

Méthodologie de prise en compte des incertitudes et des interactions des caractéristiques produit/procédé. Application aux procédés de fabrication additive

Inssaf Bahnini

► To cite this version:

Inssaf Bahnini. Méthodologie de prise en compte des incertitudes et des interactions des caractéristiques produit/procédé. Application aux procédés de fabrication additive. Génie mécanique [physics.class-ph]. Université Abdelmalek Essaadi (Tanger, Maroc), 2021. Français. NNT: . tel-03272464

HAL Id: tel-03272464 https://hal.science/tel-03272464

Submitted on 28 Jun 2021

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.



UNIVERSITE ABDELMALEK ESSAADI FACULTE DES SCIENCES et TECHNIQUES TANGER

Centre d'Etudes Doctorales : « Sciences et Techniques de l'Ingénieur » Formation Doctorale : « Sciences et Techniques de l'Ingénieur »

THESE DE DOCTORAT

Présentée

Pour l'obtention du

DOCTORAT EN SCIENCES ET TECHNIQUES DE L'INGENIEUR

Par : Inssaf BAHNINI

Discipline : Génie mécanique

Spécialité : Fabrication additive

Titre de la Thèse : Méthodologie de prise en compte des incertitudes et des interactions des caractéristiques produit/procédé. Application aux procédés de fabrication additive.

Soutenue le 21/01/2021 devant le Jury

Président : Pr. Mohamed BAKKALI (FST Al Hoceima) Rapporteurs : Pr. Khalifa ELMANSOURI (ENSET Mohammedia) Pr. Mohamed RADOUANI (ENSAM Meknès) Pr. Hamid AZZOUZI (FST Tanger) Examinateurs : Pr. Mickaël RIVETTE (Arts et Métiers, Metz-France) Pr. Ali SIADAT (Arts et Métiers, Metz-France) Pr. Ahmed NAJI (FST Tanger) Directeur de thèse : Pr. Ahmed RECHIA (FST Tanger)

"Il m'est venu à l'esprit que nulle personne n'ai écrit un livre un jour sans s'être dit le lendemain qu'il aurait été bien mieux ou bien plus beau d'y changer, d'y ajouter, d'y avancer ou d'en éliminer telle ou telle chose ; ceci étant d'une grande moralité et une preuve de l'emprise de l'imperfection sur la race humaine,,

Al-qadi Al-fadil Al-bisani (1135-1200)

A l'âme de mon père, et quelle fierté que vous soyez mon père, A ma chère mère qui n'a pour moi de semblable sur cette terre, A mon frère et mes sœurs, mon appui et mon soutien,

Voici le fruit de mes années de labeur, qui ne vous rembourseront aucunement ni vous enrichiront, mais je me contente du fait que vos cœurs et vos âmes m'acceptent et me chérissent malgré que je vous déçoive parfois.

Remerciements

Ce travail de thèse a été réalisé dans le cadre d'une codirection entre l'Université Abdelmalek Essaâdi – Faculté des Sciences et Techniques de Tanger (Maroc), et l'Ecole Arts et Métiers, Campus de Metz (France).

Dans un premier lieu, je tiens à remercier très vivement mes codirecteurs de thèse, Monsieur Ahmed Rechia, Professeur à la FST de Tanger et Monsieur Ali Siadat, Professeur associé à Arts et Métiers de Metz, ainsi que mon co-encadrant Monsieur Mickael Rivette, Maître de conférences à Arts et Métiers de Metz, pour la confiance qu'ils m'ont accordé en acceptant de me confier ce sujet de thèse et qui m'ont permis de mener à bien ce travail de recherche. Je ne manque pas aussi de remercier très chaleureusement M. Siadat et M. Rivette, pour m'avoir accueilli au sein du Laboratoire de Conception Fabrication Commande (LCFC), et de m'accorder et faciliter tous les moyens pour réaliser mes expériences nécessaires afin de finaliser et valider mes travaux de recherche. Je les remercie également pour les directives et les conseils qu'ils ne cessaient de me prodiguer tout au long de la réalisation de ce travail.

Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux membres du jury, tout particulièrement M. Mohamed Bakkali, Professeur à la FST Al Hoceima, pour m'avoir fait l'honneur d'assurer la présidence, M. Khalifa Elmansouri, Professeur à l'ENSET Mohammedia, M. Hamid Azzouzi, Professeur à la FST Tanger, et M. Mohamed Radouani, Professeur à l'ENSAM de Meknès, pour avoir accepté de rapporter ce mémoire, et M. Naji, Professeur à la FST Tanger, d'avoir accepté de se joindre à ce jury comme examinateur.

