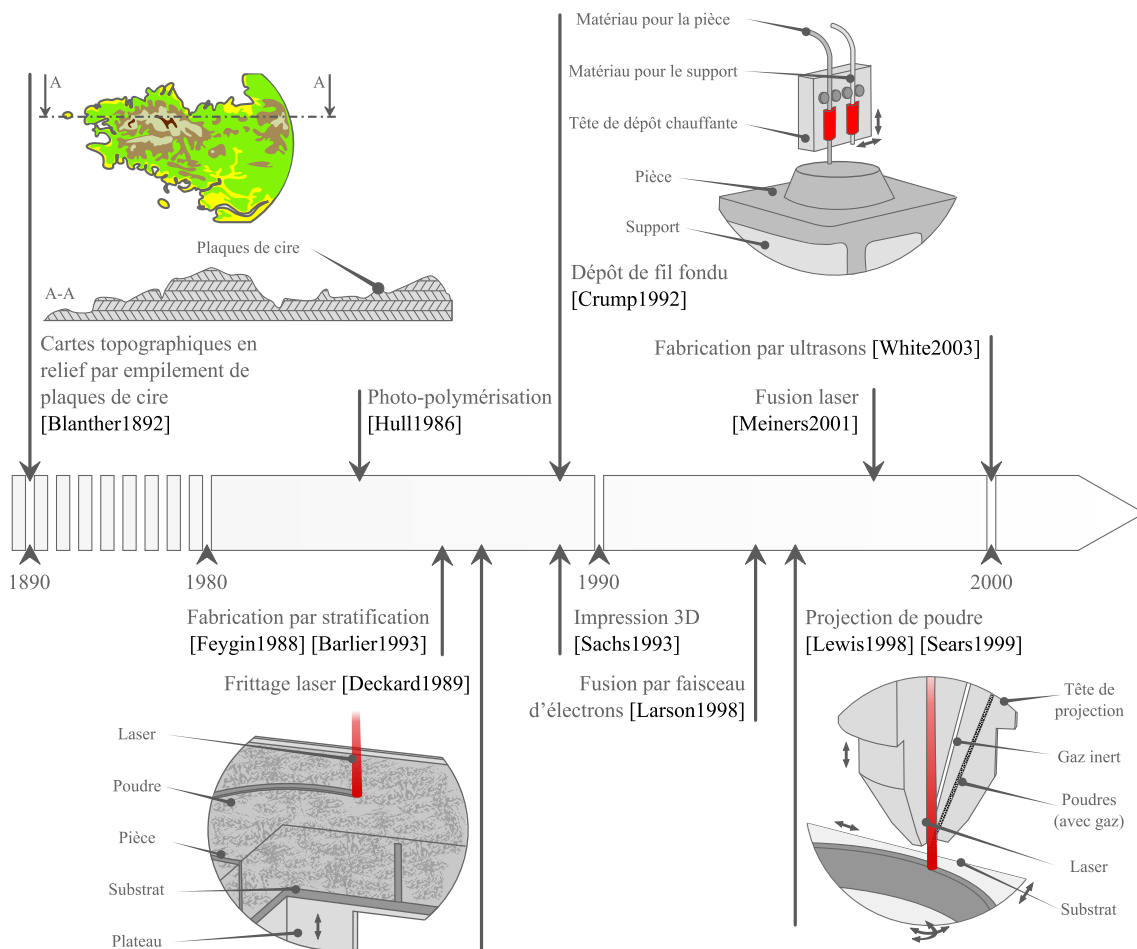


Figure 1.4 – Évolution des techniques de fabrication additive

et lissage des plaques de cire, on obtient une carte en relief. On peut noter que les procédés modernes par stratification s'inspirent directement de cette méthode de fabrication.

Les procédés de fabrication additive actuels font leur apparition au milieu des années 1980 avec l'arrivée de la photo-polymérisation (Figure 1.4) [Bourell2009a]. Avec ce procédé, un objet en trois dimensions est formé couche par couche par solidification d'une résine liquide photosensible lors d'une exposition aux rayons ultraviolets [Pham1998, Bártolo2011]. Depuis, de nombreux procédés ont été développés, offrant au fur et à mesure la possibilité d'utiliser de nouveaux matériaux : polymères, métalliques et céramiques [Kochan1999, Dimitrov2006, Yan2009, Gibson2009a]. Le premier procédé permettant la fabrication de pièces métalliques est le procédé de frittage laser développé à la fin des années 1980. Néanmoins, ce procédé ne permet pas d'obtenir de pièces métalliques denses. En effet, cette technologie utilise un mélange de deux poudres dont l'une a un point de fusion beaucoup plus bas que l'autre. Lors de la fabrication, sous l'effet d'un laser, le premier composant, celui dont le point de fusion est le plus faible, fond et lie les grains de poudre du second composant. On obtient donc une pièce poreuse avec des caractéristiques mécaniques moindres [Chua1998]. Les premières pièces métalliques denses ont été produites au milieu des années 1990 avec le procédé de fusion par faisceau d'électrons [Hopkinson2006a].

Actuellement, trois technologies sont capables de produire des pièces métalliques : la technologie par lit de poudre qui regroupe les procédés par fusion laser et par faisceau d'électrons, la technologie par dépôt de fil et la technologie par projection de poudre [Ruan2006, Karunakaran2007]. Dans le premier cas, une fine couche de poudre est déposée sur un plateau, la source d'énergie - laser ou faisceau d'électrons - se déplace et vient fondre la poudre métallique. Lorsque la première couche est terminée, le plateau descend d'un incrément de hauteur et une nouvelle couche de poudre est déposée. La pièce est fabriquée au fur et à mesure par couches successives. Dans les deux autres cas, la pièce est fabriquée par création successive de cordons de matière. Concernant la technologie par dépôt de fil, le cordon est issu de la fusion

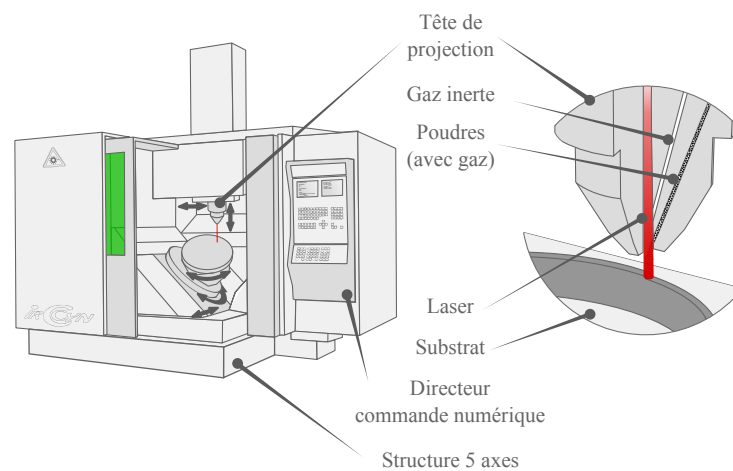


Figure 1.5 – Procédé de fabrication additive par projection de poudre

d'un fil métallique [Choi2001]. Pour ce qui est de la technologie par projection de poudre, le cordon est formé suite à la fusion d'une poudre métallique projetée dans le faisceau d'un laser (Figure 1.5) [Costa2009]. Ces deux dernières technologies, qui font partie des plus récentes, ouvrent de nouvelles perspectives pour la fabrication de pièces métalliques puisque le système d'apport de matière peut être associé à une cinématique cinq ou six axes. Cela permet donc de fabriquer des pièces complexes sans utilisation de support. Concernant la fabrication des pièces céramiques, on retrouve globalement les mêmes technologies que pour la fabrication additive [Jafari2000, Shishkovsky2007, Balla2008a, Hagedorn2010]. On remarque que la réalisation de pièces céramiques est encore plus complexe que celle des pièces métalliques. En effet, en raison de leur température de fusion élevée, de leur plasticité quasiment inexistante et leur faible résistance aux chocs thermiques, les matériaux céramiques sont plus compliqués à travailler.

1.2.3 Applications

La fabrication additive est utilisée pour trois catégories d'applications : les pièces prototypes, les outillages et les pièces fonctionnelles (Figure 1.6). Le prototypage fut une des première applications pour les procédés de fabrication additive. Ils demeurent d'ailleurs des outils très performants pour le développement et la présentation de produits. En ce qui concerne la production d'outillages, les avantages de ces techniques se présentent à différents niveaux : dans certains cas ils permettent de fabriquer plus rapidement, dans d'autres ils permettent d'améliorer les performances des outils - en particulier à l'aide de canaux conformes - ou d'augmenter la complexité des pièces fabriquées [Pessard2007, Kerbrat2010]. L'utilisation de ces procédés pour la fabrication directe de pièces, c'est à dire la fabrication additive de pièces répondant aux caractéristiques fonctionnelles attendues du produit final, est assez récente [Wohlers2002]. Dans ce cas d'application, ces techniques sont particulièrement adaptées à la fabrication de pièces unitaires ou de petites séries possédant des formes complexes [Hague2006] et présentent un fort intérêt dans un processus de personnalisation de masse [Campbell2006, Kerbrat2008, Huang2012, Paterson2012].

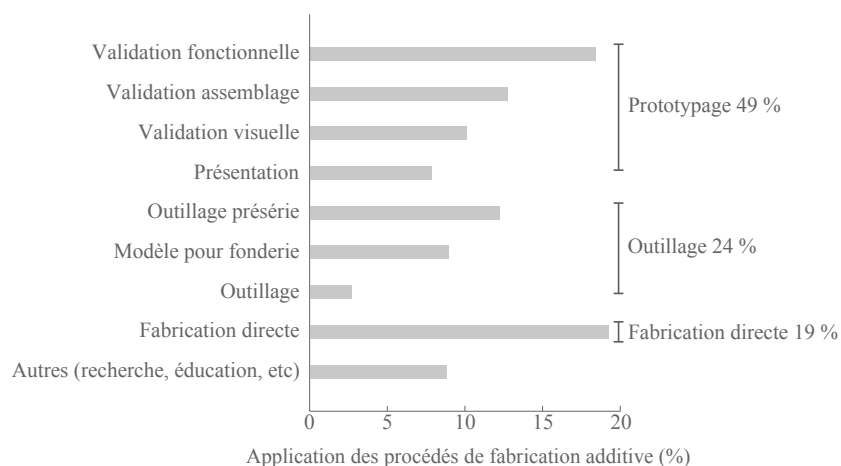


Figure 1.6 – Applications des procédés de fabrication additive [Wohlers2012]

Les applications industrielles sont de plus en plus nombreuses et impliquent de nombreux domaines [Wohlers2012]. L'implantation industrielle se fait progressivement depuis une vingtaine d'années. En ce qui concerne la fabrication directe, les applications concernent particulièrement les domaines de l'aérospatial [Sexton2002, Brandl2010], du biomédical [Williams2005, Gebhardt2010] et du sport automobile [Kochan2003, Cooper2012]. Les intérêts que trouvent les industriels à ces technologies sont divers. Les entreprises aérospatiales sont intéressées par ces technologies en raison de leur capacité à réaliser des pièces très complexes. Les possibilités de supprimer des assemblages et de créer des structures internes (canaux de refroidissement, structures en nid d'abeille, etc) sont utilisées pour réaliser des structures légères. Les industriels du domaine biomédical, quant à eux, utilisent ces procédés pour personnaliser leurs produits et ainsi répondre parfaitement aux besoins des patients.

On constate donc que la fabrication directe est dans une dynamique de croissance intéressante. D'une part la fabrication additive est en plein essor. Ce phénomène est illustré par une implantation de plus en plus importante des machines de fabrication additive dans le monde industriel (Figure 1.7(a)). D'autre part, les procédés de fabrication additive ont de plus en plus tendance à être utilisés pour produire des pièces fonctionnelles (Figure 1.7(b)). Ce type d'application ne représentait qu'une partie infime du marché il y a une dizaine d'années alors qu'elle en représente aujourd'hui près d'un cinquième [Wohlers2002, Wohlers2012].

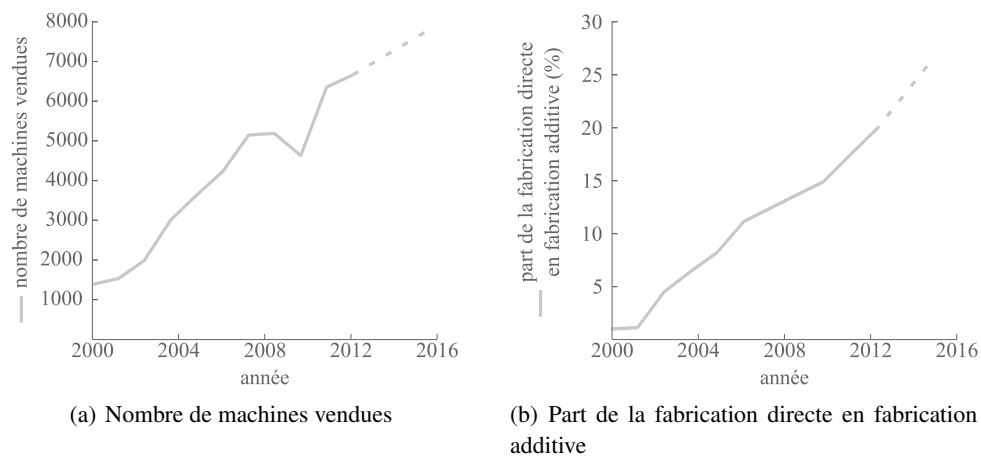


Figure 1.7 – Évolution de la fabrication additive et de la fabrication directe

Cette dynamique s'explique par les avancées considérables concernant ces procédés lors de ces dernières années [Levy2010]. Même s'il existe encore des limitations, on peut considérer qu'une grande partie de ces procédés arrive à maturité [Campbell2012]. Grâce à ces avancées de nouvelles possibilités d'application voient le jour [Scott2012]. Parmi elles, on trouve de nouvelles structures dont les structures multimatériaux. De nombreux acteurs de la fabrication additive considèrent d'ailleurs qu'une des prochaines grandes évolutions réside dans la capacité à réaliser des pièces multimatériaux [Dutta2001, Levy2003, Bourell2009b, Scott2012].

1.3 Fabrication additive des pièces multimatériaux

1.3.1 Procédés pour les pièces multimatériaux

Bien que les procédés de fabrication additive présentent de nombreux avantages pour la réalisation de pièces monomatériaux complexes, la fabrication de pièces multimatériaux n'est pas envisageable avec tous les procédés et ils ne présentent pas tous les mêmes possibilités.

Une première différence concerne la palette des matériaux utilisables. On remarque, en effet, que les procédés par photo-polymérisation [Choi2011] et impression 3D [Wang2006] ne permettent d'utiliser que des matériaux polymères. Étant donné que la majorité des applications utilise les propriétés mécaniques, physiques ou chimiques des matériaux métalliques et céramiques, ces procédés ne seront pas employables dans le cas où ces matériaux sont utilisés. Il reste possible d'y avoir recours à des fins de prototypage avec l'utilisation de matériaux polymères de couleurs différentes ainsi que pour certaines pièces fonctionnelles [Espalin2012].

Une deuxième différence porte sur la complexité de la distribution des matériaux. Les possibilités peuvent être limitées par le principe même du procédé. Les procédés par stratifications [Zhang2001] et par ultrasons [Obielodan2010] permettent la fabrication d'une pièce en des couches de matière les unes sur les autres. La distribution des matériaux ne peut être faite que dans une seule direction. De même, pour le procédé de frittage laser où chaque couche étalée ne peut comporter uniquement de la poudre avec une composition homogène [Jepson1997]. Concernant le procédé par dépôt de fil, la variation de la composition peut se faire dans plusieurs directions mais elle plus complexe à réaliser et forcément discontinue [Jafari2000].

Théoriquement, le procédé par projection de poudre semble le procédé le plus approprié pour la fabrication des pièces multimatériaux en utilisant des matériaux primaires métalliques et céramiques et permettant une distribution des matériaux continue dans les trois directions de l'espace. De plus, en principe, les possibilités sont quasiment illimitées tant au niveau de la complexité de la géométrie que de la complexité de la distribution des matériaux.

1.3.2 Apport de la fabrication additive

En passant en revue les différentes méthodes de fabrication des pièces multimatériaux, on constate que les méthodes dites conventionnelles permettent aujourd'hui de réaliser des pièces multimatériaux et des revêtements mais que les possibilités sont restreintes au niveau des dimensions du gradient et de la complexité de la répartition des matériaux. Les procédés de fabrication additive permettent, quant à eux, de fabriquer des pièces avec des géométries plus complexes et des dimensions de l'ordre de quelques centimètres à plusieurs dizaines de centimètres. Néanmoins, seulement quelques procédés permettent de fabriquer des pièces multimatériaux ayant une distribution des matériaux continue dans plusieurs directions de l'espace. Seul le procédé par projection de poudre offre cette possibilité pour les pièces métalliques (Figure 1.8). En théorie, ce procédé permet de fabriquer n'importe quelle pièce multimatériau.

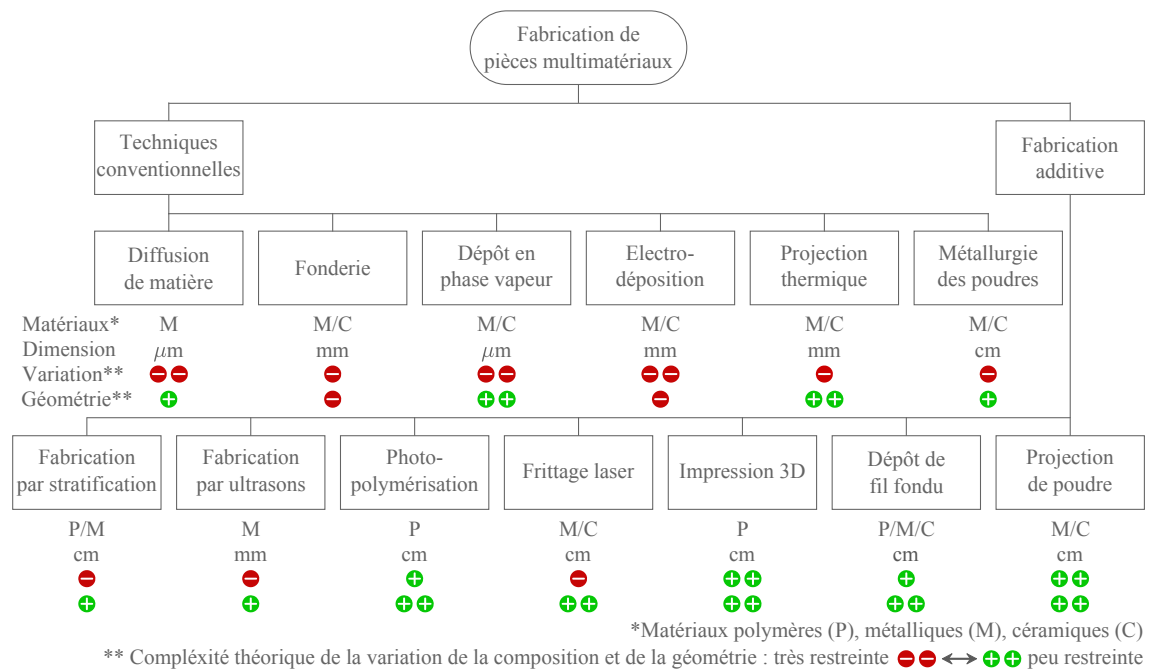


Figure 1.8 – Comparaison des méthodes de fabrication

1.3.3 La réalité des pièces multimatériaux en fabrication additive

Bien que le procédé de fabrication additive par projection de poudre semble avoir toutes les caractéristiques attendues pour la réalisation de pièces multimatériaux on constate en réalité qu'aucune pièce fonctionnelle n'a encore été fabriquée à ce jour. La première constatation est que le nombre de pièces réalisées est encore très faible. En effet, on peut estimer, à partir de la littérature, que le nombre de pièces multimatériaux fabriquées à l'aide de ces procédés est de l'ordre de quelques dizaines. La seconde constatation est que la complexité des structures réalisées, que ce soit en terme de géométrie ou de distribution des matériaux, est souvent très faible. Nous avons classé ces pièces suivant quatre catégories de complexité différentes (Figure 1.9).

La première catégorie contient des structures ayant une géométrie très simple, des dimensions inférieures au centimètre et n'étant composées que de deux matériaux (Figure 1.9(I)). Dans cette catégorie, la fabrication consiste à faire un dépôt d'un matériau primaire sur un substrat ou à faire un dépôt d'un matériau primaire sur une structure réalisée avec un autre matériau primaire. Ces pièces servent, pour la plupart, à étudier la composition et la microstructure à l'interface entre deux matériaux. La fabrication à proprement parler ne pose pas de problème puisqu'elle revient à fabriquer une ou deux structures monomatériaux.

La deuxième catégorie contient des structures ayant une géométrie simple, des dimensions inférieures au centimètre avec une variation de la composition fortement discrétisée dans une

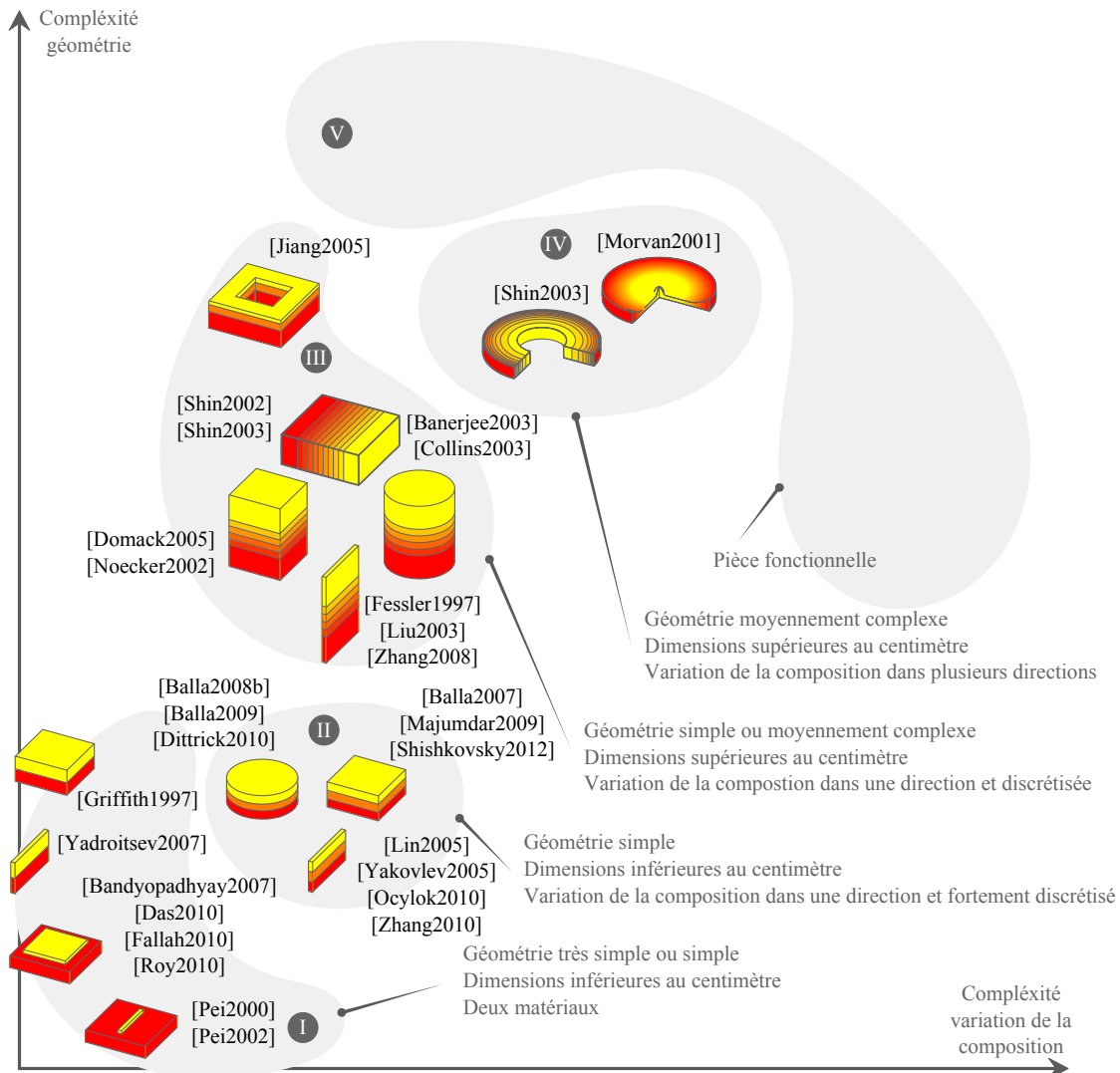


Figure 1.9 – Pièces multimatériaux réalisées à l'aide de procédés de fabrication additive par projection de poudre

direction (Figure 1.9(II)). Ces pièces sont, en fait, le fruit d'un assemblage de quelques couches de composition homogène. Comme précédemment, la pièce est fabriquée dans le but d'étudier ces caractéristiques matériaux et ces propriétés. La fabrication de ces pièces ne représente pas de problèmes majeurs. En effet, dans la plupart des cas, les poudres sont mélangées au préalable. La fabrication revient donc à faire plusieurs structures monomatériaux les unes sur les autres.

La troisième catégorie rassemble des structures assez semblables à celles de la catégorie précédente mais la variation de la composition est beaucoup moins discrétisée (Figure 1.9(III)). Cela signifie que la variation de composition n'est toujours pas continue mais que le nombre de régions monomatériaux intermédiaires est plus important. Comme pour la catégorie précédente, la variation de la composition ne se fait que dans une direction et la géométrie est assez

simple. Pour ce type de pièces, les problématiques concernant la démarche de fabrication deviennent légèrement plus importantes. En effet, comme le nombre de régions monomatériaux est plus important il est plus compliqué de préparer au préalable des mélanges de poudres. Malgré cela, on voit tout de même qu'étant donné la complexité de la géométrie et de la répartition des matériaux, il n'est pas nécessaire de mettre en place une chaîne numérique complète pour fabriquer la pièce. On constate, en effet, qu'il est encore envisageable d'avoir une commande du procédé sans outils numériques dédiés. Comme pour les deux catégories précédentes, la fabrication de ces pièces est majoritairement réalisée dans le cadre d'étude de la microstructure et des propriétés du matériau. On peut noter que certains travaux portent sur le contrôle du procédé.

La quatrième catégorie ne contient que deux pièces multimatériaux (Figure 1.9(IV)). Ces deux pièces se différencient des autres surtout par le fait que la variation de la composition se fait dans plusieurs directions. On peut également remarquer qu'elles ont une géométrie un peu plus complexe et que leurs dimensions sont un peu supérieures. Le fait de fabriquer une pièce multimatériaux avec une composition variant dans plusieurs directions complexifie tout de suite la fabrication de ces pièces. On remarque d'ailleurs, que contrairement aux autres pièces, celles-ci ne sont pas fabriquées dans le cadre d'une étude matériau ou produit mais dans le cadre d'un développement d'une méthode de fabrication. Ce sont donc les seules pièces dont la fabrication a demandée la mise en place d'une méthodologie reprenant en partie des éléments de la chaîne numérique. Nous étudierons plus en détails les éléments mis en place pour la fabrication de ces deux pièces dans le chapitre concernant l'état de l'art. On peut d'ores et déjà dire que ces études, même si elles proposent des méthodes de fabrication, ne permettent pas encore de fabriquer des pièces fonctionnelles.

Une catégorie supplémentaire ne contient aucune pièce (Figure 1.9(V)). Cette catégorie est celle des pièces fonctionnelles. La particularité de ces pièces est d'avoir une géométrie et/ou une répartition des matériaux complexes. Pour les fabriquer, il est nécessaire de proposer une méthodologie de fabrication permettant de s'adapter aux spécificités de chaque pièce. L'objectif est donc, à terme, de proposer des outils permettant de produire ces pièces.

1.4 Synthèse et plan du manuscrit

Les pièces multimatériaux à gradient fonctionnel permettent d'augmenter les possibilités de conception en associant les caractéristiques de plusieurs matériaux sans augmenter le nombre de pièces ou le volume de matière. Ces nouvelles structures sont particulièrement attractives pour de nombreux domaines. Malgré le fort engouement pour ce type de structures, on constate une limitation due à la difficulté de fabriquer ces pièces. On peut considérer que c'est à cause, en partie, des limites imposées par les techniques conventionnelles.

Pour développer ces nouvelles structures, l'utilisation des procédés de fabrication additive semble indispensable. On constate, en effet, qu'il est aujourd'hui possible de produire des pièces fonctionnelles avec des géométries complexes monomatériaux. De plus, concernant de nombreuses applications potentielles, ces procédés semblent représenter la solution idéale puisqu'ils ne présentent pas de limite au niveau de la taille des composants et permettent une personnalisation répondant à des attentes individuelles.

Un procédé de fabrication additive semble encore mieux positionné que les autres pour ce type de réalisation. Il s'agit du procédé par projection de poudre qui permet théoriquement de fabriquer des pièces multimatériaux en utilisant des matériaux primaires métalliques et céramiques avec une distribution des matériaux continue dans les trois directions de l'espace.

Néanmoins on constate que le nombre de pièces fabriquées est faible et que ces pièces présentent une géométrie et une répartition des matériaux peu complexe pour la plupart. Pour passer à la fabrication de pièces fonctionnelles, il est indispensable de proposer une méthodologie de fabrication complète et robuste [Mahamood2012].

Ces travaux de thèse ont pour objectif de proposer une démarche complète permettant de passer de l'objet imaginé par le concepteur à la fabrication de la pièce multimatériau. Pour cela, nous proposons une méthodologie reprenant les étapes de la chaîne numérique (Figure 1.10).

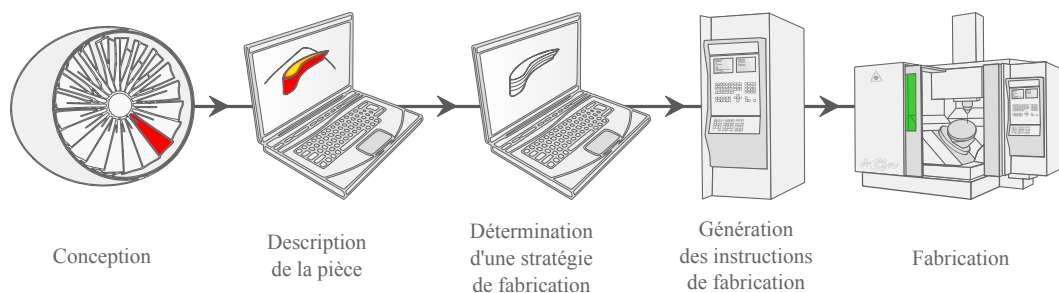


Figure 1.10 – Chaîne numérique en fabrication additive

Le deuxième chapitre sera consacré à la présentation de l'**état de l'art** en matière de fabrication additive de pièces multimatériaux. Nous analyserons les travaux réalisés pour les différentes

étapes de la chaîne numérique. Ce chapitre permettra de mettre en avant la nécessité de proposer une chaîne numérique complète permettant la fabrication de pièces fonctionnelles avec une géométrie et une répartition des matériaux complexes. De plus, nous verrons que l'étape de détermination d'une stratégie de fabrication est une des plus importantes dans le processus de fabrication et qu'il est absolument nécessaire de prendre en compte l'aspect procédé lors de cette étape.

Le troisième chapitre sera dédié à la **modélisation du procédé**. Nous présenterons, tout d'abord, les étapes de la méthodologie de fabrication. Nous montrerons, alors, l'importance d'une modélisation du procédé permettant d'évaluer les trajectoires et de choisir une stratégie de fabrication adaptée. Nous verrons comment le modèle a été mis en place et en quoi il est utile dans le choix d'une stratégie de fabrication. De plus, une **optimisation du procédé**, basée sur cette modélisation, sera proposée pour permettre l'obtention de pièces répondant au cahier des charges, que ce soit en matière de géométrie ou de distribution des matériaux.

Dans le quatrième chapitre, nous développerons les travaux concernant la **génération de trajectoires**. Cette partie des travaux propose la génération de trajectoires en prenant en compte les spécificités du procédé. Une première méthode est basée sur la sélection de stratégies de trajectoire en fonction du type de répartition des matériaux dans la pièce. Une seconde méthode permet une génération automatique de la trajectoire en prenant en compte les travaux de modélisation et d'optimisation du procédé. Ce générateur permet d'obtenir un nouveau type de trajectoire parfaitement adapté aux pièces multimatériaux et spécifique à chaque pièce fabriquée.

Une formalisation de la méthodologie de fabrication sera présentée à travers le développement d'une **maquette informatique** dans le cinquième chapitre.

La **synthèse de ces travaux** et leurs **perspectives** seront exposées dans le sixième et dernier chapitre.

État de l'art et positionnement

Ce deuxième chapitre a pour objectif d'exposer l'**état de l'art et la problématique des travaux abordés dans le cadre de cette thèse**. Au cours du chapitre précédent, nous avons mis en avant l'importance de définir une méthodologie de fabrication complète pour permettre la réalisation de pièces multimatériaux fonctionnelles. Nous allons désormais analyser les outils proposés pour chaque étape de la démarche de fabrication.

Ainsi, nous focaliserons notre attention, dans une première partie, sur les études concernant l'étape de **description des pièces multimatériaux**.

Dans une deuxième partie, nous verrons quelles méthodes sont proposées pour la **détermination d'une stratégie de fabrication**. Les outils étudiés concerneront particulièrement les pièces multimatériaux mais également les pièces monomatériaux.

La troisième partie sera consacrée à l'étape de **fabrication des pièces multimatériaux** à proprement parler qui porte à la fois sur l'analyse, la modélisation et l'optimisation du procédé.

Dans une quatrième partie, nous présenterons les étapes proposés dans les **méthodologies de fabrication complètes** existantes.

Finalement, dans une cinquième partie, nous ferons la **synthèse** de cet état de l'art. Nous mettrons également en avant les limites des études existantes afin de définir clairement le **positionnement** de ces travaux de thèse.

2.1 Description numérique des pièces multimatériaux

2.1.1 Outils CAO et pièces multimatériaux

La description d'une pièce multimatériau englobe, d'une part, la description de sa géométrie et, d'autre part, la description de sa répartition des matériaux [Jackson2000, Wu2007]. À l'aide des outils de conception assistée par ordinateur (CAO), il est aujourd'hui possible d'obtenir une description numérique d'un objet volumique quelconque. Néanmoins, la caractéristique matériau n'est pas prise en compte [Knoppers2006]. En effet, la majorité des outils CAO est basée sur la modélisation dans un espace à trois dimensions d'un objet homogène défini comme un sous-ensemble de l'espace [Kumar1999b].

On remarque d'ailleurs que la majorité des formats de description de pièce ne prend pas en compte cet aspect matériau. Par exemple, le format STL, très utilisé en fabrication additive, ne décrit que la géométrie de la surface [Rock1991]. Des études ont été menées pour proposer des formats permettant de décrire les pièces multimatériaux mais ces formats sont encore à l'état de développement. Le format STL 2.0 développé spécifiquement pour la fabrication additive a pour objectif majeur la description de ce type de pièce [Hiller2009]. La norme STEP-NC propose une vision globale de la chaîne numérique et prévoit une description de la composition de la pièce même dans le cas où le matériau n'est pas homogène [Bonnard2009].

Même si la description de pièces multimatériaux n'est pas réalisable à partir d'outils CAO [Knoppers2004], des modèles mathématiques sont proposés pour les décrire [Wu2011b]. Les pièces avec une distribution discrète des matériaux sont assez facilement descriptibles par un assemblage d'objets homogènes [Chiu2000]. Pour les variations de la composition continues, il existe trois familles de description : les modèles discrets, les modèles continus et les modèles composites [Kou2007].

2.1.2 Modèles mathématiques de description

Modèles discrets

Les modèles discrets décrivent la composition du matériau avec une décomposition importante de l'objet. Les deux modèles les plus représentatifs sont la description par voxels [Liu2000] et par éléments finis [Wang2012].

Avec une description par voxels, l'objet doit être décomposé en un ensemble de cubes disposés sur une grille en trois dimensions (Figure 2.1(a)) [Chandru1995]. Ce modèle de description peut être formulé de la façon suivante :

$$\text{Objet} = \{V_i\} = \{(x_i, y_i, z_i, m_i)\}, i \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad (2.1)$$

Chaque voxel V_i comporte les informations concernant sa localisation et son matériau. La position de chaque voxel est définie par trois scalaires x_i , y_i et z_i . La composition matériau m_i

est décrite par un vecteur $(r_1, r_2, \dots)$ où r_j est la fraction volumique du j -ième matériau primaire (Figure 2.1(b)).

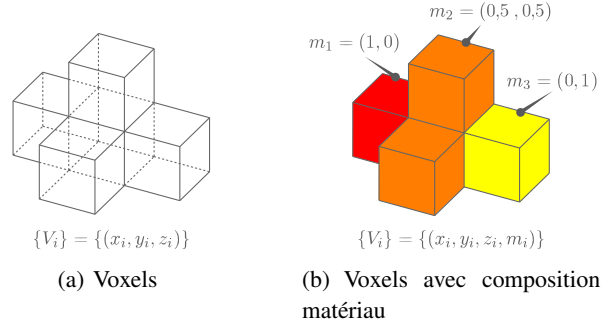


Figure 2.1 – Description par voxels

Ce type de description paraît adapté pour les structures ayant une distribution des matériaux fortement irrégulière. Néanmoins, il paraît compliqué de décrire la distribution des matériaux sans dispositif d'acquisition de données au cas où l'objet à modéliser n'existe pas sous une autre forme.

Concernant la description par éléments finis, la pièce multimatériau est décrite par un ensemble de polyèdres [Kumar2000, Wang2009]. Chaque polyèdre est décrit par un ensemble de sommets (Figure 2.2(a)). La position et le matériau de chaque sommet sont alors définis (Figure 2.2(b)). Ce modèle de description peut être formulé de la façon suivante :

$$\text{Objet} = \{P_i\} = \{(g_i, m_i)\}, i \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad (2.2)$$

Pour un polyèdre P_i , g_i représente la géométrie et m_i représente le matériau. La distribution des matériaux à l'intérieur du polyèdre est définie par une fonction d'interpolation par rapport à la composition définie aux différents sommets (Figure 2.2(c)).

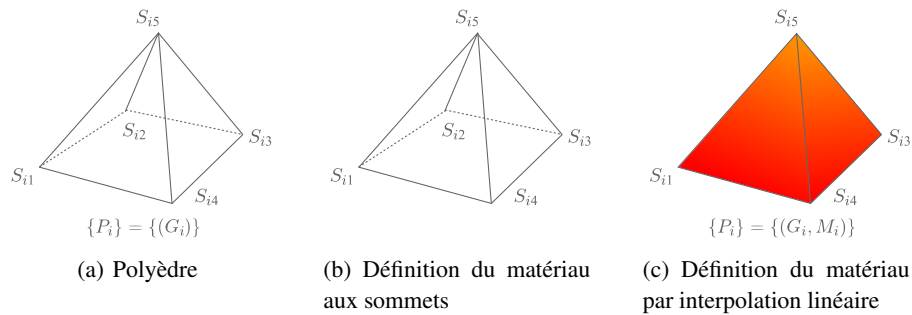


Figure 2.2 – Description par éléments finis

Ce modèle présente un intérêt pour la simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis permettant ainsi de modéliser le comportement de la pièce multimatériau [Kumar1999a, Cho2002, Chen2003, Kartasheva2003].

Modèles continus

Contrairement aux modèles discrets qui s'appuient sur une décomposition importante de l'espace, les modèles continus utilisent une description exacte du matériau. Ces modèles présentent l'avantage d'être plus rigoureux que les modèles discrets. Les méthodes présentées ici sont les descriptions par fonction explicite [Bhashyam2000], par entités de contrôle [Samanta2005], par points de contrôle [Yang2007] et par fonctions implicites [Park2000].

Concernant le modèle de description par fonction explicite, le matériau est décrit par une fonction pour chaque point de l'espace :

$$m(x, y, z) = f(x, y, z) \quad (2.3)$$

La formulation par fonction explicite présente l'avantage d'être simple et intuitive mais peut sembler restrictif dans certains cas. En effet, on constate que, dans la majorité des cas, la variation de la composition est dans une seule direction et qu'il est compliqué de définir des répartitions complexes avec une seule fonction explicite [Elishakoff2005]. Un autre inconvénient de ce modèle est lié à sa forte dépendance avec le système de coordonnées. Pour le concepteur, il est assez rare de décrire la composition par rapport à un système de coordonnées spécifique. Au lieu de cela, il a plutôt tendance à exprimer son idée en fonction des caractéristiques géométriques de la pièce [Shin2001]. On peut noter que ce modèle peut également être utilisé pour l'optimisation de pièces multimatériaux [Eraslan2005].

La méthode par entités de contrôle permet, quant à elle, la description et le contrôle de la distribution des matériaux par des entités liées à la géométrie de la pièce ou ayant une composition prédéfinie. Le principe de cette méthode est de définir la composition matériau en fonction de la distance entre un point considéré et les entités de contrôle. Lorsqu'il y a une entité de contrôle, cette fonction peut être définie sous cette forme :

$$m(x, y, z) = f(d) \quad (2.4)$$

Pour un point considéré, la composition est donc déterminée en fonction de la distance d entre ce point et l'entité de contrôle [Biswas2004]. Cette entité peut être une géométrie de référence indépendante de la géométrie de la pièce comme un axe (Figure 2.3(a)), une courbe ou un plan (Figure 2.3(b)) [Siu2002b, Choi2008]. L'entité de contrôle peut également être liée à la géométrie de la pièce (Figure 2.3(c)) [Zhou2004b]. Cette méthode peut également être déclinée avec plusieurs entités de contrôle [Liu2004, Hongmei2009, Ozbolat2011].

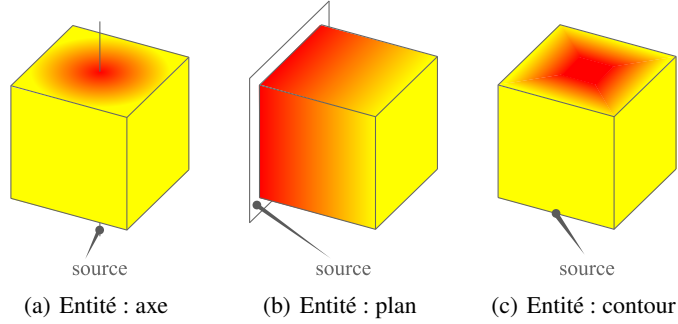


Figure 2.3 – Description par entités de contrôle

La description par points de contrôle peut être considérée comme une extension directe de la description des courbes, surfaces et volumes paramétriques. La différence est l'ajout d'une information concernant le matériau (Figure 2.4(a)). Cette information est incorporée dans chacun des points de contrôle (Figure 2.4(b)). Par exemple, un objet hétérogène peut être décrit à partir de fonctions B-splines [Qian2004] du type :

$$m(u, v, w) = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^m \sum_{k=0}^l B_{i,p}(u) B_{j,q}(v) B_{k,r}(w) P_{i,j,k} \quad (2.5)$$

$$P_{i,j,k} = (x_{i,j,k}, y_{i,j,k}, z_{i,j,k}, m_{i,j,k}) \quad (2.6)$$

Un point de contrôle $P_{i,j,k}$ contient les informations sur sa localisation et sa composition. La composition est donc définie à partir des fonctions B-splines $B_{i,p}$, $B_{j,q}$ et $B_{k,r}$ de degrés respectifs p , q et r .

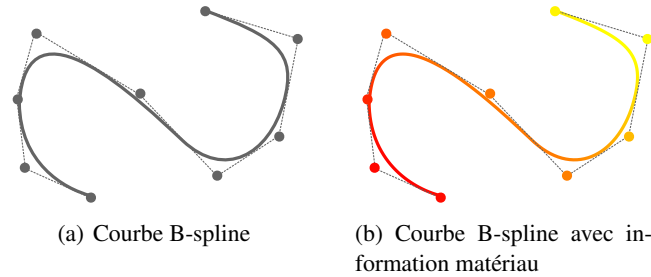


Figure 2.4 – Description par points de contrôle : méthode appliquée à une courbe

Dans la majorité des cas, la géométrie et la composition sont contrôlées par le même ensemble de points [Hua2005, Samanta2007]. Ce couplage étroit entre la description de la géométrie et de la répartition des matériaux peut limiter les possibilités de conception. Pour éviter cela, des modèles ont été développés dans lesquels la géométrie et le matériau sont décrits indépendamment [Martin2001].

Ces modèles proposent, en théorie, une description efficace pour des structures ayant une répartition des matériaux complexe. L'inconvénient de ce modèle est qu'il repose en grande partie sur la paramétrisation spatiale des objets qui n'est pas une tâche évidente.

Dans les trois méthodes continues présentées précédemment, la géométrie est le plus souvent décrite par une frontière constituée de faces, arêtes et sommets [Kou2005]. La distribution des matériaux est ensuite associée à cette description géométrique pour obtenir une description complète de l'objet. Contrairement à ces méthodes, la description par fonction explicite s'appuie sur une description de la géométrie par une fonction algébrique [Pasko2001]. Dans ce cas la frontière de l'objet est décrite par une fonction du type :

$$f(x, y, z) = 0 \quad (2.7)$$

A partir de cette fonction, il est possible de dire si un point est à l'intérieur ($f > 0$) ou à l'extérieur ($f < 0$) de l'objet. La répartition des matériaux peut être exprimée, ensuite, par un ensemble de fonctions implicites du même type. Comme pour les modèles avec fonction explicite, ce modèle peut sembler restrictif dans certains cas. Pour augmenter les possibilités de description, des nouvelles fonctions ont été développées et permettent de combiner des fonctions algébriques et de la logique combinatoire [Rvachev2001, Fayolle2006].

Modèles composites

Malgré la diversité des modèles mathématiques de description de pièces multimatériaux, il peut être compliqué de décrire certaines distributions des matériaux complexes (Figure 2.5(a)). Pour ce type de répartition, il est possible de décomposer l'objet en plusieurs entités. Un modèle de description est alors associé à chaque entité (Figure 2.5(b)) [Adzhiev2002].

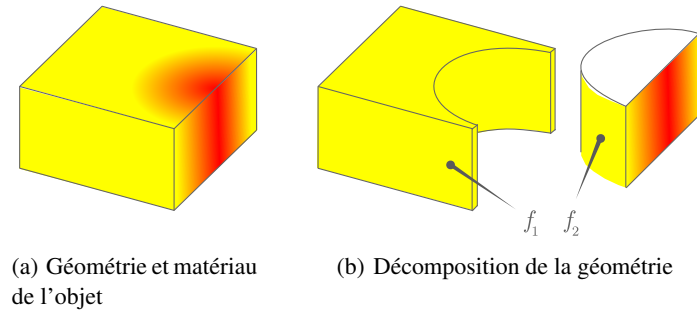


Figure 2.5 – Description par assemblage

Les modèles composites sont donc basés sur un fractionnement volume de l'objet qui peut être décrit de la façon suivante :

$$\text{Objet} = \{O_i\}, i \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad (2.8)$$

Il existe plusieurs approches pour décrire un objet à l'aide d'un modèle composite. Deux approches ont été étudiées dans le cadre de la description numérique des pièces multimatériaux. Une première approche consiste à construire l'objet à partir d'entités géométriques primitives et à l'aide d'opérations booléennes [Qian2003b, Kou2006]. Une seconde approche est basée sur la décomposition d'une géométrie existante en entités distinctes [Patil2002].

2.1.3 Synthèse

Malgré le développement de modèles mathématiques intéressants, on constate qu'il est très difficile de décrire une pièce multimatériau en vue de la fabriquer. En effet, même si les modèles proposés permettent, en théorie, de décrire des répartitions des matériaux complexes, en réalité, dans la plupart des cas, l'intégration de ces modèles mathématiques dans des outils de description n'est pas effective. De plus, la relation avec le processus de fabrication n'est pas prise en compte.

Pour la description d'une pièce, le choix d'un modèle mathématique doit, tout d'abord, être réalisé en prenant en compte les spécificités de la répartition des matériaux (Figure 2.6). Effectivement, les différents modèles n'offrent pas les mêmes avantages. Ainsi, les modèles discrets permettent de décrire des variations fortement irrégulières mais sont peu précis. Les modèles continus proposent, quant à eux, une représentation exacte de la répartition des matériaux mais peuvent sembler limités en terme de capacité de description. Néanmoins, la décomposition de l'objet peut permettre de les utiliser dans les différentes entités pour décrire une distribution des matériaux complexes.

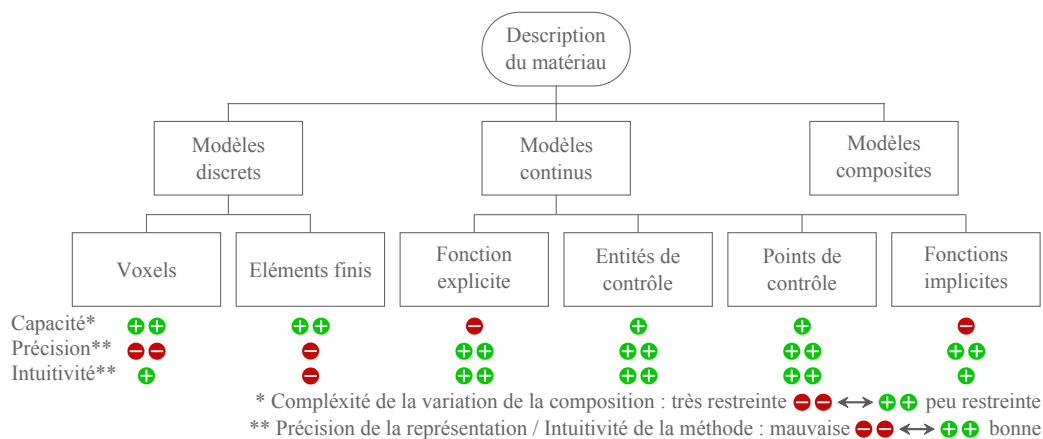


Figure 2.6 – Comparaison des modèles mathématiques de description

On doit noter que les données de description sont utilisées dans les différentes étapes du processus de fabrication. C'est pour cette raison que le modèle de description doit également prendre en compte cet aspect pour permettre une approche globale de la fabrication des pièces multimatériaux.

2.2 Détermination d'une stratégie de fabrication

2.2.1 Méthodes de détermination de stratégies de fabrication pour les pièces multimatériaux

L'étape de détermination d'une stratégie de fabrication est une des plus importantes dans la démarche de fabrication. En effet, les caractéristiques finales de la pièce sont fortement liées à ce choix. Néanmoins, il existe très peu de méthodes de détermination de stratégie de fabrication pour les pièces multimatériaux [Dutta2001]. De plus, toutes les méthodes sont basées sur la discrétisation de la composition [Kumar1998, Zhu2004, Xu2005, Choi2009]. L'idée de cette approche est de convertir la fonction de description de la composition en une fonction discontinue. Autrement dit, cette méthode décompose un objet hétérogène en une collection finie d'objets homogènes. Après discrétisation, la fabrication de chaque entité peut être traitée par des outils conventionnels. Les entités sont donc décomposées en un ensemble de tranches puis la trajectoire est générée.

Une de ces méthodes propose de définir la répartition des matériaux en prenant en compte la stratégie de fabrication (Figure 2.7) [Xu2005]. Avec cette méthode de planification, le modèle géométrique est tout d'abord découpé en une série de couches. À l'intérieur de chaque couche, la répartition des matériaux est ensuite définie avec une décomposition de la surface en plusieurs régions de composition homogène. Pour cela, dans une couche, les matériaux sont définis par

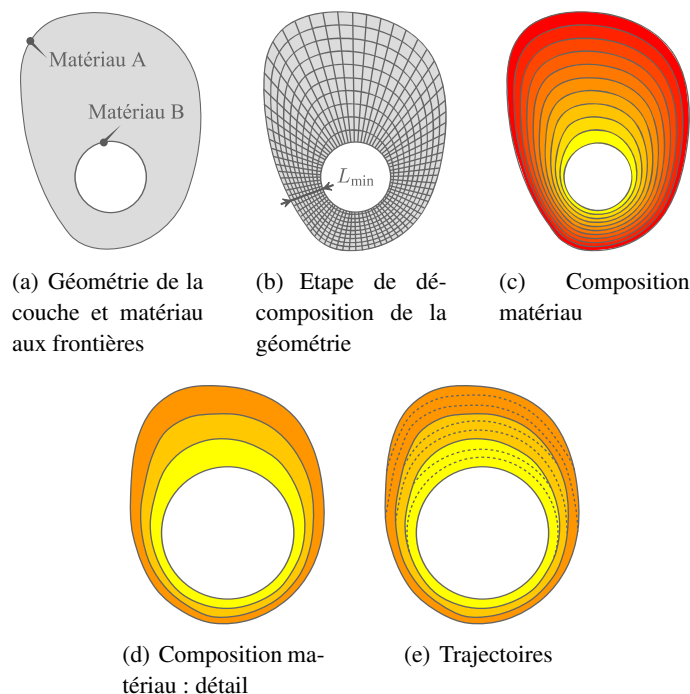


Figure 2.7 – Détermination d'une stratégie de fabrication à partir de lignes d'équi-composition [Xu2005]

l'utilisateur sur les frontières externes et internes (Figure 2.7(a)). Ensuite, un ensemble de lignes radiales est créé à partir du centre de la surface. Ces lignes sont ensuite uniformément divisées en n segments (Figure 2.7(b)). Le nombre de segments est choisi en prenant en compte les capacités de fabrication du procédé utilisé. En effet, la méthode propose de définir le nombre de régions en fonction de la résolution R de la machine utilisée et la géométrie de la couche, par exemple :

$$n = \lfloor L_{\min}/R \rfloor \quad (2.9)$$

Dans ce cas, la longueur du plus petit segment radial est égale ou légèrement supérieure à la résolution de la machine utilisée. Par conséquent, en théorie, toutes les régions peuvent être fabriquées. Une fois le nombre de région déterminé, les lignes passant par les points de division correspondants sont alors générées (Figure 2.7(c)). Les trajectoires peuvent être définies le long de ces lignes d'équi-composition avec un décalage égal à la résolution du procédé utilisé. On voit, par exemple, dans les trois premières régions (Figure 2.7(d)) comment les trajectoires sont définies (Figure 2.7(e)). On note que la modification de la composition au niveau du système de distribution des poudres n'est pas continue. Ainsi, la modification est réalisée après la fabrication d'une région et nécessite un arrêt du dépôt pendant un certain temps.

Cette méthode permet donc, théoriquement, de créer des trajectoires pour la fabrication de pièces multimatériaux en générant des lignes d'équi-composition. On note cependant que la répartition des matériaux n'est pas forcément celle attendue d'un point de vue fonctionnel puisque l'utilisateur définit uniquement les matériaux sur les surfaces de la pièce. De plus, comme pour les autres méthodes, à cause de l'approche discrétisée, l'intérêt du FGM peut être atténué.

D'autres méthodes pour déterminer des stratégies de fabrication ont été mises en place pour les procédés d'impression 3D [Cho2003, Choi2005b], de dépôt de fil fondu [Hsieh2001] et de fusion laser [Ott2010] mais sont trop liées au procédé pour pouvoir être transposées au procédé par projection de poudre.

2.2.2 Paramètres de stratégie en fabrication additive

Contrairement à la fabrication des pièces multimatériaux, il existe de nombreuses études concernant celle des pièces monomatériaux [Kulkarni2000, Kerninon2009]. Evidemment, il n'est pas envisageable d'utiliser ces méthodes telles quelles car elles ne prennent pas ou peu en compte l'aspect matériau. Cependant, il peut être intéressant d'analyser quels sont les paramètres de stratégies existants en fabrication additive et d'étudier l'état de l'art concernant ces paramètres pour savoir ce qui peut être utilisé dans le cadre de la fabrication de structures multimatériaux.

Stratégie de tranchage

Pour une fabrication couche par couche, un des paramètres de la stratégie est la manière dont l'objet est découpé en couches. Le choix de ce paramètre repose, d'une part, sur le type de tranchage et, d'autre part, sur l'orientation des couches. Il existe un certain nombre de types de

stratégie de tranchage [Pandey2003]. Il est possible de classifier ces stratégies de différentes manières. Nous proposons, par exemple, de réaliser cette classification en fonction de la géométrie des couches (Section 4.2). Le type de stratégie de tranchage et l'orientation des couches ne sont pas forcément uniques lors de la fabrication d'une pièce. En effet, il est possible d'avoir une décomposition de la pièce en entités qui sont fabriquées avec différentes stratégies de tranchage [Qian2001, Singh2001, Zhang2004, Ruan2007, Singh2008].

Les études concernant la stratégie de tranchage portent le plus souvent sur son optimisation. Dans ces études, la stratégie employée est souvent un tranchage avec des couches planes et uniformes. L'optimisation porte alors sur la hauteur de chaque couche. Dans ce cas, la hauteur de dépôt dans une couche est uniforme mais la hauteur peut être différente d'une couche à une autre. L'objectif de ces optimisations concerne le plus souvent la géométrie puisque le tranchage - responsable de l'effet escalier - influence directement l'état de surface finale de la pièce [Campbell2002, Ma2004, Ahn2007, Pandey2007]. On peut tout de même noter que l'optimisation proposée par Zhou prend en compte, en plus de la géométrie, l'aspect matériau [Zhou2004a]. En effet, outre le fait que l'état de surface soit pris en compte, l'optimisation a pour objectif de limiter la discrétisation de la composition réalisée par le tranchage. Avec cette méthode, l'utilisateur peut déterminer une valeur maximale de la variation de la fonction représentative du matériau $f(x, y, z)$ à l'intérieur d'une couche. La hauteur des couche est alors directement déterminée à partir de cette valeur limite et du calcul de la variation le long de la direction de fabrication :

$$\max_{i \in \llbracket 1; n \rrbracket} \left(\max_{(x, y, z) \in \text{couche } i} \left(\left| \frac{\partial}{\partial z} f(x, y, z) \right| \right) \right) \quad (2.10)$$

Stratégie de trajectoire

La fabrication d'une pièce est le résultat du déplacement de la tête de dépôt de matière dans l'espace. Le chemin suivi par la tête de dépôt est défini par la trajectoire. On distingue deux grandes familles de trajectoires. La première famille concerne les trajectoires pour la fabrication de structures minces [Ponche2012]. Dans ce cas, la trajectoire est directement définie par la géométrie de la structure. La seconde famille concerne les trajectoires pour la fabrication de structure pleine [Kerninon2008]. Dans ce cas, la trajectoire doit permettre de définir la forme extérieure de la pièce ainsi que la remplir complètement. Les trajectoires de cette famille sont le plus souvent semblables à celles que l'on trouve en usinage. On remarque, tout de même, qu'elles doivent répondre à des exigences supplémentaires. En effet, pour fabriquer une pièce pleine, il est nécessaire que, pour chaque couche, la tête de dépôt passe partout et ne passe qu'une seule fois au même endroit. Dans cette seconde famille, il existe plusieurs types de stratégies de trajectoire. Comme pour les stratégies de tranchage, il est possible de classifier ces stratégies de différentes manières (Section 4.2).

Nous verrons, par la suite, que la trajectoire suivie par la tête de projection détermine la géométrie et la microstructure de la pièce (Section 2.3). Pour la fabrication de pièces homogènes, le choix et l'optimisation d'une stratégie de trajectoire sont donc essentiellement basée sur des contraintes géométriques [Kao1998, Ren2010, Jin2011, Jin2013] ou métallurgiques

[Nickel2001, Thivillon2009]. Lors de la fabrication de pièces multimatériaux, le choix de la trajectoire doit être fait en prenant en compte ces caractéristiques mais il est également important de prendre en compte l'aspect matériau. En dehors, des méthodes basées sur la discrétisation de la composition, les méthodes de détermination d'une stratégie de fabrication ne prennent pas en compte cet aspect.

2.2.3 Synthèse

Malgré l'importance de l'étape de détermination d'une stratégie de fabrication, on constate que les méthodes développées sont très limitées pour les pièces multimatériaux. En effet, l'ensemble des méthodes propose de décomposer la pièce en plusieurs entités homogènes pour y appliquer, ensuite, des méthodes conventionnelles. Ces méthodes ne permettent donc pas la fabrication de pièces avec des répartitions des matériaux complexes tout en conservant l'aspect continue de la variation.

Les études concernant les stratégies de fabrication additive pour les pièces monomatériaux, quant à elles, proposent un panel intéressant de stratégies de tranchage et de trajectoire. Néanmoins, ces études ne prennent pas du tout en compte l'aspect hétérogène des pièces multimatériaux. On constate, en effet, que les objectifs d'optimisation des stratégies concernent, en très grande majorité, les contraintes géométriques ou métallurgiques.

Il est donc nécessaire de proposer de nouvelles méthodes de détermination de stratégies de fabrication pour la réalisation de pièces multimatériaux permettant la conservation de la répartition des matériaux initiale. De plus, l'optimisation de la stratégie de fabrication doit aussi prendre en compte l'aspect hétérogène des pièces multimatériaux pour assurer une fabrication des pièces en accord avec l'ensemble des spécifications de la pièce. Nous verrons, par ailleurs, dans la prochaine partie, que la prise en compte du procédé - en particulier le système de distribution des poudres - est primordiale dans le choix d'une stratégie de fabrication (Section 2.3).

2.3 Fabrication de pièces multimatériaux

Les études concernant la fabrication additive des pièces FGM avec des procédés par projection de poudre ont débuté au milieu des années 1990 avec la réalisation de structures multimatériaux métalliques [Fessler1997]. Les structures métal-céramiques sont arrivées au début des années 2000 [Pei2002] et se résument aujourd'hui, pour la plupart, à des dépôts de quelques couches métal-céramiques ou céramiques sur un substrat métallique [Balla2007, Roy2010].

Une grande partie de ces études porte sur la caractérisation des structures fabriquées avec des procédés de fabrication additive par projection de poudre. Dans ce cas, les structures FGM sont fabriquées puis le matériau et/ou les propriétés sont analysés. Quelques études ont été menées pour modéliser ou optimiser le procédé en vue d'obtenir des pièces multimatériaux.

2.3.1 Propriétés des pièces multimatériaux

Microstructure

Les propriétés mécaniques dépendent, dans une très large mesure, de la constitution du matériau, c'est-à-dire, non seulement de sa composition chimique, mais également de l'organisation des diverses phases présentes : distribution, taille, forme, orientation. Pour bien comprendre les comportements des matériaux et pouvoir maîtriser leurs propriétés, il est nécessaire de décrire et de qualifier leur microstructure. Dans cette optique, de nombreuses études portent sur l'analyse microstructurale des pièces à gradient de matériaux [Banerjee2003, Lin2005, Balla2009]. Le plus souvent, c'est l'évolution de l'organisation des diverses phases le long du gradient de matériaux qui est étudié (Figure 2.8) [Collins2003, Lin2006, Balla2007]. Ces études ont permis d'observer que le procédé a une forte influence sur la microstructure. En effet, on voit que la forme et l'orientation des grains sont directement influencées par la direction de solidification qui correspond à la direction de fabrication. Des observations similaires ont été réalisées concernant la fabrication de structures multimatériaux avec des procédés de fusion laser [Mumtaz2007] ou de structures monomatériaux avec des procédés par projection de poudre [Balla2008a].

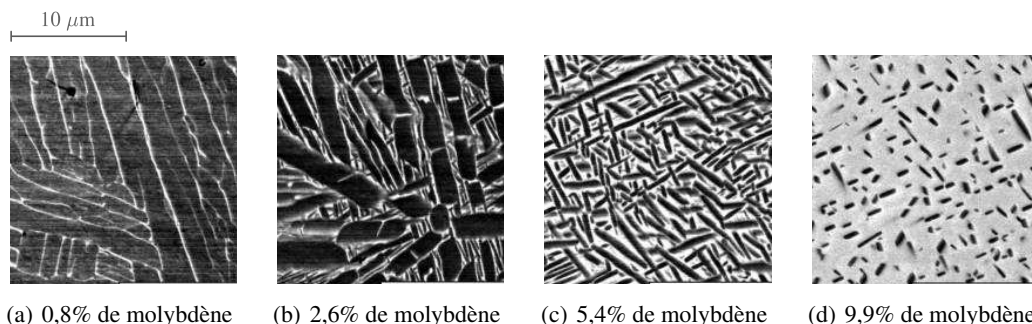


Figure 2.8 – Evolution de la microstructure le long d'un gradient de matériaux titane et molybdène [Collins2003]

L'étude de la microstructure permet également de comprendre des phénomènes macroscopiques en particulier concernant la fissuration des pièces. Les études menées par Domach *et al.* mettent en avant le rapport entre les fissures qui peuvent apparaître sur une structure FGM pendant la fabrication et sa composition microstructurale [Domack2005]. Ces travaux portent sur la réalisation de pièces en alliage base titane et alliage base nickel chrome où l'on peut observer des fissures. En observant la microstructure d'un mélange d'alliage base titane et d'alliage base nickel chrome, on observe des ségrégations importantes et on comprend donc l'apparition de fissures. Les travaux de Pei *et al.* permettent, quant à eux, de mettre en avant l'influence de la microstructure sur le comportement mécanique de la pièce [Pei2003].

Certaines observations du matériau apportent également des informations importantes sur la fabrication de pièces FGM. Cela peut concerner, entre autres, la fusion des poudres, la liaison des couches entre elles ou la liaison de la première couche avec le substrat [Schwendner2001, Alimardani2010, Das2010].

On peut noter également que les études concernant la réalisation de matériaux composites à matrice métallique (Metal Matrix Composite - MMC) à l'aide de procédés de fabrication additive apportent également des informations sur les structures FGM [Novichenko2010, Kumar2010]. Effectivement, on retrouve, en partie, les phénomènes métallurgiques existants sur les structures FGM, principalement liés à la thermique [Xiong2008].

Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques des pièces multimatériaux les plus étudiées sont la dureté et la rigidité [Lin2006, Yadroitsev2007]. Dans la majorité des cas, les observations portent sur la relation entre la composition et les caractéristiques mécaniques (Figure 2.9) [Banerjee2003]. Concernant la rigidité, la spécificité de la structure ne permet pas une caractérisation par essais

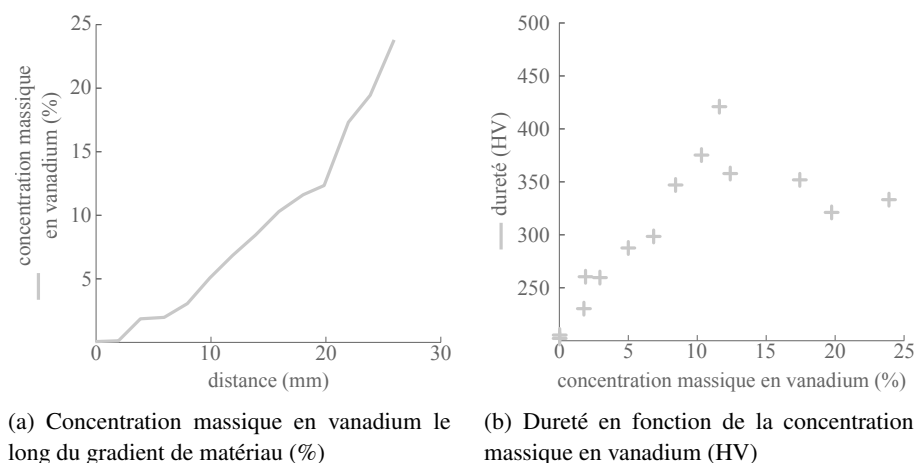


Figure 2.9 – Evolution de la dureté le long d'un gradient de matériaux titane et vanadium [Banerjee2003]

de traction. Dans le cas des structures multimatériaux, cette caractérisation est donc effectuée à l'aide d'une micro-indentation [Zhang2010]. On remarque qu'une part importante de ces activités de recherche est menée au service du domaine biomédical et met en avant les propriétés mécaniques recherchées pour des structures de remplacement osseux. On peut noter, par ailleurs, que la variation des propriétés mécaniques peut également être obtenue avec une variation de la composition et de la porosité [Bandyopadhyay2009].

Les études concernant les autres propriétés mécaniques des pièces FGM sont très limitées. On peut tout de même citer les travaux de Ganesh *et al.* comportant des essais de fatigue ainsi que des essais de résilience [Ganesh2010]. Ces études ont été menées sur des structures multimatériaux en acier inoxydable et alliage base chrome cobalt. Des comparaisons ont été effectuées sur le comportement de ces structures avec une variation continue ou non de la composition. Avec ces matériaux, on constate que la structure avec une variation continue de la composition offre une meilleure résistance à la fatigue et possède un mode de propagation des fissures plus ductile que la structure avec une variation discontinue de la composition. De plus, ces études ont montré que les structures multimatériaux offriraient une meilleure résistance à la fatigue qu'une structure en acier inoxydable. Quelques travaux démontrent, quant à eux, l'intérêt d'utiliser des structures FGM pour améliorer la résistance au frottement [Dittrick2010, Das2010, Wu2011a].

Autres propriétés

Les autres caractéristiques étudiées sont majoritairement les propriétés chimiques et la biocompatibilité des pièces multimatériaux [Majumdar2009, Ocylok2010, Balla2010a]. En effet, les structures FGM intéressent particulièrement le domaine biomédical. Il est donc important d'étudier ces caractéristiques. Pour étudier la biocompatibilité des structures, les travaux portent essentiellement sur la culture de cellules *in vitro* sur des pièces test réalisées avec des procédés de fabrication additive [Balla2010b]. En effet, même si les matériaux utilisés pour la fabrication sont biocompatibles, il est nécessaire de vérifier que la transformation des poudres par le procédé n'a pas modifié cette caractéristique. Les études appliquées au domaine médical s'intéressent également à la résistance à l'usure des pièces FGM dans des milieux biologiques. Cette caractéristique est particulièrement intéressante pour les parties frottantes des prothèses. Même si les structures métallo-céramiques sont plus intéressantes pour ces applications, des études ont été menées sur des structures comportant des alliages base titane et base chrome cobalt et démontrent l'intérêt de ce type de matériaux pour ses qualités de résistance à l'usure [Dittrick2010].

2.3.2 Modélisation du procédé de fabrication

Les objectifs de la modélisation du procédé de fabrication de pièces multimatériaux sont multiples. Les modèles doivent permettre, d'une part, de prédire les caractéristiques des pièces fabriquées et, d'autre part, d'optimiser la fabrication des pièces. En effet, les caractéristiques matériaux et dimensionnelles sont directement liées à des phénomènes physiques (Figure 2.10). Ces phénomènes physiques sont, eux, fonction des paramètres du procédé - principalement puissance du laser, débits des poudres et cinématique des axes - ainsi que des matériaux utilisés. Pour

obtenir une modélisation complète de la fabrication, il est donc nécessaire de modéliser ces phénomènes physiques mais aussi l'influence des paramètres du procédés sur ces phénomènes.

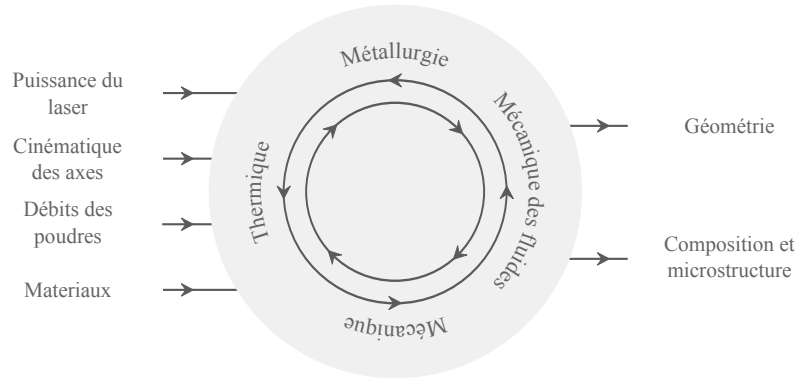


Figure 2.10 – Phénomènes physiques mis en jeu pendant la fabrication

Caractéristiques géométriques

Concernant les caractéristiques géométriques des pièces multimatériaux, on remarque que les études sur le sujet sont quasiment inexistantes. On peut, tout de même, considérer que les études concernant la fabrication additive de structures monomatériaux peuvent être, en partie du moins, transposables au cas des structures FGM.

Lors de la réalisation d'une pièce à l'aide d'un procédé de fabrication additive par projection de poudre, le volume constitué par une pièce est le résultat de l'assemblage d'un ensemble de cordons de matière. Pour modéliser l'aspect géométrique, il est donc intéressant d'être capable de modéliser la fabrication d'un cordon seul. Plusieurs travaux ont été menés sur ce sujet avec deux approches. Une première approche est basée sur l'étude physique du procédé. En effet, la fabrication d'un cordon est le fruit de la rencontre entre un flux de poudre, un bain de fusion et une source de chaleur. Certains modèles sont donc basés sur la représentation de ces différents phénomènes [Lin1999, Yang2001, Fallah2011]. Concernant cette approche, on peut noter que le modèle proposé par Cooper et Lambrakos prend même en compte une variation de la composition pour la modélisation thermique du procédé [Cooper2010]. Une seconde approche est basée sur l'analyse expérimentale de la fabrication de cordons pour en déduire un modèle de fonctionnement. Dans ce cas, les dimensions d'un cordon - entre autres, sa hauteur et sa largeur - sont mesurées pour un ensemble de paramètres du procédé. Concernant le procédé par projection de poudre, les paramètres influents sur la géométrie sont la vitesse de déplacement, le débit de poudre et la puissance laser. Ces études permettent donc de déterminer les dimensions d'un cordon en fonction de ces paramètres (Figure 2.11) [Zhang2007, Lu2010, El Cheikh2012]. De plus, une partie de ces études regarde également l'influence de ces paramètres sur d'autres caractéristiques de la pièce, comme la porosité ou la microstructure [Kobryn2000, Choi2005a].

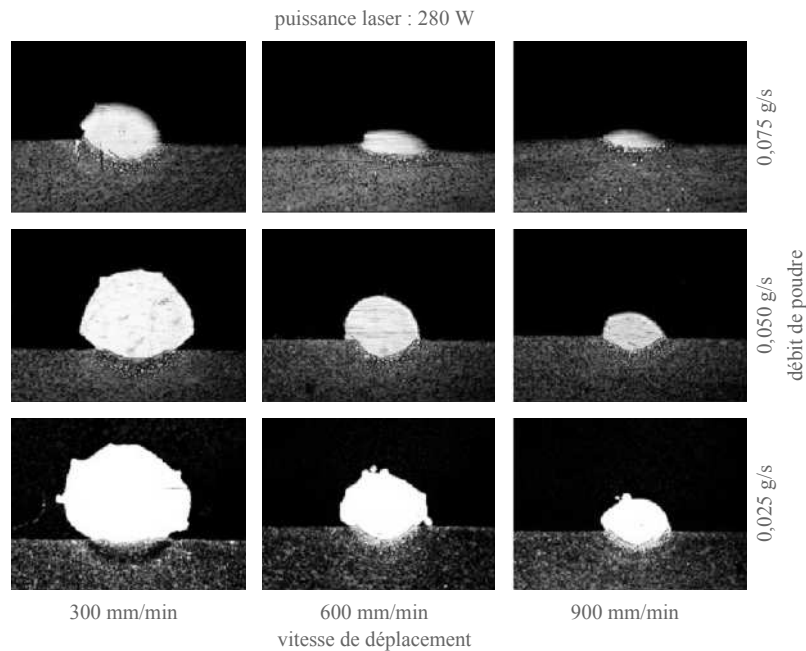


Figure 2.11 – Dimensions d'un cordon en fonction des paramètres du procédé : vitesse de déplacement et débit de poudre avec puissance laser fixée à 250 W [El Cheikh2012]

Néanmoins, la modélisation du cordon ne suffit pas à connaître la géométrie finale de la pièce. Les phénomènes physiques mis en jeu lors de la fabrication sont plus complexes lorsqu'il s'agit de fabriquer une pièce complète. Par exemple, lors de la fabrication, le laser est amené à passer à des endroits où de la matière a déjà été déposée. Dans ce cas, il est plus compliqué de savoir quelles sont les dimensions du cordon. De plus, il est nécessaire de prendre en compte les éventuelles déformations ou fissurations de la structure sous l'effet du champ de température complexe à modéliser [Bahr2003, Alimardani2007, Jendrzewski2007].

Caractéristiques matériaux

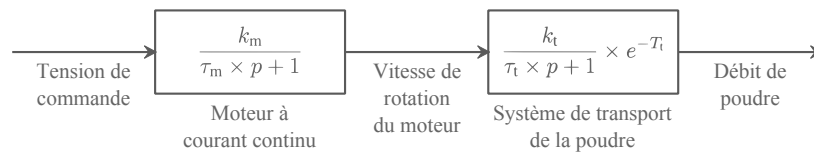
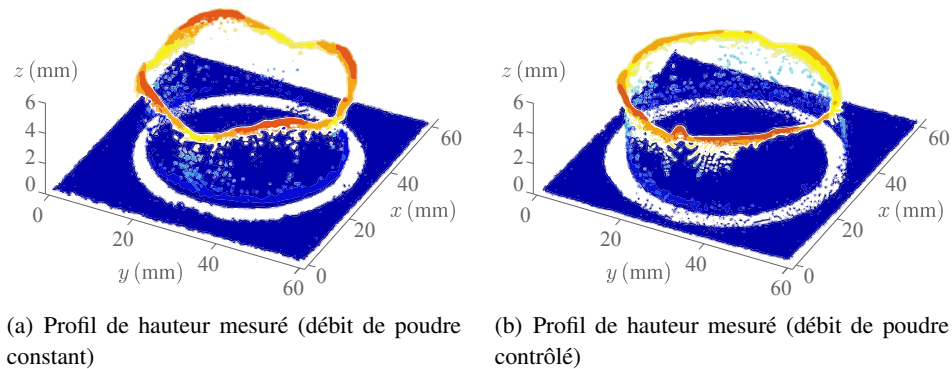
Concernant les caractéristiques matériaux, on distingue, d'une part, la composition et, d'autre part, la microstructure. Pour connaître la répartition des matériaux dans la pièce fabriquée, il faut d'abord connaître la composition du mélange des poudres délivré par le procédé. En effet, en dehors des phénomènes de mélange ou de diffusion des matériaux, la répartition des matériaux dans la pièce est surtout définie par la répartition des matériaux dans chaque cordon. Quelques modèles permettent de simuler le comportement de poudres de matériaux différents dans un même flux. Les poudres, en fonction de leurs caractéristiques, n'ont pas toutes le même comportement dans le flux de poudre délivré par le procédé [Zhang2009]. Ainsi, la composition du flux de poudre à la sortie de la tête de projection n'est pas forcément similaire à celle du flux de poudre au contact du bain de fusion [Balu2012]. Par contre, la modélisation du procédé en lui-même est très peu étudiée. Dans le cas où l'on souhaite fabriquer avec une variation continue de la composition du matériau, il est pourtant nécessaire de connaître le comportement du

procédé - plus particulièrement du système de distribution des poudres - lors de la modification de la composition.

Pour ce qui est de la microstructure, malgré plusieurs études concernant l'observation et l'analyse de celle-ci, on constate qu'il n'existe pas encore de moyen de prédire cette caractéristique. Pour passer au stade de la prédétermination, il est essentiel d'étudier l'historique thermique de la pièce pendant toute la fabrication et de prendre en compte l'aspect métallurgique. Des modèles numériques sur l'aspect thermique existent et permettent de connaître l'historique thermique dans une structure mais ces modèles sont souvent limités à des géométries très simples avec un ou deux matériaux primaires sans modification graduelle de la composition [Shen2009]. Par ailleurs, le plus souvent, ces modèles thermiques ne sont pas associés à des modèles métallurgiques. Dans les rares études où les deux modèles sont associés, ils ne sont valables que pour des structures monomatériaux [Costa2005].

2.3.3 Optimisation du procédé de fabrication

Les études concernant l'optimisation du procédé sont majoritairement dédiées au contrôle de la géométrie des cordons déposés [Ponche2012]. Nous avons vu précédemment que la géométrie du cordon est directement liée aux paramètres du procédé. Ainsi, Ruan *et al.* proposent de réaliser des structures fines avec une variation de la hauteur du cordon [Ruan2010]. La modification de la hauteur du cordon est, dans ce cas, réalisée avec une variation de la vitesse d'avance. D'autres études proposent, quant à elle, d'optimiser le procédé en vue d'obtenir des cordons avec une hauteur la plus constante possible. Lors de la fabrication d'une pièce, on se rend compte que la hauteur du cordon n'est pas forcément constante, même si les paramètres de fabrication sont choisis constants. Cette variation est, le plus souvent, le résultat d'une variation de la taille du



(c) Modélisation du système de distribution de la poudre

Figure 2.12 – Asservissement du système de distribution de la poudre [Tang2007]

bain de fusion. Pour contrer ces phénomènes, des asservissements du procédé ont été proposés. Ainsi, des modèles permettent d'asservir la puissance du laser en fonction de la taille du bain de fusion [Bi2006] ou d'asservir le débit de poudre en fonction de la vitesse d'avance (Figure 2.12) [Tang2007].

Nous pouvons remarquer que cette seconde étude propose une modélisation du fonctionnement du système de projection de la poudre afin de pouvoir ajuster le débit de poudre en fonction de la vitesse (Figure 2.12(c)). Ce type de modélisation peut, en effet, être très intéressant dans le but de contrôler les débits des poudres pour la fabrication de structures multimatériaux avec une variation continue des débits des poudres. Le modèle de comportement du système de distribution de la poudre est constitué d'un modèle pour le moteur du pot de distribution et d'un modèle pour le système de transport de la poudre. Le moteur est modélisé par une fonction du premier ordre. Le système de transport est, quant à lui, modélisé par une fonction du premier ordre ainsi qu'un retard pur représentant le transport de la poudre dans les tuyaux de distribution. Ce modèle met en avant la difficulté que peut représenter le contrôle du débit de poudre et la nécessité de prendre en compte cet aspect dans le cas de la fabrication de pièces multimatériaux où le contrôle des débits des différentes poudres est primordial.

2.3.4 Synthèse

Les études centrées sur la fabrication des pièces multimatériaux sont majoritairement menées dans le but d'analyser les propriétés des pièces. Ainsi, elles permettent, par exemple, de mettre en avant l'influence que peut avoir la répartition des matériaux sur les caractéristiques mécaniques des pièces fabriquées ou les relations qui peuvent exister entre la microstructure et les phénomènes macroscopique, en particulier l'éventuel fissuration des pièces multimatériaux. On remarque, tout de même, que les connaissances sur les caractéristiques des pièces sont encore limitées, surtout en ce qui concernent les caractéristiques mécaniques.

Les travaux de modélisation du procédé pour la fabrication de pièces multimatériaux sont, quant à eux, quasiment inexistantes. Il est donc très difficile de prédire les caractéristiques des structures fabriquées. Les travaux concernant la fabrication de pièces homogènes permettent, tout de même, d'avoir certaines informations sur la géométrie. De façon similaire, les quelques travaux d'optimisation du procédé existants sont dédiés au contrôle de la géométrie. La modélisation du procédé en vue de prédire la répartition des matériaux est donc un point sur lequel il est nécessaire d'avancer pour avoir un contrôle du procédé pendant la fabrication.

2.4 Méthodologie de fabrication : du concept à la pièce

Jusqu'à maintenant, dans ce chapitre, nous avons étudié les différents outils proposés pour chaque étape de la démarche de fabrication. Dans cette partie, nous allons présenter quels outils sont utilisés dans le cadre des méthodologies de fabrication complètes. Lors de l'analyse des pièces existantes, nous avons détecté deux pièces pour lesquelles une démarche spécifique et complète a été mise en place (Section 1.3). En effet, les autres pièces étudiées présentaient des géométries et des variations de la composition assez simples pour permettre une fabrication sans méthodologie spécifique. Nous allons donc analyser les outils proposés pour la fabrication de ces deux pièces.

La première pièce étudiée est un volant d'inertie présentant une variation de la composition dans les trois directions de l'espace (Figure 2.13) [Morvan2001]. Cette pièce a pour fonction de stocker l'énergie cinétique et a été conçue avec l'objectif de maximiser la quantité d'énergie stockée tout en minimisant les contraintes dans la direction radiale. L'utilisation d'une structure multimatériau composée de carbure de tungstène et de cobalt a été proposée pour répondre à cette problématique. Pour réaliser cette pièce, le procédé de fabrication additive par projection de poudre LENSTM a été utilisé. Avec ce procédé, les étapes usuelles de planification et de programmation commande numérique sont assez opaques pour l'utilisateur lorsqu'il s'agit de fabriquer des pièces homogènes. En effet, l'utilisateur se contente de fournir une description de la géométrie au format STL. Cette géométrie est ensuite décomposée en un ensemble de tranches, la trajectoire est automatiquement générée et le programme commande numérique créé. Ici, l'hétérogénéité de la pièce ne permet pas de suivre cette démarche. Une méthode spécifique a donc été développée.

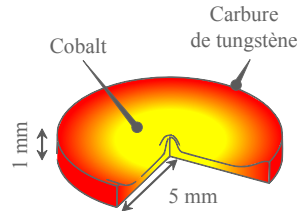


Figure 2.13 – Volant d'inertie [Morvan2001]

La description de la pièce, première étape de la méthodologie, est réalisée à l'aide d'équations paramétriques permettant de décrire la géométrie et la distribution des matériaux. Ces équations sont définies à l'aide de polynômes de Bernstein $B_{i,p}(u)$:

$$r(u) = \sum_{i=0}^n r_i B_{i,p}(u), z(u) = \sum_{i=0}^n z_i B_{i,p}(u) \text{ et } c(u) = \sum_{i=0}^n c_i B_{i,p}(u) \quad (2.11)$$

Les termes r_i sont fixés et représentent la localisation des points de contrôle le long du rayon pour décrire la géométrie et la composition. Concernant la composition, la fonction $c(u)$ représente la fraction volumique d'un des deux matériaux. A l'aide de ces équations, il est non

seulement possible de décrire la pièce mais également d'optimiser la géométrie ainsi que la répartition des matériaux à l'aide des variables z_i et c_i .

La technologie utilisée pour le contrôle des débits de poudre ne permet pas leur modification lors de la phase de dépôt de matière. De plus, le temps nécessaire pour s'assurer de la bonne composition du matériau en sortie de buse est assez important. L'étape de choix de la stratégie de fabrication doit donc prendre en compte ces considérations. C'est pour cette raison que les stratégies proposées dans cette étape sont définies de façon à ce que la composition soit rarement modifiée. Une stratégie de dépôt de cordons circulaires et concentriques a donc été choisie. La méthode proposée décompose donc la pièce en anneaux concentriques avec un espacement radial et en hauteur déterminés définissant la trajectoire (Figure 2.14). Le classement des anneaux est réalisé par hauteur puis par composition et enfin par rayon décroissant. Ainsi, dans une tranche donnée, les anneaux de composition similaire sont déposés en une seule fois, ce qui réduit le temps de fabrication. Pour les anneaux de composition différente, le temps de changement de composition est minimisé. Pour cela, la composition est modifiée pour une variation minimale de 5 % de la fonction $c(u)$. Dans ce cas, une attente de 20 ms est nécessaire pour s'assurer que l'état d'équilibre est atteint pour le système de distribution des poudres.

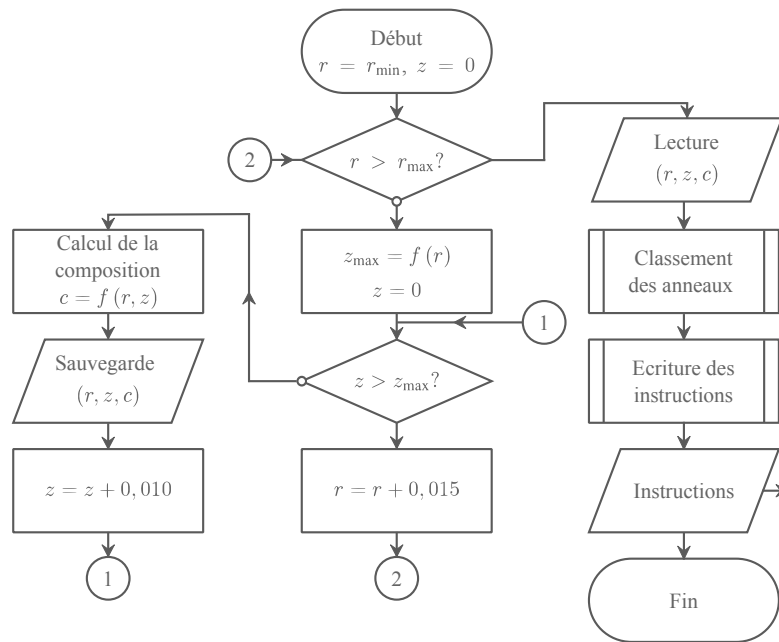


Figure 2.14 – Organigramme pour la génération du fichier d'instructions [Morvan2001]

Une fois la stratégie de fabrication déterminée, le programme commande numérique est généré automatiquement. Cette méthode a été validée avec la fabrication d'une pièce. Bien que la pièce ne présente pas les caractéristiques géométriques attendues et que la structure contienne des grains de poudre non fondus, on constate la faisabilité de fabriquer une structure multimatériau avec une variation de la composition complexe. On voit donc que cette méthode apporte

une réponse à la problématique. Néanmoins, elle n'est applicable qu'aux pièces présentant une géométrie de révolution et une répartition des matériaux avec des lignes d'équi-composition circulaires et concentriques.

La seconde pièce étudiée est un canal sous pression avec une variation de la composition dans deux directions de l'espace (Figure 2.15) [Shin2003]. Ce canal est en contact avec un fluide à haute température et haute pression sur sa surface intérieure tandis qu'il est en contact avec l'air ambiant sur sa surface extérieure. Par conséquent, il est intéressant de disposer d'une partie en céramique sur la surface intérieure du canal en raison de ses bonnes propriétés à haute température tout en ayant une structure métallique pour ses propriétés mécaniques. L'utilisation d'une structure multimatériau avec une variation continue de la composition permet de réduire les contraintes à l'interface entre ces deux matériaux. Le procédé de fabrication par projection de poudre DMD® a été utilisé dans cette étude. Comme dans la première étude, l'auteur met en avant la nécessité de développer une méthode pour la représentation et la fabrication des pièces complexes multimatériaux, particulièrement dans le cas des structures FGM.

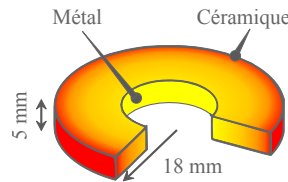


Figure 2.15 – Canal sous pression [Shin2003]

Pour décrire la pièce, une nouvelle méthode de description est proposée. Avec cette méthode, une structure multimatériau complexe est définie comme une composition de structures multimatériaux simples (Figure 2.16). Ainsi, un objet est défini comme un ensemble fini d'objets hétérogènes primitifs $\{O_i\}$ avec G_i qui décrit la géométrie de l'objet primitif et M_i qui repré-

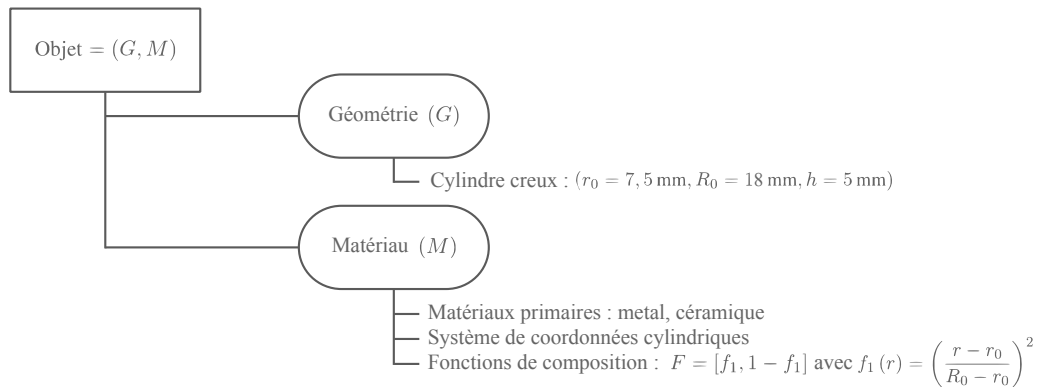


Figure 2.16 – Modèle de description d'une pièce multimatériau [Shin2003]

sente la distribution des matériaux primaires :

$$\text{Objet} = \{O_i\} = \{(G_i, M_i)\}, i \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad (2.12)$$

Concernant la détermination d'une stratégie de fabrication, la méthode proposée est basée sur la discrétisation de la composition (Figure 2.17(a)). La fonction de description de la composition est donc convertie en une fonction discontinue (Figure 2.17(b)). Après décomposition de l'objet en une collection finie d'objets homogènes, les entités sont décomposées en un ensemble de tranches puis la trajectoire est générée. Lors de la fabrication, dans une couche, les zones appartenant à une même entité sont fabriquées les unes à la suite des autres. Les débits des poudres sont modifiés entre chaque changement de zone avec un temps d'attente pour s'assurer de la composition correcte du mélange.

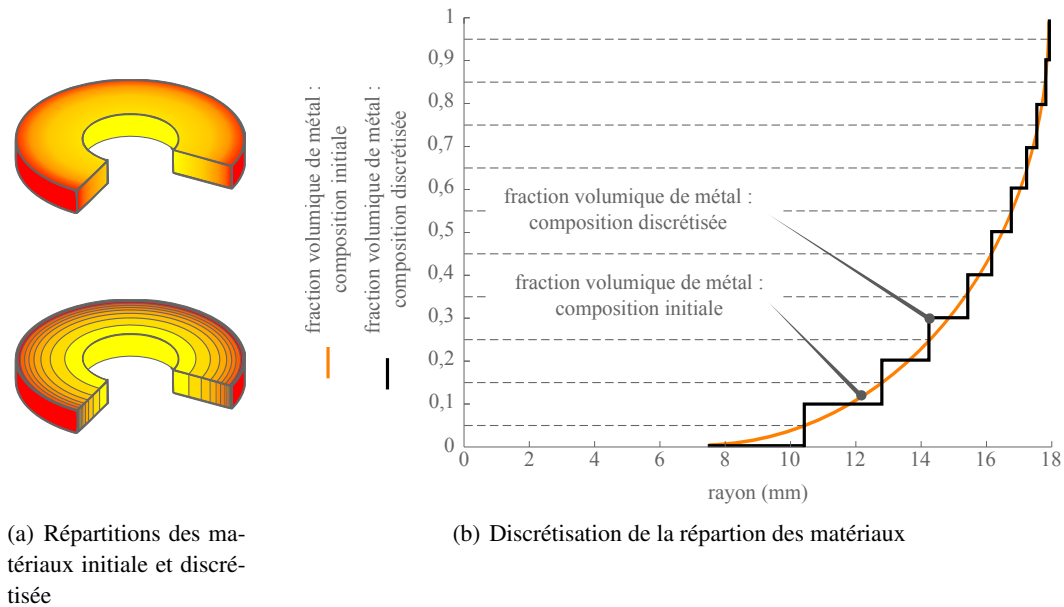


Figure 2.17 – Méthode de discrétisation de la répartition des matériaux [Shin2003]

Contrairement à la première méthode présentée, celle-ci peut s'appliquer à l'ensemble des pièces multimatériaux complexes [Shin2002]. On voit tout de même que l'on se prive de l'aspect continu de la structure FGM. De plus, la méthode de fabrication proposée n'est pas optimale avec des temps d'attente importants. Ces deux méthodologies de fabrication répondent donc en partie à la problématique mais ne sont pas totalement satisfaisantes. La première ne permet de fabriquer qu'une partie restreinte des pièces multimatériaux tandis que la seconde permet de fabriquer l'ensemble des pièces mais ne conserve pas l'aspect continu de la distribution des matériaux. On peut noter également que des méthodologies de fabrication complètes ont été proposées pour d'autres procédés de fabrication additive - principalement le procédé d'impression 3D - mais qu'il est impossible de transposer ces méthodes au procédé par projection de poudre car elles sont fortement liées au procédé utilisé [Jackson1999, Siu2002c, Siu2002a, Kou2009].

2.5 Synthèse et positionnement de nos travaux de recherche

2.5.1 Synthèse

L'analyse des travaux existants, présentée dans les différentes parties de ce chapitre, permet de faire la synthèse de l'état de l'art concernant les méthodologies de fabrication des pièces multimatériaux. La première étape de cette méthodologie doit permettre de décrire numériquement les pièces multimatériaux. Malgré le manque d'outils de CAO capables de décrire les pièces hétérogènes, nous avons constaté que des modèles mathématiques de description sont proposés. Néanmoins, même si ces modèles permettent théoriquement de décrire des répartitions des matériaux complexes, leur intégration dans un processus de fabrication de pièces n'est pas encore effective.

On peut tout de même noter que certains modèles permettent une modélisation du comportement des structures multimatériaux et proposent même une boucle d'optimisation pour la conception [Wang2005, Goupee2006]. Ces méthodes d'optimisation permettent, dans certains cas, d'optimiser simultanément la géométrie et la répartition des matériaux (Figure 2.18) [Xia2008].

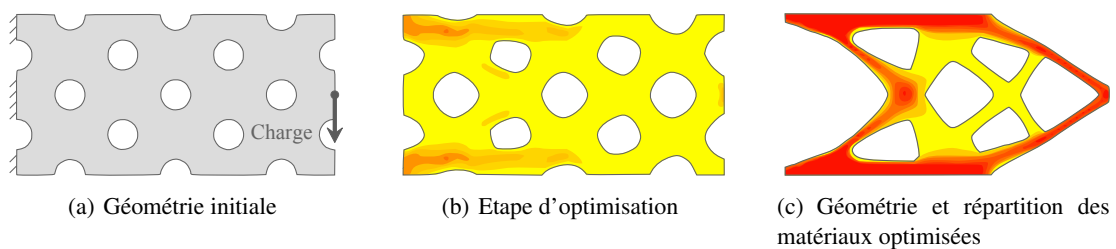


Figure 2.18 – Optimisation simultanée de la géométrie et de la répartition des matériaux [Xia2008]

Pour cette étape, c'est surtout le manque d'intégration et de normalisation des méthodes proposées qui est limitant. Ceci peut poser problème dans le cadre de la fabrication de pièces fonctionnelles où il est indispensable d'assurer la transition entre l'objet imaginé par le concepteur et la fabrication de la pièce.

L'étape de détermination d'une stratégie de fabrication est, quant à elle, celle qui présente le plus de lacunes (Figure 2.19). On constate, en premier lieu, que peu de travaux ont été consacrés à ce sujet et, en second lieu, que les rares méthodes proposées sont encore très limitées pour la fabrication de pièces fonctionnelles. En effet, la majorité d'entre elles est basée sur la discrétisation de la répartition des matériaux. Il paraît donc intéressant de développer en priorité cette étape pour proposer une fabrication sans discrétisation de la répartition des matériaux permettant de conserver au maximum la conception initiale.

Concernant l'étape de fabrication, les études relatives à l'analyse des propriétés des pièces multimatériaux permettent d'avoir quelques connaissances intéressantes sur leur comportement (Figure 2.19). La modélisation et l'optimisation du procédé sont, quant à elles, très limitées (Figure 2.19). En effet, la plupart des modélisations des phénomènes physiques est développée pour la fabrication de structures monomatériaux avec des géométries simples. De plus, la modélisation et l'optimisation du procédé en lui-même ne sont pas encore assez complètes pour permettre un contrôle optimal de la fabrication.

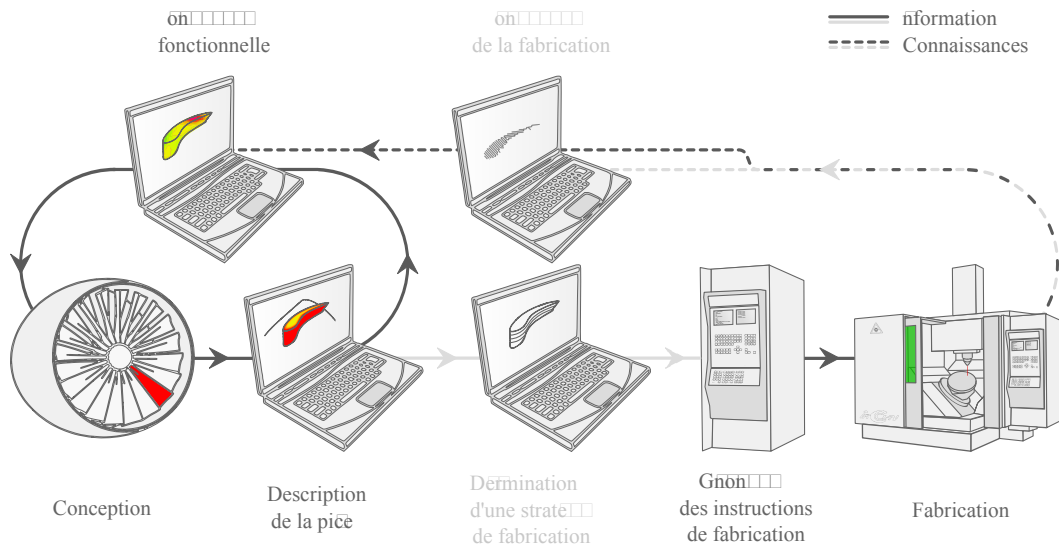


Figure 2.19 – Chaîne numérique : état de l'art

2.5.2 Positionnement de nos travaux de recherche

Au regard de l'état de l'art, nous souhaitons que nos travaux de recherche s'inscrivent dans une démarche globale de fabrication de pièces multimatériaux fonctionnelles. En effet, nous pensons qu'il est indispensable de proposer une méthodologie complète permettant de réaliser la transition entre l'objet imaginé par le concepteur et la fabrication de la pièce (Figure 2.20). Nous pensons également qu'il est important que le procédé utilisé soit pris en compte à chaque étape de la méthodologie (Figure 2.20). En effet, l'étape de conception est aujourd'hui en partie optimisée sur des contraintes fonctionnelles. Il peut être également intéressant de prendre en compte l'aspect procédé [Hascoët2011b]. De plus, l'étape de détermination d'une stratégie de fabrication doit absolument prendre en compte cet aspect procédé. Pour cela, la modélisation du procédé est indispensable. Elle doit permettre de qualifier et de sélectionner une stratégie adaptée à la fabrication d'une pièce donnée.

Concernant l'optimisation de la méthodologie, les travaux de thèse se limiteront à l'aspect stratégie de fabrication (Figure 2.20). En effet, nous avons pu constater que cette étape est pour le moment assez limitée alors qu'elle est pourtant une des plus importantes dans la démarche de fabrication. Ainsi, dans le troisième chapitre nous présenterons nos propositions en terme de

modélisation et d'optimisation du procédé pour la détermination d'une stratégie de fabrication. Dans le quatrième chapitre, nous développerons nos travaux concernant des méthodes de génération de trajectoires capables de proposer des trajectoires adaptées en prenant en compte les spécificités de la pièce et du procédé.

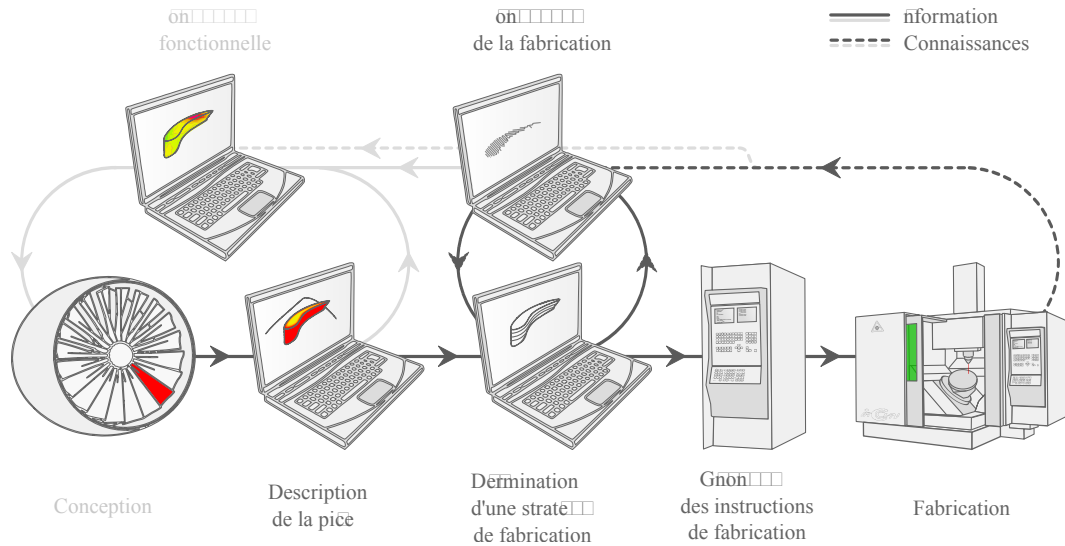


Figure 2.20 – Chaîne numérique : positionnement de nos travaux de recherche

Modélisation et optimisation du procédé

Dans ce troisième chapitre, nous exposerons les travaux concernant la **modélisation et l'optimisation du procédé**.

Nous avons constaté, dans le chapitre précédent, qu'il est nécessaire de proposer une méthodologie de fabrication des pièces multimatériaux. Dans la première partie de ce chapitre, nous proposerons une méthodologie et montrerons l'**intérêt de la modélisation du procédé** dans le cadre de cette méthodologie.

La **modélisation de la fabrication**, permettant de prévoir la répartition des matériaux dans la pièce, sera détaillée dans la deuxième partie. Nous présenterons également les résultats d'une première étude expérimentale.

Dans la troisième partie, nous mettrons en avant, à l'aide de la modélisation, que la différence entre la répartition des matériaux souhaitée et celle simulée est parfois importante. Nous décrirons également le **dispositif d'optimisation** visant à réduire cette différence.

Un des objectifs de la modélisation est de permettre la comparaison de plusieurs stratégies de fabrication pour choisir la plus appropriée. Nous présenterons, dans la quatrième partie, les **indices de performance** avec lesquels il est possible de classer les différentes stratégies entre elles.

La cinquième partie est consacrée à la **validation expérimentale** des outils de modélisation et d'optimisation présentés dans ce chapitre.

La **synthèse** de ces travaux sera exposée dans une sixième partie.

3.1 Intérêt et objectifs de la modélisation du procédé

3.1.1 Méthodologie de fabrication : du concept à la pièce

Dans le chapitre précédent, nous avons montré l'intérêt de développer une méthodologie qui s'inscrit dans une démarche globale de fabrication de pièces multimatériaux fonctionnelles (Section 2.5). Nous allons, dans un premier temps, présenter les étapes permettant de passer de l'objet imaginé par le concepteur à la fabrication de la pièce (Figure 3.1).

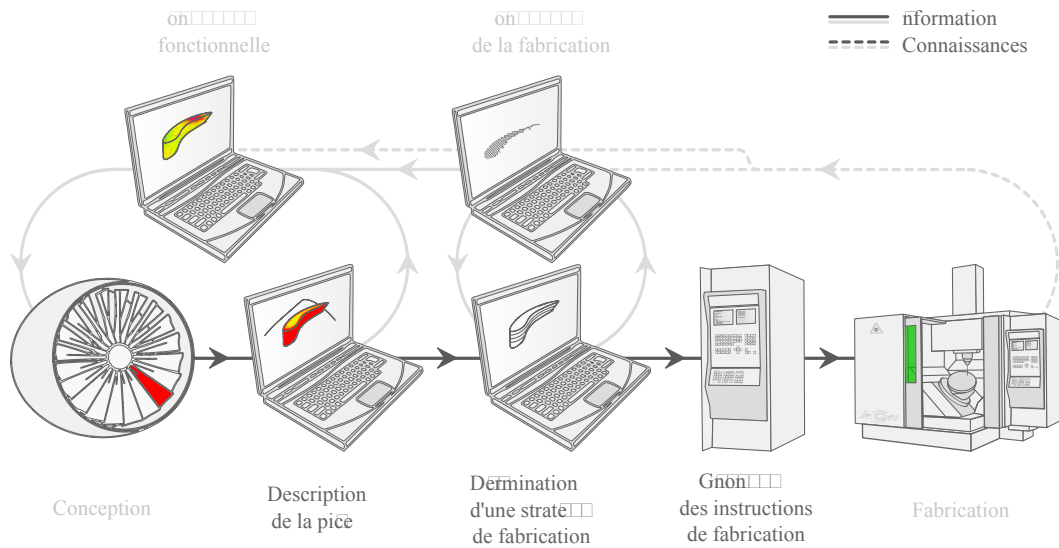


Figure 3.1 – Chaîne numérique : du concept à la pièce

Description de la pièce

L'étape de description de la pièce a pour objectif de décrire avec des données mathématiques l'objet imaginé par le concepteur (Figure 3.2). En sortie de cette étape, il est nécessaire d'avoir une description comprenant les informations sur la géométrie de la pièce et la répartition des matériaux. Ces informations doivent évidemment pouvoir être utilisées dans les étapes suivantes de la méthodologie de fabrication.

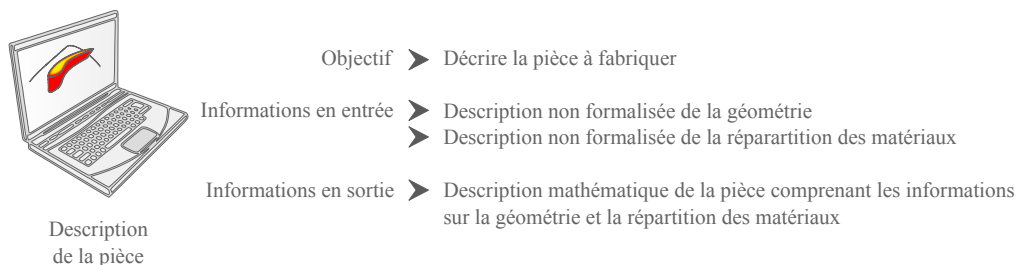


Figure 3.2 – Objectif de l'étape de description de la pièce

Nous avons constaté, en étudiant l'état de l'art, qu'il n'existait pas encore de format de description pour les pièces multimatériaux (Section 2.1). Néanmoins, il existe des modèles mathématiques pour la description des structures hétérogènes. Nous avons donc décidé d'en choisir une existante et de l'inscrire dans la méthodologie globale. La méthode choisie doit proposer une représentation continue de la répartition des matériaux. En effet, nous souhaitons proposer une méthode capable de produire des pièces multimatériaux avec une variation continue de la distribution des matériaux. Cette première caractéristique nous semble donc essentielle.

Parmi les modèles continus existants, nous avons choisi la méthode de description par fonction explicite (Section 2.1). Cette méthode permet de décrire très facilement une répartition des matériaux. Même si elle peut sembler limitée en terme de complexité des distributions des matériaux descriptibles, le fait de l'utiliser dans le cadre d'une méthode composite permet d'augmenter considérablement les possibilités de description. De plus, la détermination du vecteur gradient et des surfaces d'équi-composition - utilisées dans une partie de la méthodologie (Section 4.2) - est très simple avec cette méthode de description.

Ainsi, la géométrie est décrite par un domaine $\mathcal{D}_P \subset R^3$ qui correspond au domaine de l'espace occupé par la pièce (Figure 3.3(a)). La fonction matériau $M^*(x, y, z)$ représente la composition matériau dans le domaine $\mathcal{D}_P$ et correspond à la fraction volumique de matériau A (Figure 3.3(b)) [Mognol2011] :

$$M^*(x, y, z) : \mathcal{D}_P \rightarrow [0; 1] \quad (3.1)$$

Dans le cas où la répartition des matériaux ne peut pas être représentée par une fonction unique, le domaine $\mathcal{D}_P$ peut être décomposé en sous-domaines $\mathcal{D}_{P_i}$:

$$\mathcal{D}_P = \bigcup_i \mathcal{D}_{P_i} \quad (3.2)$$

Dans ce cas, une fonction matériau est associée à chaque sous-domaine. Cette décomposition du domaine permet d'améliorer considérablement la capacité de description de cette méthode.

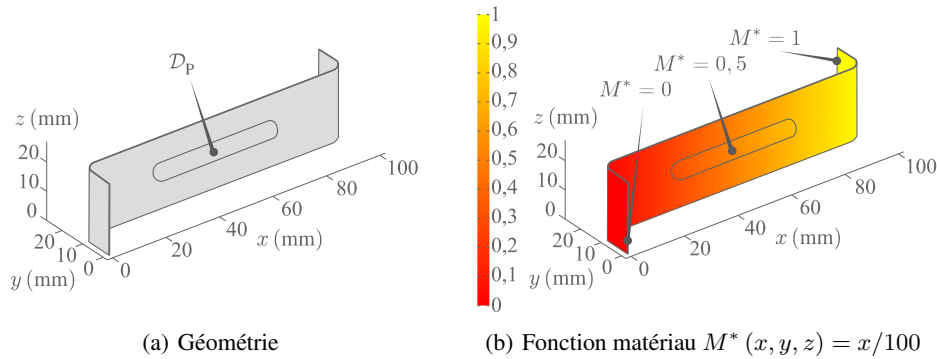


Figure 3.3 – Description d'une pièce multimatériau

Détermination d'une stratégie de fabrication

Le premier objectif de l'étape détermination d'une stratégie de fabrication est de sélectionner une stratégie de fabrication adaptée à la réalisation de la pièce en accord avec le cahier des charges (Figure 3.4). Nous verrons, par la suite, que le choix d'une stratégie détermine les caractéristiques finales de la pièce. Il est donc indispensable que cette étape prenne en compte les spécificités de la pièce et du procédé pour définir quelle stratégie doit être utilisée pour la fabrication.