Mes sincères remerciements s'adressent également à Monsieur Nicolas Bonnet, Professeur agrégé à l'ENSAM, pour donner de son temps et de son effort, et pour son aide précieuse dans la réalisation des expérimentations nécessaires pour l'achèvement des objectifs soulignés de cette thèse.

J'exprime ma profonde gratitude à Monsieur Patrick MARTIN, Professeur émérite à l'ENSAM de Metz, pour les discussions enrichissantes que nous avons menés et le temps qu'il a consacré pour m'écouter et me proposer des voies d'amélioration de mon travail de recherche. Je n'oublierai pas de remercier vivement mon collègue durant mon stage de recherche à l'ENSAM, Dr. Uzair Khaleeq Uz Zaman, Professeur assistant à l'Université Nationale des Sciences et de la Technologie d'Islamabad à Pakistan. La coopération et le travail collectif avec lui étaient d'une grande valeur ajoutée ; les articles rédigés en commun en sont le témoin.

Je tiens à remercier très chaleureusement mes encadrants durant mon stage de recherche à l'Université de Pitești en Roumanie, Messieurs Daniel-Constantin Anghel, Ingénieur et Maître de conférences à la Faculté de Mécanique et de Technologie de Pitești, et Alin Rizea, le Recteur de la dite faculté. Les trois mois que j'y ai passé étaient une occasion en or pour découvrir une nouvelle culture et travailler avec des chercheurs partageant les mêmes questions de recherche. Je leur suis reconnaissante car ils m'ont ouverts les portes de leur faculté avec chaleur et humilité, et les échanges formels tant qu'informels furent d'une grande richesse humaine et professionnelle grâce à eux.

Je présente finalement mes remerciements les plus sincères, mon respect, et ma gratitude à Monsieur Mohamed Bakkali, Professeur à la FST Al Hoceima et ancien directeur du Centre d'Études Doctorales « Sciences et Techniques de l'Ingénieur » pour son écoute, son amabilité, et son sens de responsabilité que tout doctorant de la FST de Tanger connaît et en témoigne. Je n'oublierais jamais son aide précieux.

Résumé

Cette thèse a pour objectif l'élaboration et la mise en œuvre d'une nouvelle méthodologie de conception bidirectionnelle destinée à la Fabrication Additive (FA) prenant en compte les interactions des caractéristiques produit/procédé le plus tôt possible lors de la phase de conception. L'achèvement de tel objectif nécessite de passer à travers une méthodologie de conception spécifique à des procédés de fabrication tenant compte des tolérancements et veillant à trouver un compromis entre les caractéristiques du produit à concevoir, les paramètres du procédé, et de la machine à choisir pour la fabrication.

A cette finalité, nous avons proposé une méthodologie permettant de répondre à ces problématiques tout en guidant le concepteur dans son travail, et en validant, étape par étape, les choix pris par ce dernier face aux contraintes imposées par le fabricant. Le point de départ est les exigences du cahier des charges (CDC) sur la base desquelles le choix du matériau et du procédé ainsi que la génération de la géométrie initiale sont faits. L'étape qui suit consiste à définir les paramètres de fabrication optimale, puis, grâce aux modèles mathématiques que nous avons proposés pour la modélisation de la déviation dans les pièces cylindriques et prismatiques, et à travers des tests sur des pièces de géométries bien choisies selon le cas, on pourra évaluer la déviation survenue et la compenser, pour pouvoir arriver aux tolérancements requis.

Deux cas d'études sont inclus dans ce travail ; le premier consiste en l'application d'une méthode de multi-optimisation pour pouvoir choisir les paramètres de fabrication optimale pour une application donnée, et la deuxième a pour but la validation des modèles mathématiques proposés pour les formes géométriques considérées.

La méthodologie proposée a le majeur avantage d'être bidirectionnelle, dans une démarche d'intégration conception-fabrication. Ceci permet de concevoir un produit en prenant en compte les contraintes imposées par la fabrication, et de valider les choix du procédé et de la machine face aux exigences du CDC. Autre avantage très important est l'évaluation de la déviation pour la compenser afin de pouvoir réaliser les tolérances requises, ce qui constitue un grand pas concret dans la voie d'intégration des tolérancements au plus tôt dans le processus de conception pour la FA.

<u>Mots-clés</u> : méthodologie de conception, fabrication additive, tolérances, modèle mathématique.

Abstract

This thesis aims to the development and implementation of a bidirectional design methodology for Additive Manufacturing (AM) taking into account tolerances and the interactions of the product/process characteristics early in the design process. The achievement of this objective requires a specific design methodology for these processes that takes into account the tolerances and ensures a compromise between the characteristics of the product to be designed and the chosen parameters of the manufacturing process and the machine.

To this end, we have proposed a methodology that permits to address these issues while guiding the designer in his work, and validating, step by step, the choices made by the latter against the constraints imposed by the manufacturer.

The starting point is the set of specifications on the basis of which a choice of the material and the process as well as the generation of the initial geometry is made. The next step is to define the optimal manufacturing parameters. Thanks to the mathematical models we have proposed for the modeling of the deviation in cylindrical and prismatic parts, and through tests on parts of well-chosen geometries, according to the case, the occurred deviation could be evaluated and compensated, in order to realize the required tolerances.

Two cases studies are included in this work; the first consists of a multioptimization approach that has as a purpose to choose the optimal manufacturing parameters for a given application, and the second aims to validate the mathematical models proposed for the cylindrical and prismatic shapes.

The proposed methodology has the major advantage of being bidirectional, in an integrated design-manufacturing approach. This makes it possible to design a product taking into account the manufacturing constraints, and to validate the choices of the process and the machine in light of the specifications required. Another very important advantage is the evaluation of the deviation in order to compensate it and achieve the required tolerances, which constitute a big concrete step in the way of integrating tolerances early in the design process for AM technology.

Keywords: design methodology, additive manufacturing, tolerances, mathematical model.

Glossaire

Ab nihilo: Expression latine signifiant «à partir de rien» ;

ABS: Acrylonitrile Butadiène Styrène, polymère thermoplastique ;

CAO: Conception Assistée par Ordinateur ;

CDC : Cahier des charges ;

CNC: Computer Numerical Control, francisé en «commande numérique par calculateur» ;

CLAD : Construction Laser Additive Directe, procédé de FA ;

DFA : (Design For Assembly), conception pour l'assemblage ;

DfAM: (Design for Additive Manufacturing), conception pour la FA ;

DFC: (Design For Cost), conception pour le coût ;

DFE: (Design For Environment), conception pour l'environnement ;

DFM: (Design For Manufacturing), conception pour la fabrication ;

DFQ: (Design For Quality), conception pour la qualité ;

DFR: (Design For Reliability), conception pour la fiabilité ;

DFX : (Design For X), conception pour l'X, méthodologie de conception visant l'amélioration du processus de conception tenant compte du point de vue particulier X.

DMD : Direct Metal Deposition, procédé de FA;

EBM : Electron Beam Melting, procédé de FA ;

FA: Fabrication Additive ;

FAO: Fabrication Assistée par Ordinateur ;

FDM: Fused Deposition Modelling, procédé de FA ;

GRA: Grey Relational Analysis, méthode de multi-optimisation ;

LENS: Laser engineered net shaping, procédé de FA ;

PLA: (Polylactic acide), polymère thermoplastique ;

PLM: Product Lifecycle Management, la gestion du cycle de vie des produits ;

Rapport S/N : (Signal to Noise Ratio) ; rapport signal sur bruit ;

SGDT: Systèmes de Gestion des Données Techniques ;

STL: Standard Tessellation Language, format d'échange standard utilisée dans la FA ;

ULTRAT: Polymère spécifique développé par la société Zortrax ;

Sommaire

Remerci	ements	5
Résumé		7
Abstract		8
Glossair	e	9
Sommai	re	11
Liste de	s figures	13
Liste de	s tableaux	16
Introduc	tion	17
Chapitre	I : Etat de l'art	25
Partie	1 : les procédés de la fabrication additive	26
1.	Classification des procédés de la FA	26
2.	Matériaux de la FA	28
3.	Spécificités de la FA :	29
4.	La chaîne numérique dans la fabrication	32
5.	Identification et modélisation de la déviation dans la FA	35
Partie	2 : Méthodologies de conception et reconception	42
1.	L'historique du processus de conception	42
2.	Notions de DFX et DFM	44
3.	La conception pour la fabrication additive : DfAM	46
4.	Cadre méthodologique adopté	52
Concl	usion :	53
Chapitre	e II : Méthodologie de prise en compte des incertitudes et des interactions produit/pro	cédé
Doutio	1 · Cabáma gánáral de la máthadalagia	33 56
Partie	2 : Explications des sections de la méthodologie	30 57
raitie	2. Explications des sections de la methodologie	57
1. 2	Section 1 : Choix du couple materiau/machine et generation de la geometrie	57
2. 2	Section 2 : Optimisation des parametres de l'abrication	05
J. Dortio	2 Conitalization des compaisances	08
Partie	Je erfetion du codre de référence	14 75
1.	La creation du cadre de reference.	/5
2.	Reperage des points d'inflexions	15
3.	Extraction et classification des savoir-faire	/6