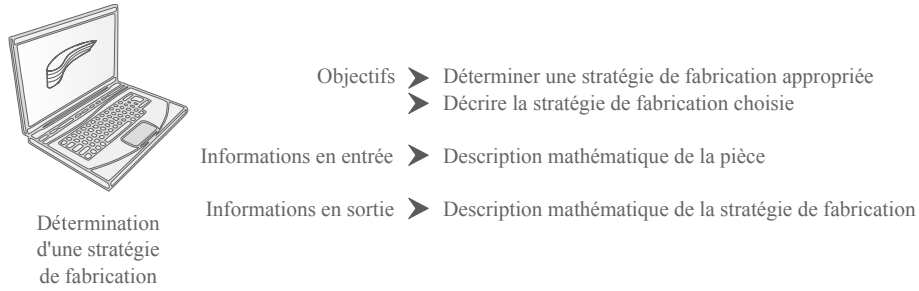


Figure 3.4 – Objectifs de l'étape de détermination d'une stratégie de fabrication

Le second objectif de cette étape est de décrire mathématiquement la stratégie de fabrication choisie pour définir, par la suite, les instructions de fabrication. Nous verrons également que cette description mathématique est nécessaire à la simulation de la fabrication. Nous allons présenter, dans un premier temps, ce volet description.

Les données de description concernent la stratégie de tranchage et la stratégie de trajectoire. Pour ce qui est de la stratégie de tranchage, les données mathématiques dépendent du type de stratégie utilisé (Section 4.2). Ainsi, les stratégies sont décrites en fonction de la géométrie des couches par des plans ou des surfaces [Hascoët2011a].

Les données de description concernant la stratégie de trajectoire décrivent tout d'abord l'évolution de la position des axes de la machine. La trajectoire est décrite par une courbe paramétrique $\mathcal{C}_T(\lambda)$ (Figure 3.5) :

$$\mathcal{C}_T(\lambda) = \begin{cases} x(\lambda) \\ y(\lambda) \\ z(\lambda) \end{cases} \quad (3.3)$$

Le matériau souhaité est ensuite défini pour chaque point de la courbe par la fonction $m^*(\lambda)$ (Figure 3.6). Cette fonction est directement déduite de la fonction matériau $M^*(x, y, z)$:

$$m^*(\lambda) = M^*(x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)) \quad (3.4)$$

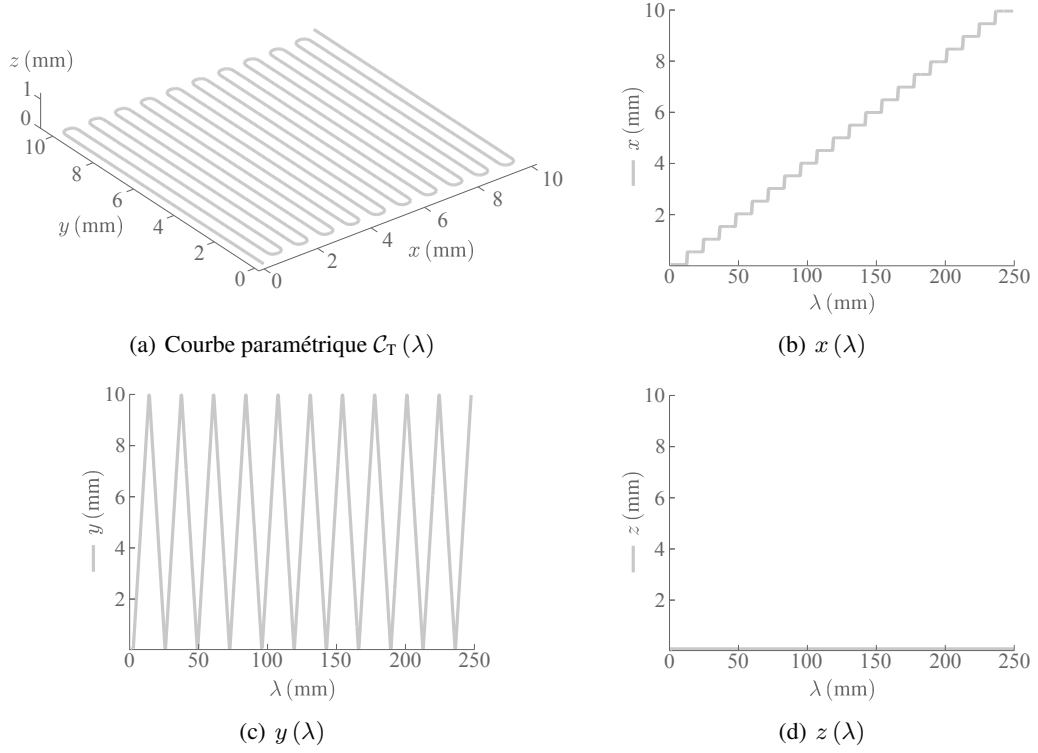


Figure 3.5 – Description d’une trajectoire

L’ajout d’une donnée concernant la répartition des matériaux est primordial puisque nous verrons que la modification de la composition du matériau à déposer est un élément déterminant pour le choix de la stratégie.

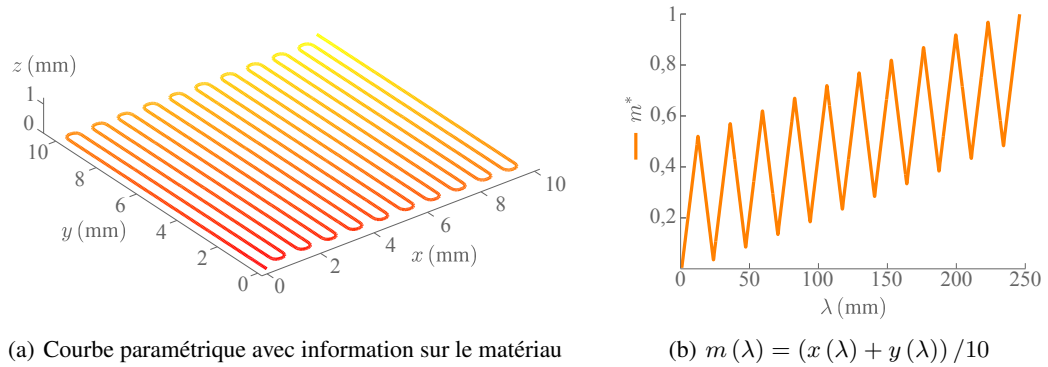


Figure 3.6 – Description d’une trajectoire avec information sur le matériau

Génération des instructions de fabrication

Le procédé est commandé avec des instructions générées à l’aide de la description de la stratégie de fabrication choisie (Figure 3.7). Les principaux paramètres sont la position des axes, la

vitesse d'avance, la puissance du laser, les débits des poudres et les débits de gaz (Annexe A).

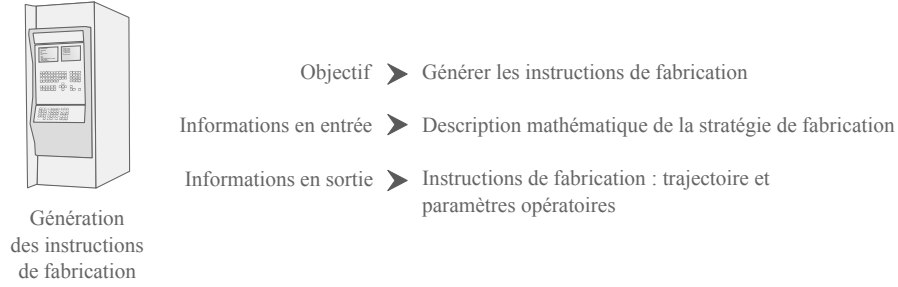


Figure 3.7 – Objectif de l'étape de programmation commande numérique

Les positions des axes sont définies à partir des coordonnées de la trajectoire. La vitesse d'avance et la puissance du laser sont, quant à elles, choisies en fonction des paramètres géométriques souhaités pour le cordon. En effet, nous avons vu, dans le deuxième chapitre de ce manuscrit, que les dimensions d'un cordon sont principalement dépendants de la vitesse d'avance, de la puissance du laser et des débits des poudres (Section 2.3). Lorsque ces deux premiers paramètres sont fixés, on en déduit donc, en théorie, le débit de poudre nécessaire à la formation du cordon $\phi_{\max}$. Ce débit de poudre est, dans le cas de la fabrication d'une pièce multimatériau, le résultat de l'addition des débits des poudres de chaque matériau ϕ_A^* et ϕ_B^* :

$$\phi_A^*(\lambda) + \phi_B^*(\lambda) = \phi_{\max} \quad (3.5)$$

La composition du matériau déposé peut être modifiée en paramétrant les débits des poudres de chaque matériau. Ainsi, sans prendre en compte le fonctionnement réel du procédé, les commandes des débits ϕ_A^* et ϕ_B^* peuvent être définies à partir de la fonction matériau souhaitée :

$$\frac{\phi_A^*(\lambda)}{\phi_A^*(\lambda) + \phi_B^*(\lambda)} = m^*(\lambda) \quad (3.6)$$

Pour satisfaire les dimensions et la composition du cordon déposé, on peut donc définir les commandes des débits le long de la trajectoire de cette manière :

$$\begin{cases} \phi_A^*(\lambda) = m^*(\lambda) \times \phi_{\max} \\ \phi_B^*(\lambda) = (1 - m^*(\lambda)) \times \phi_{\max} \end{cases} \quad (3.7)$$

Synthèse

Les étapes présentées permettent donc de passer de l'objet imaginé par le concepteur à la fabrication de la pièce. La première étape de la méthodologie décrit la pièce multimatériau avec des informations sur la géométrie et la répartition des matériaux. Concernant la description de la distribution des matériaux, l'intégration d'un modèle composite associé à des méthodes de description par fonction explicite permet de décrire simplement des répartitions des matériaux complexes dans les trois directions de l'espace sans discrétisation de celles-ci.

Concernant l'étape de détermination d'une stratégie de fabrication, la description de la stratégie de fabrication a été présentée. Avec le mode de description choisi, les données concernant la trajectoire comportent les informations sur la cinétique du procédé pendant la fabrication ainsi sur le matériau à déposer. A partir de cette description et paramètres opératoires, il est possible de générer les instructions de fabrication.

Désormais, nous allons mettre en avant la nécessité de choisir avec attention la stratégie de fabrication et nous montrerons que ce choix ne peut pas être effectué sans une simulation de la fabrication.

3.1.2 Importance du choix de la stratégie de fabrication

Pourquoi proposer des stratégies de fabrication sans discrétisation de la répartition des matériaux ?

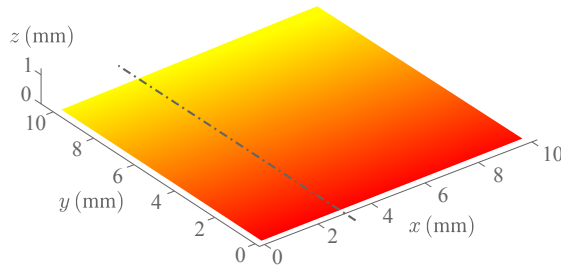
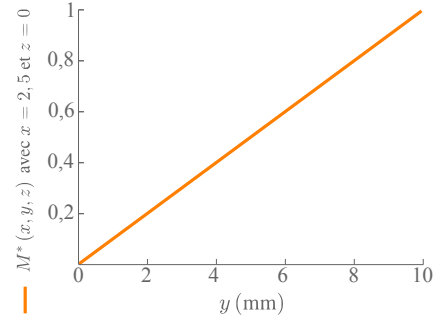
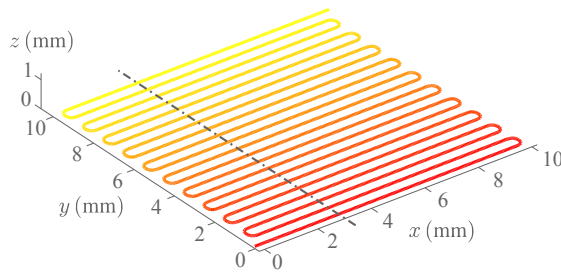
Nous avons constaté, dans le chapitre consacré à l'état de l'art, que la majorité des méthodologies de fabrication des pièces multimatériaux était basée sur la discrétisation de la répartition des matériaux (Section 2.2). Nous souhaitons proposer une méthodologie permettant de conserver au maximum la définition initiale de la répartition des matériaux. Cette contrainte est motivée, d'une part, par l'étude bibliographique et, d'autre part, par les résultats d'études expérimentales que nous avons réalisées. En effet, bien que peu nombreuses, les études sur le sujet montrent expérimentalement qu'il est avantageux d'utiliser une structure FGM, c'est à dire avec une variation continue. Ces études montrent, qu'avec ce type de structure, les interfaces entre les différentes couches ne comportaient pas de fissure. Le dépôt graduel permet de diminuer les contraintes internes, ce qui réduit fortement les risques de fissures par rapport à une variation brutale de la composition [Liu2003, Bandyopadhyay2007]. De plus, nous avons mené une étude comparant le comportement mécanique de structures multimatériaux avec et sans variation graduelle de la composition (Annexe B). Cette étude a permis de mettre en évidence qu'une variation continue de la composition permettait d'augmenter la résistance à la traction.

Influence de la stratégie de fabrication sur la pièce fabriquée à travers un exemple

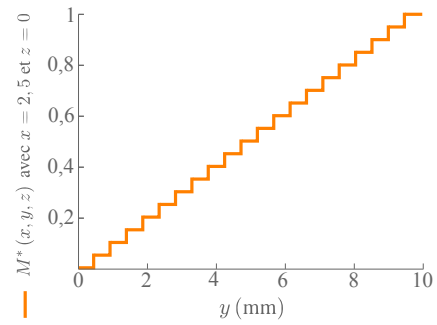
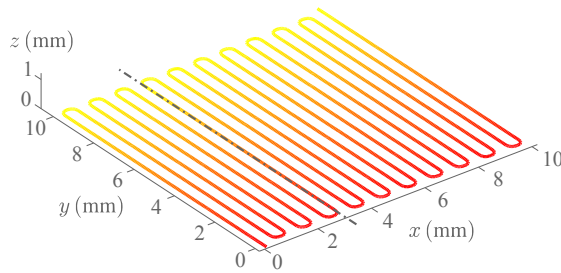
En plus des caractéristiques géométriques, le choix de la stratégie de fabrication est également à prendre en considération pour la composition de la pièce. Pour montrer l'importance de ce choix sur les caractéristiques finales d'une pièce, la fabrication d'une couche multimatériau est présentée avec trois stratégies différentes. La fonction matériau associée à la couche est la suivante :

$$\forall (x, y, z) \in \mathcal{D}_P, M^*(x, y, z) = \frac{y}{10} \quad (3.8)$$

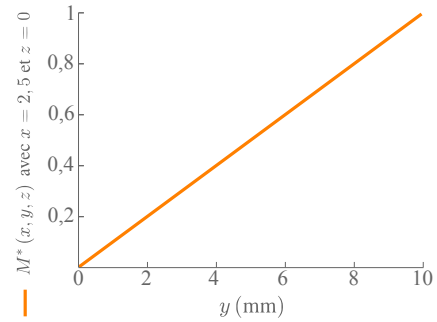
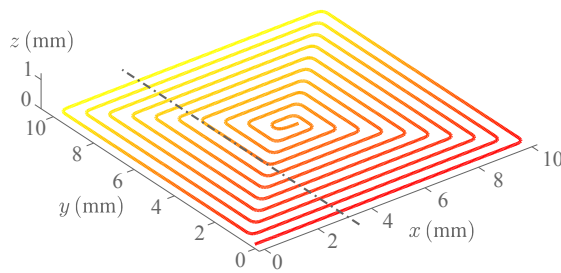
La couche considérée est celle définie dans le plan $z = 0$ (Figure 3.8(a)). Les deux premières stratégies de trajectoire étudiées sont du type balayage (Figure 3.8(c,e)) tandis que la troisième est du type spiral (Figure 3.8(g)). La direction de balayage de la première stratégie est perpendiculaire à celle de la deuxième stratégie. Les trois stratégies sont continues.

(a) Fonction matériau dans le plan $z = 0$ (b) $M^*(x, y, z)$ avec $x = 2,5$ et $z = 0$ 

(c) Première stratégie de trajectoire

(d) $M^*(x, y, z)$ avec $x = 2,5$ et $z = 0$ 

(e) Deuxième stratégie de trajectoire

(f) $M^*(x, y, z)$ avec $x = 2,5$ et $z = 0$ 

(g) Troisième stratégie de trajectoire

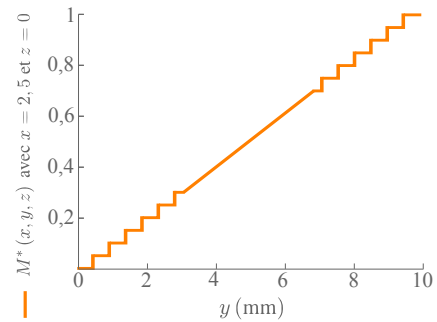
(h) $M^*(x, y, z)$ avec $x = 2,5$ et $z = 0$

Figure 3.8 – Discretisation de la fonction matériau en fonction de la trajectoire

La première observation qui peut être réalisée concerne la différence qu'il existe dans la discrétisation de la fonction matériau par la trajectoire. En effet, on peut considérer que la répartition des matériaux dans une couche est fonction du matériau de chaque cordon de matière déposé les uns à côté des autres. Si on fait l'hypothèse que la composition du matériau est homogène dans la section du cordon et qu'il n'y a ni mélange, ni diffusion de composant à l'interface entre deux cordons, on peut voir que la fonction matériau est discrétisée par la trajectoire. Cette discrétisation diffère en fonction de la stratégie de trajectoire choisie. Ainsi, dans l'exemple, les trois stratégies de trajectoire ne discrétisent pas la fonction matériau de la même façon. Si l'on étudie l'évolution de la fonction matériau le long d'une droite d'équation ($x = 2.5$ et $z = 0$) (Figure 3.8(b)), on constate que la fonction matériau résultante de l'association des cordons est différente (Figure 3.8(d,f,h)). Une observation similaire a été faite par Wang et al. concernant la fabrication de structures multimatériaux avec un procédé de projection plasma [Wang2007, Wang2008].

La seconde observation conserve la variation de la fonction $m^*(\lambda)$ en fonction des différentes stratégies. L'évolution de cette fonction correspond à une variation des débits des poudres. On constate que l'évolution est très différente selon la stratégie choisie (Figure 3.9). Les commandes de changement des débits de poudres seront donc également très différentes. Étant donné l'inertie

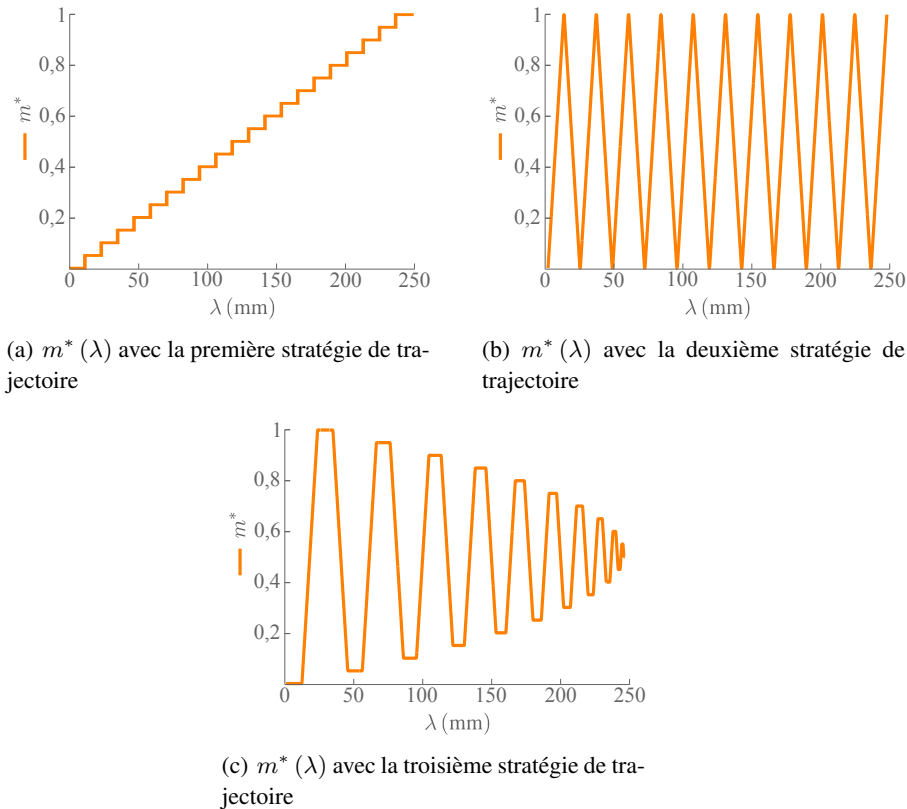


Figure 3.9 – Évolution de la fonction $m^*(\lambda)$ en fonction de la trajectoire

tie dans le comportement du système de distribution observée - que ce soit expérimentalement ou en étudiant l'état de l'art [Morvan2001, Shin2003, Xu2005, Tang2007] - on peut penser qu'une évolution lente de la fonction $m^*(\lambda)$ est à privilégier par rapport à une variation rapide.

Des observations similaires peuvent être faites concernant la stratégie de tranchage. Sur le même exemple, si l'on considère une fabrication avec des couches planes et uniformes, le choix de l'orientation modifie fortement la fonction matériau dans chaque couche (Figure 3.10). La discrétisation réalisée par le tranchage est donc différente en fonction de la stratégie choisie. De plus, étant donné que la fonction matériau dans chaque couche varie en fonction de l'orientation des couches, l'évolution de la fonction $m^*(\lambda)$ sera forcément différente.

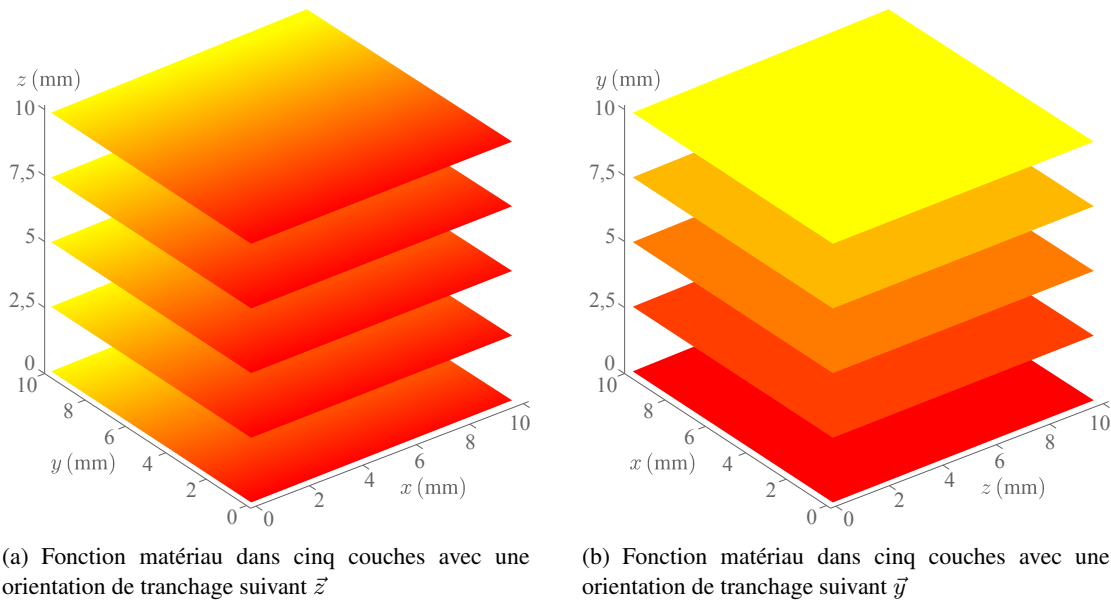


Figure 3.10 – Fonction matériau en fonction de l'orientation de tranchage

Synthèse

Nous avons vu, à l'aide d'un exemple, que l'influence de la stratégie de fabrication peut être importante sur la répartition des matériaux de la pièce fabriquée. Effectivement, la stratégie sélectionnée détermine, d'une part, la discrétisation de la fonction matériau $M^*(x, y, z)$ et, d'autre part, l'évolution de la fonction $m^*(\lambda)$. Cette évolution correspond à l'évolution des commandes de changement des débits de poudre qu'il faut prendre en compte à cause de l'inertie dans le comportement du système. Pour ces raisons, il est nécessaire de choisir avec attention la stratégie de fabrication. De plus, il est primordial de qualifier les différentes stratégies pour savoir quelle stratégie est la plus appropriée pour fabriquer une pièce multimatériau. Cette qualification des stratégies de fabrication n'est envisageable qu'avec une modélisation du procédé.

3.1.3 Objectifs de la modélisation du procédé

On constate que la méthodologie de fabrication présentée permet de fabriquer une pièce multimatériau à partir de l'objet imaginé par le concepteur. Néanmoins, sans outil complémentaire permettant de choisir une stratégie de fabrication appropriée, il semble compliqué de réaliser une pièce dans de bonnes conditions. En effet, les différents phénomènes qui peuvent induire des erreurs dans la répartition des matériaux doivent être modélisés pour pouvoir qualifier la capacité du procédé associé à une stratégie de fabrication à réaliser une pièce multimatériau (Figure 3.11).

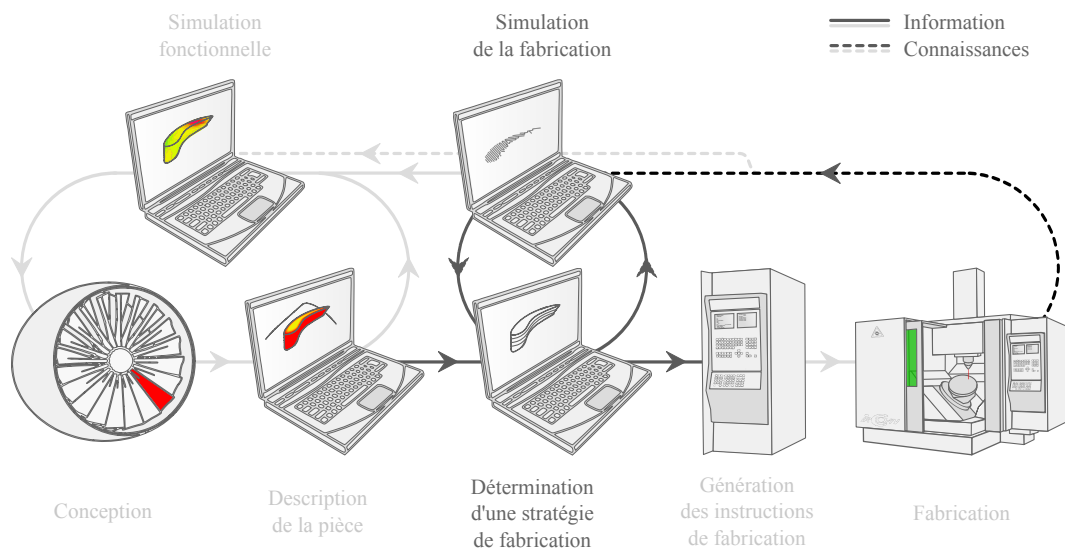


Figure 3.11 – Chaîne numérique : boucle d'optimisation de la stratégie de fabrication

Les outils de simulation doivent donc être capables, d'une part, de prévoir le comportement du procédé durant la fabrication de la pièce. Cela permettra d'avoir une prévision de la répartition des matériaux dans la pièce fabriquée. D'autre part, ils doivent permettre la comparaison de plusieurs stratégies de fabrication pour que la stratégie la plus appropriée soit choisie pour la génération des instructions de fabrication (Figure 3.12).

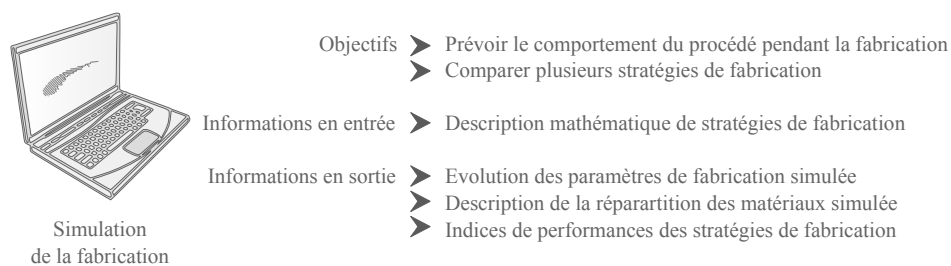


Figure 3.12 – Objectifs de l'étape de génération des instructions de fabrication

3.2 Modélisation du procédé

3.2.1 Modélisation de la pièce fabriquée

La simulation a pour principal objectif de prévoir la répartition des matériaux de la pièce fabriquée. La principale donnée de sortie est donc la fonction matériau simulée. Nous décidons, pour ce modèle, de nous concentrer sur le fonctionnement du procédé. Ainsi, pour le calcul de la fonction matériau, nous ne prenons pas en compte, dans un premier temps, certains phénomènes physiques intervenant au cours de la fabrication. Ainsi, le couplage des phénomènes mécaniques et thermiques pouvant entraîner une déformation de la pièce, le couplage des phénomènes thermiques et métallurgiques pouvant entraîner une diffusion des composants et le couplage des phénomènes métallurgiques et mécaniques des fluides pouvant entraîner un mélange des composants ne sont pas pris en compte. Nous considérons, en effet, que ces phénomènes pourront être pris en compte pour l'amélioration du modèle de détermination de la répartition des matériaux mais que la modélisation du procédé en lui-même est une étape prioritaire dans la modélisation de la fabrication.

Avec ces hypothèses, nous considérons que la section d'un cordon de matière est homogène. Ainsi, nous définissons la fonction matériau simulée par :

$$\forall (x, y, z) \in \mathcal{D}_P, M(x, y, z) = m(\tilde{\lambda}) \quad (3.9)$$

Avec le paramètre $\tilde{\lambda}$ défini tel que :

$$\left[(x - x(\tilde{\lambda}))^2 + (y - y(\tilde{\lambda}))^2 + (z - z(\tilde{\lambda}))^2 \right] = \min_{\lambda} \left[(x - x(\lambda))^2 + (y - y(\lambda))^2 + (z - z(\lambda))^2 \right] \quad (3.10)$$

Ainsi, pour un point considéré, la fonction matériau $M(x, y, z)$ est égale à la fonction matériau $m(\lambda)$ du point appartenant à la trajectoire et le plus proche du point considéré (Figure 2.8).

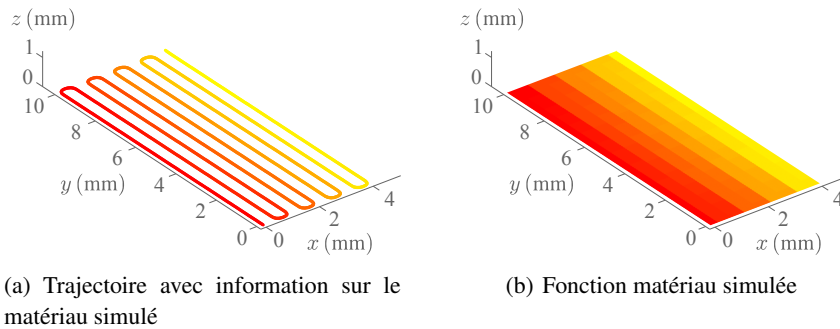


Figure 3.13 – Modélisation de la fonction matériau dans la pièce fabriquée

Pour connaître la répartition des matériaux, il est donc nécessaire de modéliser la fonction $m(\lambda)$. Cette fonction correspond à la composition du matériau dans la section de chaque cordon déposé.

3.2.2 Modélisation des cordons de matière

Concernant la modélisation des cordons de matière, on fait l'hypothèse que la géométrie du cordon est celle attendue. Cette hypothèse sous entend, tout d'abord, que la trajectoire suivie par la tête de projection est exactement celle définie par la courbe $\mathcal{C}_T(\lambda)$ et, ensuite, que les dimensions du cordon sont exactement celles choisies. La composition du matériau dans la section du cordon est décrite par la fonction $m(\lambda)$. La composition du matériau dépend de la quantité de chaque poudre délivrée au point considéré. Pour déterminer cette fonction matériau, nous considérons que les caractéristiques des poudres utilisées sont équivalentes. Ainsi, nous prenons l'hypothèse que le rapport entre les débits des poudres A et B dans le cône de poudre en sortie de la tête de projection est similaire au rapport entre les quantités des poudres A et B dans la section du cordon :

$$m(\lambda) = \frac{\phi_A(\lambda)}{\phi_A(\lambda) + \phi_B(\lambda)} \quad (3.11)$$

La détermination de la fonction matériau $m(\lambda)$ repose donc sur la modélisation du fonctionnement du procédé et plus particulièrement sur la modélisation du fonctionnement des systèmes de distribution des poudres [Muller2013c].

3.2.3 Modélisation du fonctionnement du procédé

Objectif de l'étude

Le système de distribution des poudres est composé de deux réservoirs de poudres contenant respectivement la poudre A et la poudre B. La tête de dépôt est alimentée en poudre par des tuyaux, eux-mêmes alimentés par les réservoirs. La gestion des débits des poudres est réalisée en contrôlant la vitesse de rotation des plateaux de distribution (Figure 3.14).

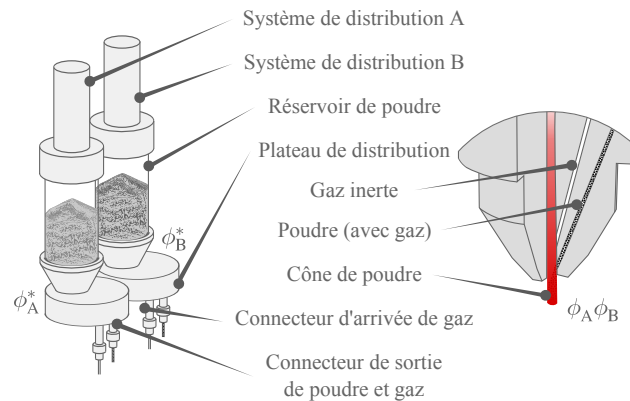


Figure 3.14 – Fonctionnement du procédé : débits de poudres

La modélisation de ce système est motivée par une inertie importante dans le comportement du système de distribution. L'objectif de cette modélisation est donc de comprendre la relation qui existe entre les commandes de débits $\phi_A^*(t)$ et $\phi_B^*(t)$ et les débits de poudre en sortie de la tête de dépôt $\phi_A(t)$ et $\phi_B(t)$.

Procédure expérimentale

Une étude expérimentale a été mise en place pour modéliser le fonctionnement de ce système de distribution. Cette étude a été réalisée avec le procédé CLAD® (Annexe A). Pour comparer la commande de débit et le débit de poudre en sortie, des cordons de matière (Figure 3.15(a)) ont été déposés avec différentes lois de commande de débit de poudre $\phi_A^*(t)$ (Figure 3.15(b)) puis les profils de hauteur de ces cordons ont été mesurés. Le débit de poudre $\phi_B^*(t)$ étant nul pendant toute la durée de l'expérimentation, la hauteur du cordon dépend uniquement du débit de poudre A en sortie de la tête de dépôt. La hauteur des cordons de matière a été mesurée à l'aide d'un système de mesure optique de surface trois dimensions. La hauteur est mesurée tous les 0,02 mm (Figure 3.15(c)). Une moyenne mobile des résultats a été calculée sur des ensembles de deux cents points (Figure 3.15(d)). Elle permet d'atténuer les variations de hauteur dues aux irrégularités du cordon. Pour en déduire une loi de comportement temporelle, le profil de hauteur est transposé dans le domaine temporel en prenant l'hypothèse que le dépôt de matière est réalisé à vitesse constante.

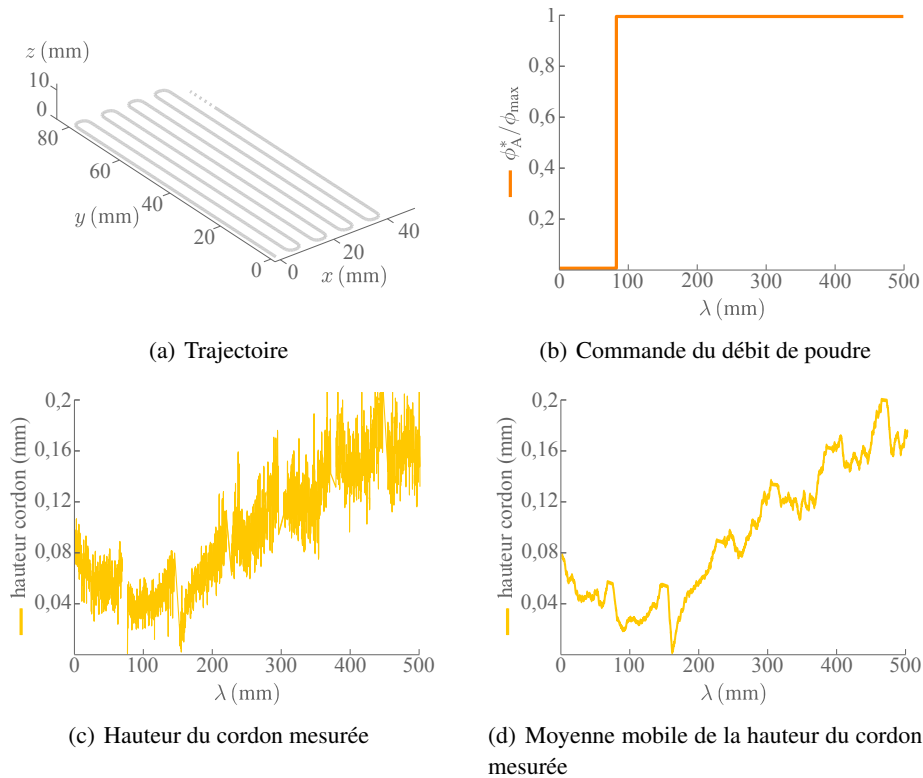
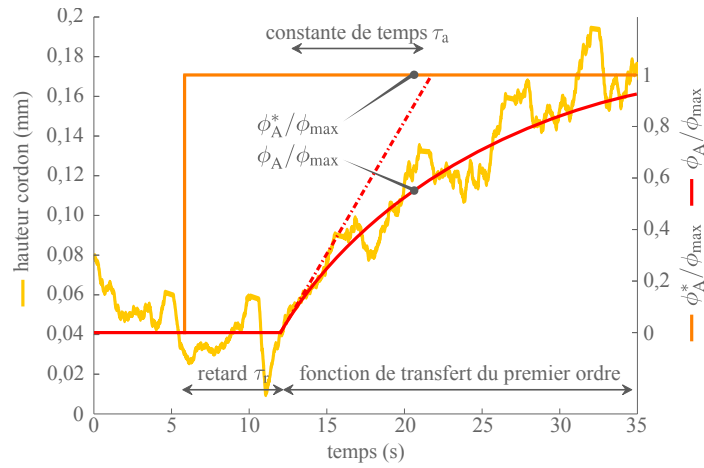


Figure 3.15 – Procédure expérimentale pour la modélisation du procédé

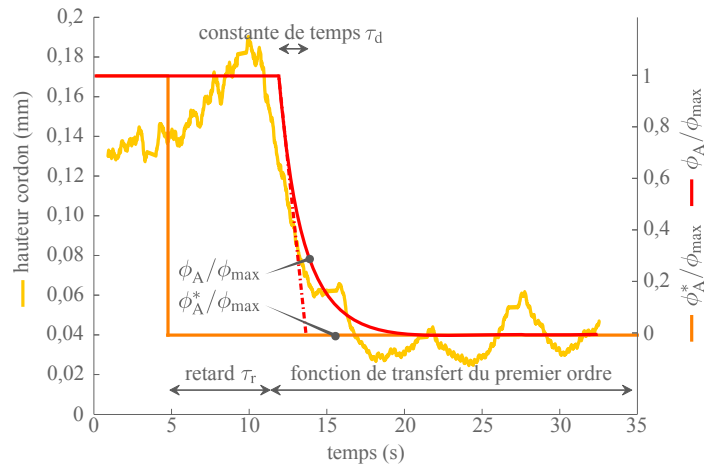
Résultats

Le premier profil obtenu a été généré avec une loi de commande de type échelon. Le dépôt débute avec une commande de débit de poudre nul. La valeur maximale de l'échelon est définie pour obtenir, en régime établi, la formation d'un cordon, c'est-à-dire $\phi_A^* = \phi_{\max}$ (Figure 3.15(b)). A partir de la mesure de ce premier essai, un modèle de fonctionnement peut être établi. Ce modèle est composé d'un retard pur de durée $\tau_r = 6,2$ s et d'un modèle de système du premier ordre avec une constante de temps $\tau_a = 10$ s (Figure 3.16(a)) :

$$\tau_a \times \frac{d\phi_A(t)}{dt} + \phi_A(t) = \phi_A^*(t - \tau_r) \quad (3.12)$$



(a) Comportement en phase d'augmentation de débit



(b) Comportement en phase de diminution du débit

Figure 3.16 – Comportement dynamique du système : fonctions de transfert

Le retard pur peut être expliqué par le transfert de la poudre dans les tuyaux. Le modèle d'un système du premier ordre, quant à lui, peut être considéré comme la conséquence de l'inertie dans le comportement de l'ensemble moteur et plateau de distribution.

Le second profil obtenu a été généré avec une loi de commande de type échelon opposé à celui utilisé pour le premier profil. A partir de la mesure de ce second essai, un modèle de fonctionnement similaire au premier essai peut être établi. Ce modèle est composé d'un retard pur de durée $\tau_r = 6,2$ s et d'un modèle de système du premier ordre avec, pour cet essai, une constante de temps $\tau_d = 2$ s (Figure 3.16(b)).

$$\tau_d \times \frac{d\phi_A(t)}{dt} + \phi_A(t) = \phi_A^*(t - \tau_r) \quad (3.13)$$

Le retard pur, imputable au transfert de la poudre dans les tuyaux, est de durée similaire à celui déterminé avec le premier essai. La constante de temps du modèle du premier ordre est, par contre, différente. On peut l'expliquer car le comportement de l'ensemble moteur et plateau de distribution n'est pas identique en phase d'augmentation ou de diminution du débit.

Ces deux modèles sont utilisés pour représenter le fonctionnement des systèmes de distribution des poudres. Le premier modèle est utilisé lors de l'accélération du plateau tandis que le second est utilisé lors de la décélération du plateau. Les comportements des systèmes de distribution A et B sont considérés équivalents. La modélisation du comportement des systèmes de distribution des poudres permet de prévoir la composition des cordons de matière déposés. Avec les différentes hypothèses définies, il est donc possible d'obtenir la répartition des matériaux simulée dans le domaine représentatif de la pièce.

3.2.4 Simulation et analyse de la fabrication d'une pièce multimatériel

Objectif

L'objectif de la fabrication de cette pièce multimatériel est de réaliser une première validation de la modélisation. Pour cela, la simulation de la fabrication a été réalisée avec le modèle mis en place. La pièce a été fabriquée et la répartition des matériaux analysée [Muller2013a].

La pièce fabriquée est un mur multimatériel - hauteur de 15 mm, longueur de 90 mm et épaisseur 0,8 mm correspondant à l'épaisseur d'un cordon - avec une variation continue de la composition. Le premier matériau primaire - prédominant dans la partie supérieure du mur - est un alliage base chrome-cobalt Stellite 6, désigné matériau A (Tableau 3.1). Le second matériau primaire est un acier inoxydable 316L, désigné matériau B (Tableau 3.1).

Matériau	C	Co	Cr	Fe	Mn	Mo	Ni	Si	W
Stellite 6 (A)	1,2	60	29	2	-	-	2	1	4,8
316L (B)	0,03	-	17	64	2	3	12	1	-

Tableau 3.1 – Composition chimique des matériaux primaires Stellite 6 et 316L (% massique)

Simulation de la fabrication

Tout d'abord, le domaine $\mathcal{D}_P$ correspondant à la géométrie est décrit ainsi que la fonction matériau $M^*(x, y, z)$ associée (Figure 3.17(a)) :

$$\forall (x, y, z) \in \mathcal{D}_P, M^*(x, y, z) = \begin{cases} 0 & \text{si } z \leq 1 \\ \frac{z - 14}{13} & \text{si } 1 < z \leq 13 \\ 1 & \text{si } 14 < z \end{cases} \quad (3.14)$$

La stratégie de fabrication utilisée est décrite par une courbe paramétrique étant donné que la tête de dépôt est déplacée le long de la pièce avec un mouvement d'aller-retour (Figure 3.17(b)). Un seul passage de la tête de dépôt étant nécessaire par couche puisque l'épaisseur de la pièce est équivalente à l'épaisseur d'un cordon.

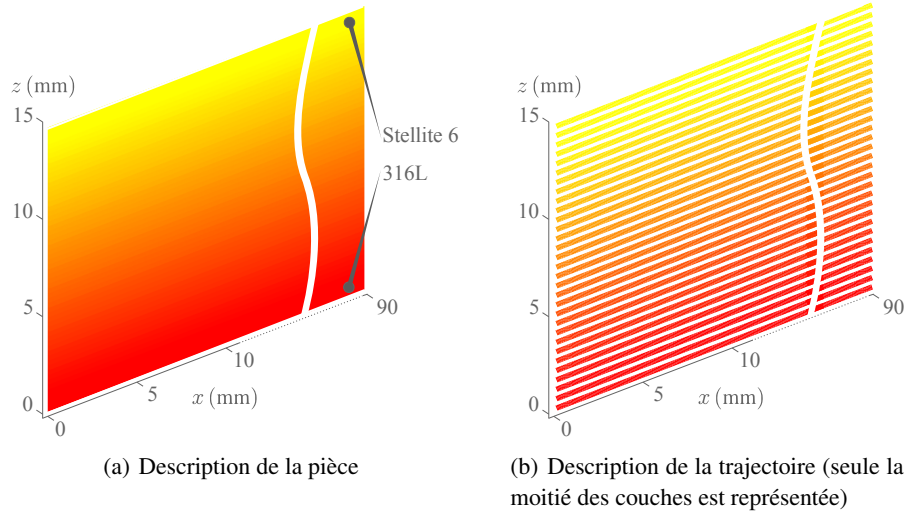


Figure 3.17 – Description de la pièce et de la trajectoire

La fonction matériau souhaitée $m^*(\lambda)$ au cours de la fabrication est déduite de la description de la trajectoire et de la fonction matériau $M^*(x, y, z)$ (Figure 3.18(c)). A partir de la fonction matériau $m^*(\lambda)$ ainsi que la vitesse choisie pour la fabrication - $900 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ - il est possible de décrire temporellement les lois de commandes des débits $\phi_A^*(t)$ et $\phi_B^*(t)$ (Figure 3.18(a,b)). Le modèle de fonctionnement des systèmes de distribution de poudre en phase d'accélération (Équation 3.12) est utilisé pour simuler le débit de poudre du matériau A en sortie de tête de dépôt (Figure 3.18(a)). Le modèle de fonctionnement des systèmes de distribution de poudre en phase de décélération (Équation 3.13) est utilisé pour simuler le débit de poudre du matériau B en sortie de tête de dépôt (Figure 3.18(b)). On en déduit la fonction matériau simulée $m(\lambda)$. Cette fonction matériau doit représenter la composition du cordon de matière déposé. On peut noter, dans ce cas, que la différence entre la fonction matériau souhaitée et celle simulée - d'environ 5 % tout le long du cordon - est majoritairement due à la partie retard pur du modèle. En

effet, la variation des débits étant progressive et assez lente, l'inertie des systèmes de distribution de poudre a peu d'influence.

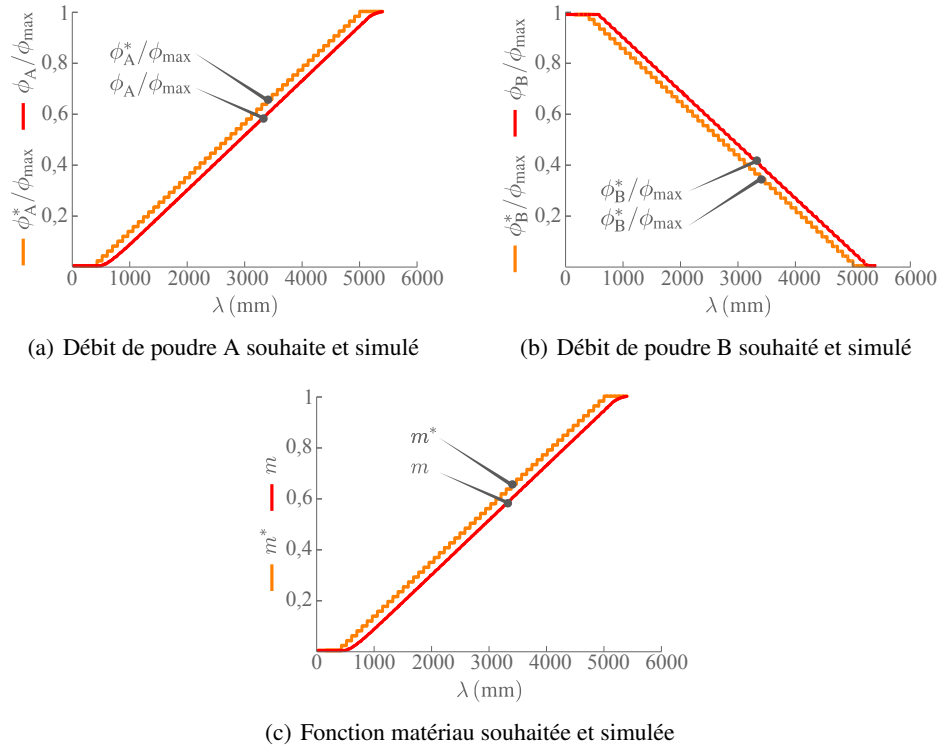


Figure 3.18 – Simulation de la fabrication

Analyse de la fabrication

La caractéristiques géométriques et la composition de la structure fabriquée ont été analysées (Figure 3.19). La structure a été découpée et polie (Figure 3.20). La composition a été analysée suivant la hauteur du mur à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) équipé d'une sonde d'analyse par dispersion de l'énergie. L'analyse semi-quantitative a été réalisée tous les 0,5 mm sur les éléments présents dans les deux matériaux primaires (Tableau 3.1). La distribution des matériaux est déterminée par rapport à la présence de quatre composants - chrome,

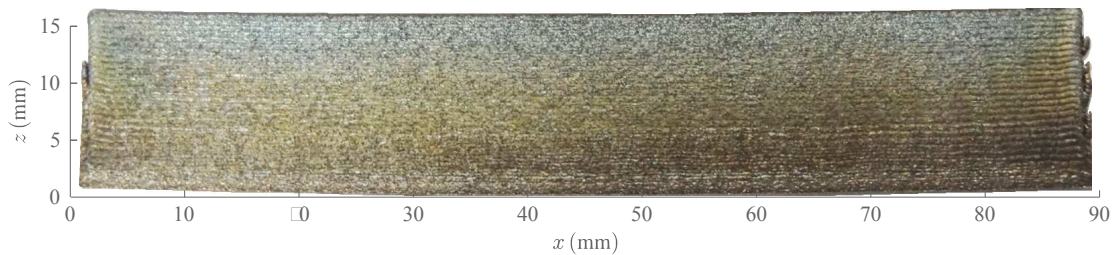


Figure 3.19 – Analyse de la géométrie de la pièce fabriquée

cobalt, fer et nickel - représentatifs des deux matériaux primaires.

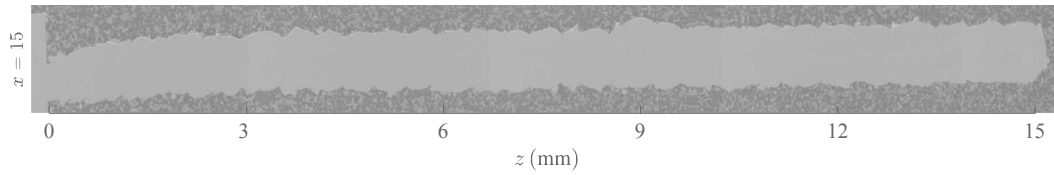


Figure 3.20 – Coupe de la pièce fabriquée

La structure des pièces fabriquées ne présentait ni pore ni fissure visible. On remarque, concernant la géométrie, une déformation de la structure à cause des phénomènes thermiques (Figure 3.19). Les résultats de cette analyse MEB ont été comparés aux résultats de la simulation. On peut considérer qu'il y a une bonne corrélation entre la fonction matériau simulée et la fonction matériau mesurée au travers de la concentration volumique de Stellite 6 (Figure 3.21). En effet, la fonction matériau mesurée augmente progressivement de manière similaire à la fonction simulée. On peut tout de même noter que la différence entre les deux fonctions a une légère tendance à augmenter dans la partie supérieure du mur tout en restant inférieure à 0,1.

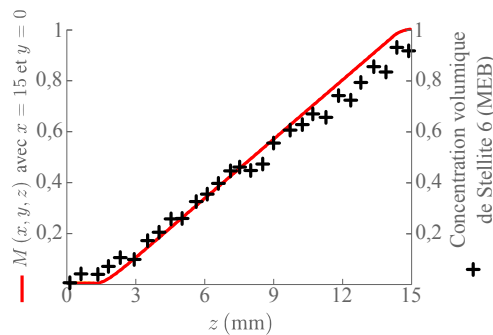


Figure 3.21 – Analyse de la composition de la pièce fabriquée

Conclusion

Les pièces multimatériaux ont été fabriquées avec une variation continue de la répartition des matériaux. La fonction matériau mesurée est très proche de la fonction matériau simulée. En effet, pour l'ensemble des points de mesure, la concentration volumique de Stellite 6 - représentant la fonction matériau mesurée - présente des valeurs similaires à la fonction matériau simulée. Avec ces résultats, nous avons donc une première validation de la modélisation du procédé.

3.3 Optimisation du procédé

3.3.1 Intérêt de l'optimisation du procédé

Nous avons constaté, précédemment, que malgré le choix d'une stratégie appropriée, il est possible d'observer une différence entre la fonction matériau souhaitée et la fonction matériau simulée (Section 3.2).

Pour fabriquer une pièce en accord avec le cahier des charges, il est nécessaire qu'au cours de la fabrication, la composition du mélange des poudres déposées corresponde à la fonction matériau souhaitée. Cette condition se traduit par :

$$m(\lambda) = m^*(\lambda) \Leftrightarrow \frac{\phi_A(\lambda)}{\phi_A(\lambda) + \phi_B(\lambda)} = \frac{\phi_A^*(\lambda)}{\phi_A^*(\lambda) + \phi_B^*(\lambda)} \quad (3.15)$$

De plus, il est nécessaire que la géométrie du cordon possède les dimensions attendues. En prenant l'hypothèse que la vitesse de dépôt et que les paramètres du laser sont ceux spécifiés, cette condition se traduit au niveau des débits des poudres par :

$$\phi_A(\lambda) + \phi_B(\lambda) = \phi_{\max} \quad (3.16)$$

Les deux conditions définies pour obtenir, d'une part, la répartition des matériaux souhaitée et, d'autre part, la géométrie du cordon souhaitée sont équivalentes à ces conditions :

$$\begin{cases} \phi_A(\lambda) = \phi_A^*(\lambda) \\ \phi_B(\lambda) = \phi_B^*(\lambda) \end{cases} \quad (3.17)$$

Au regard du comportement des systèmes de distributions des poudres, ces dernières conditions peuvent, dans certains cas, ne pas être satisfaites. Il semble donc intéressant de mettre en place une optimisation du procédé permettant, une fois une stratégie adaptée choisie, d'assurer la fabrication en accord avec le cahier des charges. Nous proposons de réaliser l'optimisation des commandes des débits à travers un dispositif de correction prédictif, c'est-à-dire que les commandes sont optimisées avant la fabrication.

3.3.2 Mise en place du dispositif d'optimisation à travers un exemple

Pour illustrer la mise en place de ce dispositif, la simulation de la fabrication d'une pièce est présentée sans puis avec ce dispositif. Cette pièce est un mur multimatériau - hauteur de 15 mm, longueur de 15 mm et épaisseur 0,8 mm correspondant à l'épaisseur d'un cordon - avec une variation continue de la composition (Figure 3.22(a)). La fonction matériau $M^*(x, y, z)$ associée est définie par :

$$\forall (x, y, z) \in \mathcal{D}_P, M^*(x, y, z) = \begin{cases} 1 & \text{si } z \leq 1 \\ \frac{14 - z}{13} & \text{si } 1 < z \leq 13 \\ 0 & \text{si } 14 < z \end{cases} \quad (3.18)$$

La stratégie de fabrication utilisée est décrite par une courbe paramétrique, la tête de dépôt est déplacée le long de la pièce avec un mouvement d'aller-retour (Figure 3.22(b)).

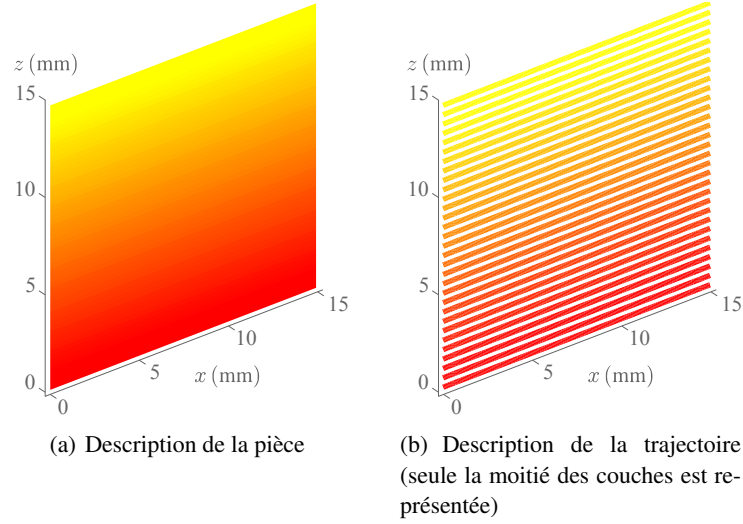


Figure 3.22 – Description de la pièce et de la trajectoire

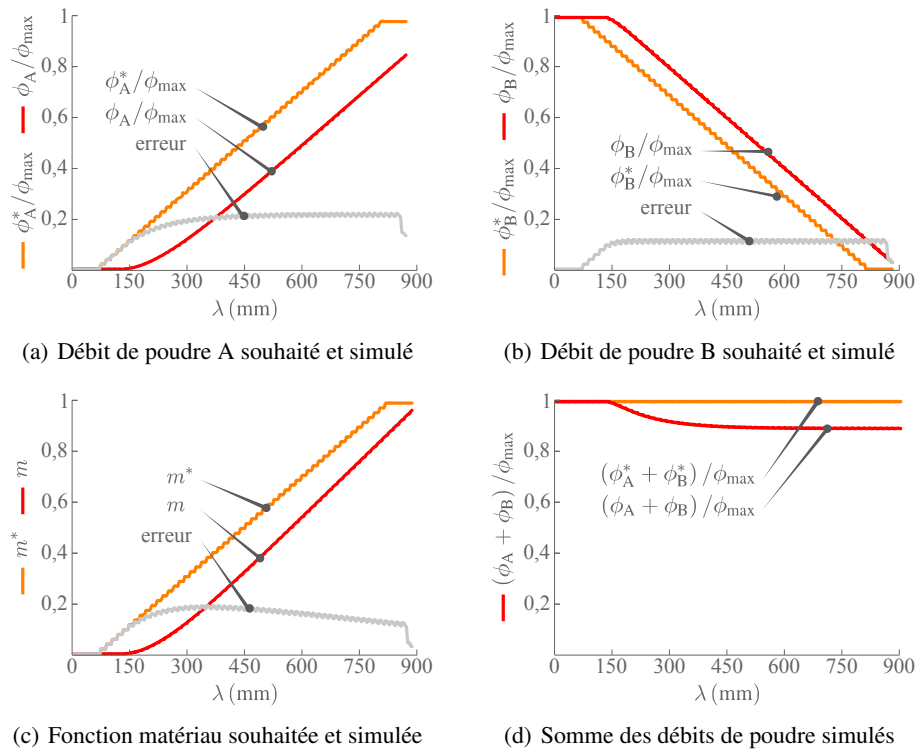


Figure 3.23 – Simulation de la fabrication

A partir de la fonction matériau $m^*(\lambda)$ ainsi que la vitesse choisie pour la fabrication - $900 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ - il est possible de décrire temporellement les lois de commandes des débits $\phi_A^*(t)$ et $\phi_B^*(t)$. Les modèles de fonctionnement des systèmes de distribution sont utilisés pour simuler les débits de poudres (Figure 3.23(a,b)). On en déduit la fonction matériau simulée $m(\lambda)$ (Figure 3.23(c)) ainsi que la somme des débits en sortie de tête de dépôt (Figure 3.23(d)). On peut constater une différence des résultats de simulation avec le mur exposé précédemment (Section 3.2). Cette différence s'explique par une longueur du mur moins importante modifiant, ainsi, la vitesse de changement des débits des poudres. On constate, dans ce cas, que sans l'utilisation d'un dispositif d'optimisation, la pièce ne peut pas être fabriquée dans de bonnes conditions. En effet, d'une part, la différence entre la fonction matériau simulée et la fonction matériau souhaitée est d'environ 0,2 pendant toute la fabrication. D'autre part, la somme des débits est nettement inférieure à la valeur souhaitée $\phi_{\max}$. Dans ce cas, la fabrication sans optimisation présente donc un problème en ce qui concerne la répartition des matériaux et la géométrie du cordon. Nous allons donc voir, par la suite, l'apport du dispositif d'optimisation pour la fabrication de cette pièce.

Le premier outil du dispositif d'optimisation concerne la compensation du retard due aux transferts des poudres dans les tuyaux. Nous avons constaté, lors de la modélisation du fonctionnement des systèmes de distribution de poudre, qu'une partie des modèles est constituée par un retard pur $\tau_r = 6,2 \text{ s}$. Cet outil contribue donc à compenser son retard en avançant temporel-

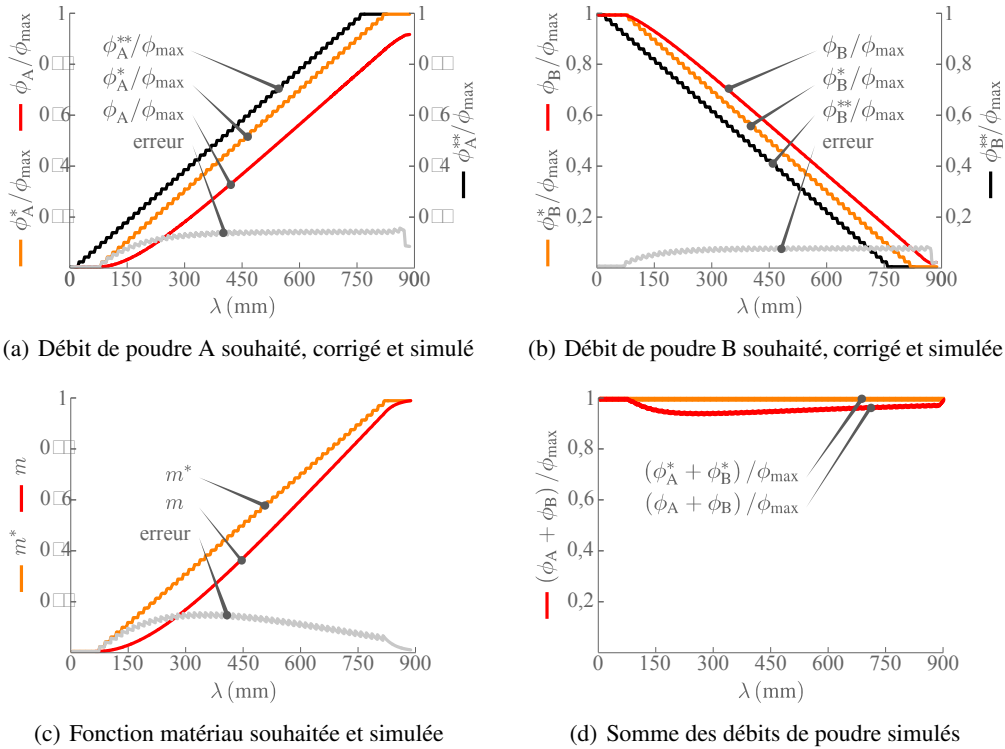


Figure 3.24 – Simulation de la fabrication avec compensation du retard

lement les commandes des débits d'une valeur τ_r . Ainsi, les commandes optimisées des débits $\phi_A^{**}(t)$ et $\phi_B^{**}(t)$ sont définies par :

$$\begin{cases} \phi_A^{**}(t) = \phi_A^*(t + \tau_r) \\ \phi_B^{**}(t) = \phi_B^*(t + \tau_r) \end{cases} \quad (3.19)$$

Concernant l'exemple traité, les commandes des débits sont donc avancées temporellement (Figure 3.24(a,b)). Cette opération est possible car l'optimisation des commandes est réalisée avant la génération des instructions de fabrication avec la connaissance du profil des commandes sur la durée complète de fabrication. Cela permet donc de supprimer une partie de la différence qu'il existe entre la fonction matériau souhaitée et la fonction matériau simulée (Figure 3.24(c)). Cette compensation permet également de rapprocher la somme des débits de la valeur souhaitée pour fabriquer un cordon de matière avec les paramètres choisis (Figure 3.24(d)). On remarque tout de même, que ce soit pour la fonction matériau ou la somme des débits, que l'erreur existante entre les valeurs souhaitées et les valeurs simulées est encore assez importante. Pour réduire cette erreur, le dispositif d'optimisation est complété.

La seconde optimisation est un asservissement prédictif des systèmes de distribution des poudres. Cet outil est basé sur un bouclage virtuel du système (Figure 3.25). La boucle d'asservissement contient un correcteur ainsi que les modèles de fonctionnement des systèmes de distribution de poudre. Ainsi, pour la commande de débit de la poudre A, le signal d'entrée - c'est-à-dire la commande avec décalage temporel $\phi_A^*(t + \tau_r)$ - est comparé au débit de poudre A simulé ϕ_A . Pour obtenir la valeur du débit de poudre A simulé, la commande issue du correcteur $\phi_A^{**}(t)$ est appliquée aux modèles de fonctionnement du système de distribution de la poudre A. Finalement, ce sont les commandes optimisées $\phi_A^{**}(t)$ et $\phi_B^{**}(t)$, issues des boucles d'asservissement virtuelles, qui sont utilisées pour générer les instructions de fabrication.

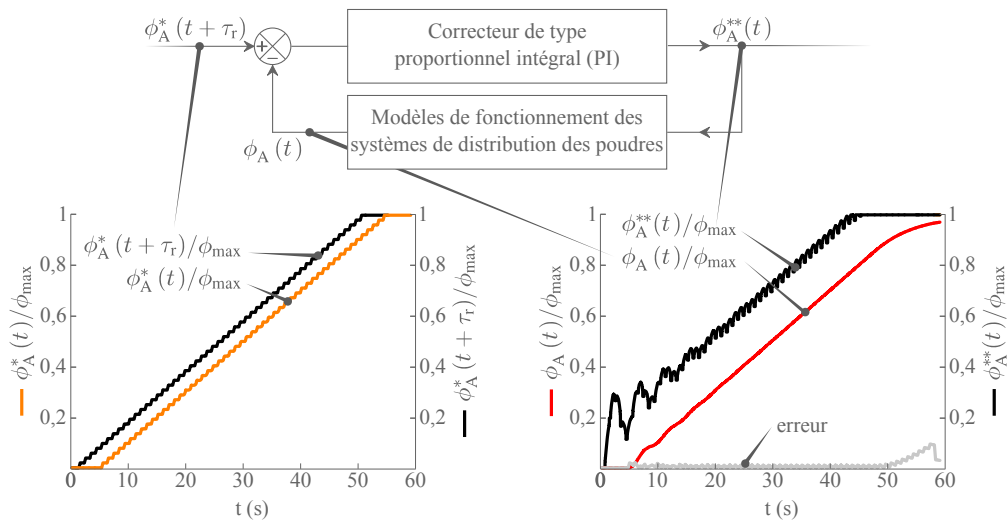
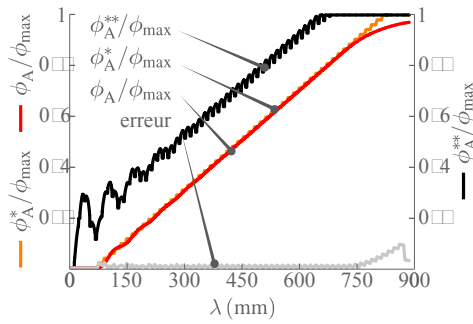


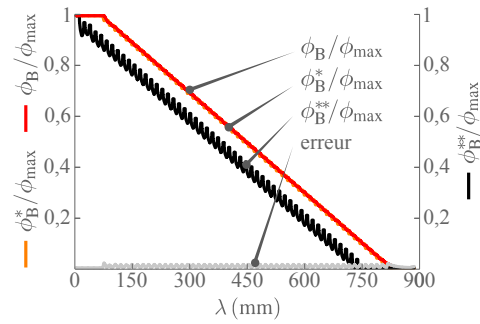
Figure 3.25 – Représentation de l'asservissement prédictif du système

Le correcteur choisi est du type proportionnel intégral (PI) avec l'objectif de réduire la différence entre la commande en entrée et le débit simulé. Des correcteurs équivalents sont définis sur les boucles d'asservissement des débits des poudres A et B. Les paramètres du correcteur - gain K_c et constante temps τ_c - ont été optimisés pour limiter l'erreur au maximum et permettre ainsi une fabrication du cordon dans de bonnes conditions.

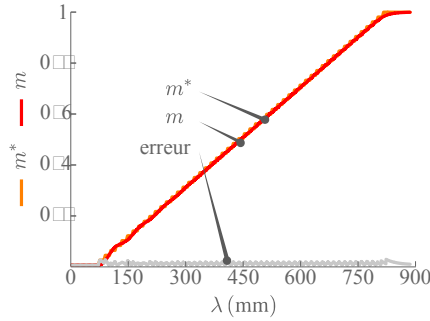
Concernant l'exemple traité, les débits des poudres optimisés sont définis à partir de cet asservissement prédictif (Figure 3.26(a,b)). Dans ce cas, l'utilisation du dispositif d'optimisation complet permet d'obtenir une fonction matériau simulée très proche de la fonction matériau souhaitée (Figure 3.26(c)). De même, la somme des débits est proche du débit de référence nécessaire à la formation du cordon de matière (Figure 3.26(d)).



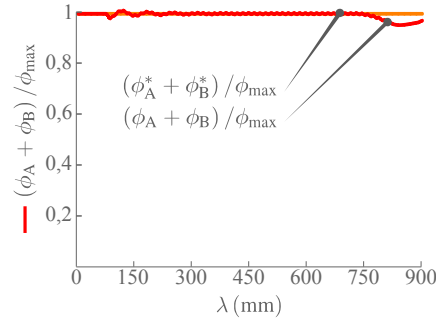
(a) Débit de poudre A souhaité, corrigé et simulé



(b) Débit de poudre B souhaité, corrigé et simulé



(c) Fonction matériau souhaitée et simulée



(d) Somme des débits de poudre simulés

Figure 3.26 – Simulation de la fabrication avec optimisation des débits ($K_c = 1$ et $\tau_c = 0,1$)

3.3.3 Réglage du dispositif d'optimisation à travers un exemple

Le choix des paramètres du correcteur τ_c et K_c n'est pas anodin. En effet, la différence entre la fonction matériau souhaitée et la fonction matériau simulée peut être importante en fonction des paramètres choisis. L'objectif de ce dispositif d'optimisation est de minimiser cette erreur. Néanmoins, certains couples de paramètres, même s'ils présentent de bons résultats, ne peuvent pas être choisis considérant les signaux de commande qu'ils engendrent. On voit, par exemple, que le choix $\tau_c = 0,1$ et $K_c = 20$ amène à générer des commandes avec des fluctuations

importantes à hautes fréquences (Figure 3.27). Le fait d'imposer ce type de signaux peut être néfaste pour les composants du systèmes.

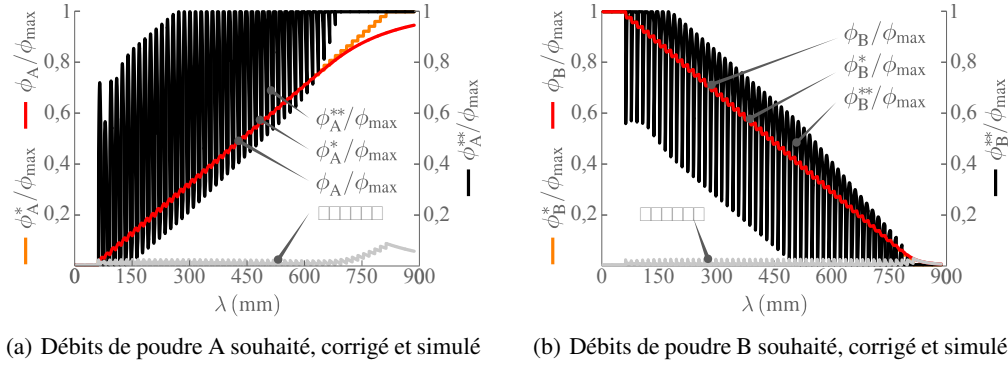


Figure 3.27 – Simulation de la fabrication avec optimisation des débits ($K_c = 20$ et $\tau_c = 0,1$)

Le choix des paramètres du correcteur peut être réalisé avec la simulation de la correction des débits dans plusieurs cas. En modifiant les valeurs des paramètres, on peut analyser l'évolution des résultats en fonction des paramètres. Le choix doit porter sur des paramètres proposant une erreur maximale inférieure à la tolérance et des signaux de commande adaptés aux systèmes de distribution des poudres (Figure 3.28).

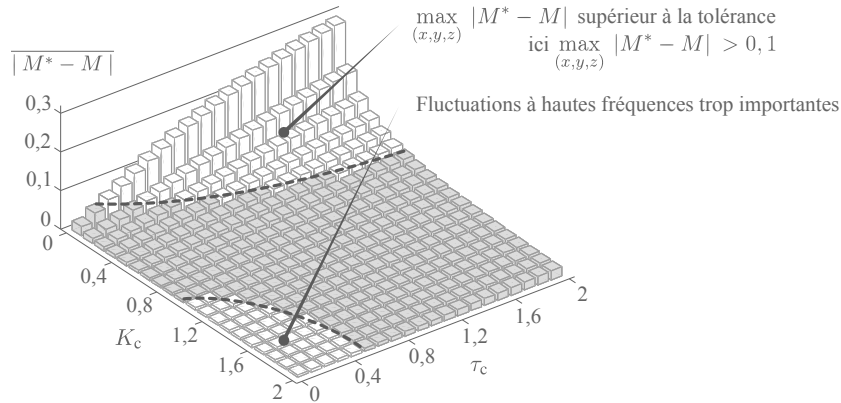


Figure 3.28 – Influence des paramètres des correcteurs sur l'erreur

L'utilisation du dispositif d'optimisation avec des paramètres de correcteur adaptés permet, dans cet exemple, de fabriquer la pièce dans de bonnes conditions. Nous verrons, que la sélection, au préalable, d'une stratégie présentant une évolution progressive des débits des poudres est tout de même indispensable pour obtenir de tels résultats. Pour sélectionner une stratégie adaptée, les indices de performance ont été développés.

3.4 Indices de performance

3.4.1 Définition des indices de performance

Un des objectifs de la modélisation est de comparer plusieurs stratégies de fabrication pour choisir la plus appropriée pour la réalisation d'une pièce multimatériaux. Nous avons vu, précédemment, que la modélisation permettait de prédire la fonction matériau $M(x, y, z)$ dans la pièce fabriquée (Section 3.2). L'utilisation des indices de performance doit permettre, à partir de cette modélisation, de classer les différentes stratégies entre elles.

L'importance du choix de la stratégie réside dans le fait que des erreurs peuvent exister entre la fonction matériau souhaitée et la fonction matériau simulée représentative de la répartition des matériaux dans la pièce fabriquée. Nous avons détecté, précédemment, deux sources d'erreur (Section 3.1). La première erreur est liée à la discrétisation de la fonction matériau par un assemblage des cordons de matière. La seconde erreur est due au fonctionnement du procédé et peut différer selon la fonction $m^*(\lambda)$. Ces indices reposent donc sur la quantification de l'erreur due à ces deux différents phénomènes.

Ainsi, un premier indice de performance reflète la capacité de la stratégie de trajectoire choisie à ne pas discrétiser la fonction matériau souhaitée. Cet indice représente donc la différence entre la fonction matériau souhaitée et celle simulée en considérant que les cordons de matière sont déposés avec la composition souhaitée. Cet indice est défini par :

$$\forall (x, y, z) \in \mathcal{D}_P, I_t(x, y, z) = 1 - \left| M^*(x, y, z) - m^*(\tilde{\lambda}) \right| \quad (3.20)$$

Avec le paramètre $\tilde{\lambda}$ défini tel que :

$$\left[(x - x(\tilde{\lambda}))^2 + (y - y(\tilde{\lambda}))^2 + (z - z(\tilde{\lambda}))^2 \right] = \min_{\lambda} \left[(x - x(\lambda))^2 + (y - y(\lambda))^2 + (z - z(\lambda))^2 \right] \quad (3.21)$$

Lorsque la composition définie par la trajectoire est équivalente à la répartition des matériaux souhaitée, cet indice est égal à 1. On connaît donc, pour tous les points du domaine de définition de la pièce, la répercussion de la définition de la trajectoire sur la fonction matériau.

Un second indice de performance permet, quant à lui, de connaître l'impact du fonctionnement du procédé sur la répartition des matériaux de la pièce fabriquée. Ainsi, cet indice représente la différence qu'il existe entre les répartitions des matériaux définies par l'assemblage des cordons de matière avec, d'une part, la composition souhaitée et, d'autre part, la composition simulée. Il est défini par :

$$\forall (x, y, z) \in \mathcal{D}_P, I_p(x, y, z) = 1 - \left| m^*(\tilde{\lambda}) - m(\tilde{\lambda}) \right| \quad (3.22)$$

Avec le paramètre $\tilde{\lambda}$ défini tel que :

$$\left[(x - x(\tilde{\lambda}))^2 + (y - y(\tilde{\lambda}))^2 + (z - z(\tilde{\lambda}))^2 \right] = \min_{\lambda} \left[(x - x(\lambda))^2 + (y - y(\lambda))^2 + (z - z(\lambda))^2 \right] \quad (3.23)$$

Lorsque la composition des cordons simulée est similaire à la composition souhaitée, cet indice est égal à 1. Comme pour l'indice précédent, la valeur de l'indice est défini pour tous les points du domaine représentatif de la géométrie de la pièce.

Un troisième indice de performance prend en compte les deux aspects. Cet indice reflète, en fait, l'erreur globale concernant la répartition des matériaux. Il est le résultat de la comparaison entre la fonction matériau souhaitée et celle simulée. Il est donc défini par :

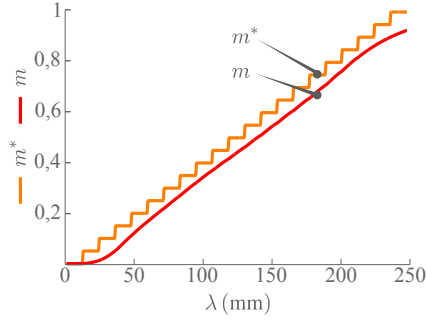
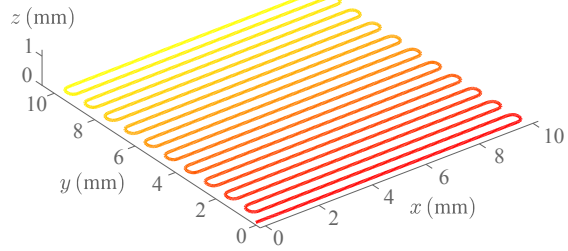
$$\forall (x, y, z) \in \mathcal{D}_P, I_m(x, y, z) = 1 - |M^*(x, y, z) - M(x, y, z)| \quad (3.24)$$

Lorsque la distribution des matériaux simulée est la même que celle souhaitée, l'indice est égal à 1. Une stratégie appropriée doit donc proposer, pour tous les points du domaine de la pièce, un indice de performance globale le plus proche de cette valeur. Ce troisième indice permet d'obtenir une vision générale de la performance de la stratégie de fabrication. A l'inverse, les deux premiers indices proposent une analyse plus fine avec une possible détermination de la source principale de l'erreur.

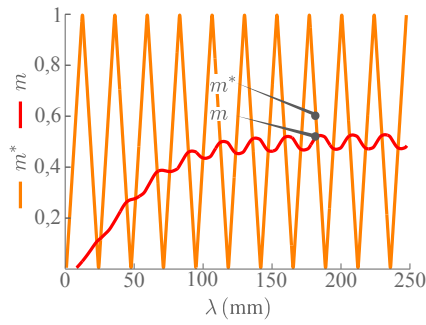
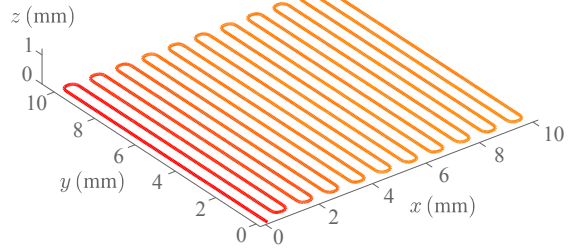
Ces indices de performance doivent permettre la comparaison de plusieurs stratégies de fabrication. Pour cela, des cartographies et des statistiques peuvent être réalisées sur ces indices. Pour l'illustrer, nous allons revenir sur deux exemples traités dans les chapitres précédents. Le premier exemple permettra de préciser l'impact du choix de la stratégie sur la pièce fabriquée tandis que le second exemple montrera l'intérêt du dispositif d'optimisation.

3.4.2 Retour sur l'importance du choix de la stratégie de fabrication

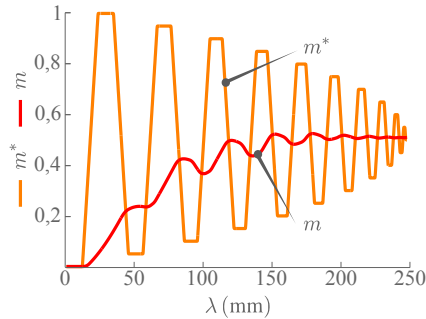
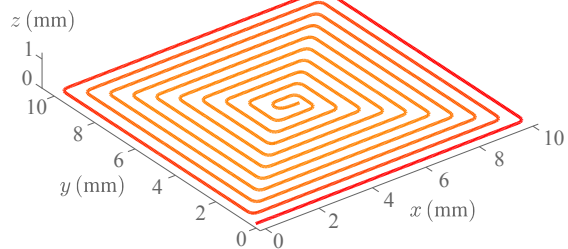
Nous avons mis en avant, au début de ce chapitre, l'importance du choix de la trajectoire sur un exemple (Section 3.1). Nous avons vu, dans un premier temps, que la discrétisation de la fonction était différente selon la trajectoire choisie. De plus, nous avons remarqué, dans un second temps, que la fonction matériau $m^*(\lambda)$ associée aux trajectoires présentait des évolutions très différentes. Désormais, il est possible de connaître les conséquences de ces fonctions sur la composition du matériau déposé. En effet, en utilisant les modèles de fonctionnement du procédé et en y associant le dispositif d'optimisation, nous pouvons constater que le matériau déposé est totalement différent en fonction des trajectoires choisies (Figure 3.29). Nous avons mis en avant le fait qu'il paraissait intéressant de privilégier des stratégies avec une évolution progressive de la fonction matériau. Ce type de trajectoire permet, effectivement, selon la simulation, de fournir une fonction matériau $m(\lambda)$ très proche de celle souhaitée $m^*(\lambda)$ à l'inverse des deux autres stratégies de trajectoire.

(a) $m^*(\lambda)$ et $m(\lambda)$ 

(b) Première stratégie de trajectoire et information sur le matériau simulé

(c) $m^*(\lambda)$ et $m(\lambda)$ 

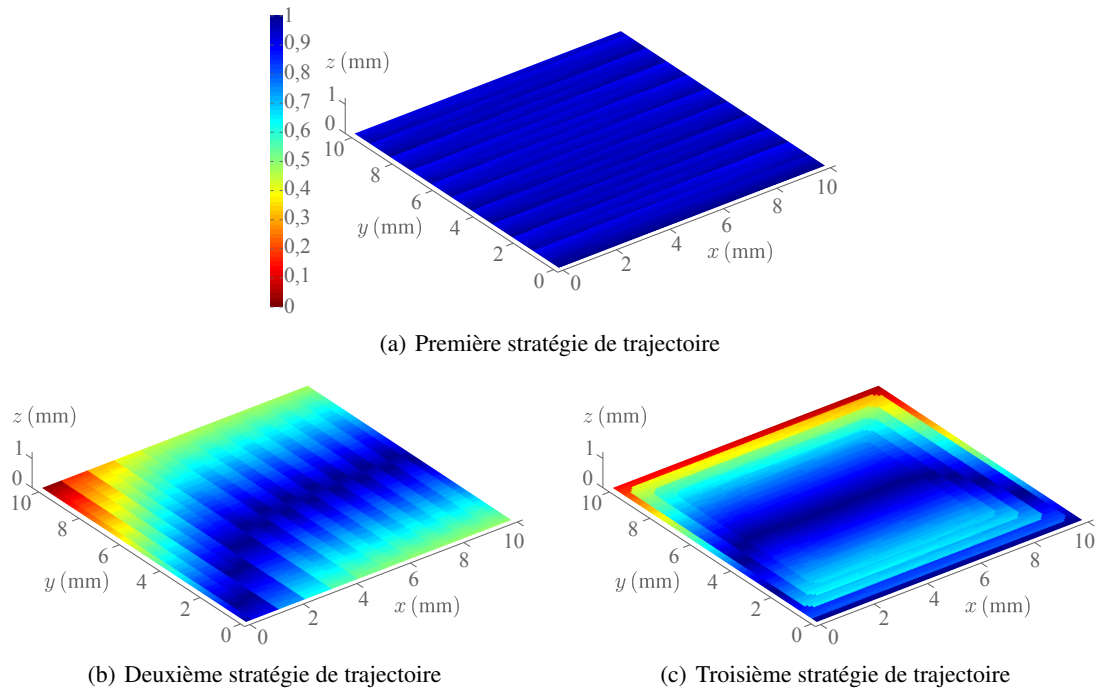
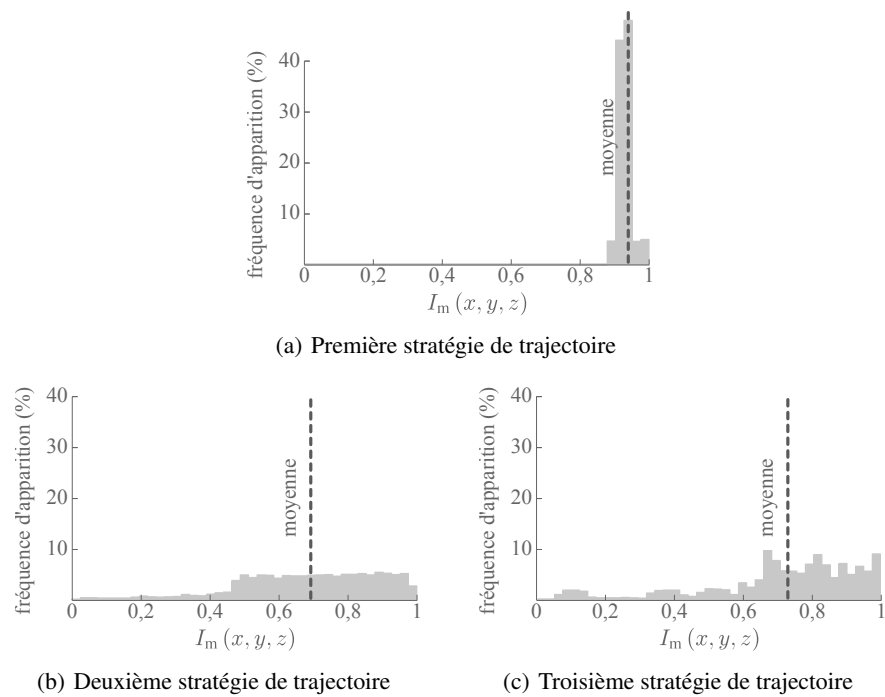
(d) Deuxième stratégie de trajectoire et information sur le matériau simulé

(e) $m^*(\lambda)$ et $m(\lambda)$ 

(f) Troisième stratégie de trajectoire et information sur le matériau simulé

Figure 3.29 – Matériau simulé en fonction de la trajectoire

Le calcul de l'indice de performance $I_m(x, y, z)$ permet d'obtenir, pour les trois stratégies sélectionnées, une cartographie permettant de réaliser une analyse locale des effets de la stratégie sur la fonction matériau déposée (Figure 3.30). On constate, dans ce cas, que le choix de la stratégie de trajectoire devrait plutôt être réalisé sur la première stratégie qui présente un indice proche de la valeur maximale dans toute la couche considérée. On voit donc, ici, que l'erreur due au fonctionnement du système prend largement le pas sur l'erreur due à la discrétisation de la fonction matériau par la trajectoire.

Figure 3.30 – Indice de performance $I_m(x, y, z)$ en fonction de la trajectoireFigure 3.31 – Données statistiques sur l'indice de performance $I_m(x, y, z)$

Pour permettre d'avoir une comparaison globale de plusieurs stratégies de fabrication, il est possible de réaliser des statistiques sur les différents indices de performance. On peut, pour l'exemple traité, comparer les fréquences d'apparition ou la moyenne des valeurs de l'indice sur une couche. Ainsi, à l'aide de ces statistiques sur les trois indices de performance, la comparaison des stratégies est réalisée avec des valeurs chiffrées. Le choix des valeurs comparées doit être fait en fonction du cahier des charges.

3.4.3 Retour sur l'intérêt du dispositif d'optimisation

L'intérêt du dispositif d'optimisation mis en avant précédemment (Section 3.3) peut également être démontré à l'aide des indices de performance. Un calcul de l'indice de performance globale pour la fabrication complète montre que l'utilisation des outils d'optimisation permet d'augmenter l'indice de performance (Figure 3.32). L'utilisation du dispositif d'optimisation complet permet d'obtenir un indice de performance proche de la valeur maximale pour l'ensemble de la pièce.

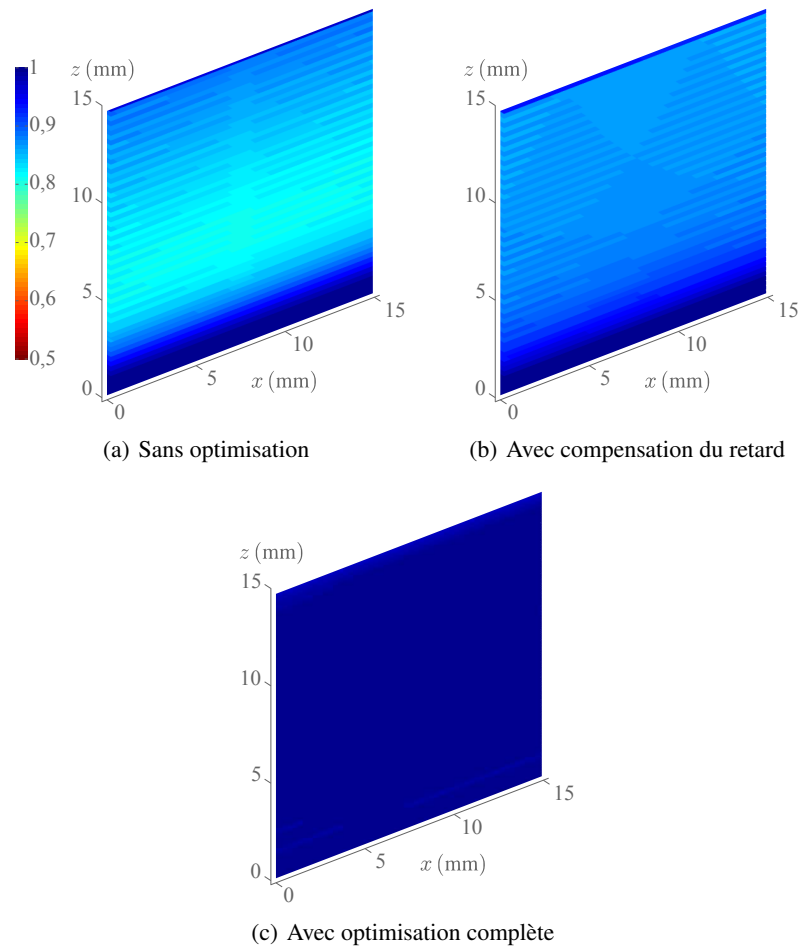
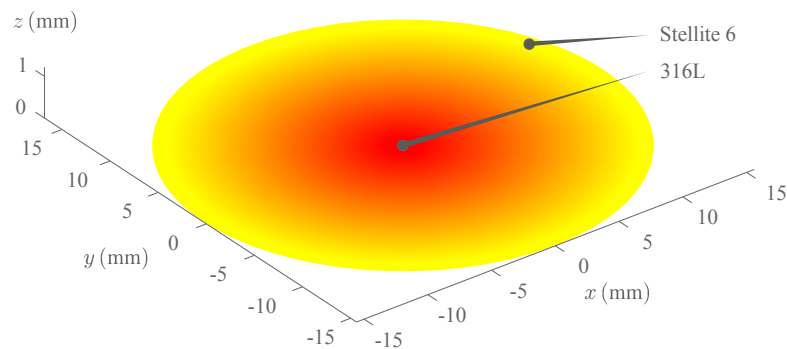


Figure 3.32 – Indice de performance $I_m(x, y, z)$ en fonction de l'optimisation des débits

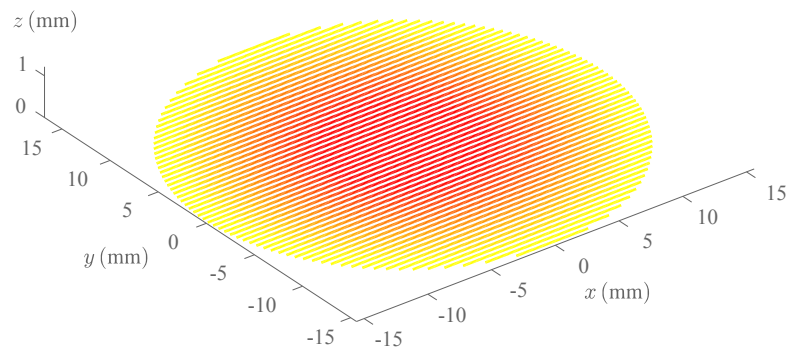
3.5 Validation expérimentale

3.5.1 Objectif de l'étude

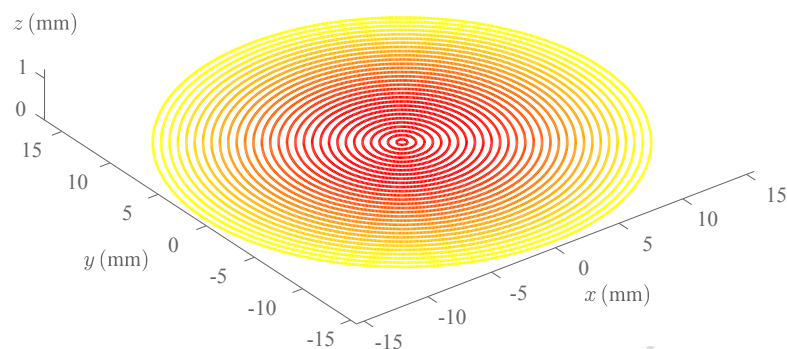
L'objectif de cette étude expérimentale est la validation de la modélisation et de l'optimisation du procédé. Les expérimentations portent sur la fabrication et l'analyse d'une pièce multimaté-
riau fabriquée avec deux stratégies de trajectoire différentes. La simulation de la fabrication et l'optimisation des commandes des débits des poudres sont réalisées avec ces deux stratégies. Les résultats de ces simulations sont comparées à ceux des analyses matériaux [Muller2013b].



(a) Description de la répartition des matériaux



(b) Description de la trajectoire avec la première stratégie



(c) Description de la trajectoire avec la seconde stratégie

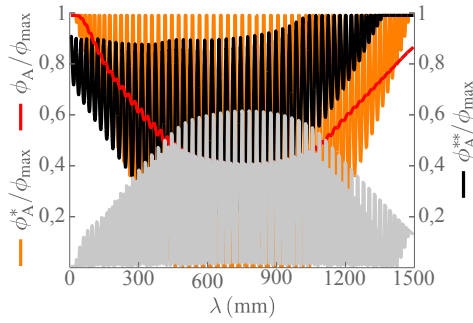
Figure 3.33 – Description de la répartition des matériaux et des trajectoires

La pièce fabriquée est un disque multimatériau - diamètre 30 mm - représentant une couche d'une prothèse de hanche (Figure 1.2(a)). Le premier matériau primaire est une poudre d'alliage base chrome-cobalt Stellite 6, désigné matériau A (Tableau 3.1). Le second matériau primaire est une poudre d'acier inoxydable 316L, désigné matériau B (Tableau 3.1). La répartition des matériaux est définie pour combiner le comportement mécanique de l'acier inoxydable pour la structure et les propriétés de résistance au frottement de l'alliage chrome cobalt pour les surfaces (Figure 3.33(a)). On peut préciser que les matériaux utilisés dans cette étude le sont à titre d'exemple et que d'autres matériaux peuvent être employés pour une application réelle.

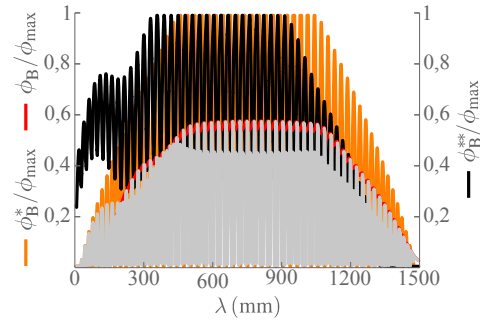
3.5.2 Simulation de la fabrication

La fonction matériau $M^*(x, y, z)$ est définie par :

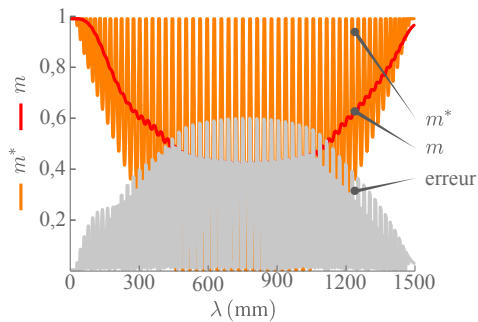
$$\forall (x, y, z) \in \mathcal{D}_P, M^*(x, y, z) = \begin{cases} 0 & \text{si } \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq 5 \\ \frac{\sqrt{x^2 + y^2 + z^2} - 14}{9} & \text{si } 5 < \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \leq 14 \\ 1 & \text{si } 14 < \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} \end{cases} \quad (3.25)$$



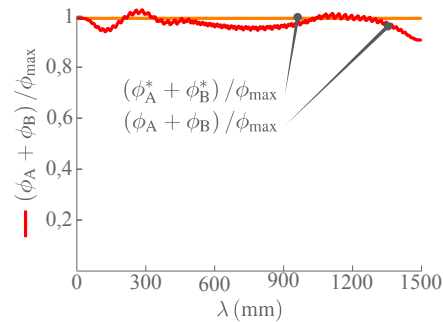
(a) Débit de poudre A souhaité et simulé



(b) Débit de poudre B souhaité et simulé



(c) Fonction matériau souhaitée et simulée



(d) Somme des débits de poudre simulés

Figure 3.34 – Simulation de la fabrication avec optimisation des débits avec la première stratégie

Les stratégies de trajectoire sont décrites par une courbe paramétrique. La première stratégie est type balayage (Figure 3.33(b)), tandis que la seconde est de type spirale (Figure 3.33(c)). La fabrication de la pièce est simulée avec les débits des poudres optimisés. Concernant la première stratégie, la fonction matériau $m^*(\lambda)$ est très fluctuante pendant l'ensemble de la fabrication. Cette fonction étant répercutée sur les commandes des débits des poudres, on observe que, malgré l'utilisation du dispositif d'optimisation, la fonction matériau simulée est très éloignée de la fonction matériau souhaitée (Figure 3.34(c)). Néanmoins, on observe, que selon la simulation, la somme des débits de poudre est proche de la valeur souhaitée (Figure 3.34(d)). Au contraire, la seconde stratégie, présente une évolution graduelle de la fonction matériau $m^*(\lambda)$. Grâce à l'utilisation du dispositif d'optimisation, il est possible d'obtenir, selon la simulation, une composition du cordon de matière très proche de celle souhaitée (Figure 3.35(c)). De plus, la somme des débits simulée est comparable au débit nécessaire à la formation du cordon de matière (Figure 3.35(d)).

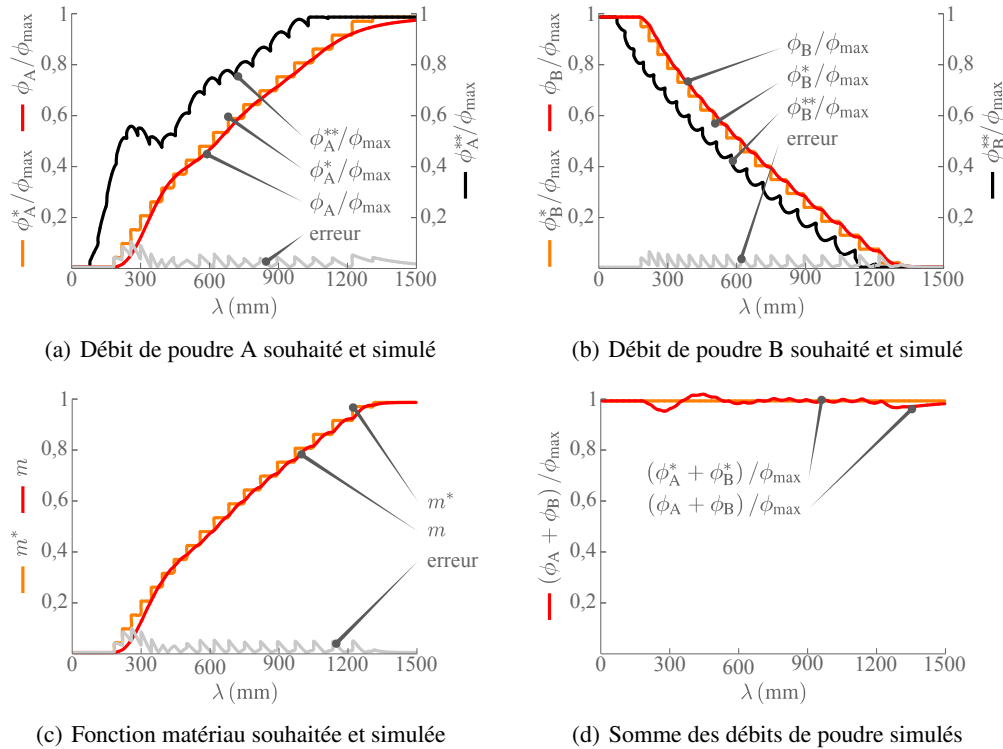
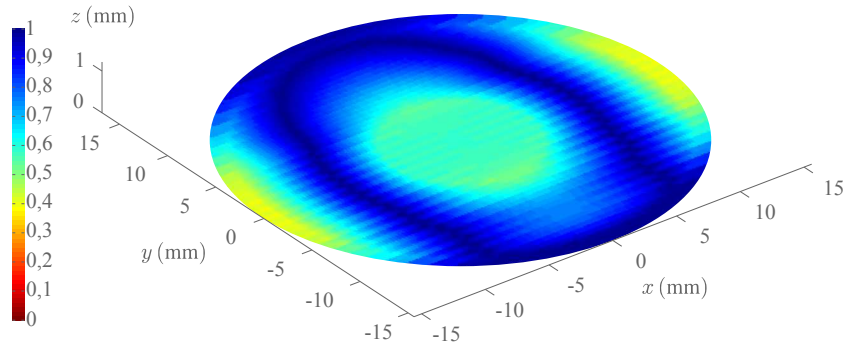
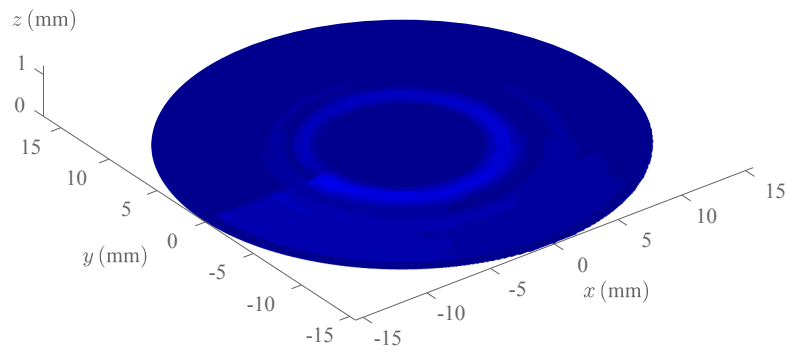


Figure 3.35 – Simulation de la fabrication avec optimisation des débits avec la seconde stratégie

L'indice de performance pour chaque stratégie reflète le fonctionnement des systèmes de distribution des poudres. En effet, pour la première stratégie, la cartographie présente de nombreuses zones où l'indice est très faible (Figure 3.36(a)). Au contraire, la cartographie pour la seconde stratégie montre des valeurs proches de la valeur maximale sur tout le domaine de la couche (Figure 3.36(b)). On peut noter, que l'indice concernant la discrétisation de la fonction matériau par la trajectoire joue un rôle peu important dans l'indice de performance globale.



(a) Première stratégie

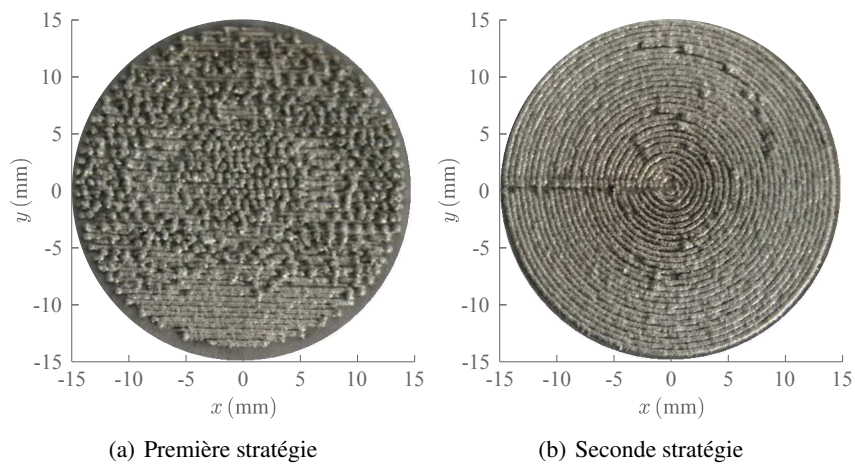


(b) Seconde stratégie

Figure 3.36 – Indice de performance $I_m(x, y, z)$ en fonction de la trajectoire

3.5.3 Analyse de la fabrication

Les pièces ont été fabriquées avec le procédé CLAD® (Annexe A). Les caractéristiques géométriques et la composition des structures fabriquées ont été analysées (Figure 3.37). Les struc-



(a) Première stratégie

(b) Seconde stratégie

Figure 3.37 – Analyse de la géométrie de la pièce fabriquée

tures ont été polies. La composition a été analysée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) équipé d'une sonde d'analyse par dispersion de l'énergie. L'analyse semi-quantitative a été réalisée tous les 1,5 mm le long de trois segments définis par :

- premier segment : $x \in [-12, 7; 0]$, $y = -8$ et $z = 0$;
- deuxième segment : $x \in [-15; 0]$, $y = 0$ et $z = 0$;
- troisième segment : $x \in [-12, 7; 0]$, $y = 8$ et $z = 0$.

Cette analyse a été réalisée sur les éléments présents dans les deux matériaux primaires (Tableau 3.1). La distribution des matériaux est déterminée par rapport à la présence de quatre composants - chrome, cobalt, fer et nickel - représentatifs des deux matériaux primaires.

Les deux surfaces des pièces fabriquées sont quasiment remplies. On peut remarquer des surplus de matière sur les deux structures. Ils sont dus aux arrêts des axes de la machine à chaque demande de changement des débits des poudres dans les instructions de fabrication. La structure fabriquée avec la première stratégie présente donc, logiquement, plus de ces défauts puisqu'elle impose beaucoup plus de variation de la fonction matériau $m^*(\lambda)$. Ces surplus de matière peuvent être supprimés en modifiant le fonctionnement du DCN de la machine. Étant

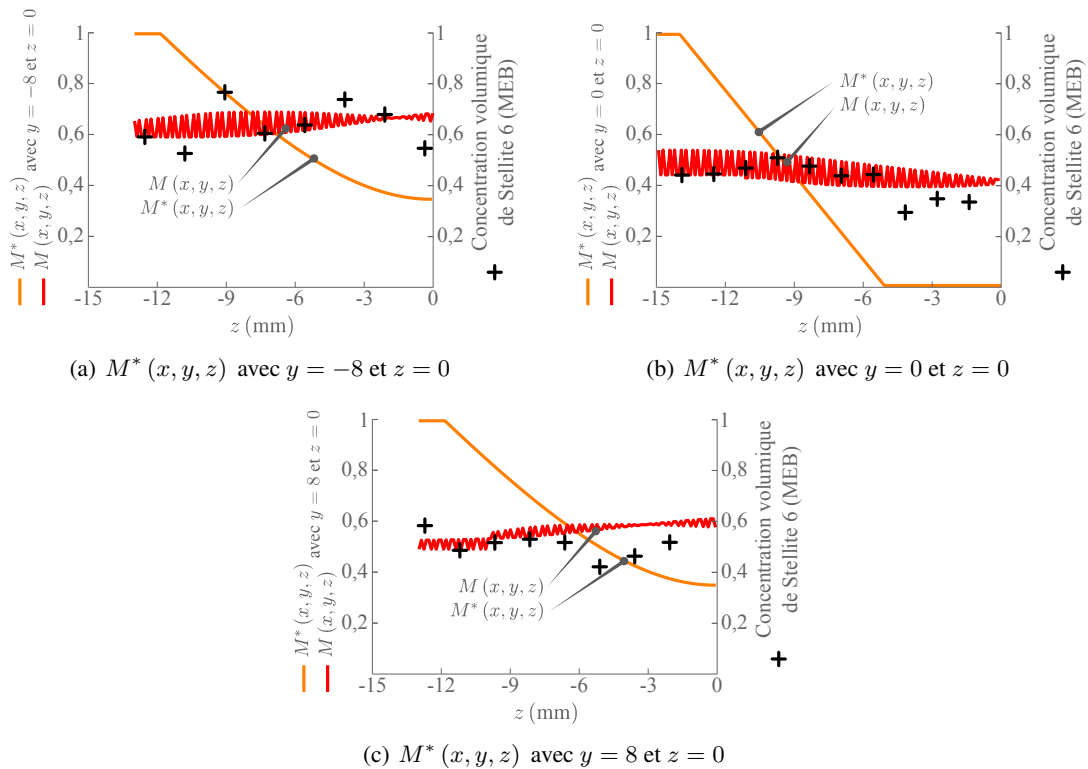


Figure 3.38 – Analyse de la composition de la pièce fabriquée avec la première stratégie

donné que cette étude expérimentale est principalement orientée vers la répartition des matériaux, ces problématiques techniques n'ont pas été soulevées.

Concernant la distribution des matériaux, la structure fabriquée avec la première stratégie, bien que les résultats soient assez satisfaisants, on remarque qu'il y a quelques points de mesure avec une erreur supérieure à 0,1 (Figure 3.38). La modélisation du fonctionnement des systèmes de distribution des poudres a été réalisé à partir de commandes ne présentant pas de fluctuation. Il est donc compréhensible que ces résultats soient perfectibles dans le cas où les commandes sont très fluctuantes comme ici. Les résultats confirment que des stratégies de trajectoire avec des fluctuations importantes de la fonction matériau $m^*(\lambda)$ ne sont pas appropriés pour la fabrication de pièces FGM.

Pour la structure fabriquée avec la seconde stratégie, on observe une bonne corrélation entre les résultats issus de la simulation et ceux issus de l'analyse matériau (Figure 3.39). En effet, à l'exception d'un point de mesure, l'erreur entre le résultat de la simulation et de la valeur de mesure est toujours inférieur à 0,1. En outre, étant donné que la fonction matériau simulée est presque similaire à celle souhaitée, on peut considérer que le matériau déposé est conforme aux spécifications avec une erreur maximale de 0,1.