4.	Modélisation	76
Conclu	usion	76
Chapitre	III : Cas d'études et validation de la méthodologie	78
Partie	1 : 1 ^{er} cas d'étude : définition du couple matériau / procédé et génération de géométrie	e 78
1.	Définition du couple matériau / machine	79
2.	Génération de la géométrie	79
3.	Choix du couple machine / orientation	87
Partie	2 : 2 ^{ème} cas d'étude : optimisation des caractéristiques de performance	90
1.	Définition de la pièce-test et établissement du plan expérimental	90
2.	Application de la méthode intégrée Grey-Taguchi	94
3.	Discussion	101
Partie	3 : 3 ^{ème} cas d'étude : modélisation de la déviation et compensation de la CAO	103
Part	digitalization with 3D scanner	103
.1	Choix de la géométrie initiale	104
2.	Fabrication de la pièce-test	104
3.	Numérisation et extraction des points des contours	105
4.	Paramétrage des modèles mathématiques	106
5.	Estimation des paramètres des modèles	107
6.	Extraction des taux de compensation	108
7.	Modification de la CAO	109
8.	Vérification des modèles utilisés	110
9.	Discussion	115
Partie	4 : Capitalisation des connaissances développées suite à la méthodologie proposée	116
Conclu	usion	119
Conclusi	on général et perspectives	121
Annexe	A : Mise en plan de la grille de perçage utilisée dans le 1 ^{er} cas d'étude	124
Annexe l	B. Application de la théorie GRA pour les pièces ABS et ULTRAT	125
Référenc	es	132

Liste des figures

Fig. 1. Evolution du paradigme de production

Fig. 2. Application des procédés de fabrication additive (en %)

Fig. 3. Prothèse fabriquée en multi-matériaux (a), et pièce fabriquée en structure « lattice » (b)

Fig. 4. Effet du changement d'orientation sur l'intégration du support : une orientation verticale nécessitera deux supports des deux côtés seulement.

Fig. 5. Cas d'une pièce irréalisable par les procédés conventionnels

Fig. 6. Classification des procédés de la FA

Fig. 7. Matériaux et procédés compatibles.

Fig. 8. (a) CAO de la pièce à fabriquer, (b) Pièce fabriquée avec support par le procédé SLM

Fig. 9. Pièce imprimée avec support en PVC (a), Pièce après enlèvement du support par dissolution dans l'eau (b)

Fig. 10. L'orientation du modèle dans la chambre de construction

Fig. 11. Orientation exigée par l'espace de fabrication limité

Fig. 12. Impact de l'orientation sur l'état de surface : cas d'une orientation unique (a), cas d'une orientation adaptée avec une machine 5 axes (b)

Fig. 13. Les étapes du processus de la FA

Fig. 14. Différentes trajectoires de balayage de la tête d'impression : la pièce à gauche présente moins d'interruptions (points bleus) et des transitions (les traits pointillés) contrairement à la pièce à droite.

Fig. 15. Quelques défauts des fichiers STL: (a) surfaces intérieures chevauchantes, (b) troue dans la surface du modèle

Fig. 16. Tranchage adaptatif

Fig. 17. Problème de confinement des couches

Fig. 18. Effet d'escalier apparu suite à l'effet d'escalier

Fig. 19. (a) Différent styles de remplissage entre l'intérieur et l'extérieur de la pièce, (b) pièce avec des traces visibles du fil déposé

Fig. 20. Délamination dans une pièce fabriquée par l'EBM : le gradient thermique empêche la

liaison des couches déposées

Fig. 21. L'approche "over the wall"

Fig. 22. Processus du design for X

Fig. 23. Répartition des DFAM selon le niveau systémique du produit

Fig. 24. Méthodologie proposée par Rodrigue

Fig. 25. Schéma général de la méthodologie proposée

Fig. 26. Première section de la méthodologie

Fig. 27. Algorithme de génération de la géométrie

- Fig. 28. Effet de l'orientation des couches sur la tenue mécanique
- Fig. 29. Algorithme d'optimisation des paramètres de fabrication