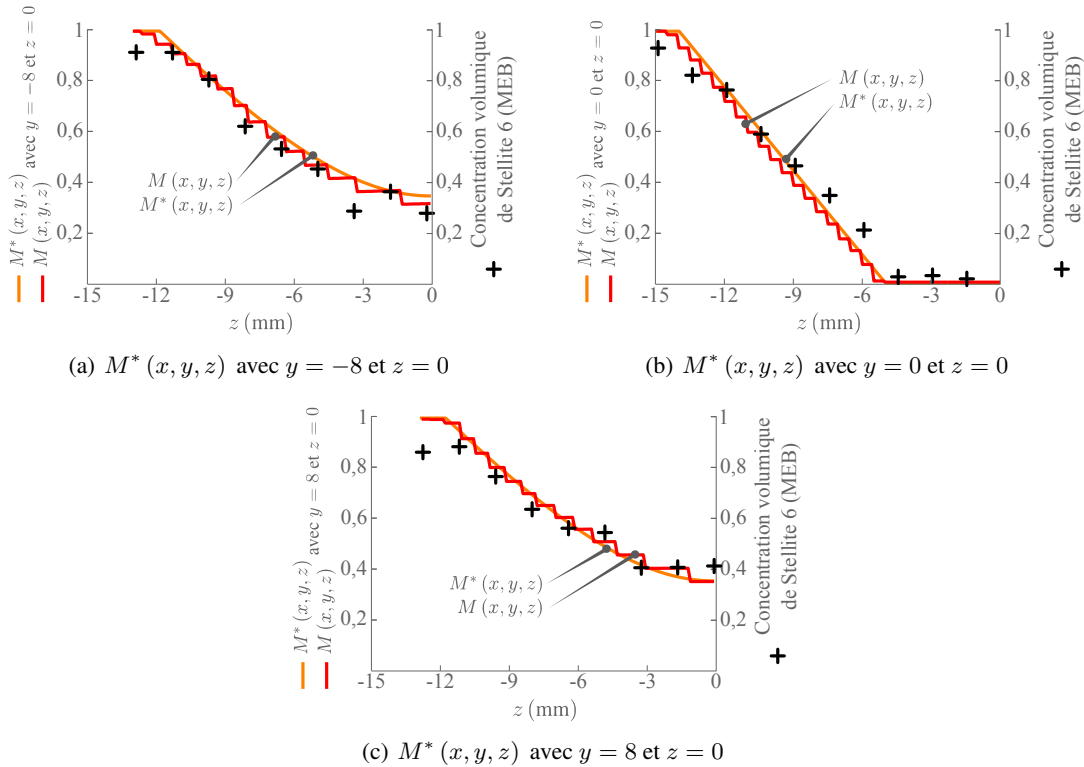


Figure 3.39 – Analyse de la composition de la pièce fabriquée avec la seconde stratégie

3.5.4 Synthèse de l'étude

Cette étude expérimentale a permis de valider la modélisation et l'optimisation du procédé dans le cas où la stratégie de trajectoire choisie ne propose de variation trop importante de la fonction matériau $m^*(\lambda)$. En effet, pour ce type de stratégie, les résultats de l'analyse sont très proches de ceux de la simulation. Pour les autres stratégies, les résultats peuvent être en deçà. La différence plus importante qui peut exister entre les résultats de simulation et expérimentaux peut s'expliquer par la manière dont a été mise en place la modélisation des systèmes de distribution des poudres. Étant donné qu'il est préconisé d'utiliser une stratégie permettant d'obtenir une variation graduelle de la fonction matériau $m^*(\lambda)$, il est nécessaire que la modélisation soit la plus juste possible dans ce cas, ce que montre cette étude. Dans les autres cas, on constate qu'il est impossible, même en utilisant un dispositif d'optimisation, d'obtenir une répartition des matériaux en accord avec le cahier des charges.

Il est donc important, pour fabriquer une pièce multimatériau, de choisir en premier lieu une stratégie appropriée ne présentant pas de fluctuations trop importantes de la fonction matériau $m^*(\lambda)$. Une fois cette stratégie sélectionnée, il est possible d'appliquer le dispositif d'optimisation. Ces deux étapes sont indispensables pour fabriquer dans de bonnes conditions. On peut noter, que si le dispositif n'avait pas été utilisé, la répartition des matériaux aurait été bien plus éloignée de ce qui était souhaité (Figure 3.40).

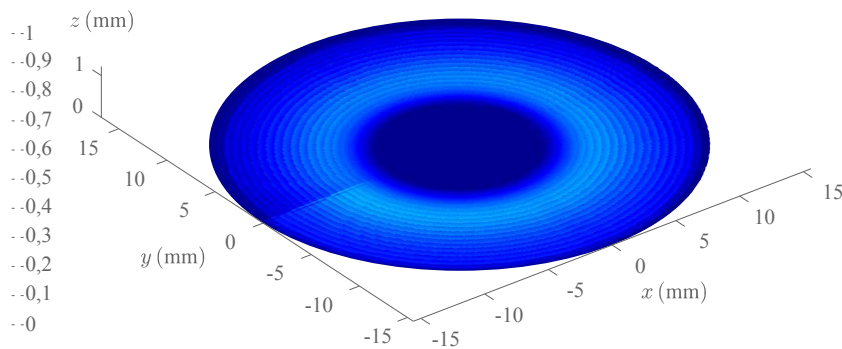


Figure 3.40 – Indice de performance $I_m(x, y, z)$ sans optimisation des débits avec la seconde stratégie

3.6 Synthèse

La méthodologie de fabrication proposée permet de passer de l'objet imaginé par le concepteur à la fabrication de la pièce multimatériau. Dans le cadre de cette méthodologie, nous avons constaté que le choix d'une stratégie de fabrication adaptée est primordial et qu'il demande une prise en compte du fonctionnement du procédé. Les outils de modélisation mis en place permettent désormais de simuler et d'optimiser la fabrication d'une pièce multimatériau. La simulation, nécessaire à la détermination d'une stratégie de fabrication adaptée, fournit une image de la répartition des matériaux dans la pièce fabriquée. Pour cela, la modélisation du procédé - plus particulièrement des systèmes de projection de poudre - a été réalisé expérimentalement. Ainsi, à partir des commandes des débits des poudres, il est possible de prédire la composition effective des cordons de matière. La distribution des matériaux dans l'ensemble du domaine de la pièce est, quant à elle, déterminée à partir de la composition simulée des différents cordons de matière.

L'ajout d'un dispositif d'optimisation permet, dans certains cas, de réduire la différence qui peut exister entre la répartition des matériaux souhaitée et celle simulée représentative de la pièce fabriquée. Ce dispositif est intéressant uniquement dans les cas où la stratégie de fabrication est appropriée. En effet, même après optimisation des commandes des débits des poudres, la répartition des matériaux ne peut être correcte que si la stratégie de fabrication propose une évolution des débits progressive.

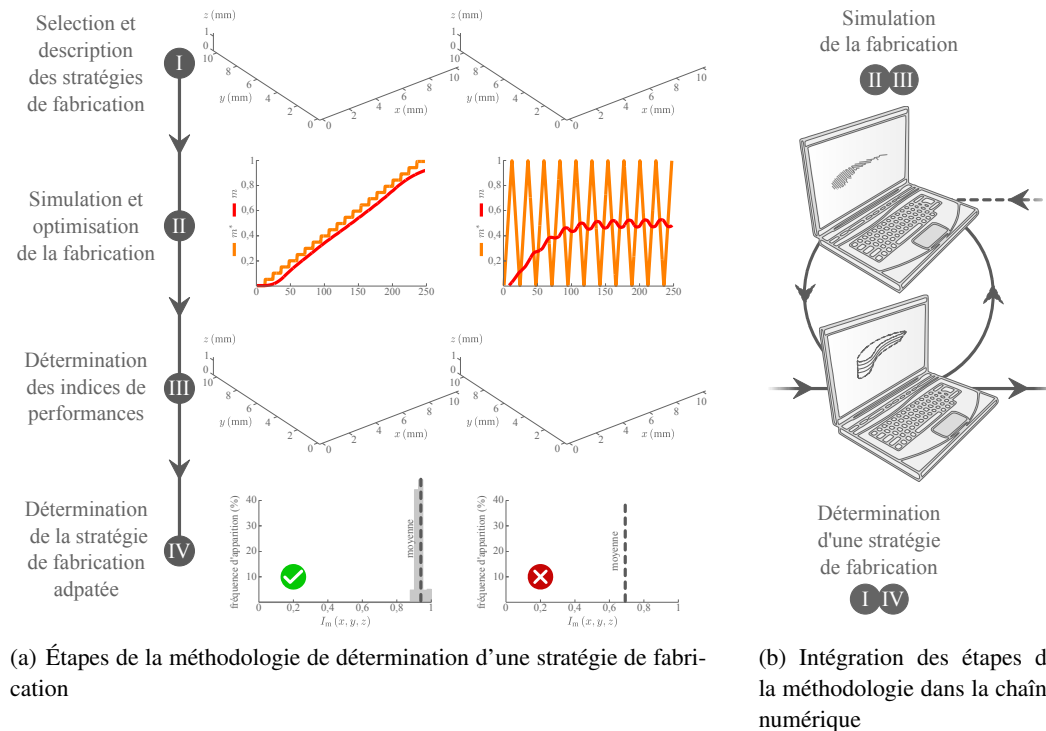


Figure 3.41 – Méthodologie de détermination d'une stratégie de fabrication

Ces outils de modélisation et d'optimisation du procédé sont utilisés pour la qualification et la comparaison des stratégies de fabrication (Figure 3.41(a)). Ainsi, après la sélection et la description des différentes stratégies de trajectoire, il est possible de simuler et d'optimiser la fabrication dans ces différents cas. Avec l'utilisation des indices de performance, la stratégie de fabrication la plus appropriée peut être alors sélectionnée. En effet, des statistiques sur ces indices peuvent être réalisées dans chaque couche ou pour la pièce complète et ainsi comparer plusieurs stratégies de fabrication. Ces mêmes indices fournissent des informations locales sur la qualité de la fabrication dans tout le domaine représentatif de la pièce. Ainsi, il est possible d'analyser localement la source d'erreur. Ces outils s'intègrent donc dans la chaîne numérique dans la boucle consacrée à l'optimisation de la stratégie de fabrication (Figure 3.41(b)).

Parmi les étapes de détermination d'une stratégie de fabrication, la sélection des différentes stratégies à comparer n'a pas encore été abordée (Figure 3.41(I)). Cette étape est pourtant importante puisque le choix final repose sur cette première sélection. Nous avons vu, dans le chapitre consacré à l'état de l'art, qu'il existait plusieurs types de stratégies de trajectoire pour le remplissage (Section 2.2). Cette première sélection peut donc reposer sur ces différents types. Néanmoins, chaque type de stratégie propose des variantes infinies. Ceci rend impossible l'utilisation de la méthodologie basée sur une sélection de toutes les stratégies possibles. Des méthodes pour la génération des trajectoires sont présentées dans le chapitre suivant. Une des méthodes proposées permet de générer automatiquement une trajectoire spécifique à la répartition des matériaux en prenant en compte les travaux de modélisation et d'optimisation du procédé présentés dans ce chapitre.

Génération de trajectoires

Ce quatrième chapitre présente les travaux concernant la **génération de trajectoires**.

Nous avons constaté dans le chapitre précédent que le choix d'une stratégie de fabrication appropriée est primordial dans le processus de fabrication et nécessite une évaluation des stratégies envisagées pour choisir la plus adaptée. La **problématique** concernant la génération de trajectoires et les **solutions envisagées** seront détaillées dans la première partie de ce chapitre.

Une première méthode de **génération de trajectoires par sélection de stratégies**, basée sur une classification des répartitions des matériaux est présentée dans la deuxième partie de ce chapitre.

Nous présenterons, dans une troisième partie, une **méthode de génération automatique de trajectoires** permettant de proposer un nouveau type de trajectoire qui prend en compte les spécificités de la pièce et du procédé utilisé.

Une **validation expérimentale** des travaux de modélisation et d'optimisation du procédé dans le cadre de la génération automatique de trajectoires sera présentée dans la quatrième partie.

Dans une cinquième partie, nous mettrons en avant les **intérêts des méthodes** de génération de trajectoires à travers l'étude de quelques exemples.

Finalement, nous ferons une **synthèse** de ces travaux dans la sixième et dernière partie de ce chapitre.

4.1 Problématique et solutions envisagées

4.1.1 Problématique

Dans le chapitre précédent, nous avons montré que la modélisation proposée permet d'évaluer et de comparer plusieurs stratégies de fabrication (Section 3.6). Avec cette modélisation, il est possible de sélectionner la stratégie de fabrication la plus adaptée parmi celles testées. De plus, les commandes des débits des poudres sont optimisées pour fabriquer la pièce avec une répartition des matériaux la plus proche possible de celle souhaitée. Parmi les étapes de la méthodologie, la proposition des stratégies de fabrication à évaluer est déterminante puisque c'est sur cette première sélection que repose le choix final.

Nous rappelons que le choix de la stratégie de fabrication repose, d'une part, sur le choix de la stratégie de tranchage et, d'autre part, sur le choix de la stratégie de trajectoire. Des stratégies de fabrication sont déjà proposées pour la fabrication additive de pièces homogènes (Section 2.2).

Concernant la stratégie de tranchage, nous avons identifié quatre types de stratégies qui diffèrent par la géométrie de leurs couches (Figure 4.1) [Hascoët2011a].

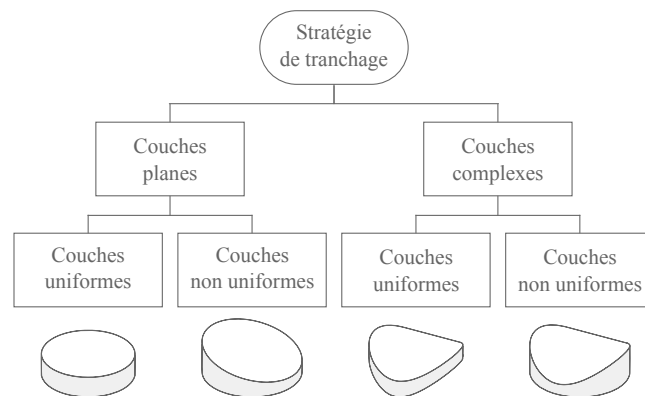


Figure 4.1 – Classification des stratégies de tranchage

Nous distinguons, d'une part, si les couches sont planes ou complexes et, d'autre part, si les couches sont uniformes ou non uniformes. Une couche est considérée plane si les surfaces inférieure et supérieure de la couche sont planes (Figure 4.2(a,b)). Dans le cas contraire, elle est considérée complexe (Figure 4.2(c)). Une couche est considérée uniforme si la hauteur est constante sur toute la couche. Dans le cas contraire, elle est considérée non uniforme.

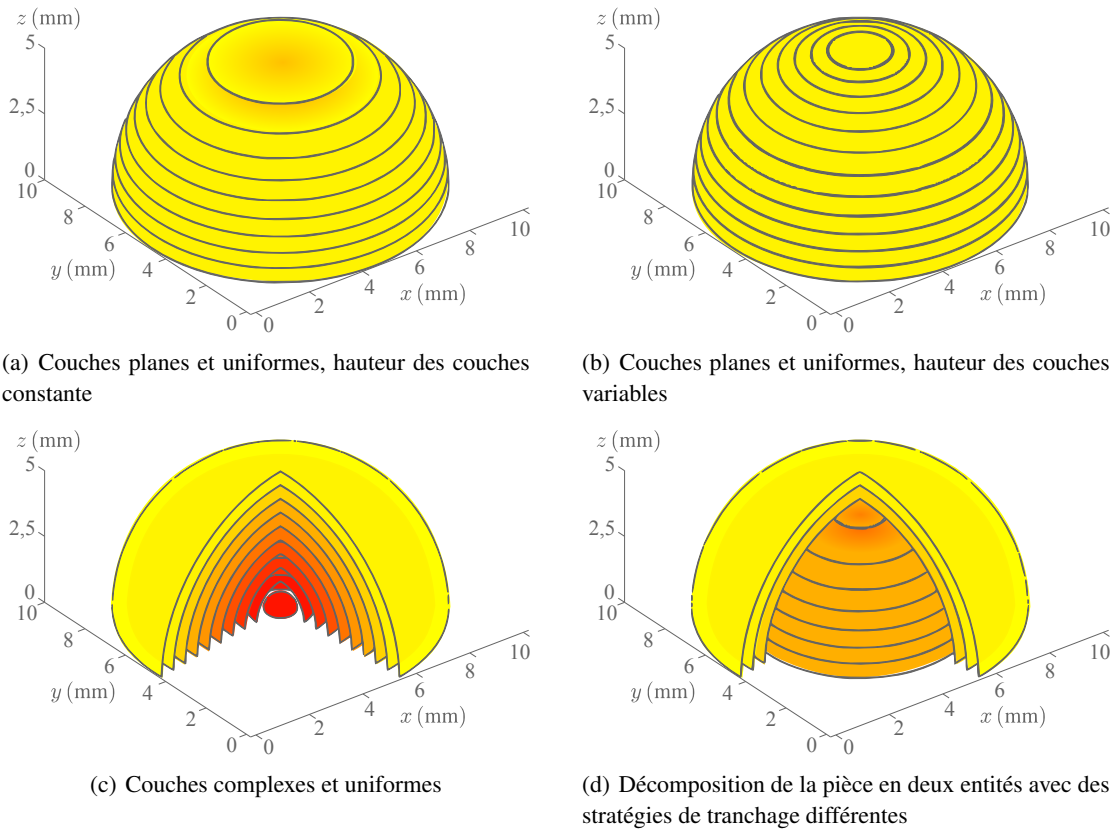


Figure 4.2 – Stratégies de tranchage

En ce qui concerne la stratégie de trajectoire, nous avons répertorié quatre types de trajectoires couramment utilisées en fabrication additive (Figure 4.3) [Muller2012].

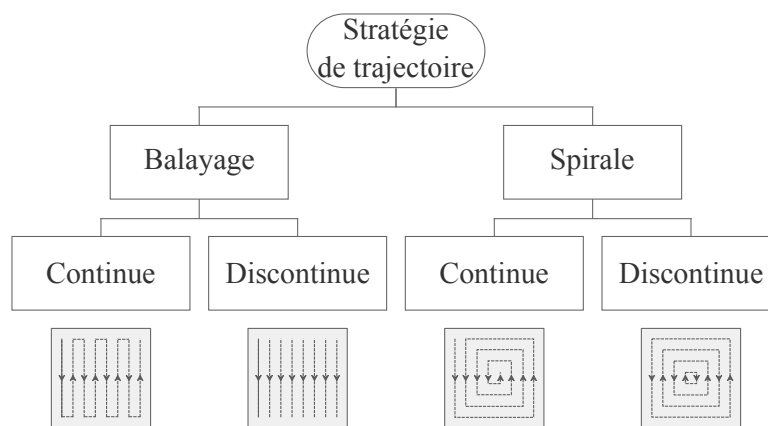
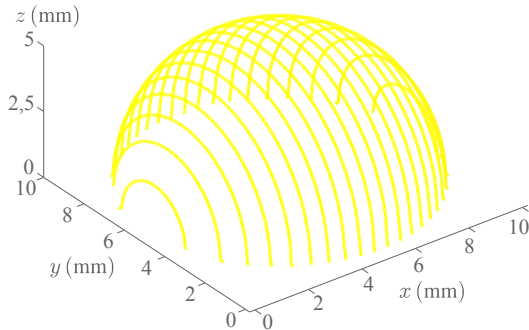
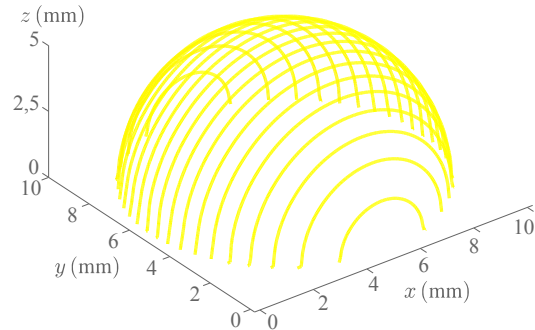


Figure 4.3 – Classification des stratégies de trajectoire de remplissage

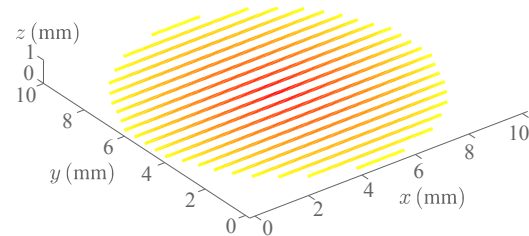
Nous distinguons, d'une part, si la trajectoire est de type balayage (Figure 4.4(a,b,c)) ou de type spiral (Figure 4.4(d)) et, d'autre part, si la trajectoire est continue ou discontinue.



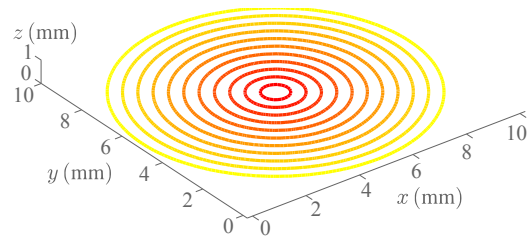
(a) Trajectoire discontinue de type balayage dans une couche complexe



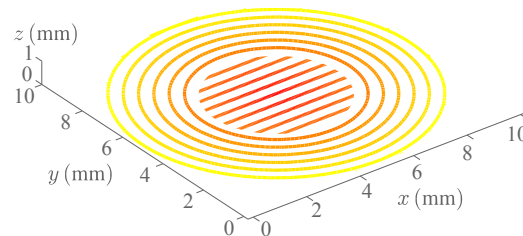
(b) Trajectoire discontinue de type balayage dans une couche complexe



(c) Trajectoire discontinue de type balayage dans une couche plane



(d) Trajectoire discontinue de type spiral dans une couche plane



(e) Décomposition d'une couche en deux entités avec des stratégies de trajectoire différentes

Figure 4.4 – Stratégies de trajectoire

Même s'il existe peu de types de stratégie de fabrication, on peut voir que le nombre de stratégies possibles est important. En effet, premièrement, chaque type de stratégie de tranchage propose une infinité de configurations. On peut, pour un type de stratégie donné, faire varier la direction des plans dans le cas d'une stratégie avec des couches planes, la géométrie des surfaces dans le cas d'une stratégie avec des couches complexes, la hauteur des couches (Figure 4.2(a,b)), etc. Deuxièmement, la stratégie de tranchage n'est pas forcément unique, il est possible d'avoir, dans une pièce, plusieurs entités réalisées avec différentes stratégies de tranchage (Figure 4.2(d)). Troisièmement, chaque type de stratégie de trajectoire propose une infinité de configurations. On peut, pour un type de stratégie donné, faire varier de nombreux paramètres, comme la forme ou

l'orientation de la courbe (Figure 4.4(a,b)), le point initial, etc. Quatrièmement, la stratégie de trajectoire n'est pas forcément unique. Il est possible d'avoir, dans une couche, plusieurs zones réalisées avec différentes stratégies de trajectoire (Figure 4.4(e)).

Les possibilités pour la stratégie de fabrication étant illimitées, l'évaluation de l'ensemble des possibilités pour la pièce à fabriquer n'est pas concevable. Ce chapitre concerne les solutions envisagées et les méthodes proposées pour déterminer les stratégies de fabrication qui seront évaluées. Les solutions envisagées sont présentées ici suivant deux catégories : les méthodes de sélection de trajectoires et les méthodes de génération automatique de trajectoires.

4.1.2 Solutions envisagées

Génération de trajectoires par sélection de stratégies

L'objectif de la sélection de trajectoires est, à la manière d'un logiciel de fabrication assistée par ordinateur (FAO) conventionnel, de choisir une stratégie de tranchage puis une stratégie de trajectoire parmi une collection de stratégies existantes. Nous avons montré, précédemment, qu'il n'est pas envisageable d'évaluer l'ensemble des configurations de stratégie de fabrication. Ainsi, il est nécessaire que les méthodes de sélection proposées soient basées sur les caractéristiques de la pièce et de la répartition des matériaux.

Nous avons vu, dans le chapitre consacré à la modélisation et à l'optimisation du procédé, qu'une stratégie de fabrication devait proposer une évolution graduelle de la fonction matériau. La ou les propositions de stratégies de fabrication doivent donc, à minima, avoir cette caractéristique pour être appropriées à la fabrication d'une pièce. Les critères de choix pour les méthodes de génération de trajectoires par sélection de stratégies s'appuient donc nécessairement sur la définition de la répartition des matériaux. On peut envisager de se baser sur les caractéristiques d'une répartition des matériaux pour proposer une ou plusieurs stratégies de fabrication appropriées.

La méthode de sélection de trajectoire que nous proposons est fondée sur les données mathématiques liées à la distribution des matériaux. On constate, en effet, que les données mathématiques de certains types de répartition des matériaux ont des particularités avec lesquelles il est possible de définir une ou des stratégies de fabrication adaptées. L'objectif est donc d'associer des types de répartition des matériaux à des stratégies de trajectoire. Cette méthode est décrite dans la seconde partie de ce chapitre.

Génération automatique de trajectoires

Contrairement aux méthodes de sélection de trajectoires permettant de choisir des stratégies parmi un panel de stratégies existantes, l'objectif des méthodes de génération automatique de trajectoires est de définir une trajectoire spécifique à la pièce. Nous verrons que, dans certains

cas, les stratégies existantes peuvent être limitées, en particulier en ce qui concerne les répartitions des matériaux avec des gradients complexes (Section 4.5). En effet, les différentes stratégies de trajectoire utilisées ont été mises en place pour la fabrication de pièces homogènes et peuvent être limitées pour la fabrication de pièces hétérogènes. C'est pourquoi ces méthodes doivent proposer, pour chaque pièce à fabriquer, une trajectoire spécifique en prenant en compte les caractéristiques de la répartition des matériaux.

Les méthodes de génération de trajectoires, comme les méthodes précédemment évoquées, doivent s'appuyer sur la définition de la répartition des matériaux. La différence réside dans la création d'une trajectoire spécifique qui n'existe pas dans une liste préétablie. Ainsi, la trajectoire n'est pas définie par une stratégie de trajectoire mais une ou plusieurs courbes de trajectoires spécialement créée pour la pièce à fabriquer. La génération des courbes de trajectoires doit répondre à plusieurs exigences. En effet, il est nécessaire, d'une part, que la trajectoire permette un remplissage complet de l'ensemble des couches et, d'autre part, que l'évolution de la fonction matériau soit la plus progressive possible.

La méthode de génération automatique de trajectoire que nous proposons est basée sur la création d'une grille avec des points de passage par lesquels la trajectoire doit passer. Ces trajectoires sont générées automatiquement et spécifiquement à la répartition des matériaux de la pièce en prenant en compte les travaux de modélisation et d'optimisation du procédé. Cette méthode est présentée dans la troisième partie de ce chapitre.

Nous verrons, dans la cinquième partie de ce chapitre, les intérêts des deux méthodes ainsi que l'avantage que peut représenter la génération d'une trajectoire mixte définie à l'aide des deux méthodes.

4.2 Génération de trajectoires par sélection de stratégies

4.2.1 Principe de la méthode proposée

La sélection des stratégies de fabrication est effectuée en deux temps. Dans un premier temps, un choix est réalisé pour la stratégie de tranchage en fonction de la géométrie de la pièce (Figure 4.5(I)). Il est intéressant que cette première sélection comporte plusieurs propositions de stratégies augmentant ainsi les possibilités d'en trouver une adaptée. Évidemment, la décomposition de la pièce en entités fabriquées avec différentes stratégies de tranchage est possible. Les configurations de tranchage doivent être décrites mathématiquement pour la suite de la sélection. Une stratégie avec des couches planes est décrite par un ensemble de vecteurs $\vec{n}_i$ perpendiculaires à la surface inférieure des couches. Une stratégie avec des couches complexes est décrite par un ensemble de surfaces S_i représentatives de la surface inférieure des couches.

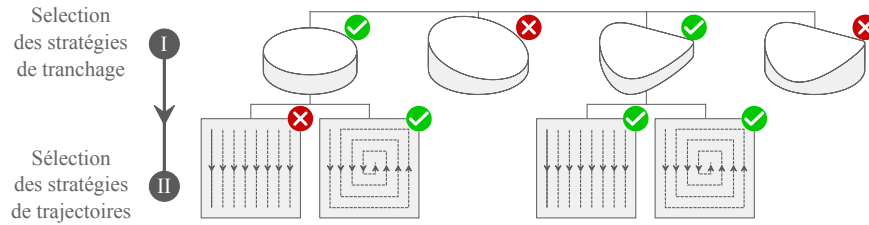


Figure 4.5 – Principe de la génération de trajectoires par sélection de stratégie

Dans un second temps, des stratégies de trajectoire sont proposées en fonction des stratégies de tranchage sélectionnées et de la répartition des matériaux (Figure 4.5(II)). Pour cela, une classification des répartitions des matériaux est définie. Cette classification permet de caractériser, pour chaque pièce, le type de répartition ainsi que de le décrire avec des données mathématiques qui sont ensuite utilisées pour la sélection des stratégies de trajectoire.

4.2.2 Classification des répartitions des matériaux

La classification des répartitions des matériaux s'appuie sur la dimension du vecteur gradient de la fonction matériau et de la répartition des surfaces d'équi-composition, tous les deux représentatifs de la distribution des matériaux dans le domaine de la pièce [Mognol2011]. La définition des critères de sélection est exposée avec les données mathématiques associées.

Le premier critère est basé sur la dimension du vecteur gradient de la fonction matériau. Le vecteur gradient indique de quelle façon la fonction matériau varie dans l'espace :

$$\vec{\nabla} M^*(x, y, z) = \left(\frac{\partial}{\partial x} M^*(x, y, z), \frac{\partial}{\partial y} M^*(x, y, z), \frac{\partial}{\partial z} M^*(x, y, z) \right) \quad (4.1)$$

Une répartition des matériaux possède un gradient à une dimension, s'il existe un vecteur $\vec{d}_1$ constant tel que :

$$\vec{\nabla} M^*(x, y, z) = g_1(x, y, z) \vec{d}_1 \quad (4.2)$$

Une répartition des matériaux possède un gradient à deux dimensions, s'il existe deux vecteurs $\vec{d}_1$ et $\vec{d}_2$ constants tel que :

$$\vec{\nabla} M^*(x, y, z) = g_1(x, y, z) \vec{d}_1 + g_2(x, y, z) \vec{d}_2 \quad (4.3)$$

Dans les autres cas, la répartition des matériaux possède un gradient à trois dimensions. Concernant ce premier critère, la répartition des matériaux peut donc être de trois types. Dans le cas d'un gradient à une dimension, la donnée mathématique la plus intéressante est le vecteur $\vec{d}_1$ qui représente la direction de variation de la composition. De même, dans le cas d'un gradient à deux dimensions, se sont les vecteurs $\vec{d}_1$ et $\vec{d}_2$ qui représentent les directions de variation de la composition.

Le second critère de classification est, quant à lui, basé sur la répartition des surfaces d'équi-composition. Ces surfaces correspondent à l'ensemble des points où la fonction matériau souhaitée est de même valeur. Elle est définie par :

$$\mathcal{S}_E = \{(x, y, z) \in R^3 \mid M(x, y, z) = \text{constante}\} \quad (4.4)$$

Une répartition des matériaux possède un gradient parallèle s'il existe un vecteur constant $\vec{p}$ tel que, dans tous les plans perpendiculaires à ce vecteur, les courbes d'équi-composition correspondent également à des courbes d'équi-distance à une courbe de référence (Figure 4.6(a)).

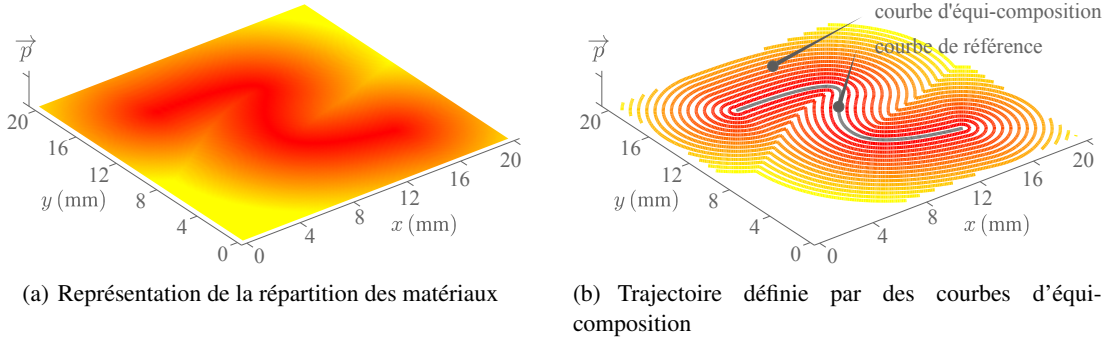


Figure 4.6 – Répartition des matériaux avec un gradient parallèle

Ce second critère ne concerne que les répartitions des matériaux avec un gradient à deux ou trois dimensions puisque la répartition des surfaces d'équi-composition est déjà connue pour les répartition des matériaux avec un gradient à une dimension. Dans le cas d'un gradient parallèle, il peut être intéressant de définir la trajectoire à l'aide des lignes d'équi-composition dans les plans perpendiculaires à $\vec{p}$ (Figure 4.6(b)). En effet, en définissant la trajectoire de cette manière, il est possible, d'une part, de remplir la couche puisque les courbes de la trajectoires sont équidistantes et, d'autre part, de proposer une variation graduelle des débits puisque la trajectoire suit également les courbes d'équi-composition.

Avec ces deux critères, la classification définit donc cinq types de répartition des matériaux (Figure 4.7). L'ensemble des distributions des matériaux peut être classifié et décrit à l'aide de données mathématiques.

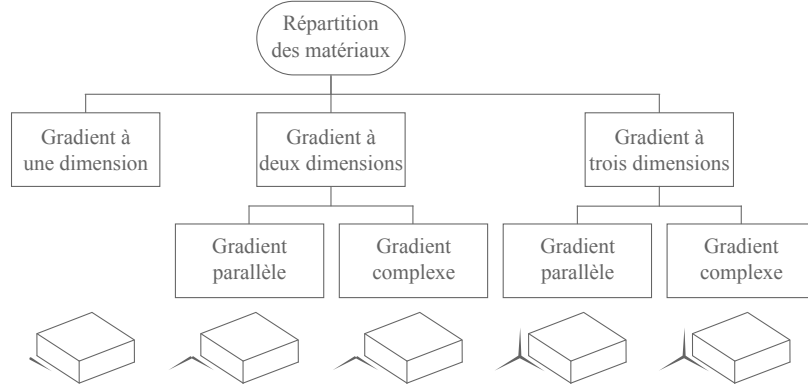


Figure 4.7 – Classification des répartitions des matériaux

On peut noter que si la pièce est décrite à l'aide d'un modèle composite (Section 3.1) la classification doit être réalisée dans chaque sous-domaine de description de la pièce. Des stratégies de trajectoire différentes peuvent ainsi être sélectionnées dans les sous-domaines de la pièce.

4.2.3 Sélection de stratégies et génération de trajectoires

Pour chaque stratégie de tranchage sélectionnée, une ou des stratégies de trajectoire sont proposées (Figure 4.8) [Muller2012]. Ces propositions sont basées sur les données mathématiques de description de la stratégie de tranchage et celles de classification de la répartition des matériaux. Les trajectoires proposées sont ensuite décrites pour être évaluées et comparées (Section 3.6).

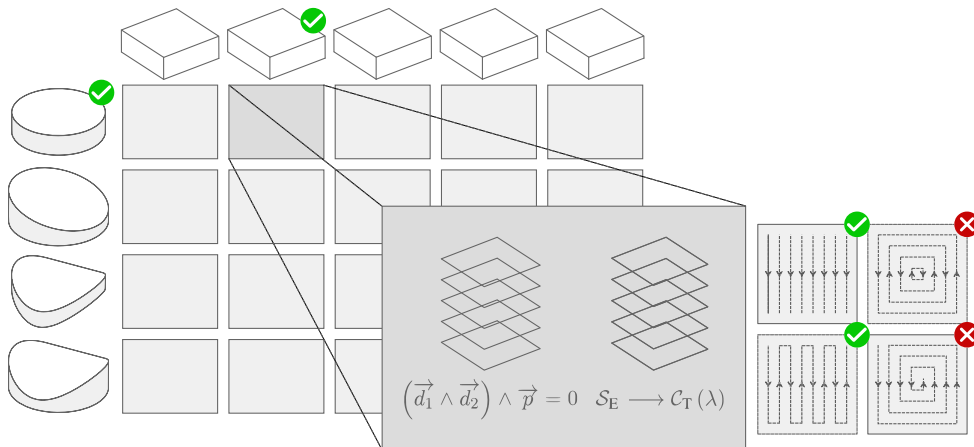


Figure 4.8 – Sélection des stratégies de trajectoire

4.3 Génération automatique de trajectoires

4.3.1 Principe de la méthode proposée

Le principe de la méthode de génération de trajectoires est basé sur la création d'une grille avec des points de passage par lesquels la trajectoire doit passer. Pour cela, on se place dans le cadre d'une fabrication avec une stratégie de tranchage avec des couches planes et uniformes. On rappelle que, dans une couche, pour remplir la surface correspondante à la pièce il est nécessaire que la tête de dépôt passe partout et ne passe qu'une seule fois au même endroit. Ainsi, si l'on définit un espacement des points de la grille égal à l'espacement entre deux cordons, il est possible de remplir la couche en considérant que la tête de dépôt passe par tous les points une seule fois. Après avoir appliqué une stratégie de tranchage à l'objet, il est possible, dans une couche (Figure 4.9(a)), de créer les points de passage en fonction de la géométrie de la couche (Figure 4.9(b)). La génération de trajectoires étant choisie, en premier lieu, en fonction du matériau, chaque point de passage comporte une information sur la répartition des matériaux (Figure 4.9(c)). Cette information est directement déduite de la fonction matériau de description de la pièce :

$$\text{Points de passage} = \{\mathcal{P}_i\} = \left\{ [x_i, y_i, z_i, M^*(x_i, y_i, z_i)] \right\}, i \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad (4.5)$$

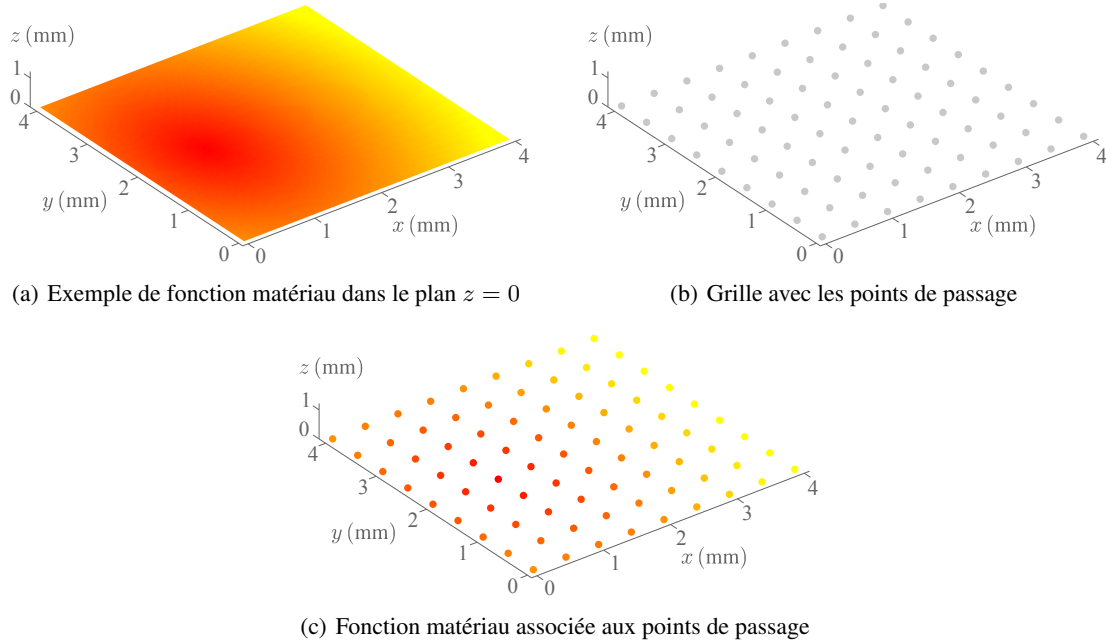


Figure 4.9 – Points de passage pour la génération automatique de trajectoires

Après création de la grille, la génération de trajectoires est effectuée en plusieurs étapes. Tout d'abord, l'ordonnancement des points de passage est déterminé. C'est sur ce point que la détermination d'une trajectoire adaptée va être déterminée. Finalement, la génération des trajectoires

peut être réalisée à partir des points de passage ordonnancés. Ces étapes sont réalisées dans chaque couche définie par la stratégie de tranchage. Nous allons, par la suite, détailler les méthodes proposées pour l'ordonnancement des points de passage ainsi que pour la génération de la trajectoire.

4.3.2 Ordonnancement des points de passage

Méthode d'ordonnancement

Dans cette étape de la génération automatique de trajectoires, les points de passage $\{\mathcal{P}_i\}$ sont donc ordonnancés. L'ordre de passage est défini par :

$$\text{Ordre de passage} = \{\mathcal{O}_i\} = \left\{ [x_i, y_i, z_i, M^*(x_i, y_i, z_i)] \right\}, i \in \llbracket 1; n \rrbracket \quad (4.6)$$

Ainsi, les informations sur les coordonnées des points de passage et la répartition des matériaux sont conservées et ordonnancées (Figure 4.10).

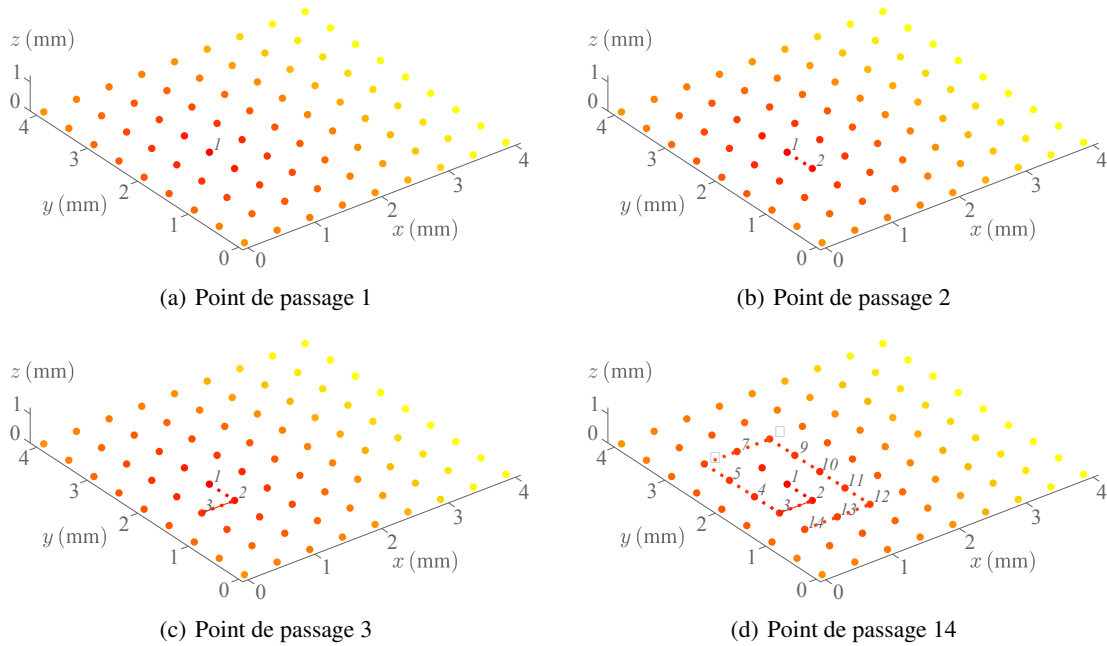


Figure 4.10 – Ordonnancement des points de passage

Concernant la définition de l'ordre des points de passage, le choix concerne, tout d'abord, le point initial (Figure 4.10(a)). Ce choix est effectué en fonction de la répartition des matériaux et des coordonnées des points (Figure 4.11(I)). Pour la première couche, le point initial est le plus souvent un point où la fonction matériau est minimum ou maximum. Concernant les autres couches, le point initial de la couche considérée est défini en fonction du dernier point de la couche précédente. L'objectif est de minimiser, entre les couches, la variation de la fonction matériau et donc des commandes des débits.

Il faut ensuite choisir le second point de passage. Ce point fait partie des points voisins au premier point (Figure 4.10(b)). Les points voisins d'un point considéré sont les points dont la distance avec le point considéré est égale à l'espacement des points de passage. Ainsi, le passage d'un point à un autre ne peut pas être réalisé en diagonale. Parmi les points sélectionnés, le choix se porte sur celui qui minimise un critère en rapport avec la répartition des matériaux (Figure 4.11(IV)). Nous verrons, par la suite, que ce critère peut être défini de différentes manières, l'objectif étant de minimiser la variation de la fonction matériau au cours du dépôt pour éviter ainsi des fluctuations importantes des débits des poudres. Le point choisi devient, pour la prochaine étape de l'algorithme, le point courant.

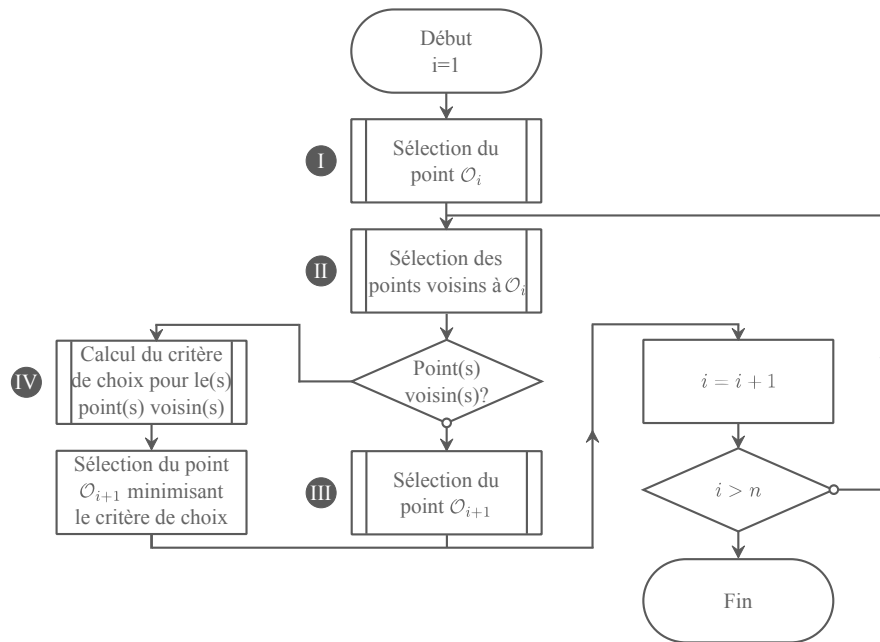


Figure 4.11 – Organigramme pour l'ordonnancement des points de passage

La sélection des points suivants est basée sur le même modèle que pour le second point (Figure 4.11(II)). Lors de la sélection des points voisins, une condition supplémentaire est définie. En effet, pour être testé, un point voisin doit être libre, c'est-à-dire qu'il n'a pas déjà été ordonnancé.

Dans le cas où le point courant ne possède pas de points voisins libres, l'ajout de points dans le groupe de points ordonnancés s'arrête (Figure 4.12(a)). Un nouveau groupe de points de passage débute sur un point libre (Figure 4.12(b)). La sélection de ce point est toujours basée sur la minimisation d'un critère en rapport avec la répartition des matériaux (Figure 4.11(II)).

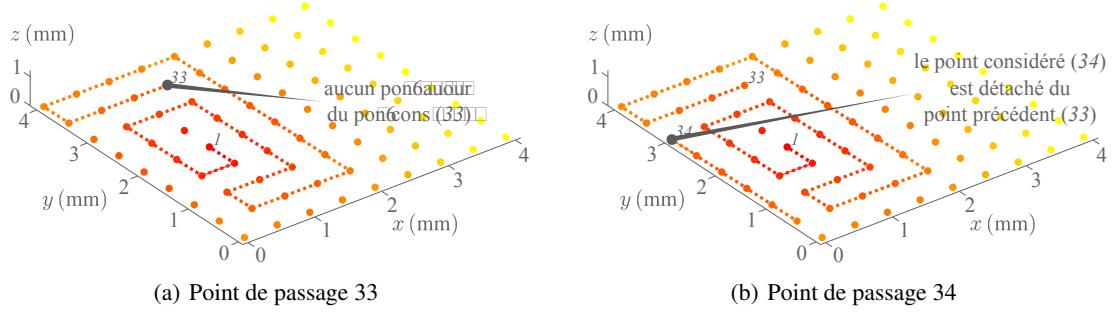


Figure 4.12 – Démarrage d'une nouvelle suite de points

Critères de sélection des points

Le critère de sélection des points est utilisé pour choisir le point voisin au point courant. Ce critère est relatif à la répartition des matériaux. Son objectif est de pouvoir minimiser la variation de la fonction matériau $m^*(\lambda)$ au cours du dépôt dans le but d'obtenir une répartition des matériaux la plus proche possible de celle souhaitée. Le premier critère proposé est basé sur la différence de fonction matériau entre les différents points voisins et le point courant. Ainsi, parmi les points voisins $\mathcal{O}_j$, le point sélectionné $\mathcal{O}_{k+1}$ est le point qui possède la fonction matériau la plus proche de celle du point courant $\mathcal{O}_k$:

$$\mathcal{O}_{k+1} = \mathcal{O}_j \mid \min_j \left(|M^*(x_k, y_k, z_k) - M^*(x_j, y_j, z_j)| \right) \quad (4.7)$$

Ce premier critère répond, entre deux points de passage, à l'objectif de minimisation de la fluctuation de la fonction matériau $m^*(\lambda)$ puisque c'est la plus petite variation qui est choisie à chaque fois. Néanmoins, ce critère ne prend pas réellement en compte les phénomènes d'inertie du procédé (Section 3.2). En effet, si la fonction matériau $m^*(\lambda)$ est dans une phase d'augmentation, il est peut être plus intéressant de choisir un point qui va dans le sens de cette dynamique plutôt qu'un point avec lequel la différence de fonction matériau est plus petite mais qui oblige à contrer cette dynamique.

Un second critère permet, quant à lui, de prendre en compte la dynamique du procédé. Avec ce critère, le point choisi est celui qui minimise la différence entre la fonction matériau simulée et la fonction matériau souhaitée. Pour cela, les travaux de modélisation et d'optimisation sont utilisés directement dans la méthodologie de génération de trajectoire. Ainsi, l'état simulé des débits des poudres est connu au fur et à mesure de l'ordonnancement. On peut alors prendre en compte l'état du système et connaître sa dynamique pour déterminer l'ordre des points de passage. Pour le choix du point ordonnancé $\mathcal{O}_{k+1}$, la simulation de la fabrication a déjà été réalisée jusqu'au point $\mathcal{O}_k$. La simulation de fabrication est alors faite pour tous les points voisins libres au point $\mathcal{O}_k$. Parmi les points voisins $\mathcal{O}_j$, le point sélectionné $\mathcal{O}_{k+1}$ est le point qui minimise l'erreur entre la fonction matériau simulée et celle souhaitée en prenant en compte l'optimisation des

débites des poudres :

$$\mathcal{O}_{k+1} = \mathcal{O}_j \mid \min_j \left(|M(x_j, y_j, z_j) - M^*(x_j, y_j, z_j)| \right) \quad (4.8)$$

Il est donc possible, à l'aide de ce critère, de prendre en compte l'état du système, sa dynamique et la possible optimisation des commandes des débits de poudres. De plus, comme le matériau simulé est connu au fur et à mesure de l'ordonnancement, il est envisageable de définir une tolérance sur la fonction matériau. Dans ce cas, si la fonction simulée n'est pas dans l'intervalle de tolérance, il est possible d'arrêter l'ajout de points dans le groupe de points ordonnancés et de définir un nouveau groupe de points. Ainsi, le démarrage d'un nouveau groupe peut être décidé pour deux raisons :

- Le point courant ne possède pas de points voisins libres ;
- La différence entre la fonction matériau simulée et souhaitée aux points voisins est supérieure à la tolérance.

Le fait d'ajouter une tolérance diminue donc l'erreur mais a tendance également à diminuer la longueur des courbes formant la trajectoire.

4.3.3 Génération de trajectoires à partir des points de passage

Suppression des points de passage isolés

Une fois l'ordonnancement déterminé, la trajectoire peut être définie à partir des points de passage. On peut remarquer, dans certains cas, que des points sont isolés, c'est-à-dire qu'ils ne sont reliés à aucun autre point de passage. Cela pose problème lorsqu'il s'agit de définir la trajectoire de fabrication. En effet, lorsque la tête de dépôt doit se déplacer d'un point à un autre, un cordon de matière se crée. Lorsqu'un point est isolé, il n'y a aucun dépôt de matière dans la zone de ce point. Pour éviter ce problème, l'ordonnancement est modifié pour supprimer tous les points isolés (Figure 4.13).

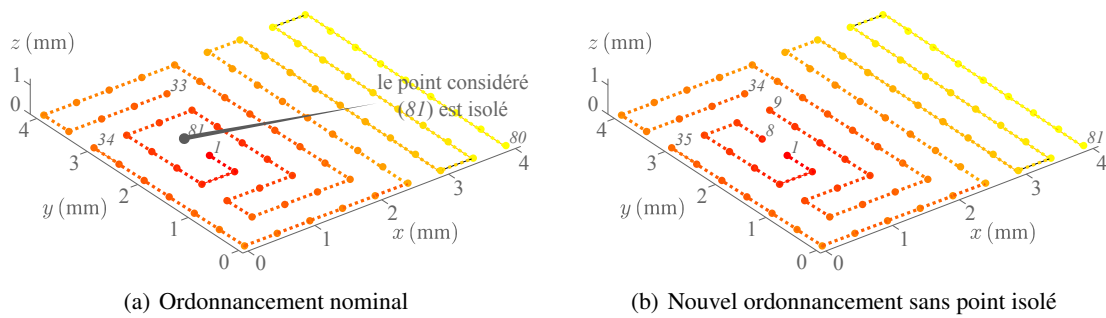


Figure 4.13 – Modification de l'ordonnancement pour supprimer les points isolés

La suppression de ces points isolés est faite de telle manière à ce qu'elle n'engendre pas la création de nouveaux points isolés suite au raccordement à une courbe de trajectoire. De plus, les critères de rattachement à un groupe de points ordonnancés sont relatifs à la répartition des matériaux pour limiter la modification de la fonction matériau $m^*(\lambda)$ définie par l'étape d'ordonnancement des points de passage.

Génération de trajectoires

La trajectoire peut être finalement créée à l'aide des points de passage. Les points ordonnancés sont alors utilisés pour créer des B-splines. Les points de passage deviennent alors des points de contrôle pour définir les courbes. Chaque groupe de points de passage correspond à une courbe de trajectoire. L'intérêt de l'utilisation des B-splines est de fluidifier les courbes de la trajectoire.

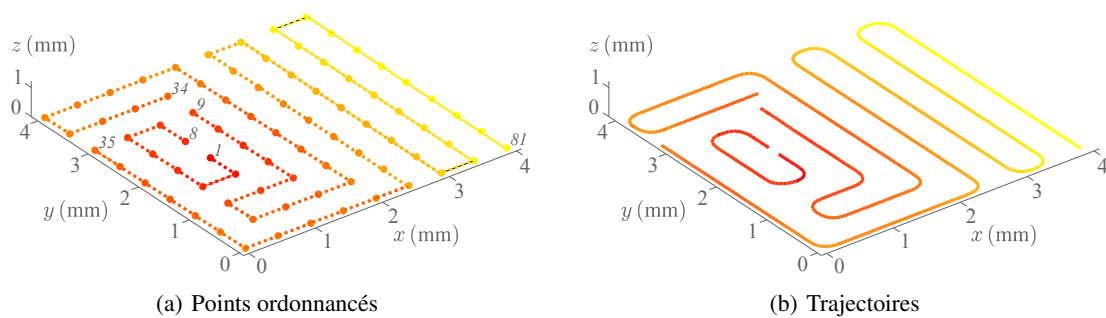
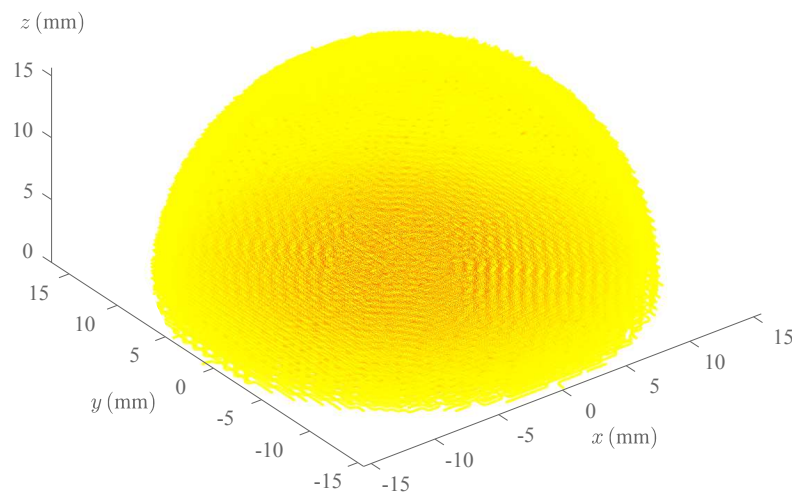


Figure 4.14 – Génération des trajectoires à partir des points ordonnancés

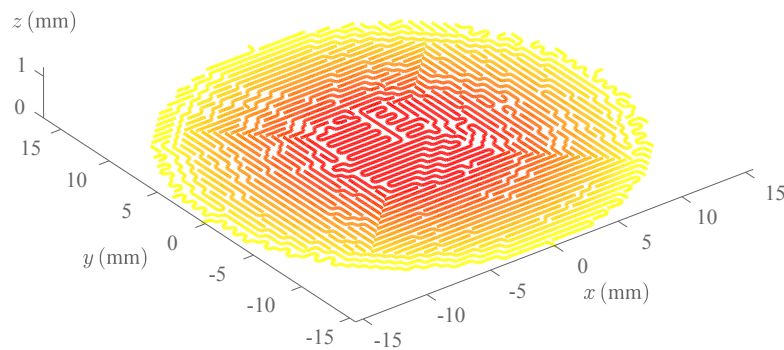
4.4 Validation expérimentale

4.4.1 Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude expérimentale est la validation de la modélisation et de l'optimisation du procédé dans le cadre de la génération automatique de trajectoires. Les expérimentations portent sur la fabrication et l'analyse d'une pièce multimatériau fabriquée avec une trajectoire générée automatiquement (Figure 4.15(a)). Les résultats de la simulation sont comparés à ceux des analyses matériaux.



(a) Trajectoire dans la partie supérieure de la prothèse de hanche



(b) Trajectoire dans le plan $z = 0$

Figure 4.15 – Description de la trajectoire générée

La pièce fabriquée est un disque multimatériau représentant une couche d'une prothèse de hanche (Figure 3.33(a)). Le premier matériau primaire est une poudre d'alliage base chrome-cobalt Stellite 6, désigné matériau A (Tableau 3.1). Le second matériau primaire est une poudre d'acier inoxydable 316L, désigné matériau B (Tableau 3.1). Cette pièce a déjà été fabriquée avec deux types de trajectoire (Section 3.5). Les résultats de cette étude sont donc également comparés aux résultats obtenus avec la trajectoire de type balayage et celle de type spirale.

4.4.2 Génération de la trajectoire et simulation de la fabrication

La trajectoire est générée à l'aide de la méthode de génération automatique de trajectoires (Figure 4.15(b)). Le critère de sélection des points pour l'ordonnancement est celui prenant en compte les travaux de modélisation et d'optimisation du procédé. On constate qu'avec cette méthode de génération, la fonction matériau $m^*(\lambda)$ présente, globalement, une évolution graduelle (Figure 4.16(c)). Néanmoins, on remarque de légères fluctuations de cette fonction matériau autour de cette évolution graduelle. Grâce à cette évolution graduelle de la fonction matériau souhaitée, les commandes des débits peuvent être optimisées dans des conditions favorables (Figure 4.16(a,b)). Effectivement, nous avons montré, dans le chapitre consacré à la modélisation et l'optimisation du procédé, que l'optimisation des commandes des débits n'est possible que si la stratégie de fabrication est adaptée (Section 3.3). Ainsi, avec l'utilisation combinée de la méthode de génération de trajectoire et des travaux de modélisation et d'optimisation du procédé, on obtient une fonction matériau simulée proche de celle souhaitée (Figure 4.16(c)). On peut noter que la somme des débits des poudres simulée est également proche du débit souhaité (Figure 4.16(d)).

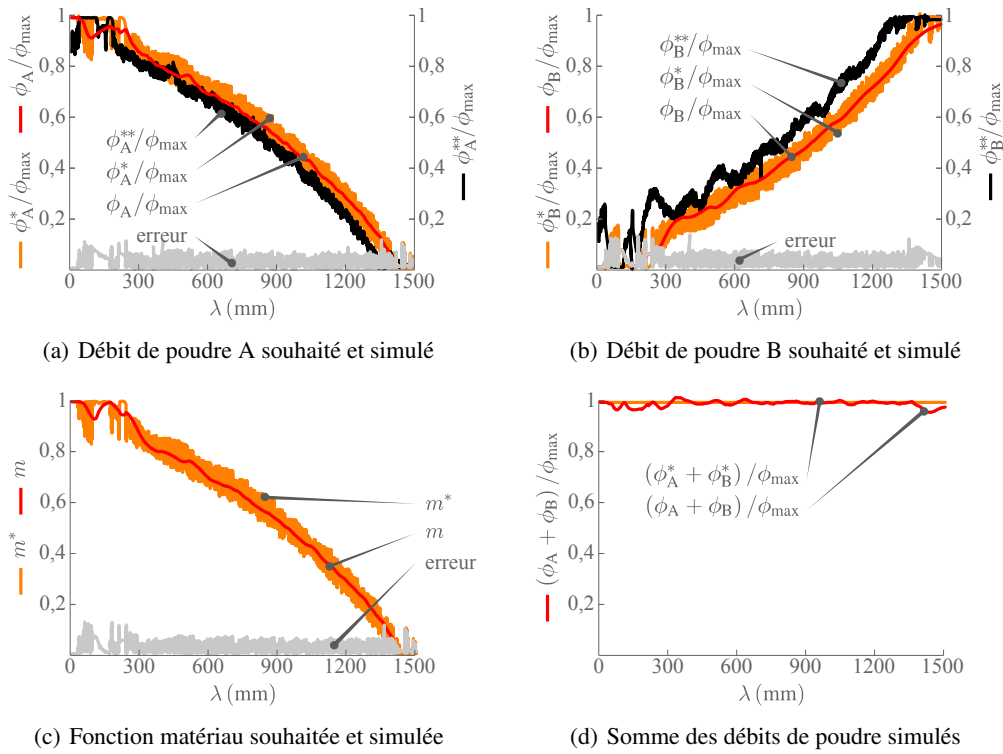


Figure 4.16 – Simulation de la fabrication avec optimisation des débits avec la trajectoire générée

L'indice de performance globale reflète bien l'observation faite sur la fonction matériau simulée. En effet, pour l'ensemble de la couche, l'indice de performance est assez proche du maximum (Figure 4.17). On peut noter, que l'indice de performance qui concerne la discrétisa-

tion de la fonction matériau par la trajectoire est très proche du maximum sur tout le domaine de la pièce. La présence de quelques zones où l'indice est un peu en deçà de la valeur maximale est donc due uniquement au comportement du système de distribution de poudre et peut être expliquée par les légères fluctuations de la fonction matériau $m^*(\lambda)$ autour de son évolution graduelle.

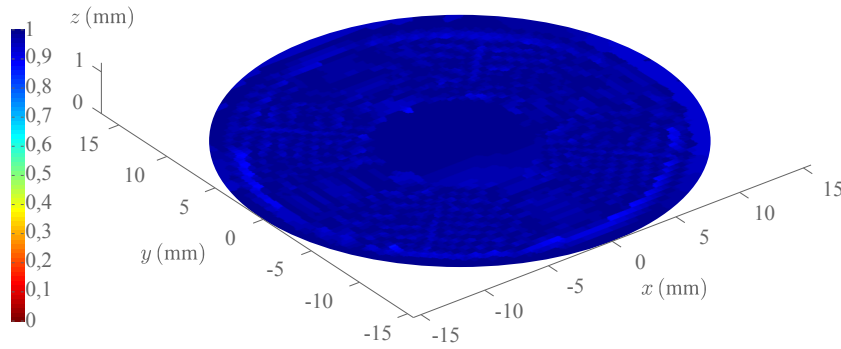


Figure 4.17 – Indice de performance $I_m(x, y, z)$ avec la trajectoire générée

4.4.3 Analyse de la fabrication

Les pièces ont été fabriquées avec le procédé CLAD® (Annexe A). Les caractéristiques géométriques et la composition des structures fabriquées ont été analysées (Figure 4.18). Les structures ont été polies. La composition a été analysée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) équipé d'une sonde d'analyse par dispersion de l'énergie. L'analyse semi-quantitative a été réalisée tous les 1,5 mm le long de trois segments définis par :

- premier segment : $x \in [-12, 7; 0]$, $y = -8$ et $z = 0$;
- deuxième segment : $x \in [-15; 0]$, $y = 0$ et $z = 0$;
- troisième segment : $x \in [-12, 7; 0]$, $y = 8$ et $z = 0$.

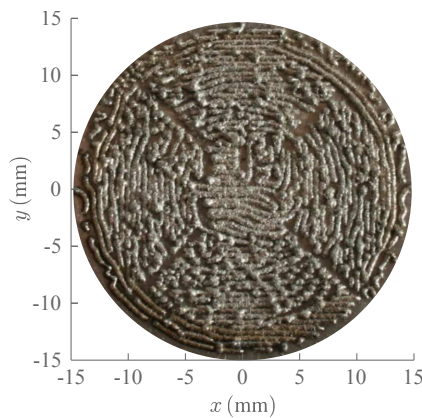


Figure 4.18 – Analyse de la géométrie de la pièce fabriquée

Cette analyse a été réalisée sur les éléments présents dans les deux matériaux primaires (Tableau 3.1). La distribution des matériaux est déterminée par rapport à la présence de quatre composants - chrome, cobalt, fer et nickel - représentatifs des deux matériaux primaires.

On remarque plusieurs défauts de géométrie sur la pièce fabriquée (Figure 4.18). Le premier défaut concerne le remplissage de la surface. On constate, en effet, qu'il manque de la matière à certains endroits. Après analyse de ce défaut, des corrections ont été apportées à la manière de commander les axes du procédé pour éviter un lissage des courbes et voir, ainsi, apparaître ce type de défaut. De plus, à l'instar des pièces fabriquées avec les stratégies de trajectoire conventionnelles, on constate des surplus de matière pouvant être supprimés en modifiant le fonctionnement du DCN de la machine. Étant donné que cette étude expérimentale est principalement orientée vers la répartition des matériaux, ces problématiques techniques n'ont pas été traitées.

Concernant la répartition des matériaux, on observe une bonne corrélation entre les résultats de la simulation et ceux issus de l'analyse matériau (Figure 4.19). On remarque, à l'exception de quelques points de mesure, que les résultats de l'analyse sont très proches de la courbe de simulation. De plus, la fonction matériau simulée étant assez proche de celle souhaitée, on peut considérer que la répartition des matériaux dans la pièce fabriquée est assez proche de celle souhaitée.

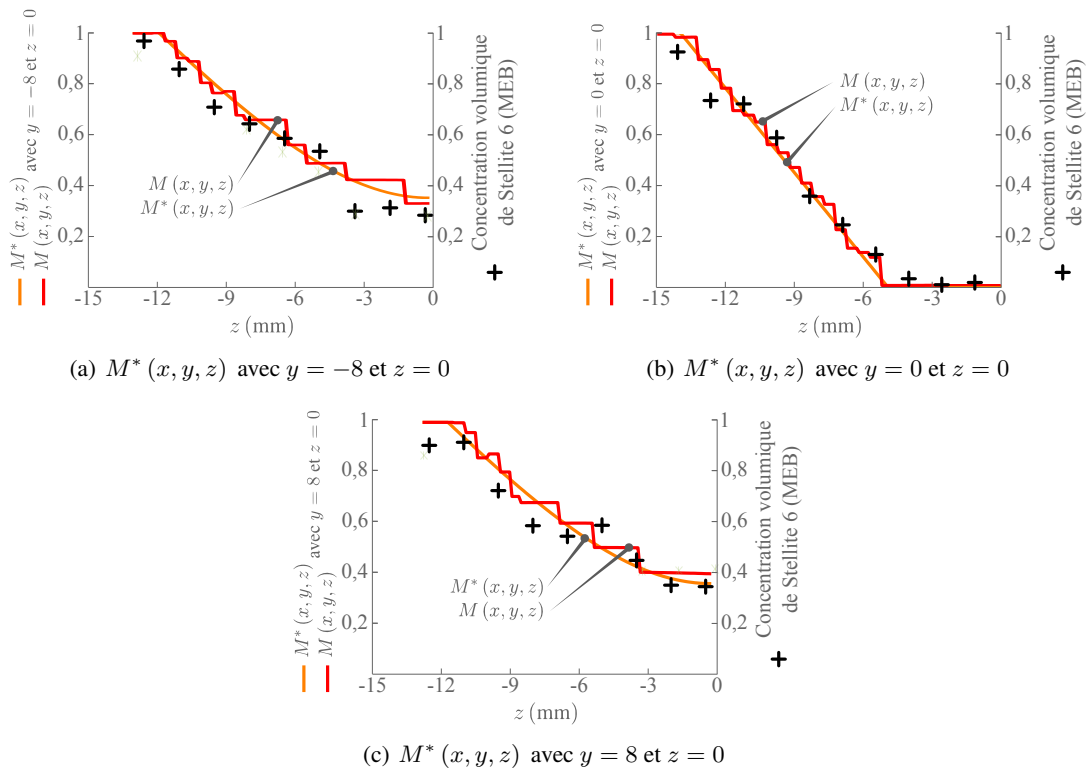


Figure 4.19 – Analyse de la composition de la pièce fabriquée

4.4.4 Synthèse de l'étude

La modélisation et l'optimisation du procédé dans le cadre de la génération automatique de trajectoire sont validées grâce à cette étude expérimentale. Les résultats de l'analyse matériau sont très proches de ceux issus de la simulation. De plus, on constate que l'utilisation combinée des travaux de modélisation et d'optimisation du procédé et de la méthode de génération de trajectoire permet de proposer une évolution graduelle de la fonction matériau $m^*(\lambda)$. Ainsi, après optimisation des débits, il est possible de fabriquer une pièce avec une répartition des matériaux proche de celle qui est souhaitée. On pourra noter que les légères fluctuations de cette fonction matériau autour de l'évolution graduelle desservent un peu la trajectoire automatique par rapport à la trajectoire de type spiral (Figure 4.20). Évidemment, la méthode de génération automatique de trajectoire, même si elle ne présente pas des résultats optimaux, permet de fabriquer tous types de pièces avec une répartition proche de celle souhaitée.

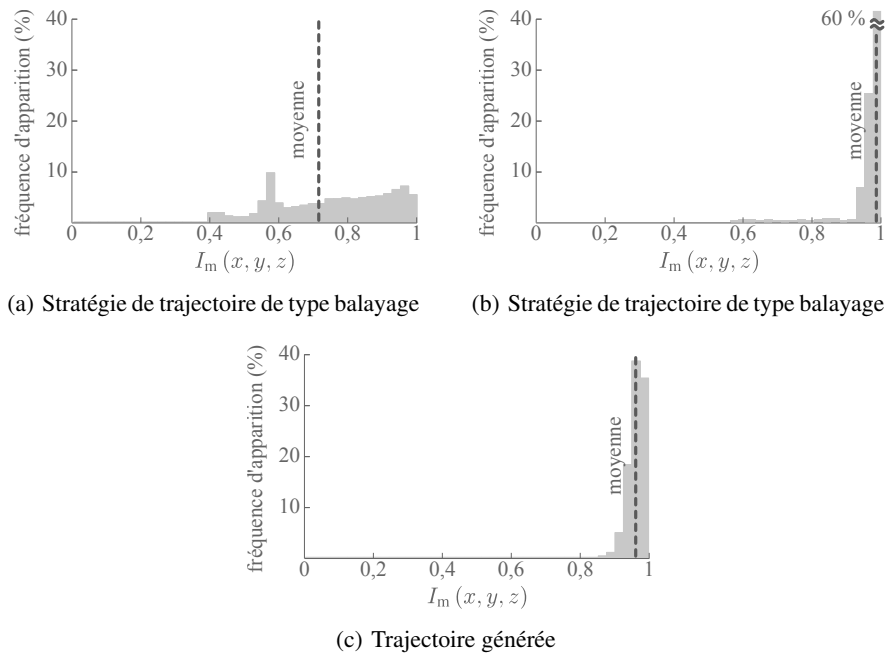
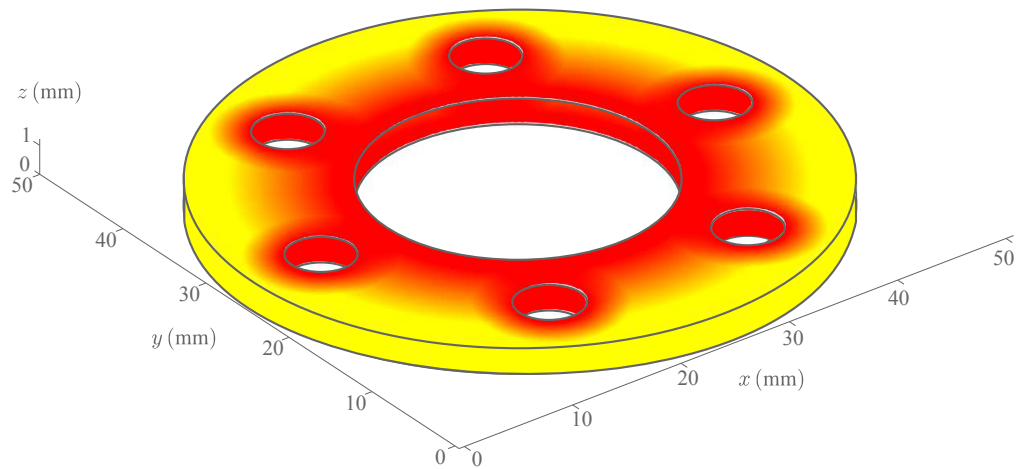


Figure 4.20 – Données statistiques sur l'indice de performance $I_m(x, y, z)$

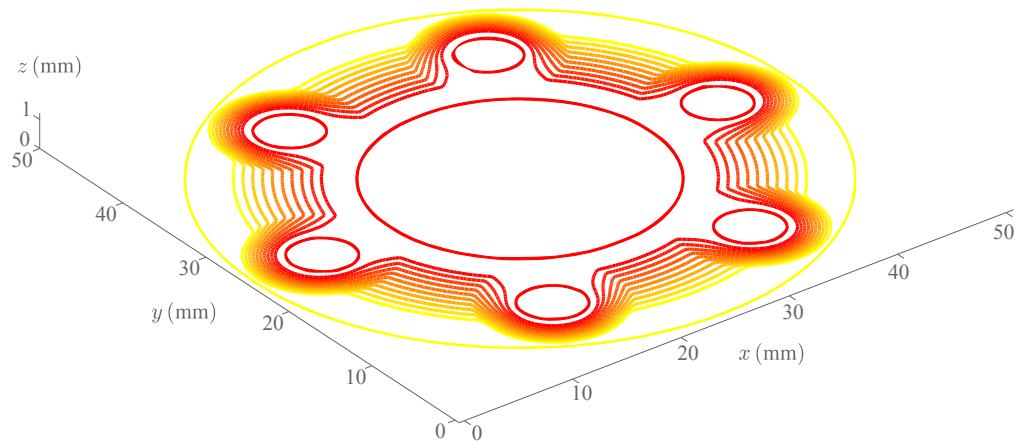
4.5 Intérêts des méthodes à travers quelques exemples

4.5.1 Intérêt de la génération automatique de trajectoires

L'étude de ce premier exemple a pour objectif de mettre en avant les possibilités de la méthode de génération automatique de trajectoires proposée. La géométrie et la répartition des matériaux de cet exemple sont inspirées d'un canal sous pression multimatériau avec une variation de la composition dans deux directions de l'espace (Figure 4.21(a)) [Shin2002]. La trajectoire est définie par la méthode de génération automatique intégrée dans une maquette informatique (Section 5.3).



(a) Répartition des matériaux



(b) Lignes d'équi-composition dans le plan $z = 0$

Figure 4.21 – Description de la répartition des matériaux

Pour des contraintes géométriques, on choisit de fabriquer cette pièce avec une stratégie de tranchage avec des couches planes et uniformes. La génération automatique de trajectoires est réalisée dans le plan $z = 0$. Dans ce plan, la répartition des matériaux possède un gradient

complexe à deux dimensions (Figure 4.21(b)). On remarque, effectivement, que les courbes d'équi-composition ne correspondent pas à des courbes d'équi-distance avec une courbe de référence. Sans méthodologie de fabrication de pièces multimatériaux comprenant une étape de détermination de stratégie de fabrication, il est impossible de procéder à la réalisation de ce type de pièce. Si l'on considère notre méthodologie de fabrication avec la méthode de sélection de stratégie, il est également très difficile de choisir une stratégie de trajectoire appropriée à cause de la complexité de la répartition des matériaux. En revanche, la méthode de génération automatique de trajectoire permet de définir automatiquement une trajectoire en prenant en compte les spécificités de la répartition des matériaux (Figure 4.22).

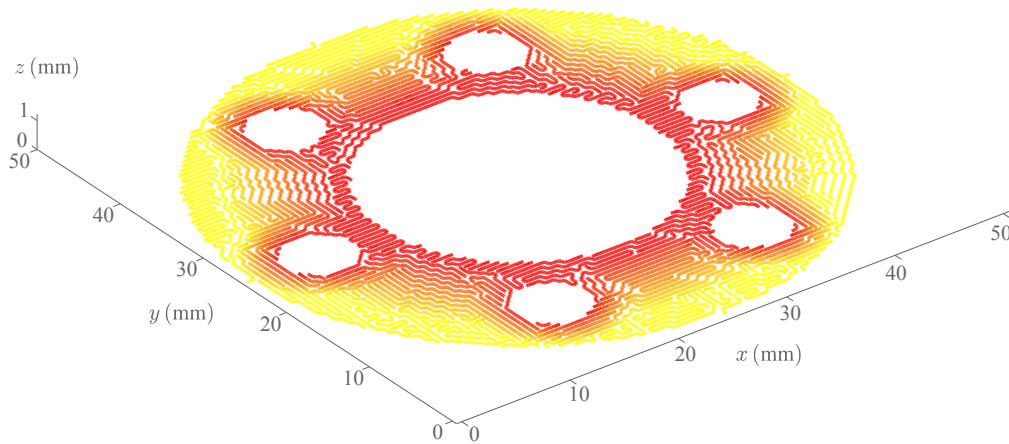


Figure 4.22 – Description de la trajectoire générée automatiquement

On constate que la trajectoire générée propose une évolution graduelle de la fonction matériau $m^*(\lambda)$ (Figure 4.23(a)). Cela rend ainsi possible une optimisation des commandes des débits de poudre. Ainsi, il est possible, avec cette trajectoire, de fabriquer dans de bonnes conditions (Figure 4.23).

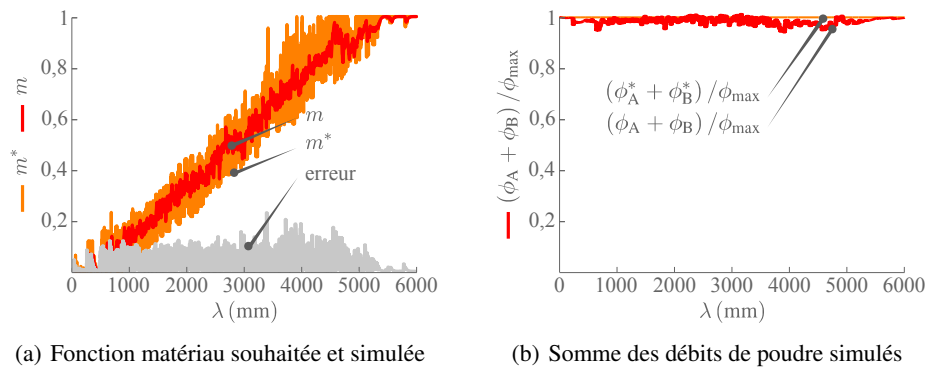


Figure 4.23 – Simulation de la fabrication

Grâce à la méthode de génération automatique de trajectoire associée aux travaux de modélisation et d'optimisation du procédé, la répartition des matériaux simulée est donc proche de celle souhaitée dans tout le domaine de la pièce (Figure 4.24(a)). On peut voir, avec cet exemple, que la méthode de génération automatique propose donc une trajectoire appropriée à la réalisation de cette pièce. On peut noter que la différence entre la fonction matériau simulée et la fonction matériau souhaitée est due, en partie, à la discrétisation de la fonction matériau par la trajectoire (Figure 4.24(b)). La trajectoire est ici difficilement perfectible puisque dans certaines zones de la pièce, la variation de la composition est très importante sur une petite distance (Figure 4.21(b)).

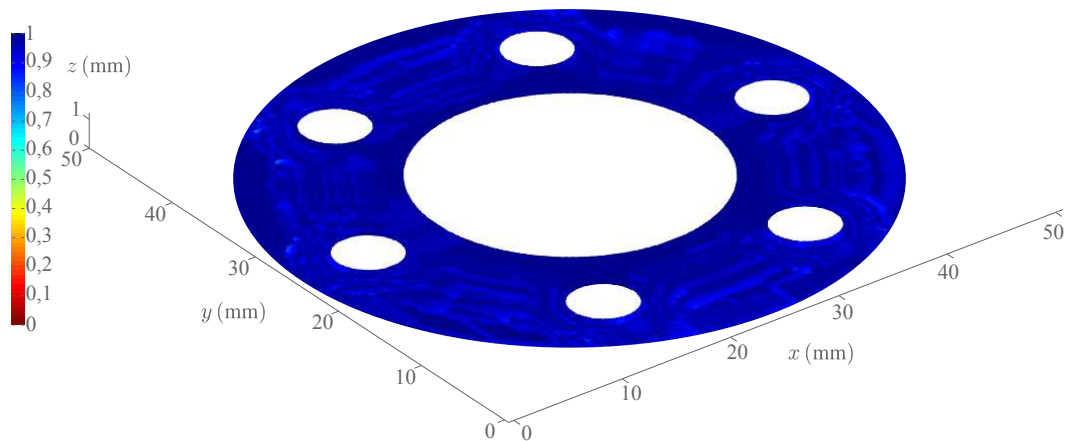
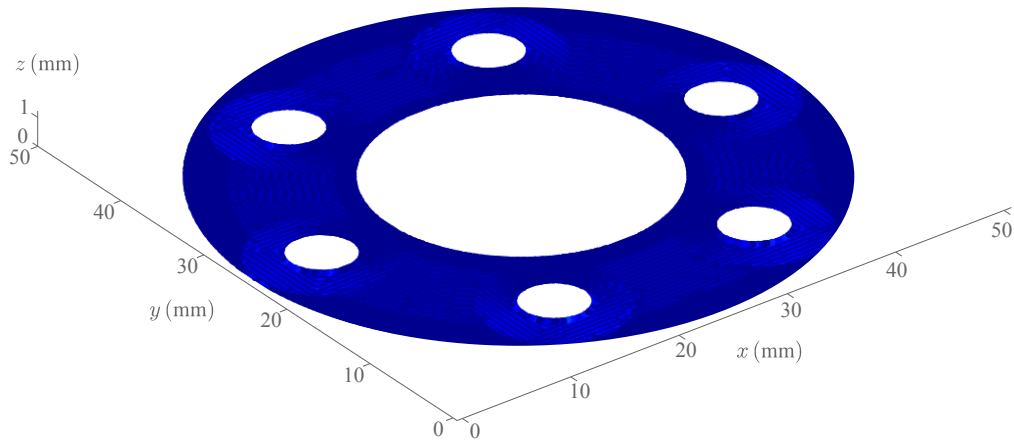
(a) Indice de performance $I_m(x, y, z)$ (b) Indice de performance $I_t(x, y, z)$

Figure 4.24 – Indices de performance avec la trajectoire générée

On constate donc, avec cet exemple, que la méthode de génération automatique de trajectoires intégrée à la méthodologie de fabrication de pièces multimatériaux permet de proposer une trajectoire adaptée à la fabrication de cette pièce alors qu'il n'est pas possible de déterminer une stratégie de fabrication avec les méthodologies de fabrication conventionnelles. De plus, la méthode de génération de trajectoires par sélection de stratégies ne permet pas non plus, dans ce

cas, de proposer une trajectoire adaptée étant donnée les stratégies de trajectoires existantes.

4.5.2 Intérêt de l'utilisation des travaux de modélisation et d'optimisation du procédé

Ce deuxième exemple vise à comparer les deux critères d'ordonnancement des points de passage de la méthode de génération automatique de trajectoires. Cette comparaison a pour objectif de mettre en avant l'avantage de prendre en compte les travaux de modélisation et d'optimisation du procédé pendant la génération de trajectoires. La méthode est utilisée pour générer une trajectoire pour une surface multimatériau avec les deux critères (Figure 4.25(a)). Les répartitions des matériaux simulées obtenues avec les deux critères sont ainsi comparées. La répartition des matériaux de l'exemple possède un gradient à deux dimensions complexe (Figure 4.25(b)).

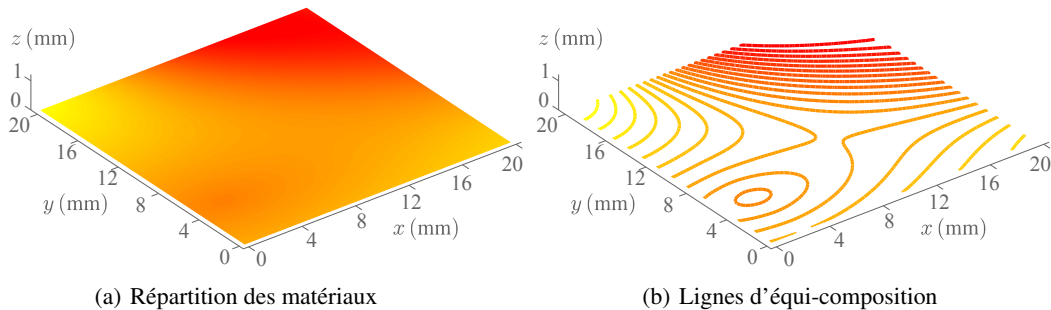


Figure 4.25 – Description de la répartition des matériaux

La première trajectoire est générée avec le premier critère. Dans ce cas, les travaux de modélisation et d'optimisation ne sont pas pris en compte. Ainsi, la sélection est faite entre des points de passage qui ont la plus petite différence de fonction matériau. On voit que cette trajectoire possède de nombreuses parties de courbes en ligne droite (Figure 4.26(a)). A l'inverse, la deuxième trajectoire - générée avec le critère qui prend en compte les travaux de modélisation et d'optimisation du procédé - présente des courbes plus proches des lignes d'équi-composition (Figure 4.26(b)).

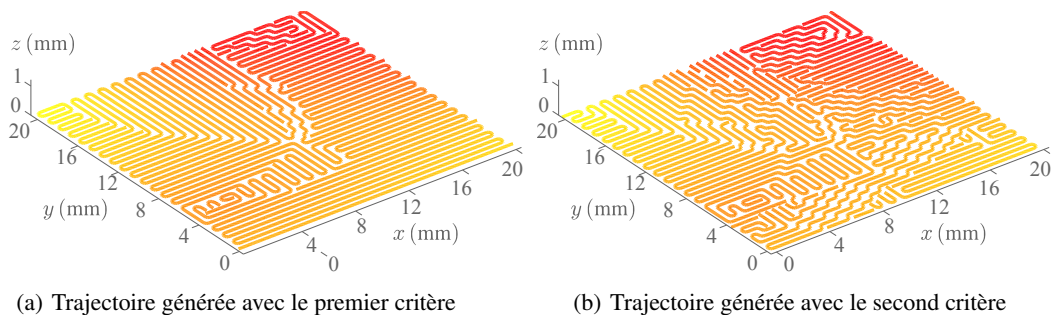


Figure 4.26 – Description des trajectoires

Les différences entre les deux trajectoires sont plus visibles lorsque l'on analyse l'évolution de la fonction matériau $m^*(\lambda)$. Concernant la première trajectoire, on constate plusieurs fluctuations importantes de cette fonction (Figure 4.27(a)) contrairement à la seconde trajectoire (Figure 4.27(b)). En effet, sur cette seconde trajectoire, il n'y a quasiment aucune fluctuation de la fonction matériau ce qui permet une optimisation des commandes des débits permettant une fabrication dans de bonnes conditions. Le fait d'utiliser les travaux de modélisation et d'optimisation du procédé permet donc de proposer une trajectoire plus adaptée à la fabrication de cette pièce.

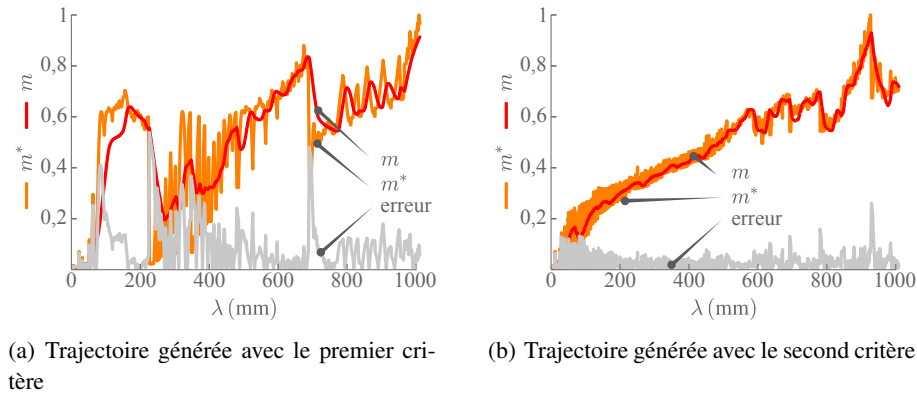
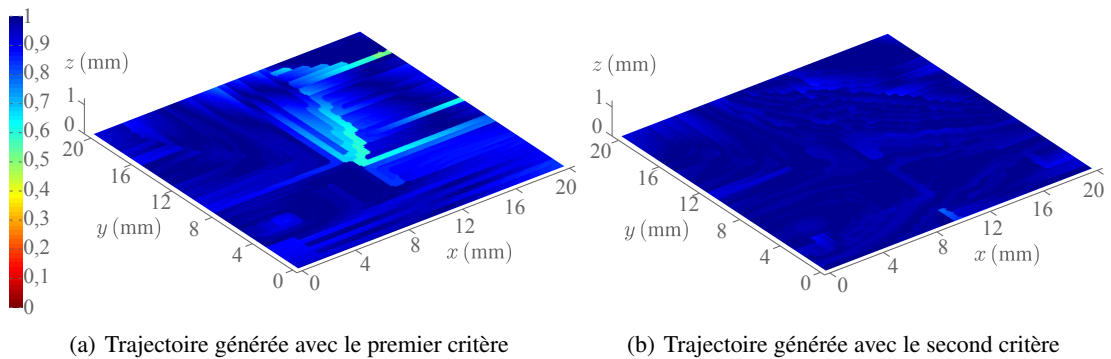


Figure 4.27 – Fonction matériau souhaitée et simulée

Évidemment, cette différence dans l'évolution de la fonction matériau souhaitée se ressent lorsque l'on analyse les indices de performance. La cartographie d'indice de performance globale de la première trajectoire montre plusieurs zones avec des valeurs d'indice assez éloignées de la valeur maximale (Figure 4.28(a)). Avec le premier critère, on constate que la trajectoire empruntée a parfois tendance à augmenter la différence entre la fonction matériau simulée et celle qui est souhaitée. De plus, comme la dynamique du procédé n'est pas prise en compte avec ce critère, cette différence n'est pas connue lors de l'ordonnancement. À l'opposé, avec le se-

Figure 4.28 – Indice de performance $I_m(x, y, z)$

cond critère, la simulation est réalisée au fur et à mesure de l'ordonnancement, permettant ainsi de connaître la fonction matériau simulée à tout moment. Cela permet, d'une part, de choisir le point permettant d'avoir le plus petite différence entre la fonction matériau simulée et celle qui est souhaitée et, d'autre part, de démarrer une nouvelle courbe de trajectoire au cas où cette différence est trop importante. La cartographie de l'indice de performance globale présente, ainsi, des meilleurs valeurs, très proche de la valeur maximale (Figure 4.28(b)).

En comparant les statistiques sur l'indice de performance globale, on choisit, pour cet exemple, le critère d'ordonnancement des points de passage prenant en compte les travaux de modélisation et d'optimisation du procédé (Figure 4.29).

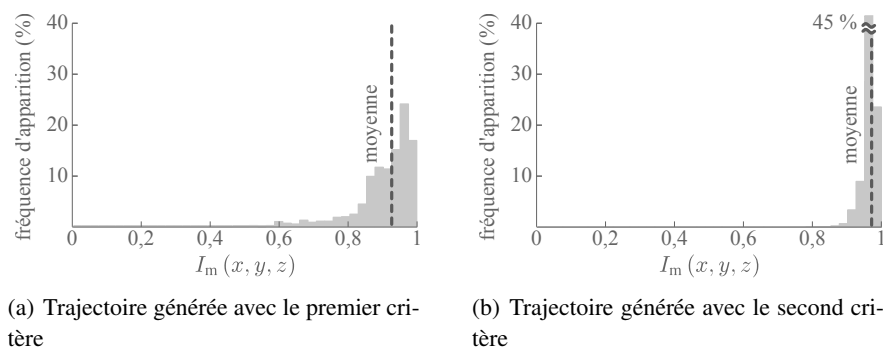


Figure 4.29 – Données statistiques sur l'indice de performance $I_m(x, y, z)$

On peut penser, que l'ordonnancement des points peut être encore optimisée en prenant en compte ces travaux sur plusieurs points à suivre. En effet, sur cet exemple, la simulation de fabrication est calculé pour les points voisins sans prendre en compte les points qui suivront. L'ordonnancement est ainsi localisé sur deux points. Le fait de réaliser ce choix en prenant en compte les points suivants permettrait d'avoir une optimisation globale de l'ordonnancement des points. Nous reviendrions sur ce point dans les perspectives de ces travaux (Section 6.2).

4.5.3 Intérêt de la génération de trajectoires par sélection de stratégies

L'objectif de cet exemple est de montrer, que dans certains cas, la génération de trajectoires par sélection de stratégies peut fournir des résultats plus intéressants que la génération automatique de trajectoires. Pour cela, nous allons comparer les trajectoires fournis par les deux méthodes de détermination de stratégie de trajectoire pour la fabrication d'une surface multimatériaux (Figure 4.30(a)). Dans cette surface, la répartition des matériau possède un gradient à une dimension (Figure 4.30(b)).

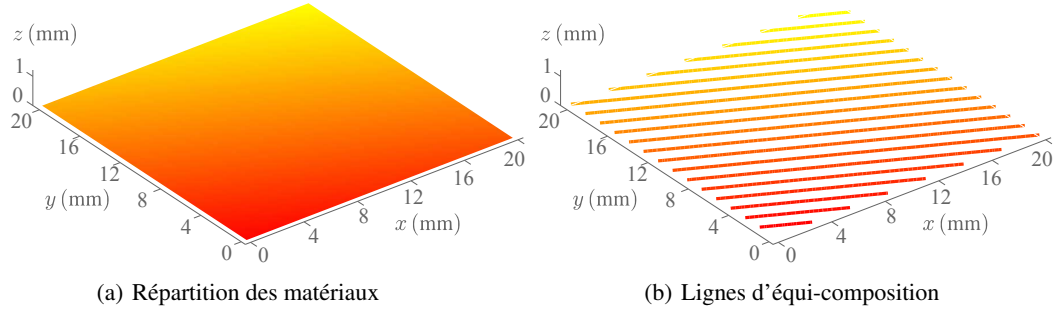


Figure 4.30 – Description de la répartition des matériaux

La première trajectoire est définie par la méthode de génération automatique de trajectoires. On constate que la trajectoire suit peu les courbes d'équi-composition contrairement à la seconde trajectoire qui est directement définie à partir de ces courbes (Figure 4.31). En effet, avec ce type de répartition des matériaux, il est possible de définir directement les courbes de trajectoires à partir des courbes d'équi-composition.

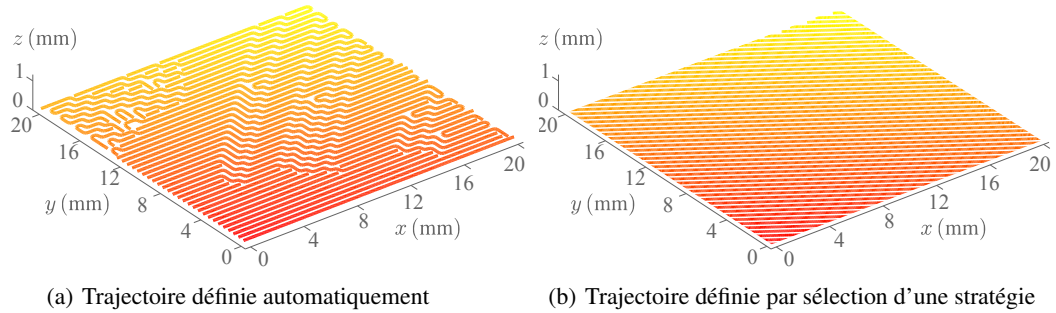


Figure 4.31 – Description des trajectoires

Le fait d'utiliser les courbes d'équi-composition pour définir la trajectoire permet d'obtenir la variation la plus graduelle qui soit de la fonction matériau souhaitée $m^*(\lambda)$ (Figure 4.32(b)). En ce qui concerne la première trajectoire, la méthode de génération automatique a pour objectif d'obtenir, elle aussi, une évolution graduelle de cette fonction matériau (Figure 4.32(a)). Néanmoins, la méthodologie, telle qu'elle est définie, est basée sur une grille de points de passage. Le fait d'utiliser cette grille force donc la trajectoire à orienter ses motifs d'une certaine façon. C'est donc ici, non pas le principe de la génération, mais la façon de l'appliquer qui est limitée. En effet, avec une rotation de la grille dans le plan, une trajectoire parfaitement appropriée pourrait être définie. De plus, on peut penser que si la méthode de génération automatique de trajectoires ne reposait pas sur une grille discrétisant l'espace mais une sélection continue des zones de passage, ce problème ne se poserait pas. Nous discuterons à nouveau de cette limite de l'outil dans la section consacrée aux perspectives des travaux de thèse (Section 6.2).

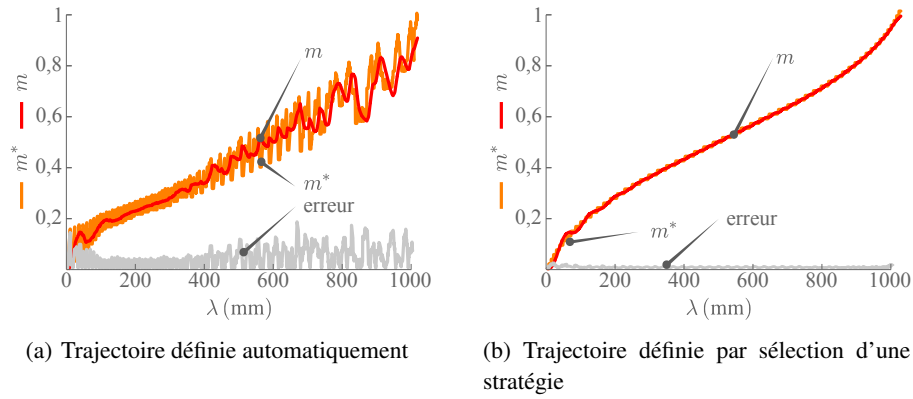
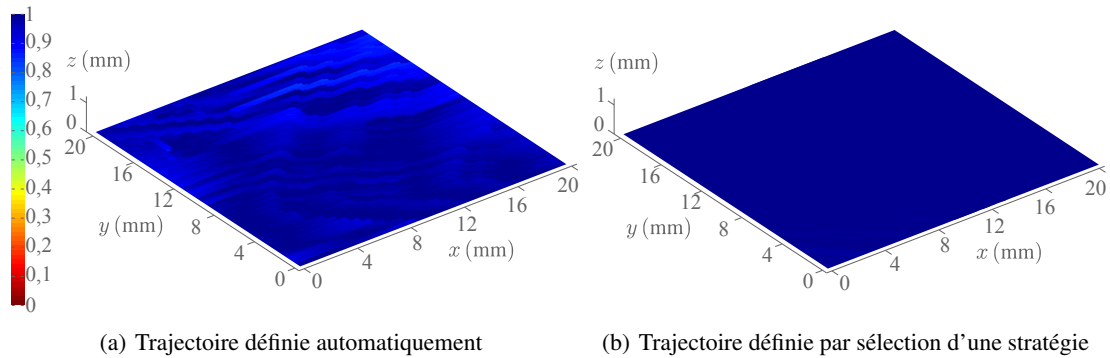
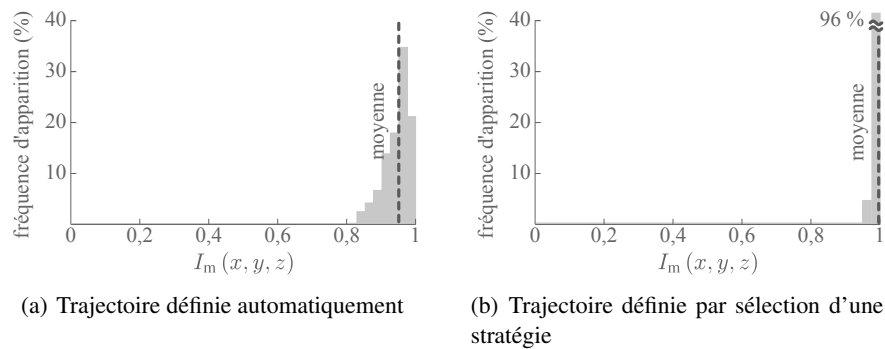


Figure 4.32 – Fonction matériau souhaitée et simulée

On constate, avec cet exemple, que la génération de trajectoires par sélection de stratégies permet pour certains cas de proposer avantageusement une trajectoire. Cette constatation peut être effectuée en analysant les cartographies d'indices de performance (Figure 4.33) ainsi que les statistiques qui sont réalisées sur ces indices (Figure 4.34).

Figure 4.33 – Indice de performance $I_m(x, y, z)$ Figure 4.34 – Données statistiques sur l'indice de performance $I_m(x, y, z)$

4.5.4 Intérêt d'une trajectoire hybride

L'exemple précédent permet de mettre en avant l'intérêt de l'utilisation de la méthode de génération de trajectoires par sélection de stratégies dans certains cas. On peut considérer, pourtant, que dans la majorité des cas, c'est la méthode de génération automatique qui propose des stratégies de trajectoire les plus adaptées. En effet, dans les cas où la répartition des matériaux est complexe, la méthode de sélection de trajectoires ne permet pas de trouver une trajectoire adaptée à la fabrication de la pièce. Par contre, on peut trouver certaines répartition des matériaux où une utilisation hybride des deux méthodes peut sembler intéressante. Ce type de répartition est présenté à travers ce dernier exemple (Figure 4.35(a)).

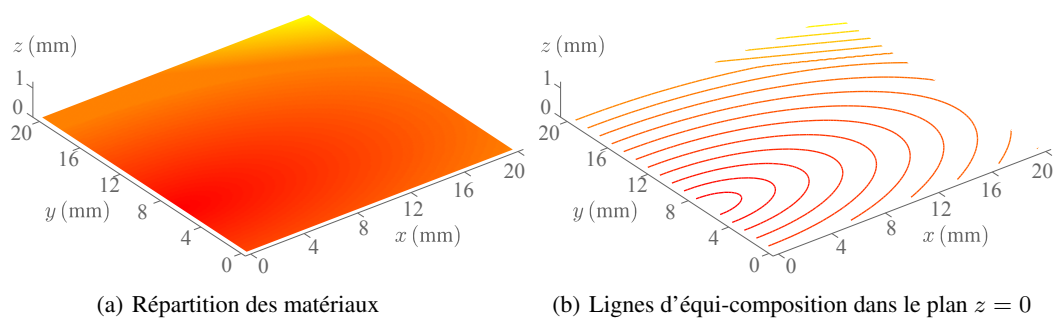


Figure 4.35 – Description de la répartition des matériaux

Dans cet exemple, la répartition des matériaux possède un gradient complexe à deux dimensions (Figure 4.35(b)). Dans ce cas, l'utilisation de la méthode de sélections de trajectoires en fonction du type de répartition des matériaux est limitée. Pourtant, lorsque l'on analyse plus précisément cette répartition des matériaux, on constate qu'une partie de la couche présente des courbes d'équi-composition qui sont également des courbes d'équi-distance à une courbe de référence. Nous allons donc, dans un premier temps, comparer la trajectoire issue de la méthode de génération automatique (Figure 4.36(a)) et une trajectoire définie à l'aide des courbes d'équi-composition précédemment évoquées (Figure 4.36(b)).

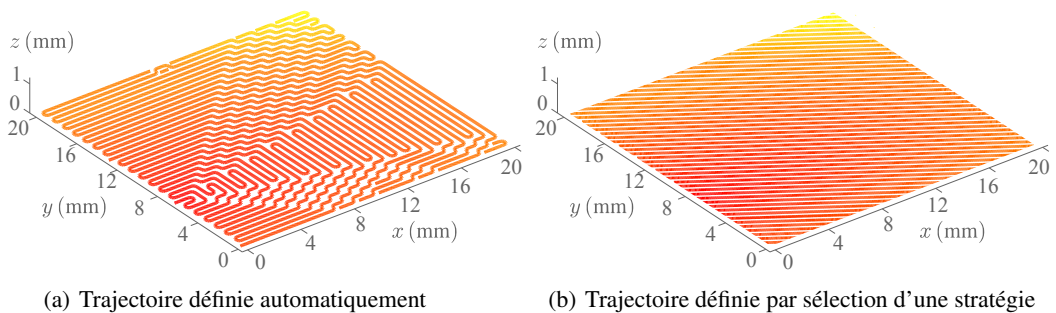


Figure 4.36 – Description des trajectoires

Lorsque l'on analyse les cartographies d'indice de performance globale, on constate que les deux stratégies montrent des résultats assez opposés. D'une part, la première trajectoire montre de bons résultats sur une grande partie de la couche à l'exception de la zone où le gradient est parallèle (Figure 4.37(a)). D'autre part, la seconde trajectoire ne propose pas une trajectoire adaptée à la fabrication mis à part dans cette zone de la pièce. Concernant les défauts présents pour la première trajectoire, on retrouve, en fait, le même phénomène que celui présenté dans l'exemple précédent. En effet, ce n'est pas la méthode qui est à mettre en cause ici mais plutôt l'utilisation d'une grille de points de passage.

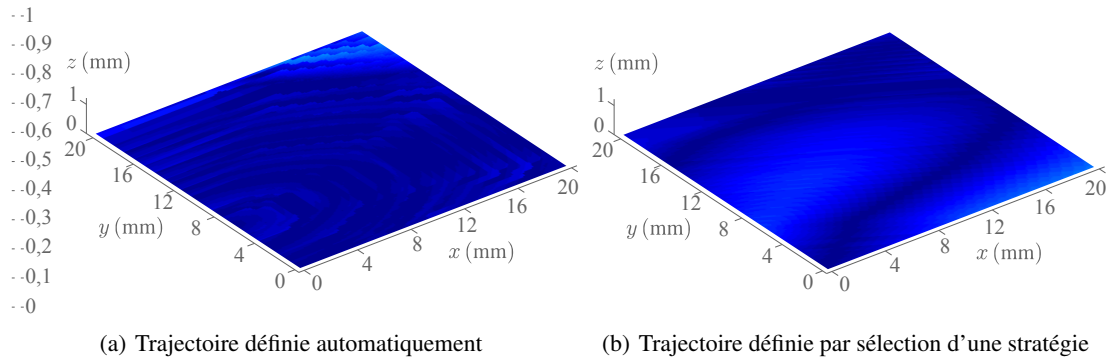


Figure 4.37 – Indice de performance $I_m(x, y, z)$

Le fait que ces deux trajectoires présentent des résultats complémentaires permet donc d'envisager une utilisation hybride des deux méthodes de détermination de trajectoires. Ainsi, si l'on définit une trajectoire hybride, les résultats peuvent être améliorés. Une trajectoire de ce type est donc proposée. Sur la zone présentant un gradient parallèle, les courbes de la trajectoire sont définies à partir des courbes d'équi-composition. Dans le reste de la couche, la méthode de génération automatique de trajectoire est appliquée. La stratégie de fabrication commence donc par une trajectoire générée automatiquement puis enchaîne sur les courbes de trajectoires parallèles (Figure 4.38).

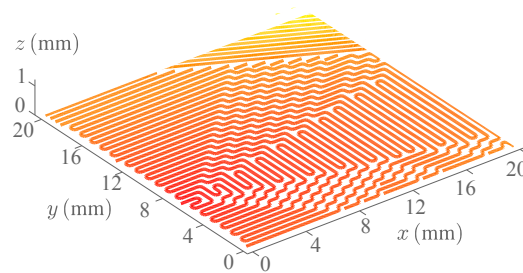


Figure 4.38 – Description de la trajectoire hybride

Ainsi, en combinant les intérêts des deux méthodes, on peut obtenir une trajectoire tout à fait appropriée pour la fabrication de cette couche multimatériau. En effet, on remarque, sur la cartographie d'indice de performance globale que la couche complète présente des valeurs très proche de la valeur maximale (Figure 4.39).

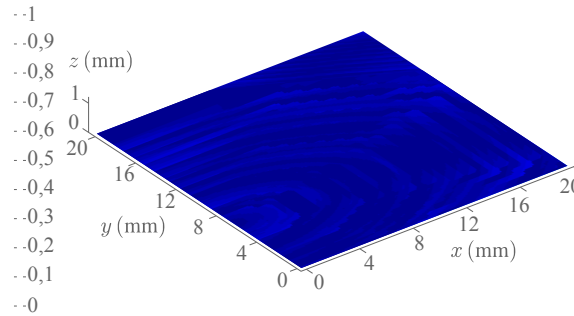
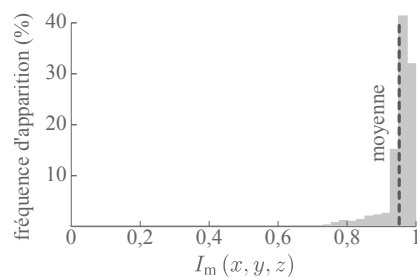
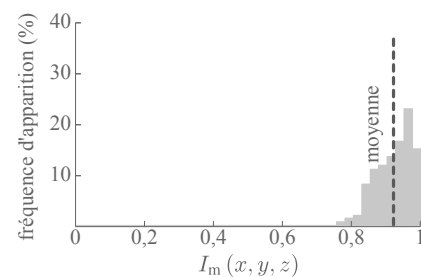


Figure 4.39 – Indice de performance $I_m(x, y, z)$ avec la trajectoire hybride

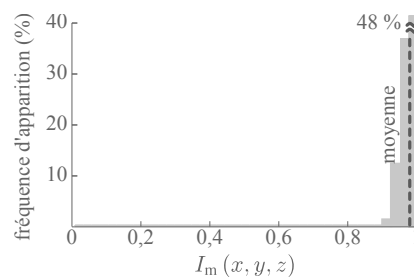
Si l'on compare les statistiques des indices de performance globale pour les trois trajectoires on peut définir un classement de ces différentes stratégies. La trajectoire définie par la méthode de génération de trajectoires par sélection de stratégies semble peu appropriée à la fabrication de la couche (Figure 4.40(b)). Cela paraît assez normal puisque seule une petite zone de la couche présente des courbes d'équi-composition parallèles. La trajectoire générée automatiquement paraît



(a) Trajectoire définie automatiquement



(b) Trajectoire définie par sélection d'une stratégie



(c) Trajectoire hybride

Figure 4.40 – Données statistiques sur l'indice de performance $I_m(x, y, z)$

appropriée à la fabrication de la pièce (Figure 4.40(a)). En effet, mise à part une petite zone où l'indice de performance n'est pas à son maximal, le reste de la couche présente de très bons résultats. Finalement, la trajectoire hybride paraît la plus appropriée des trois propositions grâce à une utilisation combinée des deux méthodes, chacune sur leur point fort (Figure 4.40(c)).

4.6 Synthèse

La méthodologie de fabrication proposée dans le chapitre précédent repose en grande partie sur l'étape de détermination d'une stratégie de fabrication (Section 3.6). En effet, c'est l'étape principale qui permet de déterminer une stratégie de fabrication adaptée en l'évaluant et en l'optimisant si besoin. Pour que cette étape fonctionne, deux méthodes de génération de trajectoires ont été présentées.

La première méthode repose sur une sélection de stratégies de trajectoires en fonction du type de répartition des matériaux et du type de la stratégie de tranchage envisagée. Pour cela, une classification des types de répartition de matériaux est proposée. Avec cette classification et les données mathématiques associées aux caractéristiques des différents types de répartition des matériaux, il est possible, dans certains cas, de proposer une ou des stratégies de trajectoires

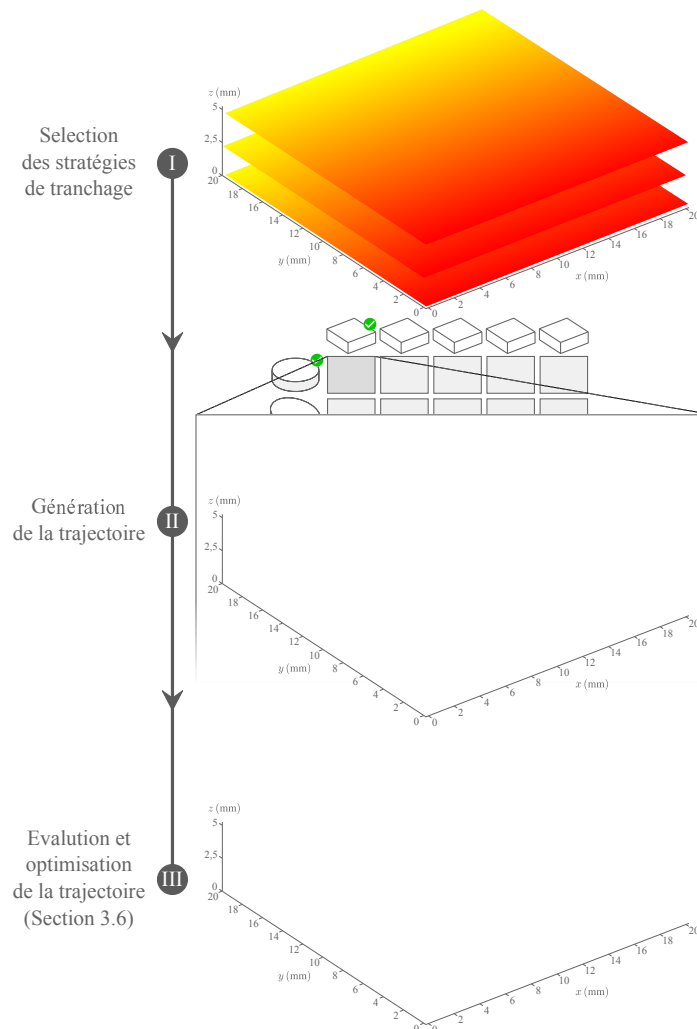


Figure 4.41 – Méthode de génération de trajectoires par sélection de stratégies

adaptées. Les stratégies de fabrication proposées - composées de différentes stratégies de tranchage associées à des stratégies de trajectoire - sont évaluées et comparées. La stratégie la plus adaptée est alors choisie pour la fabrication de la pièce (Figure 4.41). On constate, que pour certains type de répartition des matériaux, cette méthode est parfaitement adaptée puisqu'elle propose la trajectoire optimale. Néanmoins, elle paraît limitée pour les répartitions de matériaux complexes. Effectivement, dans ce cas de figure, il est très compliqué de proposer une trajectoire adaptée. La seconde méthode permet, quant à elle, de proposer des trajectoires pour ce type de répartition des matériaux.

La seconde méthode est une génération automatique de la trajectoire. Ainsi, pour une distribution des matériaux donnée, il est possible de définir une trajectoire en prenant en compte les spécificités de la pièce et du procédé utilisé (Figure 4.42). Les trajectoires proposées présentent donc des variations graduelles des débits permettant, ainsi, d'optimiser dans de bonnes condi-

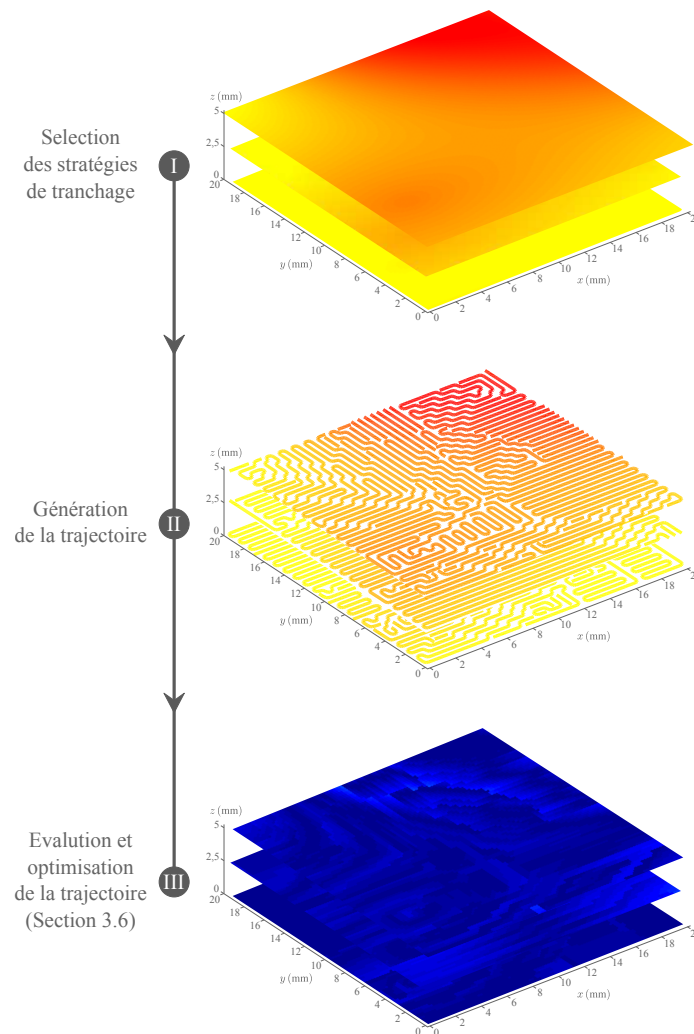


Figure 4.42 – Méthode de génération automatique de trajectoires

tions les commandes des débits des poudres. La simulation et l'optimisation du procédé au fur et à mesure de la génération de trajectoire permet d'obtenir des trajectoires présentant, dans la majorité des cas, de très bons résultats. La principale limite de cette méthode vient de la façon dont la trajectoire est déterminée à l'aide des points de passage. En effet, à cause de la contrainte des points de passage qui discrétisent la surface, il est possible que la trajectoire générée soit moins intéressante que celle déterminée à l'aide de la première méthode.

Ainsi les deux méthodes de génération de trajectoires sont complémentaires. Dans le cas où la répartition des matériaux n'est pas de type complexe, il est préférable d'utiliser une génération de trajectoires par sélection de stratégies. Dans le cas où la répartition des matériaux est de type complexe, la génération automatique permet de déterminer une trajectoire appropriée et spécifique à la pièce. Il est possible, pour tous les cas de figures, de comparer les trajectoires obtenues avec les deux méthodes à l'aide de la modélisation proposée. De plus, à partir des résultats issus des deux méthodes, il peut être avantageux de définir une trajectoire hybride utilisant certaines parties des différentes trajectoires.

On peut noter qu'après la génération et la sélection d'une trajectoire, il est possible d'obtenir une simulation réaliste de la répartition des matériaux dans la pièce. Pour cela, à partir des données mathématiques issues de la génération de trajectoires, les outils de modélisation peuvent être utilisés pour prédire la composition du mélange des poudres au cours de la fabrication et ainsi obtenir une image réaliste de la répartition des matériaux.

La méthodologie de fabrication centrée autour de la génération automatique de trajectoires permet donc de passer de l'objet imaginé par le concepteur concepteur en proposant automatiquement une stratégie de fabrication adaptée. On peut remarquer que ce type de méthode est réellement innovant puisqu'aucune méthodologie n'existe pour déterminer une stratégie de fabrication et caractériser sa capacité à fabriquer une pièce. Une maquette informatique est présentée dans le chapitre suivant présentant ainsi la faisabilité de la méthodologie de fabrication avec la génération automatique de trajectoires.

Maquette informatique

Ce cinquième chapitre présente la formalisation de la méthodologie de fabrication à travers une **maquette informatique**.

La première partie sera consacrée à la **présentation générale de la maquette informatique**. Cette maquette reprend les étapes de la méthodologie de fabrication des pièces multimatériaux centrée autour d'une génération automatique de trajectoires. Ainsi, elle propose deux modules. Le premier module correspond à l'étape de description de la pièce, tandis que le second correspond aux étapes de génération de trajectoires et de génération des paramètres opératoires.

Le module de la maquette informatique qui concerne la **description de la pièce multimatériau** sera présenté dans la deuxième partie de ce chapitre. Avec cette composante, l'utilisateur peut réaliser la description de la géométrie et de la distribution des matériaux de la pièce.

Nous exposerons, dans la troisième partie, les outils concernant la **génération automatique de trajectoires**. La méthode de génération ainsi que les interactions avec l'utilisateur - choix des paramètres et analyse des résultats - seront détaillées.

La quatrième partie, quant à elle, concernera la **génération des instructions de fabrication**.

Finalement, une **synthèse** concernant la mise en place de cette maquette informatique est proposée dans une cinquième partie.

5.1 Présentation générale de la maquette informatique

La maquette informatique a été créée pour permettre l'utilisation de la méthodologie de fabrication de pièces multimatériaux avec la génération de trajectoires. Pour cela, nous avons proposé, pour chaque étape de la méthodologie, des outils intégrés dans cette démarche globale de fabrication (Figure 5.1). Les étapes de la méthodologie, présentées au cours des chapitres précédents, ont été implémentées au sein d'une maquette informatique développée sous Matlab®.

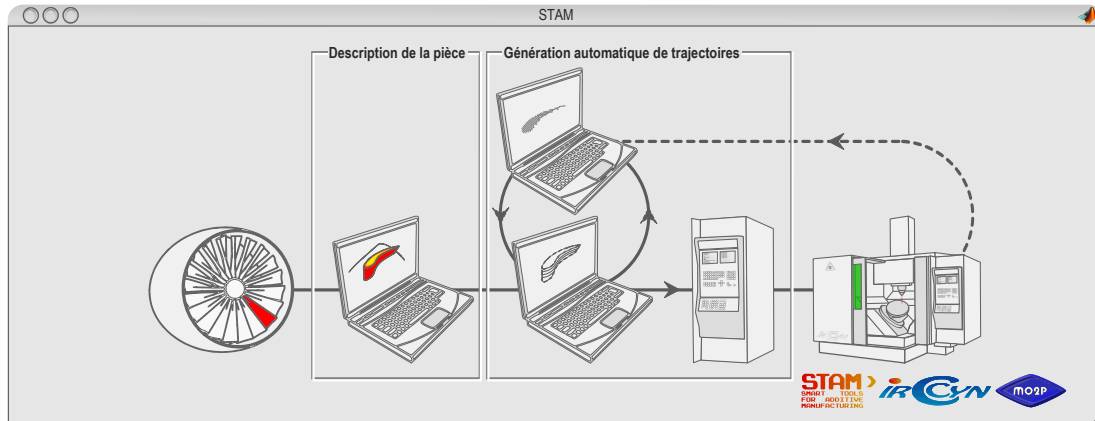


Figure 5.1 – Interface homme-machine pour la fabrication de pièces multimatériaux

La première étape de la méthodologie consiste à obtenir une description de la pièce. Nous avons proposé pour la géométrie et la répartition des matériaux des modèles mathématiques de description (Section 3.1). Ces modèles ont été intégrés dans la maquette informatique pour réaliser une description numérique de la pièce. Cette description est incluse dans le premier module de la maquette informatique. Les données numériques de description sont ensuite utilisées pour le second module de la maquette informatique.

Ce second module inclut la génération d'une trajectoire adaptée, la simulation de fabrication ainsi que la génération des instructions de fabrication.

Les éléments de cette maquette sont présentés dans ce chapitre.

5.2 Description de la pièce

La maquette informatique intègre la méthode de description exposée dans le troisième chapitre du manuscrit (Section 3.1). Ce module de la maquette informatique permet de créer un fichier contenant les données de description de la géométrie et de la répartition des matériaux (Figure 5.2). L'utilisateur peut donc, à l'aide de ce module, créer un fichier de description unique de la pièce à fabriquer. Pour cela, l'utilisateur doit donc définir le domaine de la pièce $\mathcal{D}_p$ et la ou les fonctions de description de la répartition des matériaux $M^*(x, y, z)$.

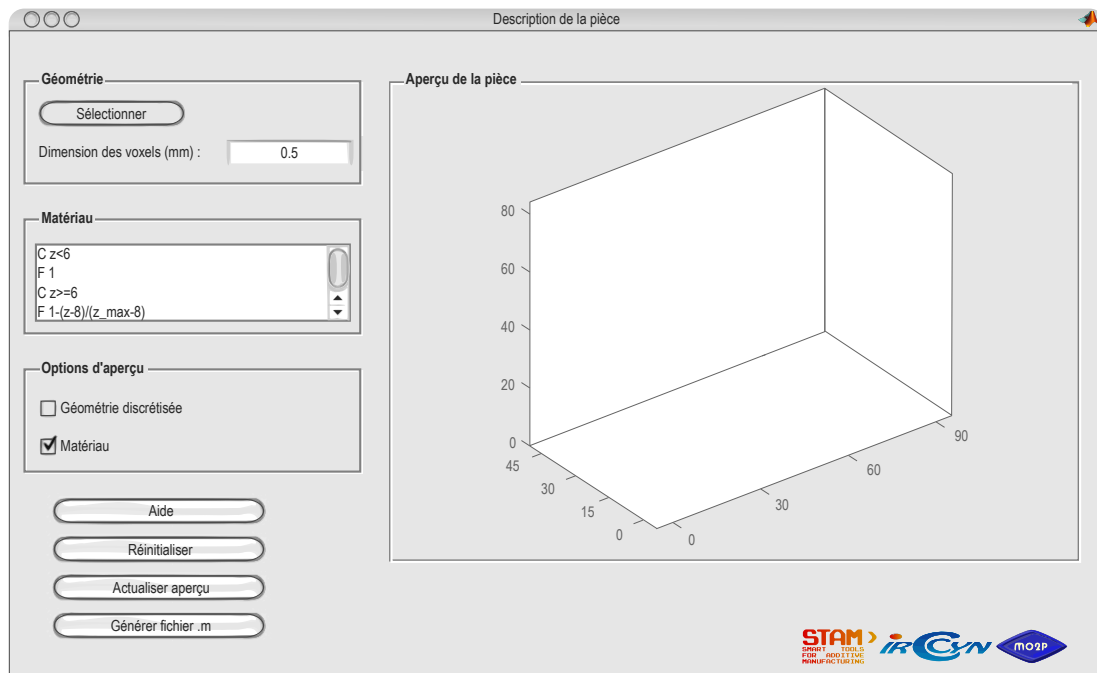


Figure 5.2 – Interface homme-machine pour la description des pièces multimatériaux

La description d'une géométrie complexe est très bien gérée par les outils de CAO existants. Nous avons donc opté pour une description de la géométrie par un outil CAO quelconque et une intégration des données correspondantes par l'intermédiaire d'un fichier au format STL (Figure 5.3(a)). La géométrie est discrétisée en voxels. A cette géométrie est associée une ou plusieurs fonctions représentatives de la distribution des matériaux (Figure 3.3(b,c)). La fonction matériau reste continue. En effet, la discrétisation porte uniquement sur la géométrie.

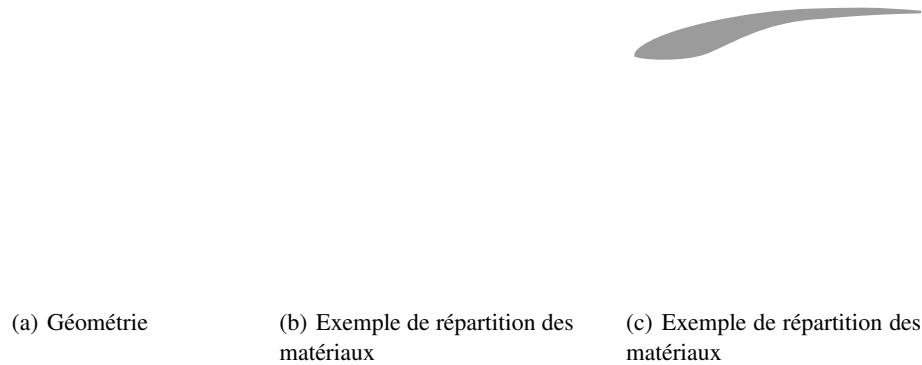


Figure 5.3 – Description d’une pièce

Pour définir la répartition des matériaux, l'utilisateur renseigne la ou les fonctions nécessaires à la description de la composition dans l'interface :

EXEMPLE DE DÉFINITION DE LA REPARTITION DES MATERIAUX

```
C z<6 % Condition pour la première fonction
F 1 % Première fonction matériau
C z>=6 % Condition pour la première fonction
F 1-(z-8)/(z_max-8) % Seconde fonction matériau
```

Dans le cas d'une répartition complexe des matériaux, la décomposition du domaine $\mathcal{D}_P$ en sous-domaines est définie dans l'interface. Les fonctions de description du matériau sont associées à chaque sous-domaine.

La description est réalisée à partir des différentes informations fournies par l'utilisateur à l'aide d'une fonction Matlab® :

EXEMPLE DE DESCRIPTION DE LA PIÈCE

```
function [m,g,x_min,x_max,y_min,y_max,z_min,z_max]=...
    MA_PIECE_FGM(x,y,z)
```

Ainsi, il est possible d'appeler la fonction `MA_PIECE_FGM(x,y,z)`. La fonction peut fournir les dimensions maximales de la pièce et, pour un point considéré, la valeur de la fonction

matériau et une information sur la géométrie :

$$\forall (x, y, z) \in R^3, g = \begin{cases} 1 & \text{si } (x, y, z) \in \mathcal{D}_P \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (5.1)$$

Pour savoir si le point considéré appartient ou non au domaine $\mathcal{D}_P$, un test est effectué à l'intérieur même du fichier de description. L'information sur la composition au point considéré est, quant à elle, déterminée par le calcul de la fonction matériau :

EXEMPLE DE DESCRIPTION DE LA PIÈCE

```
if z<6 % Condition pour la première fonction
    m=1; % Première fonction matériau
elseif z>=6 % Condition pour la première fonction
    m=1-(z-8)/(z_max-8); % Seconde fonction matériau
end
```

5.3 Génération automatique de trajectoires

Le second module de la maquette informatique est dédié à la génération automatique de trajectoires et des instructions de fabrication. Nous allons détailler, dans cette partie, le volet génération de trajectoires. Pour ce module, l'utilisateur commence par choisir les paramètres de génération. La trajectoire est ensuite générée automatiquement suivant la méthode présentée précédemment (Section 4.3). Cette génération de la trajectoire est accompagnée d'une simulation de la fabrication et une optimisation des débits des poudres. Finalement, l'utilisateur peut analyser les résultats de ces opérations.

5.3.1 Choix des paramètres

Avant de commencer la génération de trajectoires, l'utilisateur doit sélectionner la pièce à fabriquer et choisir les paramètres propres à la méthode de génération de trajectoires et au procédé utilisé (Figure 5.4).

Figure 5.4 – Interface homme-machine pour le choix des paramètres de génération de la trajectoire

La description de la pièce est réalisée dans un fichier `MA_PIECE_FGM.m` contenant les informations sur la géométrie de la pièce et la répartition des matériaux. Cette description est définie dans le premier module de la maquette informatique. L'utilisateur doit donc, dans un premier temps, sélectionner le fichier approprié. Après sélection du fichier de description souhaité, l'utilisateur peut modifier l'ensemble des paramètres.

Concernant les paramètres du générateur, l'utilisateur choisit, tout d'abord, le critère de sélection des points de passage. S'il choisit le critère prenant en compte les travaux de modélisation et d'optimisation du procédé, il peut définir une tolérance matériau. En effet, si ce critère est sélectionné, la simulation de fabrication est réalisée au fur et à mesure de la génération de la trajectoire. Ainsi, si l'erreur entre la fonction matériau souhaitée et celle simulée est supérieure à la tolérance, la courbe de trajectoire s'arrête et une nouvelle courbe débute. L'utilisateur définit également l'ordre des B-splines définissant les courbes de la trajectoire à partir des points de passage ordonnancés.

Les autres paramètres modifiables par l'utilisateur concernent le procédé - laser, cinématique, débits des poudres et débits des gaz - et les coefficients des correcteurs présents dans le dispositif d'optimisation des débits des poudres. De plus, il a la possibilité de modifier les paramètres de calcul pour la simulation de la fabrication, privilégiant ainsi, soit la précision des résultats, soit la rapidité de calcul.

5.3.2 Génération de la trajectoire et simulation de la fabrication

Après ordonnancement des points de passage dans chaque couche, la trajectoire est décrite. Nous avons vu précédemment que, dans la méthodologie de fabrication proposée, la trajectoire est décrite par une courbe paramétrique (Section 3.1). Dans la maquette informatique, cette représentation n'est pas continue. Ainsi, la trajectoire est décrite à l'aide d'une matrice contenant les coordonnées des points ainsi que l'information sur le matériau pour un ensemble de points de la courbe.

$$\begin{cases} x(\lambda) \\ y(\lambda) \\ z(\lambda) \\ m^*(\lambda) \end{cases} \longrightarrow \begin{bmatrix} x_0 & x_1 & \dots & x_n \\ y_0 & y_1 & \dots & y_n \\ z_0 & z_1 & \dots & z_n \\ m_0^* & m_1^* & \dots & m_n^* \end{bmatrix} \quad (5.2)$$

Lors de la génération de la trajectoire, d'autres informations sont définies dans cette matrice. On y trouve des données sur les paramètres du procédé en tout point de la trajectoire ainsi que des informations pour définir les débuts et fins des courbes de la trajectoire. Une fois que la génération de trajectoire est terminée, la simulation de la fabrication et l'optimisation des débits des poudres sont réalisées. Les informations déduites de ces opérations sont ajoutées à la matrice.

La première étape de simulation concerne le temps de fabrication. Les modèles de fonctionnement du système de distribution des poudres sont temporels (Section 3.2). Il est donc nécessaire d'ajouter, pour chaque point de la trajectoire, une information temporelle. Cette information est déterminée à l'aide des coordonnées de la courbe et de la vitesse définies en chaque point.

Le calcul des débits de poudres et de la fonction matériau est réalisé dans la deuxième étape de simulation. Cette partie de la simulation est réalisée à l'aide de la fonction matériau et des modèles de fonctionnement du système de distribution des poudres. L'optimisation des débits

des poudres peut être faite à l'aide du dispositif d'optimisation comprenant la boucle d'asservissement virtuelle.

La troisième et dernière étape de simulation concerne la fonction matériau simulée $M(x, y, z)$ ainsi que le calcul des indices de performance $I_t(x, y, z)$, $I_t(x, y, z)$ et $I_t(x, y, z)$.

5.3.3 Analyse des résultats

Lorsque la génération de trajectoire, la simulation de la fabrication et l'optimisation des commandes des débits des poudres sont terminées, les instructions de fabrication sont directement générées à partir des données issues des trois étapes précédentes. Nous reviendrons sur ces instructions de fabrication dans la quatrième partie de ce chapitre. Après cela, l'interface homme-machine pour l'analyse des résultats de simulation peut être utilisée par l'utilisateur pour examiner la trajectoire générée et les résultats de simulation (Figure 5.5).

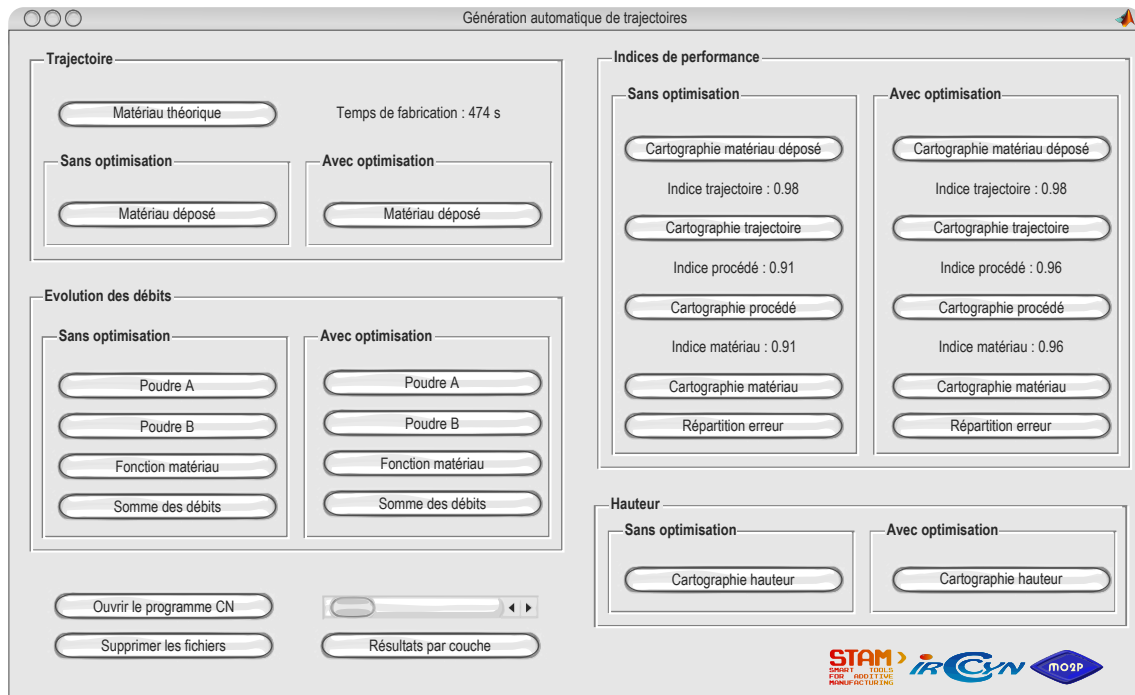
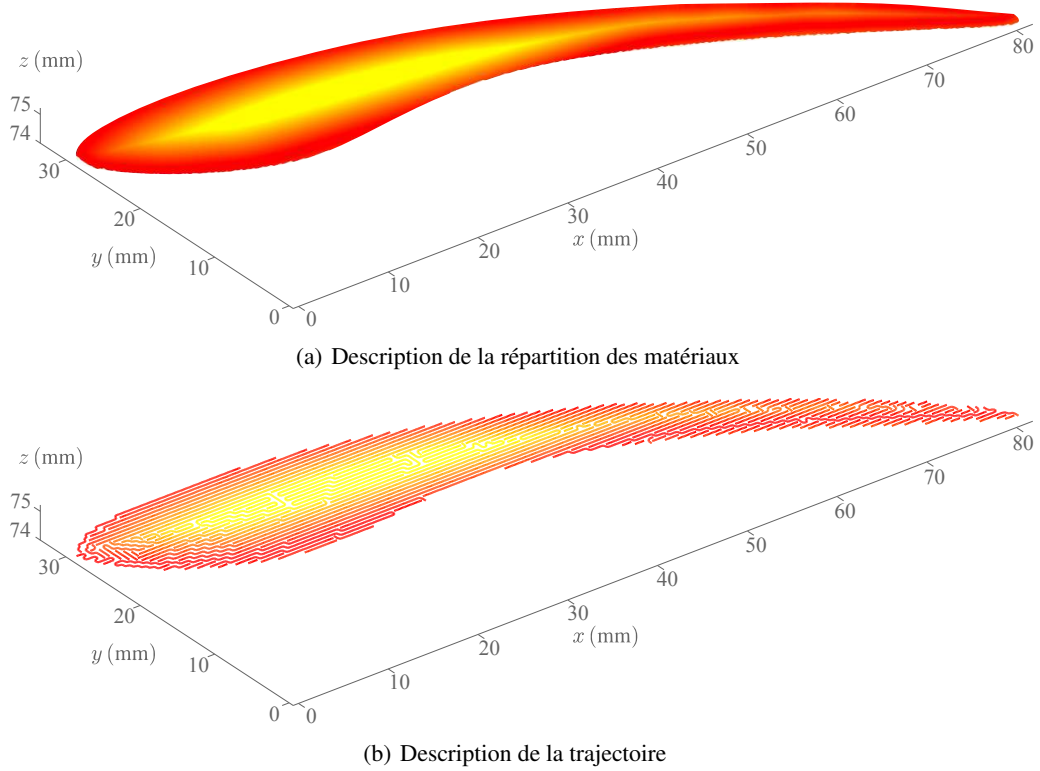


Figure 5.5 – Interface homme-machine pour l'analyse des résultats de simulation

L'ensemble des résultats peut être étudié pour la fabrication complète ou couche par couche. Pour une couche donnée (Figure 5.6(a)), l'utilisateur peut prendre connaissance de la trajectoire générée (Figure 5.6(b)) ainsi que du temps estimé de fabrication pour le dépôt de la couche (Figure 5.5).

Figure 5.6 – Description de la répartition des matériaux et de la trajectoire dans le plan $z = 74$

De plus, il a la possibilité d'analyser les résultats de simulation avec ou sans optimisation des commandes des débits des poudres. Ces résultats concernent l'évolution des débits des poudres, la fonction matériau $m^*(\lambda)$ (Figure 5.7(a)) et la somme des débits (Figure 5.7(b)).

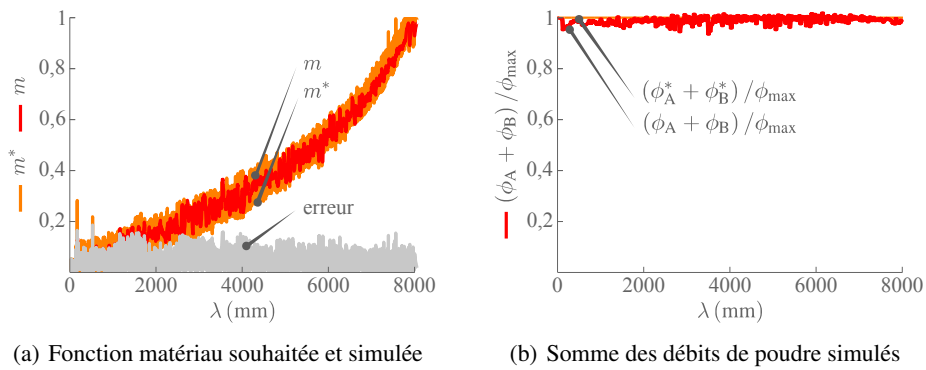


Figure 5.7 – Simulation de la fabrication avec optimisation des débits avec la trajectoire générée

Les valeurs moyennes (Figure 5.5) et les cartographies des indices de performance (Figure 5.8) sont fournies pour la fabrication de la pièce complète et pour chaque couche. De plus, des don-

nées statistiques sur l'indice de performance globale peuvent être examinées.

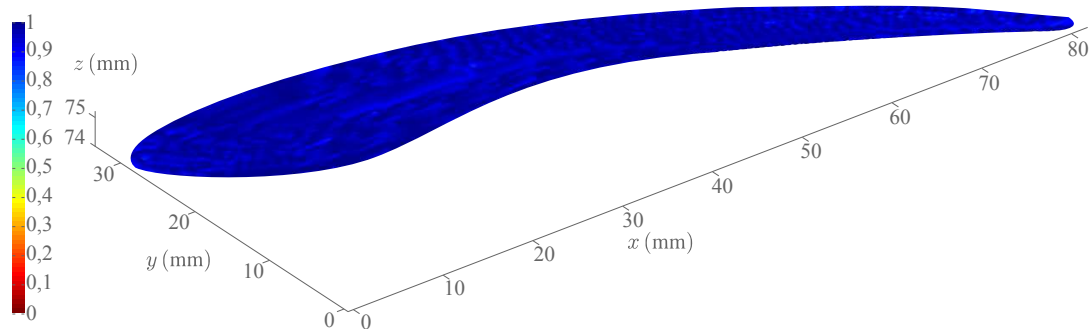


Figure 5.8 – Indice de performance $I_m(x, y, z)$ avec la trajectoire générée

Finalement, la géométrie des cordons de matière - simulée pour prédire la géométrie des couches - peut être analysée. Le modèle choisi prend en compte les paramètres opératoires pour le calcul des dimensions du cordon de matière existant [Ponche2013]. Dans le cas de la fabrication de pièces multimatériaux, nous avons constaté que la somme des débits n'est pas forcément constante. En effet, les débits des poudres sont modifiés très souvent pour permettre le dépôt des cordons avec la composition souhaitée. Bien que les commandes des débits soient optimisées, il est possible que les débits des poudres ne soient pas, à tout moment, similaires à ceux souhaités. La somme des débits peut alors être différente du débit nécessaire à la formation du cordon. Pour prendre en compte cette spécificité, le modèle intègre donc la somme des débits simulés.

5.4 Génération des instructions de fabrication

Les instructions de fabrication sont générées à partir de la description de la trajectoire et des commandes des débits des poudres optimisées. Avec le procédé CLAD® (Annexe A), ces instructions sont interprétées par le directeur commande numérique (DCN) de la machine. Elles contiennent des informations concernant les débits des poudres, la puissance laser et la vitesse d'avance nécessaires à la formation du cordon.

EXEMPLE D'INSTRUCTIONS DE FABRICATION

```
PMAX = 85 % Débit de poudre (%)
LASE = 32 % Puissance laser (% 800 W)
RAPI = 5000 % Vitesse rapide (mm/min)
AVAN = 900 % Vitesse avance (mm/min)
```

Ces instructions décrivent ensuite la trajectoire à suivre. Pour le procédé CLAD®, cela revient à traduire la matrice de description de la trajectoire (Équation 5.2) en code G. Chaque courbe de la trajectoire est donc décrite par un ensemble de points de passage. Des commandes spécifiques au procédé permettent de modifier les paramètres du laser et les débits des poudres. Le passage d'une courbe à une autre nécessite un arrêt du laser :

EXEMPLE D'INSTRUCTIONS DE FABRICATION

```
...
M10 % Démarrage du laser
F=AVAN % Dépôt à vitesse d'avance
X10.88 Y21.00 Z74 % Premier point d'une courbe
X11.00 Y21.00 Z74
...
X6.88 Y22.50 Z74
X6.75 Y22.50 Z74 % Dernier point d'une courbe
M11 % Arrêt du laser
F=RAPI % Passage d'une courbe à une autre à vitesse rapide
X6.75 Y22.50 Z75
X7.75 Y23.00 Z75
X7.75 Y23.00 Z75
M10
F=AVAN
X7.63 Y23.00 Z74
...
```

Les débits des poudres sont régulièrement modifiés au cours du dépôt en fonction des commandes des débits des poudres optimisées contenues dans la matrice de description de la trajectoire (Équation 5.2) :

EXEMPLE D'INSTRUCTIONS DE FABRICATION

```
...  
X6.90 Y23.96 Z74  
H60=(0.54*PMAX) % Débit de poudre matériau A  
H62=(0.74*PMAX) % Débit de poudre matériau B  
X6.97 Y23.90 Z74  
...
```

5.5 Synthèse

Les outils mis en place dans cette maquette informatique permettent désormais de passer de l'objet imaginé par le concepteur à la fabrication de la pièce. La première étape de cette méthodologie permet de décrire numériquement les pièces multimatériaux. Ainsi, la description de l'objet est réalisée dans un fichier unique contenant les informations sur la géométrie et la répartition des matériaux. L'utilisation du format STL pour la description de la géométrie permet de décrire n'importe quelle pièce. Concernant la description de la distribution des matériaux, l'intégration d'un modèle composite associé à des méthodes de description par fonction explicite permet de décrire simplement des répartitions des matériaux complexes dans les trois directions de l'espace sans discrétisation de celles-ci.

Concernant la génération automatique de trajectoires, le module de la maquette informatique dédié permet de proposer une stratégie de trajectoire adaptée à la fabrication d'une pièce multimatériau. De plus, la simulation de fabrication est réalisée. Ainsi, l'utilisateur peut analyser et évaluer la trajectoire proposée. Il peut comparer ces résultats à ceux obtenus pour d'autres trajectoires déterminées avec une autre stratégie de tranchage ou avec la méthode de sélection de trajectoires basée sur le type de répartition des matériaux.

Finalement, une fois la stratégie de fabrication validée, la génération des instructions de fabrication nécessaires à la commande du procédé peut être réalisée.

Synthèse et perspectives

Ce sixième et dernier chapitre a pour objectif de présenter une **synthèse** des travaux effectués et d'en dégager les **perspectives**.

Les chapitres précédents ont permis d'exposer la problématique, le positionnement et les travaux dédiés à la fabrication additive de pièces multimatériaux. Ces travaux ont été consacrés, en particulier, à la génération, l'évaluation et l'optimisation de trajectoires dans le cadre d'une méthodologie de fabrication des pièces multimatériaux à gradient continu. La première partie de ce chapitre sera consacrée à une **synthèse** du travail effectué. De plus, les **apports** des travaux seront dégagés.

Les **perspectives** de ces travaux seront énoncées dans la seconde partie de ce chapitre. L'objectif est de mettre en avant les voies de recherche qui nous semblent pertinentes à étudier.

6.1 Synthèse et apports des travaux effectués

Les travaux de thèse s'intéressent à la fabrication additive de pièces multimatériaux à gradient continu. Ces structures innovantes permettent de nouvelles conceptions en changeant graduellement les propriétés de la pièce. Nous avons vu que la fabrication de ces pièces avec des techniques dites conventionnelles est limitée. En effet, les possibilités avec ces procédés sont restreintes, que ce soit pour les dimensions du gradient, les types de répartitions des matériaux ou le contrôle de la distribution des matériaux pendant la fabrication. L'utilisation des procédés de fabrication additive - particulièrement le procédé de fabrication par projection de poudre - apparaît comme une solution pour réaliser ce type de structure. Néanmoins, à ce jour, les pièces fabriquées avec ce type de procédé ne sont pas des pièces fonctionnelles. Pour passer de ces structures à des pièces fonctionnelles, il est nécessaire de proposer une méthodologie de fabrication avec une approche globale en prenant en compte les spécificités de la pièce et du procédé utilisé.

La méthodologie permettant de passer de l'objet imaginé par le concepteur à la fabrication de la pièce doit inclure une étape de description de la pièce, une étape de détermination d'une stratégie de fabrication appropriée et une étape de génération des instructions de fabrication. Nous avons vu, lors de l'étude de l'état de l'art, que très peu de méthodologies de ce type existent. De plus, l'étape de détermination d'une stratégie de fabrication - pourtant essentielle dans le processus de fabrication - est très peu développée. En effet, les méthodologies existantes ne prennent pas en compte l'aspect hétérogène des pièces multimatériaux ou proposent de décomposer la pièce en entités homogènes. Nous avons donc proposé, au regard de l'état de l'art, une méthodologie de fabrication centrée sur l'étape de détermination d'une stratégie de fabrication appropriée. Cette méthodologie a été mise en place avec une approche globale et une prise en compte du procédé utilisé. L'intérêt de la prise en considération du procédé réside dans le fait que la fabrication d'une pièce multimatériaux demande, en plus des contraintes liées à la géométrie, de prendre en compte l'aspect hétérogène des structures pour choisir une stratégie adaptée. L'étape de détermination d'une stratégie de fabrication intègre une génération, une évaluation et une optimisation des trajectoires.

Nous avons proposé deux méthodes pour la génération de trajectoires. La première méthode permet de générer des trajectoires en sélectionnant des types de stratégies de trajectoire en fonction du type de répartition des matériaux et de la stratégie de tranchage envisagée. Pour cela, une classification des répartitions des matériaux a été mise en place en fonction de leurs spécificités. Cette méthode permet, pour quelques types de répartitions, de proposer des stratégies de fabrication parfaitement adaptées. Néanmoins, on constate que cette méthode peut être limitée pour une majorité de pièces présentant des répartitions des matériaux complexes. Une seconde méthode propose, quant à elle, une génération automatique de la trajectoire en fonction de la répartition des matériaux. La génération de trajectoires peut directement intégrer les travaux de modélisation et d'optimisation du procédé pour choisir une trajectoire appropriée à la fabrication de la pièce.

Pour sélectionner la stratégie de fabrication la plus adaptée à la réalisation d'une pièce, l'évaluation des trajectoires est nécessaire. Cette évaluation est basée sur une modélisation du procédé utilisé - plus particulièrement du système de distribution des poudres - prenant en compte les contraintes liées à la fabrication et l'inertie du système. Ainsi, la fabrication est simulée et la répartition des matériaux est prédite. Pour l'analyse et la comparaison des stratégies de fabrication, des indices de performance ont été définis. Un indice de performance globale permet de comparer les stratégies entre elles. Deux autres indices peuvent être étudiés pour une analyse plus précise de la différence entre la répartition des matériaux simulée et celle souhaitée.

Dans certains cas, même en choisissant une stratégie de fabrication adaptée, la différence entre la répartition des matériaux simulée et celle souhaitée peut être importante. Pour ces cas, un dispositif d'optimisation a été mis en place. Ce dispositif permet, en amont de la fabrication, d'optimiser les commandes des débits des poudres à l'aide d'une boucle d'asservissement prédictif prenant en compte les travaux de modélisation du procédé. Les commandes optimisées sont ensuite utilisées pour définir les instructions de la fabrication. Ces travaux de modélisation et d'optimisation du procédé ont été validés expérimentalement sur plusieurs pièces test.

Une maquette informatique a été réalisée en reprenant de façon automatisée l'ensemble des étapes permettant de passer de la conception à la fabrication. Cette maquette informatique permet de décrire numériquement une pièce multimatériau. Une trajectoire est générée automatiquement et les commandes des débits des poudres sont optimisées. Les instructions de fabrication adaptées au procédé sont définies à partir de la trajectoire générée et des commandes optimisées. Des exemples de génération de trajectoires ont ainsi pu être réalisés pour mettre en avant les intérêts de la méthode de génération de trajectoires.

Après avoir fait la synthèse des travaux effectués, nous pouvons mettre en avant les apports de ces travaux suivant ces cinq points :

- Mise en place d'une **méthodologie de fabrication** avec une approche globale sans discrétisation de la répartition des matériaux et retour sur la conception. Les rares méthodologies existantes proposent, quant à elles, une décomposition de la pièce en entités homogènes dégradant, ainsi, les propriétés de la pièce. Nous proposons donc une fabrication de la pièce en conservant le plus possible la répartition des matériaux définie par le concepteur. De plus, la méthodologie permet un retour sur la conception grâce à une simulation réaliste de la répartition des matériaux dans la pièce.
- **Évaluation des stratégies de fabrication** à l'aide d'une modélisation du procédé. Quelques méthodologies de choix de stratégies de fabrication mettent en avant les contraintes liées au procédé mais ne permettent pas une évaluation des stratégies de fabrication en prenant en compte les spécificités de la pièce et du procédé utilisé. Ainsi, nous pouvons prédire la répartition des matériaux dans la pièce fabriquée et comparer les stratégies de fabrication pour choisir la plus adaptée.
- **Optimisation des commandes des débits des poudres** en amont de la fabrication. L'optimisation du procédé est peu développée pour la fabrication additive et ne prend pas en

compte l'aspect hétérogène des pièces multimatériaux. L'optimisation des commandes des débits des poudres à l'aide d'une boucle d'asservissement virtuel basée sur la modélisation du procédé apparaît donc comme une avancée importante.

- **Génération de trajectoires à partir d'une classification des répartitions des matériaux.** La classification permet, pour certaines pièces, de choisir une stratégie parfaitement adaptée. Bien qu'elle soit limitée pour les répartitions des matériaux complexes, elle peut être avantageusement utilisée dans certains cas. De plus, elle peut sembler utile dans une démarche de conception de pièces multimatériaux avec une prise en compte du procédé. Nous reviendrons sur ce dernier point dans les perspectives de ces travaux.
- **Génération automatique de trajectoires** pour la fabrication additive. Cette méthode permet de définir, pour n'importe quelle répartition des matériaux, une trajectoire adaptée en prenant en compte les contraintes du procédé. Dans nos travaux, la méthode a été utilisée avec un objectif orienté sur la distribution des matériaux pour la fabrication additive de pièces hétérogènes. On peut considérer qu'elle peut être appliquée avec d'autres objectifs, orientés sur la géométrie, par exemple. Ce dernier point paraît donc intéressant pour la fabrication additive en général.

Tous les verrous n'ont pas été levés, les perspectives de ces travaux sont donc multiples. Ces perspectives sont présentées dans la partie suivante.

6.2 Perspectives

Nous présentons, dans cette dernière partie, les perspectives de nos travaux.

Les première perspectives concernent la méthode de génération automatique de trajectoires mise en place. Nous avons constaté, à travers un exemple, que le fait de passer par la création d'une grille de point de passage pouvait diminuer la performance de la méthode. Pour ne pas être contraints par cette limite technique, les points de passage pourraient être remplacés par des zones de passage. Ainsi, la trajectoire devra être définie de manière à passer dans toutes les zones de passage. Avec cette évolution, la génération de trajectoires ne passerait plus par une décomposition de l'espace. Évidemment, la transition d'une zone de passage à une autre serait définie, comme à l'heure actuelle, par des critères basés sur la répartition des matériaux et les spécificités du procédé.

D'autres évolutions peuvent être amenées pour la génération de trajectoires. Par exemple, l'optimisation des trajectoires pourrait être plus globale. En effet, dans la méthode proposée, le choix de l'ordre des points de passage est réalisé un point après l'autre. Le choix pourrait donc être réalisé en prenant en compte plusieurs points à la fois ou une optimisation de la trajectoire pourrait être menée à la fin de l'ordonnancement. On peut noter également qu'avec la méthode définie dans le manuscrit, la première courbe d'une couche ne peut débuter sans que la couche précédente n'ait été remplie. On peut penser que cette contrainte n'est pas utile et sa suppression peut permettre une amélioration des conditions de fabrication avec une variation plus graduelle de la fonction matériau. Évidemment, d'autres contraintes seraient définies puisqu'il est nécessaire de déposer de la matière sur une structure déjà existante.

Cette question amène également des perspectives sur la stratégie de tranchage utilisée. Sur la méthode de génération automatique présentée, la stratégie de tranchage est définie avec des couches planes et uniformes. On peut penser qu'il serait intéressant de proposer d'autres stratégies de tranchage dans certains cas. De plus, le paramètre de l'orientation des couches n'est pas totalement résolu. En effet, pour trouver l'orientation, l'utilisateur doit évaluer plusieurs stratégies pour garder celle qui est la plus adaptée. Le choix automatique d'une stratégie de tranchage est donc un point sur lequel il est nécessaire de travailler. On peut noter que des travaux ont été menés pour déterminer des liens possibles entre stratégies de tranchage et le type de répartition des matériaux. Pour cela, des évaluations des stratégies ont été réalisées sur plusieurs cas tests pour mettre en évidence des règles possibles à l'aide des données mathématiques de classification. Ces essais n'ont pas été concluants et ne permettent pas de définir de règles simples de choix de stratégie de tranchage.

On peut également noter que, contrairement à certaines technologies, la technologie par projection de poudre ne contraint pas une fabrication couche par couche. Ainsi, la stratégie de fabrication peut être définie uniquement par une trajectoire en trois dimensions sans contrainte vis à vis d'une stratégie de tranchage augmentant, ainsi, les possibilités de générer une trajectoire adaptée. Dans ce cas, la question de l'orientation de la pièce pour la fabrication se pose

toujours. On peut mentionner que cette problématique se rapproche, sur certains aspects, des travaux sur le choix d'orientation de pièces pour la réalisation de surfaces complexes en usinage [Hascoët1997].

Concernant l'aspect général de la méthodologie de fabrication, on peut noter qu'une normalisation de la chaîne numérique et particulièrement de l'étape de description de la pièce semblent indispensables. Les travaux de normalisation de la chaîne numérique avec un modèle STEP-NC permettraient d'avoir une démarche globale sans pertes d'informations et une fabrication hybride pour la réalisation des pièces multimatériaux.

Un des derniers points concerne l'optimisation de l'étape de conception en prenant en compte les spécificités du procédé. Ces types de travaux existent pour la fabrication additive de pièces homogènes. Ces travaux pourraient donc être développés pour les pièces multimatériaux. Nous avons constaté, au cours de ce manuscrit, que certaines pièces sont plus simples à fabriquer grâce à une répartition des matériaux permettant de définir une stratégie de fabrication adaptée. Il serait donc envisageable, dans l'étape de conception, de prendre en compte les spécifications fonctionnelles et les spécificités du procédé pour les pièces hétérogènes. On peut noter que, pour cela, il est nécessaire d'enrichir, entre autre, les connaissances sur les caractéristiques des pièces multimatériaux réalisées en fabrication additive.

Finalement, la dernière perspective concerne la fabrication effective de pièces multimatériaux fonctionnelles. En effet, nous avons proposé, avec la méthodologie de fabrication, la réalisation de pièces complexes. Nous avons montré un contrôle de la répartition des matériaux. Néanmoins, le contrôle de la géométrie et de la microstructure reste un verrou à la fabrication de pièces. La fabrication de pièces homogènes est déjà un challenge en-soi mais l'ajout de l'aspect hétérogène des pièces multimatériaux en augmente la difficulté. Pour cela, le contrôle et l'optimisation du procédé doivent prendre en compte tous les aspects : la géométrie et la répartition des matériaux de la pièce, les spécificités du procédé utilisé et les caractéristiques des matériaux primaires choisis.

Spécificités du procédé CLAD®

Les études nécessaires à la mise en place des outils méthodologiques et la modélisation du procédé ont été menées avec le procédé par projection de poudre CLAD®.

- L'apport d'énergie est réalisé avec un laser fibre de 4000 W au nominal.
- Les poudres sont distribuées par deux systèmes de distribution (Figure A.1) et déposées par une tête de dépôt coaxiale, c'est-à-dire que le flux de poudre englobe le laser [Weisheit2001].
- Le système de fabrication est basé sur une machine outils cinq axes : deux translations de l'ensemble tête de dépôt et laser, une translation et une rotation de la table où est fabriquée la pièce (Figure A.1).

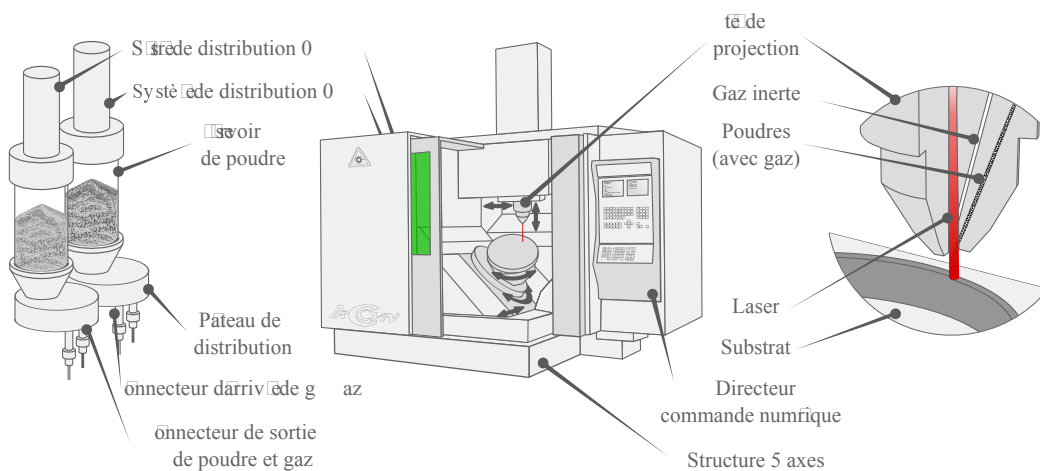


Figure A.1 – Procédé de fabrication additive CLAD®

Étude du comportement mécanique des structures multimatériaux

B.1 Objectif de l'étude

L'objectif de cette étude expérimentale est de montrer l'intérêt que représente une variation de la composition continue par rapport à une variation discontinue concernant le comportement mécanique. Cette étude consiste à fabriquer une série d'éprouvettes (Figure B.1) et de comparer leur comportement mécanique à l'aide d'essais de traction.

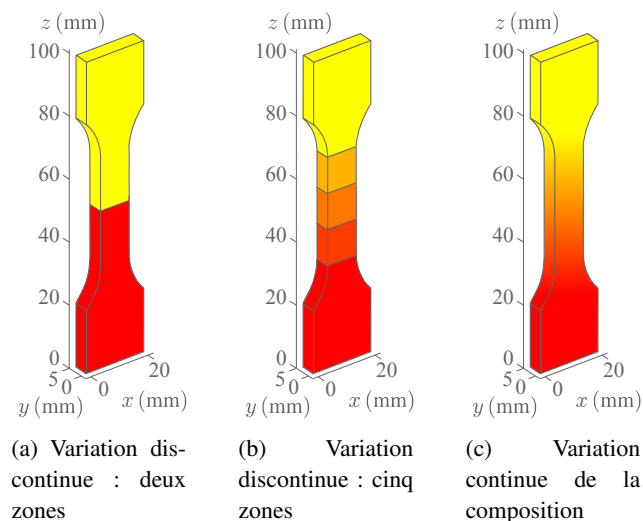


Figure B.1 – Configurations de l'éprouvette de traction

Les éprouvettes de traction sont composées de deux matériaux primaires, l'évolution de composition est discrète pour les deux premières et graduelle pour la troisième. Le premier matériau primaire est une poudre d'alliage base chrome-cobalt Stellite 6. Le second matériau primaire est

une poudre d'acier inoxydable 316L. Deux éprouvettes supplémentaires composées uniquement d'acier inoxydable 316L ont été étudiées. La première est issue de la fabrication additive, la seconde est réalisée à partir d'une tôle.

B.2 Procédure expérimentale

Deux éprouvettes ont été fabriquées pour chaque configuration. Les éprouvettes issues de la fabrication additive ont été réalisées en deux temps ; fabrication additive d'un brut avec le procédé CLAD® (Annexe A) puis usinage pour obtenir la géométrie finale de l'éprouvette.

B.3 Résultats

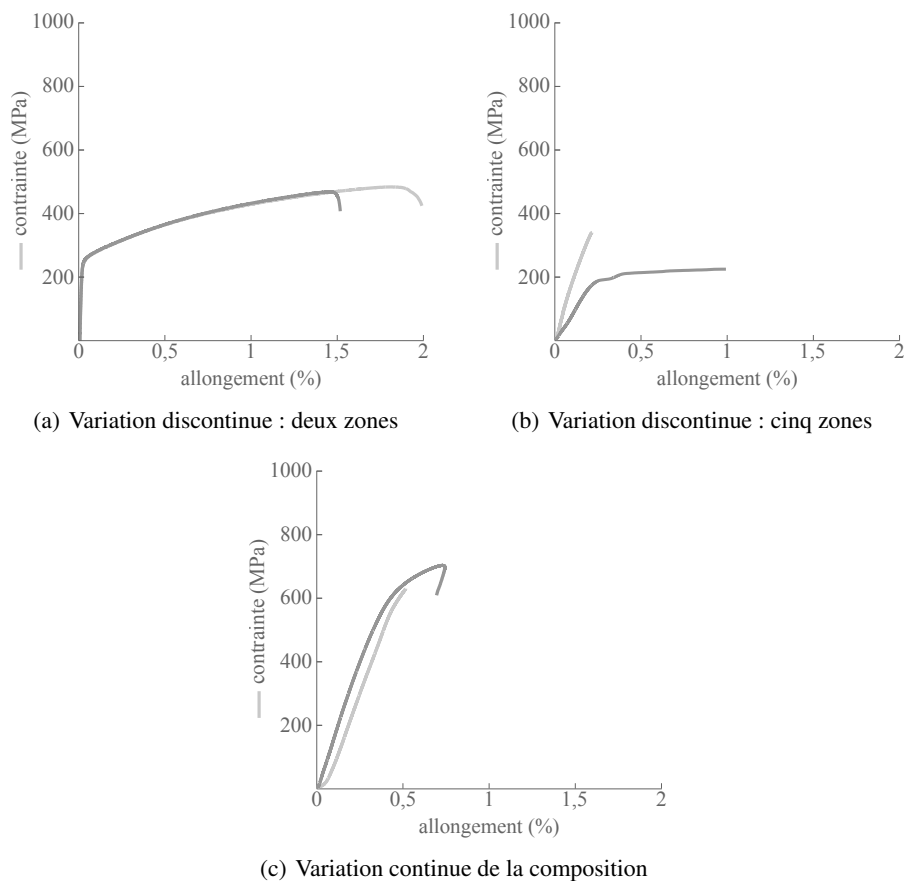


Figure B.2 – Courbes de traction des éprouvettes multimatériaux

Les premières observations concernent le comportement général des éprouvettes. D'un côté, les éprouvettes avec deux zones homogènes présentent un comportement ductile (Figure B.2(a)), d'un autre, les éprouvettes avec une variation continue présentent un comportement fragile

(Figure B.2(c)). Il est plus compliqué de conclure sur le comportement des éprouvettes avec cinq zones homogènes (Figure B.2(b)).

Concernant les propriétés des éprouvettes, on peut observer qu'une variation continue de la composition permet d'augmenter la contrainte pour laquelle il y a rupture (Figure B.2). On peut noter que dans le cas d'une variation discontinue, la rupture est présente à l'interface entre deux matériaux homogènes.

La différence principale entre les éprouvettes multimatériaux et les éprouvettes en acier inoxydable concerne l'allongement. En effet, on remarque que les éprouvettes en acier inoxydable présentent un allongement largement supérieur à celui des éprouvettes multimatériaux. Une comparaison du comportement des éprouvettes monomatériaux (Figure B.3) et multimatériaux (Figure B.2) peut être réalisée sur la première partie de la courbe correspondant à un allongement de 2 %. On observe que les éprouvettes avec deux zones homogènes présentent un comportement proche de celui des éprouvettes en acier inoxydable sur cette partie de la courbe de traction (Figure B.2(a)). On peut expliquer ce résultats car ces éprouvettes sont composées à moitié d'acier inoxydable.

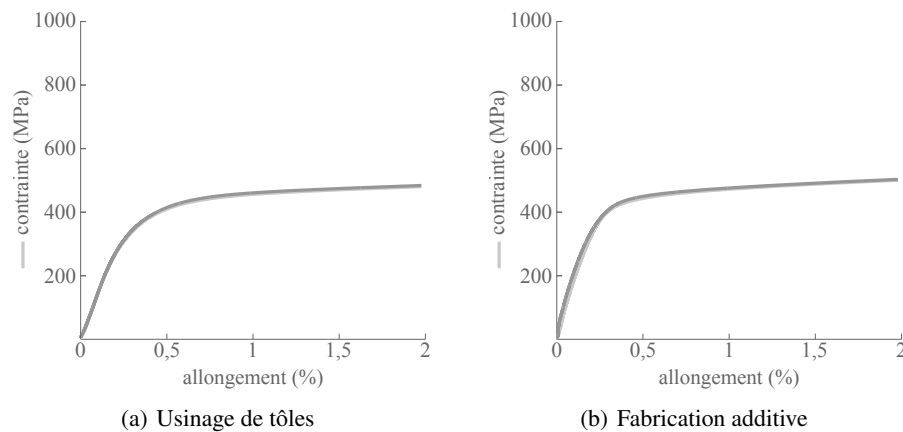


Figure B.3 – Courbes de traction des éprouvettes en acier inoxydable (allongement jusqu'à 2 %)

En ce qui concerne les éprouvettes en acier inoxydable, elles présentent un comportement ductile (Figure B.4). Les éprouvettes issues de la fabrication additive ont globalement le même comportement dans la zone élastique et le début de la zone plastique que celles issues de l'usinage de tôles. Une différence est tout de même à noter puisque la rupture intervient plus rapidement pour les éprouvettes issues de la fabrication additive.

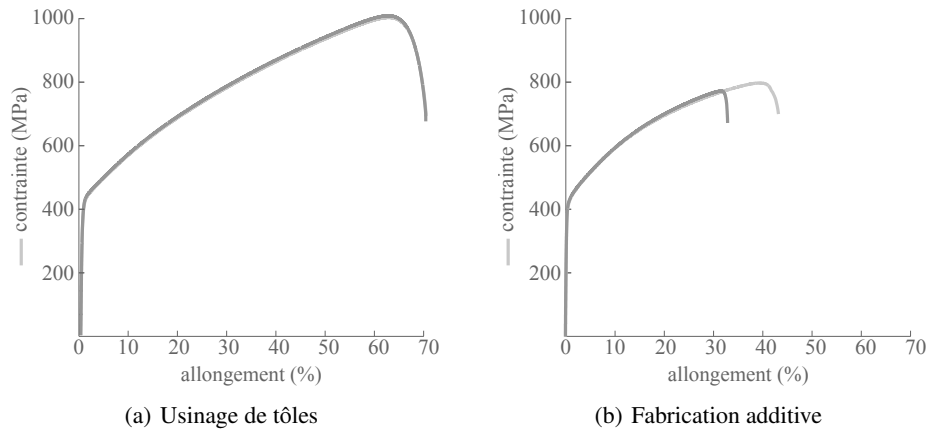


Figure B.4 – Courbes de traction des éprouvettes en acier inoxydable

Les propriétés suivantes des matériaux sont déduites des différents essais :

- le module d'élasticité, noté E , exprimé en GPa ;
- la limite d'élasticité, notée R_e , exprimée en MPa ;
- la résistance à la traction, notée R_m , exprimée en MPa ;
- l'allongement à la rupture, noté A , exprimé en %.

Echantillon	E (GPa)	R_e (MPa)	R_m (MPa)	A (%)
316L/Stellite : 2 zones	183 / 95	417 / 313	452 / 504	0,9 / 2
316L/Stellite : 5 zones	90 / 205	218 / -	231 / 352	1 / 0,2
316L/Stellite : continue	171 / 149	679 / -	706 / 632	0,7 / 0,5
316L : fabrication add.	150 / 175	401 / 403	796 / 771	43,5 / 33,1
316L : usinage	131 / 135	390 / 393	1019 / 1024	68,8 / 68,7

Tableau B.1 – Propriétés des matériaux mesurées

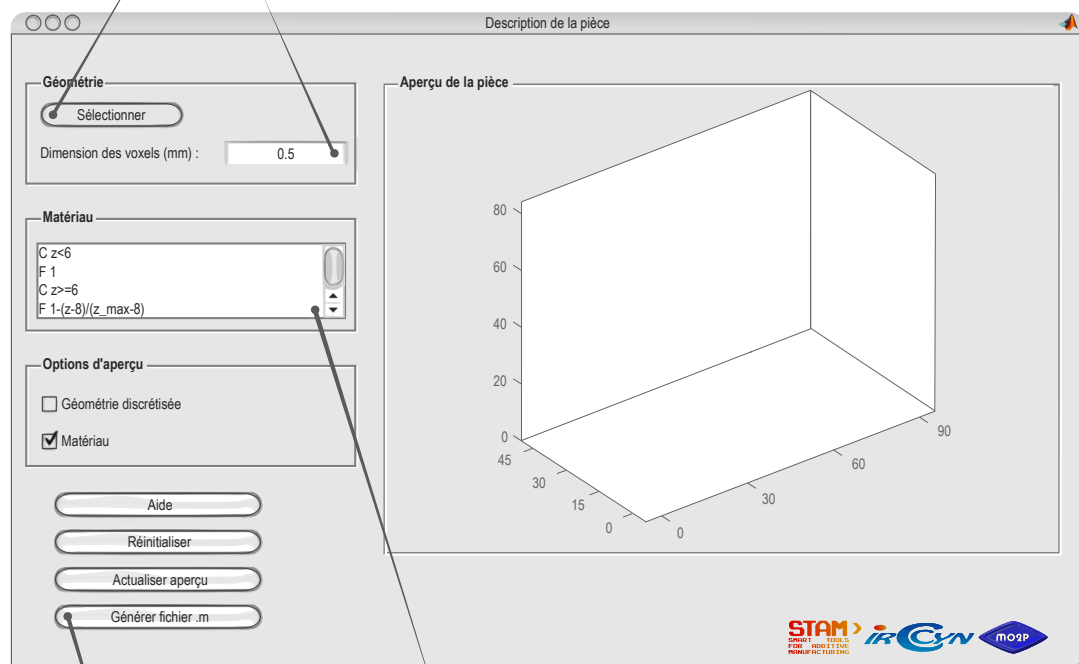
B.4 Synthèse de l'étude

L'intérêt principal de cette étude réside dans la comparaison des propriétés entre les éprouvettes multimatériaux. On constate alors qu'une variation continue permet principalement d'augmenter la résistance à la traction. On note également que dans le cas d'une variation discontinue, la rupture est présente à l'endroit de la variation brutale de la composition. On peut penser qu'il est donc intéressant d'avoir une variation de la répartition des matériaux continue pour améliorer la résistance des pièces multimatériaux.

Documentation pour la maquette informa- tique

La description de la pièce regroupe la géométrie et la répartition des matériaux.
Pour choisir la géométrie, sélectionner le fichier CAO au format STL.

Définir la dimension des voxels influençant la précision de la géométrie sur le fichier de description.



Définir la ou les fonction(s) de description de la répartition des matériaux.
Chaque fonction matériau doit être associée à une condition.

Il est possible de faire intervenir les dimensions de la pièce dans les fonctions et les conditions.

Générer le fichier de description. Ce fichier peut ensuite être utilisé pour la génération de trajectoire.

Figure C.1 – Interface homme-machine pour la description des pièces multimatériaux

Sélectionner le fichier de description de la pièce généré au préalable.

La hauteur de la première et de la dernière couche est extraite du fichier de description.
Modifier ces valeurs pour ne fabriquer qu'une partie de la pièce.

Choisir le critère de sélection des points d'ordonnement (Section 4.3).

Définir la tolérance pour le critère prenant en compte les travaux de modélisation.

Générer la trajectoire et le programme de fabrication, simuler la fabrication.

Définir les paramètres du correcteur intégré au processus d'optimisation (Section 3.3).

Définir les paramètres de calcul. Les résolutions de trajectoire définissent la distance entre deux points de trajectoire.
La résolution matériau définit la différence de fonction matériau nécessaire à la modification des débits des poudres dans le programme de fabrication. Les résolutions de grille définissent la précision spatiale des simulations

Sélectionner les options de calcul pour obtenir respectivement le programme de fabrication, l'utilisation des commandes des débits optimisés dans le programme de fabrication, une simulation de la fabrication avec les indices de performances (Section 3.4) et une simulation de la hauteur des cordons.

Figure C.2 – Interface homme-machine pour le choix des paramètres de génération de la trajectoire

Bibliographie

- [Adzhiev2002] Adzhiev V., Uk B.H., Kartasheva E., Pasko A., Schmitt B. Cellular-functional Modeling of Heterogeneous Objects. In *Proceedings of the ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pp. 192–203, Saarbrücken, Germany, 2002.
- [Ahn2007] Ahn D., Kim H., Lee S. Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layered manufacturing. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 47(3-4):593–606, 2007.
- [Alimardani2010] Alimardani M., Fallah V., Khajepour A., Toyserkani E. The effect of localized dynamic surface preheating in laser cladding of Stellite 1. *Surface & Coatings Technology*, 204(23):3911–3919, 2010.
- [Alimardani2007] Alimardani M., Toyserkani E., Huissoon J. A 3D dynamic numerical approach for temperature and thermal stress distributions in multilayer laser solid freeform fabrication process. *Optics and Lasers in Engineering*, 45(12):1115–1130, 2007.
- [Bahr2003] Bahr H.A., Balke H., Fett T., Hofinger I., Kirchhoff G., Munz D., Neubrand A., Semenov A.S., Weiss H.J., Yang Y.Y. Cracks in functionally graded materials. *Materials Science and Engineering : A*, 362(1-2):2–16, 2003.
- [Balla2007] Balla V.K., Bandyopadhyay P., Bose S., Bandyopadhyay A. Compositionally graded yttria-stabilized zirconia coating on stainless steel using laser engineered net shaping (LENS). *Scripta Materialia*, 57(9):861–864, 2007.
- [Balla2010a] Balla V.K., Banerjee S., Bose S., Bandyopadhyay A. Direct laser processing of a tantalum coating on titanium for bone replacement structures. *Acta Biomaterialia*, 6(6):2329–2334, 2010.
- [Balla2010b] Balla V.K., Bodhak S., Bose S., Bandyopadhyay A. Porous tantalum structures for bone implants : fabrication, mechanical and in vitro biological properties. *Acta biomaterialia*, 6(8):3349–59, 2010.

- [Balla2008a] Balla V.K., Bose S., Bandyopadhyay A. Processing of bulk alumina ceramics using laser engineered net shaping. *International Journal of Applied Ceramic Technology*, 5(3):234–242, 2008.
- [Balla2009] Balla V.K., De Vas Con Cellos P.D., Xue W., Bose S., Bandyopadhyay A. Fabrication of compositionally and structurally graded Ti-TiO₂ structures using laser engineered net shaping (LENS). *Acta Biomaterialia*, 5(5):1831–1837, 2009.
- [Balla2008b] Balla V.K., Xue W., Bose S., Bandyopadhyay A. Functionally graded Co-Cr-Mo coating on Ti-6Al-4V alloy structures. *Acta biomaterialia*, 4(3):697–706, 2008.
- [Balu2012] Balu P., Leggett P., Kovacevic R. Parametric study on a coaxial multi-material powder flow in laser-based powder deposition process. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(7):1598–1610, 2012.
- [Bandyopadhyay2009] Bandyopadhyay A., Krishna B.V., Xue W., Bose S. Application of Laser Engineered Net Shaping (LENS) to manufacture porous and functionally graded structures for load bearing implants. *Journal of Materials Science*, 20:29–34, 2009.
- [Bandyopadhyay2007] Bandyopadhyay P., Balla V.K., Bose S., Bandyopadhyay A. Compositionally graded aluminum oxide coatings on stainless steel using laser processing. *Journal of the American Ceramic Society*, 90(7):1989–1991, 2007.
- [Banerjee2003] Banerjee R., Collins P.C., Bhattacharyya D., Banerjee S., Fraser H.L. Microstructural evolution in laser deposited compositionally graded α/β titanium-vanadium alloys. *Acta Materialia*, 51(11):3277–3292, 2003.
- [Barlier1993] Barlier C., Gasser D., Maucourt J.M. La Stratoconception un procédé nouveau. In *Actes du Congrès Français de Mécanique*, Lille, France, 1993.
- [Bártolo2011] Bártolo P.J., Gibson I. History of stereolithographic processes. In *Stereolithography : Materials, Processes and Applications*, pp. 37–56, 2011.
- [Bhashyam2000] Bhashyam S., Shin K.H., Dutta D. An integrated CAD system for design of heterogeneous objects. *Rapid Prototyping Journal*, 6(2):119–135, 2000.
- [Bi2006] Bi G., Gasser A., Wissenbach K., Drenker A., Poprawe R. Characterization of the process control for the direct laser metallic powder deposition. *Surface and Coatings Technology*, 201(6):2676–2683, 2006.
- [Biswas2004] Biswas A., Shapiro V., Tsukanov I. Heterogeneous material modeling with distance fields. *Computer Aided Geometric Design*, 21(3):215–242, 2004.
- [Blanter1892] Blanter J.E. Manufacture of contour relief maps. *U.S. Patent 473901*, 1892.
- [Bonnard2009] Bonnard R., Mognol P., Hascoët J.Y. Integration of rapid manufacturing processes in a high-level numerical chain. In *Proceedings of the Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pp. 595–601, Leiria, Portugal, 2009.

- [Bourell2009a] Bourell D.L., Beaman J.J., Leu M.C., Rosen D.W. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing : looking back and looking ahead. In *Proceedings of the RapidTech 2009 : U.S. - Turkey Workshop on Rapid Technologies*, Istanbul, Turkey, 2009.
- [Bourell2009b] Bourell D.L., Leu M.C., Rosen D.W. Roadmap for additive manufacturing, 2009.
- [Brandl2010] Brandl E., Baufeld B., Leyens C., Gault R. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire : comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications. *Physics Procedia*, 5:595–606, 2010.
- [Campbell2006] Campbell R. Customer input and customisation. In *Rapid Manufacturing : An Industrial Revolution for the Digital Age*, pp. 19–37, 2006.
- [Campbell2012] Campbell R., Bourell D., Gibson I. Additive manufacturing : rapid prototyping comes of age. *Rapid Prototyping Journal*, 18(4):255–258, 2012.
- [Campbell2002] Campbell R., Martorelli M., Lee H.S. Surface roughness visualisation for rapid prototyping models. *Computer-Aided Design*, 34(10):717–725, 2002.
- [Chandru1995] Chandru V., Manohar S., Prakash C.E. Voxel-based modeling for layered manufacturing. *IEEE Computer Graphics and Applications*, 15(6):42–47, 1995.
- [Chen2003] Chen K.Z., Feng X.A. Computer-aided design method for the components made of heterogeneous materials. *Computer-Aided Design*, 35(5):453–466, 2003.
- [Chiu2000] Chiu W., Tan S.T. Multiple material objects : from CAD representation to data format for rapid prototyping. *Computer-Aided Design*, 32(12):707–717, 2000.
- [Cho2002] Cho J.R., Ha D.Y. Optimal tailoring of 2D volume-fraction distributions for heat-resisting functionally graded materials using FDM. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 191(29-30):3195–3211, 2002.
- [Cho2003] Cho W., Sachs E.M., Patrikalakis N.M., Troxel D.E. A dithering algorithm for local composition control with three-dimensional printing. *Computer-Aided Design*, 35(9):851–867, 2003.
- [Choi2001] Choi D.S., Lee S.H., Shin B.S., Whang K.H., Song Y.A., Park S.H., Jee H.S. Development of a direct metal freeform fabrication technique using CO₂ laser welding and milling technology. *Journal of Materials Processing Technology*, 113(1-3):273–279, 2001.
- [Choi2005a] Choi J., Chang Y. Characteristics of laser aided direct metal/material deposition process for tool steel. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 45(4-5):597–607, 2005.
- [Choi2011] Choi J.W., Kim H.C., Wicker R. Multi-material stereolithography. *Journal of Materials Processing Technology*, 211(3):318–328, 2011.

- [Choi2005b] Choi S.H., Cheung H.H. A multi-material virtual prototyping system. *Computer-Aided Design*, 37(1):123–136, 2005.
- [Choi2008] Choi S.H., Cheung H.H. Digital fabrication of multi-material objects for biomedical applications. In *Biomedical Engineering, Trends in Materials Science*, number Mmlm, pp. 65–86, 2008.
- [Choi2009] Choi S.H., Cheung H.H. A topological hierarchy-based approach to layered manufacturing of functionally graded multi-material objects. *Computers in Industry*, 60(5):349–363, 2009.
- [Chua1998] Chua C.K., Chou S.M., Wong T.S. A study of the state-of-the-art rapid prototyping technologies. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 14(2):146–152, 1998.
- [Collins2003] Collins P.C., Banerjee R., Banerjee S., Fraser H.L. Laser deposition of compositionally graded titanium-vanadium and titanium-molybdenum alloys. *Materials Science and Engineering : A*, 352(1-2):118–128, 2003.
- [Cooper2012] Cooper D.E., Stanford M., Kibble K.A., Gibbons G.J. Additive Manufacturing for product improvement at Red Bull Technology. *Materials & Design*, 41:226–230, 2012.
- [Cooper2010] Cooper K.P., Lambrakos S.G. Thermal Modeling of Direct Digital Melt-Deposition Processes. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 20(1):48–56, 2010.
- [Costa2009] Costa L., Vilar R. Laser powder deposition, 2009.
- [Costa2005] Costa L., Vilar R., Reti T., Deus A. Rapid tooling by laser powder deposition : process simulation using finite element analysis. *Acta Materialia*, 53(14):3987–3999, 2005.
- [Crump1992] Crump S.S. Apparatus and method for creating three-dimensional objects. *U.S. Patent 5121329*, 1992.
- [Das2010] Das M., Balla V.K., Basu D., Bose S., Bandyopadhyay A. Laser processing of SiC-particle-reinforced coating on titanium. *Scripta Materialia*, 63(4):438–441, 2010.
- [Deckard1989] Deckard C.R. Method and apparatus for producing parts by selective sintering. *U.S. Patent 4863538*, 1989.
- [Dimitrov2006] Dimitrov D., Schreve K., De Beer N. Advances in three dimensional printing - state of the art and future perspectives. *Rapid Prototyping Journal*, 12(3):136–147, 2006.
- [Dittrick2010] Dittrick S., Balla V.K., Davies N.M., Bose S., Bandyopadhyay A. In vitro wear rate and Co ion release of compositionally and structurally graded CoCrMo-Ti6Al4V structures. *Materials Science and Engineering : C*, 31(4):809–814, 2010.
- [Domack2005] Domack M.S., Baughman J.M. Development of nickel-titanium graded composition components. *Rapid Prototyping Journal*, 11(1):41–51, 2005.

- [Dutta2001] Dutta D., Prinz F.B., Rosen D., Weiss L. Layered manufacturing : current status and future trends. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(1):60–71, 2001.
- [El Cheikh2012] El Cheikh H., Courant B., Hascoët J.Y., Guillén R. Prediction and analytical description of the single laser track geometry in direct laser fabrication from process parameters and energy balance reasoning. *Journal of Materials Processing Technology*, 212(9):1832–1839, 2012.
- [Elishakoff2005] Elishakoff I., Gentilini C., Viola E. Three-dimensional analysis of an all-round clamped plate made of functionally graded materials. *Acta Mechanica*, 180(1-4):21–36, 2005.
- [Erasenthiran2006] Erasenthiran P., Beal V.E. Functionally graded materials. In *Rapid Manufacturing : An Industrial Revolution for the Digital Age*, pp. 103–124, 2006.
- [Eraslan2005] Eraslan A.N., Akis T. On the plane strain and plane stress solutions of functionally graded rotating solid shaft and solid disk problems. *Acta Mechanica*, 181(1-2):43–63, 2005.
- [España2010] España F.A., Balla V.K., Bose S., Bandyopadhyay A. Design and fabrication of CoCrMo alloy based novel structures for load bearing implants using laser engineered net shaping. *Materials Science and Engineering : C*, 30(1):50–57, 2010.
- [Espalin2012] Espalin D., Ramirez J., Medina F., Wicker R. Multi-material, multi-technology FDM system. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 828–835, Austin, U.S., 2012.
- [Fallah2010] Fallah V., Alimardani M., Corbin S.F., Khajepour A. Impact of localized surface preheating on the microstructure and crack formation in laser direct deposition of Stellite 1 on AISI 4340 steel. *Applied Surface Science*, 257(5):1716–1723, 2010.
- [Fallah2011] Fallah V., Alimardani M., Corbin S.F., Khajepour A. Temporal development of melt-pool morphology and clad geometry in laser powder deposition. *Computational Materials Science*, 50(7):2124–2134, 2011.
- [Fayolle2006] Fayolle P.A., Pasko A., Schmitt B., Mirenkov N. Constructive heterogeneous object modeling using signed approximate real distance functions. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 6(3):221, 2006.
- [Fessler1997] Fessler J., Nickel A., Link G., Prinz F. Functional gradient metallic prototypes through shape deposition manufacturing. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 521–528, Austin, U.S., 1997.
- [Feygin1988] Feygin M. Apparatus and method for forming an integral object from laminations. *U.S. Patent 4752352*, 1988.
- [Ganesh2010] Ganesh P., Moitra A., Tiwari P., Sathyanarayanan S., Kumar H., Rai S.K., Kaul R., Paul C.P., Prasad R.C., Kukreja L.M. Fracture behavior of laser clad joint of Stellite 21 on

- AISI 316L stainless steel. *Materials Science and Engineering : A*, 527(16-17):3748–3756, 2010.
- [Gebhardt2010] Gebhardt A., Schmidt F.M., Hötter J.S., Sokalla W., Sokalla P. Additive manufacturing by selective laser melting the realizer desktop machine and its application for the dental industry. *Physics Procedia*, 5:543–549, 2010.
- [Gibson2009a] Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Development of additive manufacturing technology. In *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, pp. 17–38, 2009.
- [Gibson2009b] Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. Introduction and basic principles. In *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, pp. 1–16, 2009.
- [Gibson2009c] Gibson I., Rosen D.W., Stucker B. The use of multiple materials in additive manufacturing. In *Additive Manufacturing Technologies : Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing*, pp. 423–436, 2009.
- [Goupee2006] Goupee A.J., Vel S.S. Two-dimensional optimization of material composition of functionally graded materials using meshless analyses and a genetic algorithm. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 195(44-47):5926–5948, 2006.
- [Griffith1997] Griffith M.L., Harwell L.D., Romero T., Schlienger E., Atwood C.L., Smugersky J.E. Multi-material processing by LENS. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 387–394, Austin, U.S., 1997.
- [Groves1997] Groves J.F., Wadley H.N.G. Functionally graded materials synthesis via low vacuum directed vapor deposition. *Composites Part B : Engineering*, 28(1):57–69, 1997.
- [Hagedorn2010] Hagedorn Y.C., Wilkes J., Meiners W., Wissenbach K., Poprawe R. Net shaped high performance oxide ceramic parts by selective laser melting. *Physics Procedia*, 5:587–594, 2010.
- [Hague2006] Hague R. Unlocking the design potential of rapid manufacturing. In *Rapid Manufacturing : An Industrial Revolution for the Digital Age*, pp. 5–18, 2006.
- [Hascoët1997] Hascoët J.Y., Bennis F., Risacher P. Choice of machine tool configuration. In *Integrated Design and Manufacturing in Mechanical Engineering*, pp. 379–387, 1997.
- [Hascoët2011a] Hascoët J.Y., Muller P., Mognol P. Manufacturing of complex parts with continuous functionally graded materials (FGM). In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 557–569, Austin, U.S., 2011.
- [Hascoët2011b] Hascoët J.Y., Ponche R., Kerbrat O., Mognol P. From functional specifications to optimized CAD model : proposition of a new DFAM methodology. In *Proceedings of the ASME Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference*, pp. 467–472, Leiria, Portugal, 2011.

- [Hiller2009] Hiller J.D., Lipson H. STL 2.0 : a proposal for a universal multi-material additive manufacturing file format. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, number 1, pp. 266–278, Austin, U.S., 2009.
- [Hongmei2009] Hongmei Z., Zhigang L., Bingheng L. Heterogeneous object modeling based on multi-color distance field. *Materials & Design*, 30(4):939–946, 2009.
- [Hopkinson2006a] Hopkinson N., Dickens P. Emerging rapid manufacturing processes. In *Rapid Manufacturing : An Industrial Revolution for the Digital Age*, pp. 55–80, 2006.
- [Hopkinson2006b] Hopkinson N., Hague R., Dickens P. Introduction to rapid manufacturing. In *Rapid Manufacturing : An Industrial Revolution for the Digital Age*, pp. 1–4, 2006.
- [Hsieh2001] Hsieh C.T., Langrana N.A. A system approach in extrusion-based multi-material CAD. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 313–321, Austin, U.S., 2001.
- [Hua2005] Hua J., He Y., Qin H. Trivariate simplex splines for inhomogeneous solid modeling in engineering design. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 5(2): 149, 2005.
- [Huang2012] Huang S.H., Liu P., Mokasdar A., Hou L. Additive manufacturing and its societal impact : a literature review. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–13, 2012.
- [Hull1986] Hull C.W. Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. *U.S. Patent 4575330*, 1986.
- [Jackson2000] Jackson T.R. *Analysis of functionally graded material object representation methods*. PhD thesis, Massachusetts Institute of Technology, 2000.
- [Jackson1999] Jackson T.R., Liu H., Patrikalakis N.M., Sachs E.M., Cima M.J. Modeling and designing functionally graded material components for fabrication with local composition control. *Materials & Design*, 20:63–75, 1999.
- [Jafari2000] Jafari M.A., Han W., Mohammadi F., Safari A., Danforth S.C., Langrana N. A novel system for fused deposition of advanced multiple ceramics. *Rapid Prototyping Journal*, 6(3):161–174, 2000.
- [Jendrzewski2007] Jendrzewski R., Sliwinski G. Investigation of temperature and stress fields in laser clad coatings. *Applied Surface Science*, 254(4):921–925, 2007.
- [Jepson1997] Jepson L., Beaman J.J., Bourell D.L., Wood K.L. SLS processing of functionally gradient materials. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 67–80, Austin, U.S., 1997.
- [Jiang2005] Jiang W., Nair R., Molian P. Functionally graded mold inserts by laser-based flexible fabrication : processing modeling, structural analysis, and performance evaluation. *Journal of Materials Processing Technology*, 166(2):286–293, 2005.

- [Jin2013] Jin G.Q., Li W.D., Gao L. An adaptive process planning approach of rapid prototyping and manufacturing. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 29:23–38, 2013.
- [Jin2011] Jin G.Q., Li W.D., Tsai C.F., Wang L. Adaptive tool-path generation of rapid prototyping for complex product models. *Journal of Manufacturing Systems*, 30(3):154–164, 2011.
- [Jin2005] Jin G., Takeuchi M., Honda S., Nishikawa T., Awaji H. Properties of multilayered mullite/Mo functionally graded materials fabricated by powder metallurgy processing. *Materials Chemistry and Physics*, 89(2):238–243, 2005.
- [Kao1998] Kao J.H., Prinz F.B. Optimal motion planning for deposition in layered manufacturing. In *Design Engineering Technical Conferences*, pp. 13–16, Atlanta, U.S., 1998.
- [Kartasheva2003] Kartasheva E., Adzhiev V., Pasko A., Fryazinov O., Gasilov V. Discretization of functionally based heterogeneous objects. In *Proceedings of the ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, p. 145, New York, U.S., 2003.
- [Karunakaran2007] Karunakaran K.P., Suryakumar S., Bernard A. Rapid manufacturing of metallic objects : process comparison. In *Proceedings of the Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, Leiria, Portugal, 2007.
- [Kawasaki1997] Kawasaki A., Watanabe R. Concept and P/M fabrication of functionally gradient materials. *Ceramics International*, 8842(95):73–83, 1997.
- [Kerbrat2008] Kerbrat O., Mognol P., Hascoët J.Y. Manufacturing complexity evaluation for additive and subtractive processes : application to hybrid modular tooling. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 519–530. IRCCyN, MO2P, 2008.
- [Kerbrat2010] Kerbrat O., Mognol P., Hascoët J.Y. Manufacturability analysis to combine additive and subtractive processes. *Rapid Prototyping Journal*, 16(1):63–72, 2010.
- [Kerninon2009] Kerninon J., Mognol P., Hascoët J.Y. Global approach to design and manufacture direct parts. In *Proceedings of the Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pp. 111–116, Leiria, Portugal, 2009.
- [Kerninon2008] Kerninon J., Mognol P., Hascoët J.Y., Legonidec C. Effect of path strategies on metallic parts manufactured by additive process. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 352–361, Austin, U.S., 2008.
- [Kieback2003] Kieback B., Neubrand A., Riedel H. Processing techniques for functionally graded materials. *Materials Science and Engineering : A*, 362(1-2):81–106, 2003.
- [Knoppers2004] Knoppers G.E., Gunnink J.W., Van Den Hout J., Van Vliet W.P. The reality of functionally graded material products. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 38–43, Austin, U.S., 2004.
- [Knoppers2006] Knoppers R., Hague R. CAD for rapid manufacturing. In *Rapid Manufacturing : An Industrial Revolution for the Digital Age*, pp. 39–54, 2006.

- [Kobryn2000] Kobryn P., Moore E.H., Semiatin S.L. The effect of laser power and traverse speed on microstructure, porosity, and build height in laser-deposited Ti-6Al-4V. *Scripta Materialia*, 43(4):299–305, 2000.
- [Kochan2003] Kochan A. Rapid prototyping helps Renault F1 Team UK improve championship prospects. *Assembly Automation*, 23(4):336–339, 2003.
- [Kochan1999] Kochan D., Kai C.C., Zhaohui D. Rapid prototyping issues in the 21st century. *Computers in Industry*, 39(1):3–10, 1999.
- [Kou2005] Kou X.Y., Tan S.T. A hierarchical representation for heterogeneous object modeling. *Computer-Aided Design*, 37(3):307–319, 2005.
- [Kou2007] Kou X.Y., Tan S.T. Heterogeneous object modeling : A review. *Computer-Aided Design*, 39(4):284–301, 2007.
- [Kou2009] Kou X.Y., Tan S.T. Robust and efficient algorithms for rapid prototyping of heterogeneous objects. *Rapid Prototyping Journal*, 15(1):5–18, 2009.
- [Kou2006] Kou X.Y., Tan S.T., Sze W.S. Modeling complex heterogeneous objects with non-manifold heterogeneous cells. *Computer-Aided Design*, 38(5):457–474, 2006.
- [Kulkarni2000] Kulkarni P., Marsan A., Dutta D. A review of process planning techniques in layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 6(1):18–35, 2000.
- [Kumar2000] Kumar A.V., Lee J. Designing and slicing heterogeneous components for Rapid Prototyping. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 428–436, Austin, U.S., 2000.
- [Kumar1999a] Kumar A.V., Wood A. Representation and design of heterogeneous components. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 179–186, Austin, U.S., 1999.
- [Kumar2010] Kumar S., Kruth J.P. Composites by rapid prototyping technology. *Materials & Design*, 31(2):850–856, 2010.
- [Kumar1999b] Kumar V., Burns D., Dutta D., Hoffmann C. A framework for object modeling. *Computer-Aided Design*, 31(9):541–556, 1999.
- [Kumar1998] Kumar V., Rajagopalan S., Cutkosky M., Dutta D. Representation and processing of heterogeneous objects for solid freeform fabrication. In *Proceedings of the Geometric Modeling Workshop*, pp. 1–21, Tokyo, Japan, 1998.
- [Larson1998] Larson R. Method and device for producing three-dimensional bodies. *U.S. Patent 5786562*, 1998.
- [Levy2010] Levy G.N. The role and future of the laser technology in the additive manufacturing environment. *Physics Procedia*, 5:65–80, 2010.

- [Levy2003] Levy G.N., Schindel R., Kruth J.P. Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 52(2):589–609, 2003.
- [Lewis1998] Lewis G.K., Milewski J.O., Cremers D.A., Nemec R.B., Barbe M.R. Laser production of articles from powders. *U.S. Patent 5837960*, 1998.
- [Lin1999] Lin J., Hwang B.C. Coaxial laser cladding on an inclined substrate. *Optics & Laser Technology*, 31(8):571–578, 1999.
- [Lin2005] Lin X., Yue T. Phase formation and microstructure evolution in laser rapid forming of graded SS316L/Rene88DT alloy. *Materials Science and Engineering : A*, 402(1-2):294–306, 2005.
- [Lin2006] Lin X., Yue T.M., Yang H.O., Huang W.D. Microstructure and phase evolution in laser rapid forming of a functionally graded Ti-Rene88DT alloy. *Acta Materialia*, 54(7):1901–1915, 2006.
- [Liu2000] Liu H., Cho W., Jackson T.R., Patrikalakis N.M., Sachs E.M. Algorithms for design and interrogation of functionally gradient material objects. In *Proceedings of the ASME Design Automation Conference*, pp. 1–10, Baltimore, U.S., 2000.
- [Liu2004] Liu H., Maekawa T., Patrikalakis N.M., Sachs E.M., Cho W. Methods for feature-based design of heterogeneous solids. *Computer-Aided Design*, 36(12):1141–1159, 2004.
- [Liu2003] Liu W., DuPont J.N. Fabrication of functionally graded TiC/Ti composites by laser engineered net shaping. *Scripta Materialia*, 48(9):1337–1342, 2003.
- [Lu2011] Lu L., Chekroun M., Abraham O., Maupin V., Villain G. Mechanical properties estimation of functionally graded materials using surface waves recorded with a laser interferometer. *NDT&E International*, 44(2):169–177, 2011.
- [Lu2010] Lu Z.L., Li D.C., Lu B.H., Zhang A.F., Zhu G.X., Pi G. The prediction of the building precision in the Laser Engineered Net Shaping process using advanced networks. *Optics and Lasers in Engineering*, 48(5):519–525, 2010.
- [Ma2004] Ma W., But W.C., He P. NURBS-based adaptive slicing for efficient rapid prototyping. *Computer-Aided Design*, 36(13):1309–1325, 2004.
- [Mahamood2012] Mahamood R.M., Member E.T.A., Shukla M., Pityana S. Functionally Graded Material : An Overview. In *Proceedings of the World Congress on Engineering*, London, U.K., 2012.
- [Majumdar2009] Majumdar J.D., Manna I., Kumar A., Bhargava P., Nath A.K. Direct laser cladding of Co on Ti-6Al-4V with a compositionally graded interface. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(5):2237–2243, 2009.

- [Martin2001] Martin W., Cohen E. Representation and extraction of volumetric attributes using trivariate splines : a mathematical framework. In *Proceedings of the ACM Symposium on Solid Modeling and Applications*, pp. 234–240, Ann Arbor, U.S., 2001.
- [Meiners2001] Meiners W., Wissenbach K., Gasser A. Selective laser sintering at melting temperature. *U.S. Patent 6215093*, 2001.
- [Meng2012] Meng Q., Yang H., Nam T.H. Compositionally graded NiTi plate prepared by diffusion annealing. *Scripta Materialia*, 67(3):305–308, 2012.
- [Mognol2011] Mognol P., Muller P., Hascoët J.Y. A novel approach to produce functionally graded materials for additive manufacturing. In *Proceedings of the Conference on Advanced Research in Virtual and Rapid Prototyping*, pp. 473–478, Leiria, Portugal, 2011.
- [Morvan2001] Morvan S., Fadel G.M., Love J., Keicher D. Manufacturing of a heterogeneous flywheel on a LENS apparatus. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 553–560, Austin, U.S., 2001.
- [Müller2003] Müller E., Drasar C., Schilz J., Kaysser W.A. Functionally graded materials for sensor and energy applications. *Materials Science and Engineering : A*, 362(1-2):17–39, 2003.
- [Muller2013a] Muller P., Hascoët J.Y., Mognol P. A method for the manufacturing of functionally graded material parts. *Advanced Materials Research*, 698:117–126, 2013.
- [Muller2013b] Muller P., Hascoët J.Y., Mognol P. Toolpaths for additive manufacturing of functionally graded materials (FGM) parts. *Rapid Prototyping Journal*, soumis, 2013.
- [Muller2012] Muller P., Mognol P., Hascoët J.Y. Functionally graded material (FGM) parts : from design to the manufacturing simulation. In *Proceedings of the ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, pp. 1–9, Nantes, France, 2012.
- [Muller2013c] Muller P., Mognol P., Hascoët J.Y. Modeling and control of a direct laser powder deposition process for Functionally Graded Materials (FGM) parts manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 213(5):685–692, 2013.
- [Mumtaz2007] Mumtaz K.A., Hopkinson N. Laser melting functionally graded composition of Waspaloy and zirconia powders. *Journal of Materials Science*, 42(18):7647–7656, 2007.
- [Nickel2001] Nickel A.H., Barnett D.M., Prinz F.B. Thermal stresses and deposition patterns in layered manufacturing. *Materials Science and Engineering : A*, 317(1-2):59–64, 2001.
- [Niino1988] Niino M., Suzuki A., Hirai T., Watanabe R., Hirano T., Kuroishi N. Method of producing a functionally gradient material. *U.S. Patent 4571099*, 1988.
- [Noecker2002] Noecker F.F., DuPont J.N. Functionally graded copper-steel using laser engineered net shaping process. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 231–238, Austin, U.S., 2002.

- [Novichenko2010] Novichenko D., Thivillon L., Bertrand P., Smurov I. Carbide-reinforced metal matrix composite by direct metal deposition. *Physics Procedia*, 5:369–377, 2010.
- [Obielodan2010] Obielodan J.O., Ceylan A., Murr L.E., Stucker B.E. Multi-material bonding in ultrasonic consolidation. *Rapid Prototyping Journal*, 16(5):180–188, 2010.
- [Ocylok2010] Ocylok S., Weisheit A., Kelbassa I. Functionally graded multi-layers by laser cladding for increased wear and corrosion protection. *Physics Procedia*, 5:359–367, 2010.
- [Ott2010] Ott M., Zaeh M.F. Multi-material processing in additive manufacturing. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 195–203, Austin, U.S., 2010.
- [Ozbolat2011] Ozbolat I.T., Koc B. Multi-directional blending for heterogeneous objects. *Computer-Aided Design*, 43(8):863–875, 2011.
- [Pandey2003] Pandey P.M., Reddy N.V., Dhande S.G. Slicing procedures in layered manufacturing : a review. *Rapid Prototyping Journal*, 9(5):274–288, 2003.
- [Pandey2007] Pandey P.M., Venkatareddy N., Dhande S. Part deposition orientation studies in layered manufacturing. *Journal of Materials Processing Technology*, 185(1-3):125–131, 2007.
- [Park2000] Park S.M., Crawford R.H., Beaman J.J. Functionally gradient material representation by volumetric multi-texturing for solid Freeform Fabrication. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 350–361, Austin, U.S., 2000.
- [Pasko2001] Pasko A., Adzhiev V., Schmitt B., Schlick C. Constructive hypervolume modeling. *Graphical Models*, 63(6):413–442, 2001.
- [Paterson2012] Paterson A.M., Bibb R.J., Campbell R.I. Evaluation of a digitised splinting approach with multiple-material functionality using Additive Manufacturing technologies. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 656–672, Austin, U.S., 2012.
- [Patil2002] Patil L., Dutta D., Bhatt A.D., Jurens K., Lyons K., Pratt M.J., Sriram R.D. A proposed standards-based approach for representing heterogeneous objects for layered manufacturing. *Rapid Prototyping Journal*, 8(3):134–146, 2002.
- [Pei2000] Pei Y.T., De Hosson J.T. Functionally graded materials produced by laser cladding. *Acta Materialia*, 48(10):2617–2624, 2000.
- [Pei2002] Pei Y.T., Ocelik V., De Hosson J.T. SiCp/Ti6Al4V functionally graded materials produced by laser melt injection. *Acta Materialia*, 50(8):2035–2051, 2002.
- [Pei2003] Pei Y.T., Ocelik V., De Hosson J.T. Interfacial adhesion of laser clad functionally graded materials. *Materials Science and Engineering : A*, 342(1-2):192–200, 2003.
- [Pessard2007] Pessard E., Mognol P., Hascoët J.Y., Gerometta C. Complex cast parts with rapid tooling : rapid manufacturing point of view. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 39(9-10):898–904, 2007.

- [Pham1998] Pham D.T., Gault R.S. A comparison of rapid prototyping technologies. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, 38(10-11):1257–1287, 1998.
- [Pompe2003] Pompe W., Worch H., Eppe M., Friess W., Gelinsky M., Greil P., Hempel U., Scharnweber D., Schulte K. Functionally graded materials for biomedical applications. *Materials Science and Engineering : A*, 362(1-2):40–60, 2003.
- [Ponche2012] Ponche R., Kerbrat O., Mognol P., Hascoët J.Y. Consideration of the manufacturing trajectories in a global design for additive manufacturing methodology. In *Proceedings of the ASME Conference on Engineering Systems Design and Analysis*, pp. 1–9, Nantes, France, 2012.
- [Ponche2013] Ponche R., Kerbrat O., Mognol P., Hascoët J.Y. Implementation of a novel design for additive manufacturing methodology. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, soumis, 2013.
- [Put2003] Put S., Vleugels J., Anné G., Biest O.V.B. Functionally graded ceramic and ceramic-metal composites shaped by electrophoretic deposition. *Colloids and Surfaces*, 222(1-3):223–232, 2003.
- [Qian2001] Qian X., Dutta D. Feature Based Fabrication in Layered Manufacturing. *Journal of Mechanical Design*, 123(3):337, 2001.
- [Qian2003a] Qian X., Dutta D. Design of heterogeneous turbine blade. *Computer-Aided Design*, 35:319–329, 2003.
- [Qian2003b] Qian X., Dutta D. Heterogeneous object modeling through direct face neighborhood alteration. *Computers & Graphics*, 27(6):943–961, 2003.
- [Qian2004] Qian X., Dutta D. Feature-based design for heterogeneous objects. *Computer-Aided Design*, 36(12):1263–1278, 2004.
- [Rajan2010] Rajan T.P.D., Pillai R.M., Pai B.C. Characterization of centrifugal cast functionally graded aluminum-silicon carbide metal matrix composites. *Materials Characterization*, 61(10):923–928, 2010.
- [Ren2010] Ren L., Sparks T., Ruan J., Liou F. Integrated process planning for a multiaxis hybrid manufacturing system. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(2):021006, 2010.
- [Rock1991] Rock S.J., Wozny M.J. A flexible file format for solid freeform fabrication. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 1–12, Austin, U.S., 1991.
- [Roy2010] Roy M., Balla V.K., Bandyopadhyay A., Bose S. Compositionally graded hydroxyapatite/tricalcium phosphate coating on Ti by laser and induction plasma. *Acta Biomaterialia*, 2010.

- [Ruan2006] Ruan J., Sparks T.E., Fan Z., Stroble J.K., Panackal A., Liou F. A review of layer based manufacturing processes for metals. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 233–245, Austin, U.S., 2006.
- [Ruan2007] Ruan J., Sparks T.E., Panackal A., Liou F.W., Eiamsa-ard K., Slattery K., Chou H.N., Kinsella M. Automated slicing for a multiaxis metal deposition system. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 129(2):303, 2007.
- [Ruan2010] Ruan J., Tang L., Liou F.W., Landers R.G. Direct three-dimensional layer metal deposition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 132(6):064502, 2010.
- [Rvachev2001] Rvachev V.L., Sheiko T.I., Shapiro V., Tsukanov I. Transfinite interpolation over implicitly defined sets. *Computer Aided Geometric Design*, 18(3):195–220, 2001.
- [Sachs1993] Sachs E.M., Haggerty J.S., Cima M.J., Williams P.A. Three-dimensional printing techniques. *U.S. Patent 5204055*, 1993.
- [Samanta2005] Samanta K., Koc B. Feature-based design and material blending for free-form heterogeneous object modeling. *Computer-Aided Design*, 37(3):287–305, 2005.
- [Samanta2007] Samanta K., Koc B. Optimum matching of geometric features for material metamorphosis in heterogeneous object modeling. *Computer-Aided Design & Applications*, 4(1-4):57–66, 2007.
- [Schwendner2001] Schwendner K.I., Banerjee R., Collins P.C., Brice C.A., Fraser H.L. Direct laser deposition of alloys from elemental powder blends. *Scripta Materialia*, 45:1123–1129, 2001.
- [Scott2012] Scott J., Gupta N., Weber C., Newsome S., Wohlers T., Caffrey T. Additive manufacturing : status and opportunities, 2012.
- [Sears1999] Sears J.W. Direct laser powder deposition - state of the art, 1999.
- [Sexton2002] Sexton L., Lavin S., Byrne G., Kennedy A. Laser cladding of aerospace materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 122(1):63–68, 2002.
- [Shen2009] Shen H., Yao Z., Hu J. Numerical analysis of metal/ceramic bilayer materials systems in laser forming. *Computational Materials Science*, 45(2):439–442, 2009.
- [Shin2001] Shin K.H., Dutta D. Constructive representation of heterogeneous objects. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(3):205–217, 2001.
- [Shin2002] Shin K.H., Dutta D. Process-planning for layered manufacturing of heterogeneous objects using direct metal deposition. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 2(4):330–344, 2002.
- [Shin2003] Shin K.H., Natu H., Dutta D., Mazumder J. A method for the design and fabrication of heterogeneous objects. *Materials & Design*, 24(5):339–353, 2003.

- [Shishkovsky2012] Shishkovsky I., Missemmer F., Smurov I. Direct metal deposition of functional graded structures in Ti-Al system. *Physics Procedia*, 39:382–391, 2012.
- [Shishkovsky2007] Shishkovsky I., Yadroitsev I., Bertrand P., Smurov I. Alumina-zirconium ceramics synthesis by selective laser sintering/melting. *Applied Surface Science*, 254(4):966–970, 2007.
- [Singh2001] Singh P., Dutta D. Multi-direction slicing for layered manufacturing. *Journal of Computing and Information Science in Engineering*, 1(2):129, 2001.
- [Singh2008] Singh P., Dutta D. Offset slices for multidirection layered deposition. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 130(1):011011, 2008.
- [Siu2002a] Siu Y.K., Tan S.T. Slicing and contours generation for fabricating heterogeneous objects. In *Proceedings of the Geometric Modeling and Processing*, pp. 219–225, Saitama, Japan, 2002.
- [Siu2002b] Siu Y.K., Tan S.T. 'Source-based' heterogeneous solid modeling. *Computer-Aided Design*, 34(1):41–55, 2002.
- [Siu2002c] Siu Y.K., Tan Y.K. Modeling the material grading and structures of heterogeneous objects for layered manufacturing. *Computer-Aided Design*, 34(10):705–716, 2002.
- [Tang2007] Tang L., Ruan J., Landers R.G., Liou F. Variable powder flow rate control in laser metal deposition processes. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 22–48, Austin, U.S., 2007.
- [Thivillon2009] Thivillon L., Bertrand P., Laget B., Smurov I. Potential of direct metal deposition technology for manufacturing thick functionally graded coatings and parts for reactors components. *Journal of Nuclear Materials*, 385(2):236–241, 2009.
- [Wang2007] Wang F., Chen K.Z., Feng X.A. Modeling of plasma spraying process to manufacture hybrid materials. *Computer-Aided Design*, 39(12):1120–1133, 2007.
- [Wang2008] Wang Feng, Chen Ke-zhang, Feng Xin-an. Virtual manufacturing to design a manufacturing technology for components made of a multiphase perfect material. *Computer-Aided Design & Applications*, 5:110–120, 2008.
- [Wang2006] Wang J., Shaw L.L. Fabrication of functionally graded materials via inkjet color printing. *Journal of the American Ceramic Society*, 89(10):3285–3289, 2006.
- [Wang2005] Wang M.Y., Wang X. A level-set based variational method for design and optimization of heterogeneous objects. *Computer-Aided Design*, 37(3):321–337, 2005.
- [Wang2009] Wang S., Chen N., Chen C.S., Zhu X. Finite element-based approach to modeling heterogeneous objects. *Finite Elements in Analysis and Design*, 45(8-9):592–596, 2009.
- [Wang2012] Wang S., Wang Y., Chen C.S., Zhu X. An adaptive slicing algorithm and data format for functionally graded material objects. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, pp. 1–8, 2012.

- [Watari2004] Watari F., Yokoyama A., Omori M., Hirai T., Kondo H., Uo M., Kawasaki T. Bio-compatibility of materials and development to functionally graded implant for bio-medical application. *Composites Science and Technology*, 64(6):893–908, 2004.
- [Watari1997] Watari F., Yokoyama A., Saso F., Uo M., Kawasaki T. Fabrication and properties of functionally graded dental implant. *Composites Part B : Engineering*, 28(1-2):5–11, 1997.
- [Weisheit2001] Weisheit A., Backes G., Stromeier R., Gasser A., Wissenbach K., Poprawe R. Powder injection : the key to reconditioning and generating components using laser cladding. In *Proceedings of the International Congress on Advanced Materials and Processes*, pp. 1–8, Munich, Germany, 2001.
- [White2003] White D. Ultrasonic object consolidation. *U.S. Patent 6519500*, 2003.
- [Williams2005] Williams J.M., Adewunmi A., Schek R.M., Flanagan C.L., Krebsbach P.H., Feinberg S.E., Hollister S.J., Das S. Bone tissue engineering using polycaprolactone scaffolds fabricated via selective laser sintering. *Biomaterials*, 26(23):4817–27, 2005.
- [Wohlers2002] Wohlers T. Background. In *Wohlers Report 2002*, pp. 12–32, 2002.
- [Wohlers2012] Wohlers T. Background. In *Wohlers Report 2012*, pp. 12–21, 2012.
- [Wu2011a] Wu D., Liang X., Li Q., Jiang L. Laser rapid manufacturing of stainless steel 316L/Inconel718 functionally graded materials : microstructure evolution and mechanical properties. *International Journal of Optics*, 2010, 2011.
- [Wu2011b] Wu X. Heterogeneous object modeling for rapid prototyping. In *Rapid Prototyping Technology - Principles and Functional Requirements*, number 1999, pp. 81–104, 2011.
- [Wu2007] Wu X.J., Liu W.J., Wang M.Y. Modeling heterogeneous objects in CAD. *Computer-Aided Design & Applications*, 4(6):731–740, 2007.
- [Xia2008] Xia Q.X., Wang M.Y. Simultaneous optimization of the material properties and the topology of functionally graded structures. *Computer-Aided Design*, 40(6):660–675, 2008.
- [Xinhua1997] Xinhua X., Jingchuan Z., Zhongda Y., Zhonghong L. Fabrication and microstructure of ZrO₂/NiCrCoAlY graded coating by plasma spraying. *Surface & Coatings Technology*, 88(1-3):66–69, 1997.
- [Xiong2008] Xiong Y., Smugeresky J.E., Ajdelsztajn L., Schoenung J.M. Fabrication of WC-Co cermets by laser engineered net shaping. *Materials Science and Engineering : A*, 493(1-2):261–266, 2008.
- [Xu2005] Xu A., Shaw L.L. Equal distance offset approach to representing and process planning for solid freeform fabrication of functionally graded materials. *Computer-Aided Design*, 37(12):1308–1318, 2005.

- [Yadroitsev2007] Yadroitsev I., Bertrand P., Laget B., Smurov I. Application of laser assisted technologies for fabrication of functionally graded coatings and objects for the international thermonuclear experimental reactor components. *Journal of Nuclear Materials*, 362(2-3): 189–196, 2007.
- [Yakovlev2005] Yakovlev A., Trunova E., Grevey D., Pilloz M., Smurov I. Laser-assisted direct manufacturing of functionally graded 3D objects. *Surface & Coatings Technology*, 190(1): 15–24, 2005.
- [Yan2009] Yan Y., Li S., Zhang R., Lin F., Wu R., Lu Q., Xiong Z., Wang X. Rapid prototyping and manufacturing technology : principle, representative technics, applications, and development trends. *Tsinghua Science & Technology*, 14(S1):1–12, 2009.
- [Yang2001] Yang L.X., Peng X.F., Wang B.X. Numerical modeling and experimental investigation on the characteristics of molten pool during laser processing. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 44(23):4465–4473, 2001.
- [Yang2007] Yang P., Qian X. A B-spline-based approach to heterogeneous objects design and analysis. *Computer-Aided Design*, 39(2):95–111, 2007.
- [Zhang2009] Zhang F., Chen J., Tan H., Lin X., Huang W. Composition control for laser solid forming from blended elemental powders. *Optics & Laser Technology*, 41(5):601–607, 2009.
- [Zhang2004] Zhang J. Adaptive slicing for a multi-axis laser aided manufacturing process. *Journal of Mechanical Design*, 126(2):254, 2004.
- [Zhang2007] Zhang K., Liu W., Shang X. Research on the processing experiments of laser metal deposition shaping. *Optics & Laser Technology*, 39(3):549–557, 2007.
- [Zhang2001] Zhang Y., Han J., Zhang X., He X., Li Z., Du S. Rapid prototyping and combustion synthesis of TiC/Ni functionally gradient materials. *Materials Science and Engineering : A*, 299(1):218 – 224, 2001.
- [Zhang2010] Zhang Y.Z., Meacock C., Vilar R. Laser powder micro-deposition of compositional gradient Ti-Cr alloy. *Materials & Design*, 31(8):3891–3895, 2010.
- [Zhang2008] Zhang Y., Wei Z., Shi L., Xi M. Characterization of laser powder deposited Ti-TiC composites and functional gradient materials. *Journal of Materials Processing Technology*, 206(1-3):438–444, 2008.
- [Zhou2004a] Zhou M.Y. Adaptive slicing of functionally graded material objects for rapid prototyping. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 24(5-6): 345–352, 2004.
- [Zhou2004b] Zhou M.Y., Xi J.T., Yan J.Q. Modeling and processing of functionally graded materials for rapid prototyping. *Journal of Materials Processing Technology*, 146(3):396–402, 2004.

- [Zhu2004] Zhu Feng, Chen KZ, Feng XA. Converting CAD models into manufacturing models for the components made of a multiphase perfect material. In *Proceedings of the Solid Freeform Fabrication Symposium*, pp. 532–543, Austin, U.S., 2004.

Résumé en français

Les pièces multimatériaux à gradient fonctionnel (Functionally Graded Materials - FGM) sont des structures dont la composition et la microstructure du matériau changent graduellement à l'intérieur de la pièce. Cette distribution des matériaux permet de réaliser des gradients de propriétés au niveau mécanique, physique, chimique, etc. Les domaines d'application sont nombreux pour ces pièces, en particulier l'aérospatial et le biomédical mais également l'électronique, l'énergie nucléaire, la production d'outillage, le design, etc.

L'utilisation des procédés innovants tels que les procédés de fabrication additive est indispensable pour la réalisation de pièces multimatériaux complexes. Bien que ces procédés aient les caractéristiques attendues pour la réalisation de pièces multimatériaux, on constate qu'aucune pièce fonctionnelle n'a encore été fabriquée à ce jour.

Pour permettre la fabrication de pièces fonctionnelles, il est indispensable de proposer une méthodologie de fabrication complète permettant de passer de l'objet imaginé par le concepteur à la fabrication. Cette méthodologie doit comporter les étapes suivantes : description de la pièce à fabriquer, détermination d'une stratégie de fabrication adaptée et génération des instructions de fabrication. Parmi les étapes du processus de fabrication, celle de choix d'une stratégie de fabrication occupe une place importante. En effet, les caractéristiques de pièces – géométrie et répartition des matériaux – sont fortement dépendantes de la stratégie de fabrication choisie.

Les travaux de thèse portent principalement sur les méthodes mises en place pour la détermination de trajectoires appropriées à la fabrication des pièces multimatériaux. Ces méthodes reposent sur la modélisation du procédé nécessaire à l'évaluation des stratégies et une optimisation du procédé permettant de diminuer les différences entre la répartition des matériaux souhaitée et celle fabriquée. Une des méthodes proposées permet d'obtenir automatiquement des trajectoires parfaitement adaptées aux pièces multimatériaux et repose sur la modélisation et l'optimisation du procédé. Ces travaux sont intégrés dans une méthodologie de fabrication de pièces multimatériaux. De plus, une maquette informatique a été développée pour mettre en avant les possibilités d'utilisation de cette méthodologie.

Mots-clés : pièces multimatériaux (FGM), fabrication additive, modélisation et optimisation de procédé, trajectoires.

Titre et résumé en anglais

Additive Manufacturing of Functionally Graded Materials (FGM) parts

Functionally Graded Materials (FGM) parts are heterogeneous objects with material composition and microstructure that change gradually into the parts. The distinctive feature of FGM structure gives the possibility of selecting the distribution of properties – mechanical, physical, chemical, etc. - to achieve the desired functions. It is the reason why aeronautical and biomedical industries are particularly concerned by developments of these materials.

Innovative processes like additive manufacturing processes are indispensable to manufacture complex FGM parts. Nowadays, with these processes, customized homogeneous parts are manufactured from digital data. Although these processes seem adapted to produce these parts, the manufacturing of heterogeneous parts is limited to samples: parts are not functional, with simple morphology and simple material distribution.

To move from these samples to functional parts a methodology with a global approach is necessary. This methodology must enable to move from the concept imagined by a designer to the manufacturing of the part. The following steps must be included in the methodology: description of the part, determination of an appropriate manufacturing strategy and generation of process instructions. The step of determination of an appropriate manufacturing strategy is decisive to ensure the fabrication of a part in compliance with the desired geometry and the desired material distribution.

Thesis work concern the methods defined to determine appropriate tool paths for additive manufacturing of FGM parts. These methods are based on a process modelling necessary for the evaluation of manufacturing strategies and a process control to reduce the difference between the desired material distribution and the material distribution in the manufactured part. One of the proposed methods enables to generate new kind of path strategy. With this method, tool paths will be automatically generated taking into account the process modelling. This work is integrated into methodology for manufacturing FGM parts. Moreover, a procedure has been developed to highlight the potential use of this methodology.

Keywords: Functionally Graded Materials (FGM) parts, additive manufacturing, process modelling, process optimisation, tool paths.

Discipline : Sciences de l'Ingénieur