Fig. 30. Algorithme d'extraction des taux de compensation

- Fig. 31. Modélisation de la déviation d'un point P en coordonnées cartésiènnes (a) et en coordonnées polaires (b).
- Fig. 32. Rayons polaires des formes déviées, (a) forme circulaire, (b) forme prismatique
- Fig. 33. Méthodologie de capitalisation

Fig. 34. Grille de perçage

- Fig. 35. La géométrie initiale générée
- Fig. 36. Le facteur de sécurité calculé pour l'analyse statique actuelle
- Fig. 37. Les contraintes de Von Mises
- Fig. 38. Les déplacements internes dans la pièce
- Fig. 39. Régions où la matière sera préservée (en vert) avant l'optimisation topologique
- Fig. 40. Optimisation topologique : pièce optimisée à 40% de masse initiale.
- Fig. 41. Optimisation topologique : pièce optimisée à 42% de masse initiale
- Fig. 42. Les géométries initiale et optimisée superposées (a) ; le solide généré (b)
- Fig. 43. Les contraintes de Von Mises dans le solide optimisé
- Fig. 44. Les déplacements internes dans le solide optimisé
- Fig. 45. Les deux orientations basiques de la pièce, (a) horizontale, (b) verticale
- Fig. 46. Dessin technique de la pièce (a) et désignation des dimensions à mesurées (b)
- Fig. 47. La machine Zortrax / Orientation et positionnement de la pièce sur la plateforme / les densités de remplissage considérées
- Fig. 48. Schéma de base de la méthode GRA
- Fig. 49. Les effets principaux pour le rapport S/N calculés pour les pièces en ABS (en haut) et pour les pièces en ULTRAT (en bas) (Les nombres 1, 2, et 3 représentent les niveaux du paramètre en question)
- Fig. 50. Analyse de Variance (ANOVA) : Contribution de chaque paramètre
- Fig. 51. Schéma général de la méthode d'extraction des taux de compensation
- Fig. 52. Dessin de définition de la pièce considérée
- Fig. 53. Fichier STL de la pièce numérisée, (a) défaut d'impression sur la surface latérale du petit cylindre, (b) côtés arrondis du carré
- Fig. 54. Les points des contours extraits à une distance de 5 mm du haut de la pièce
- Fig. 55. Les courbes des déviations dans les carrés (depuis le haut : le grand, le moyen, et le petit carré) avant (en bleu) et après (en rouge) l'application de la compensation
- Fig. 56. La courbes de déviation dans le grand cylindre, avant (en bleu) et après (en rouge) l'application de la compensation
- Fig. 57. La courbes de déviation dans le moyen cylindre, avant (en bleu) et après (en rouge) l'application de la compensation

Fig. 58. La courbes de déviation dans le petit cylindre, avant (en bleu) et après (en rouge)

l'application de la compensation

Fig. 59. Capitalisation des connaissances de notre méthodologie de conception

Liste des tableaux

Tableau 1: Caractéristiques des procédés de la FA
Tableau 2. Des travaux de modélisation de la déviation dans les procédés de la FA
Tableau 3. Matrice orthogonale L9
Tableau 4. Liste des machines de FA métalliques utilisant l'alliage d'aluminium
Tableau 5. Les facteurs contrôlables et leurs niveaux
Tableau 6. Valeurs des facteurs fixes
Tableau 7. Plan expérimental réalisé avec la matrice orthogonale L9
Tableau 8. Valeurs des ratios S/N calculées pour les grades GRG des pièces en ABS et enULTRAT
Tableau 9. Les valeurs prédites VS les valeurs du test de confirmation
Tableau 10. Les paramètres de fabrication et leurs valeurs
Tableau 11: paramètres estimés pour les 3 cylindres
Tableau 12: paramètres estimés pour les 3 carrés

Introduction

Le monde industriel a connu une progression énorme, de la production artisanale (craft production) basée sur une main-d'œuvre qualifiée, à la production de masse (mass production) basée sur la réalisation d'une gamme limitée de produits, fabriqués à volume élevé, par des moyens de production dédiés [1]. L'apparition des « imprimantes 3D » à des tarifs inférieurs au millier d'euros ainsi que la multiplication du nombre des fablab ; lieux ouverts à tous généralement dotés de moyens de fabrication conventionnels et additifs, a conduit certains chercheurs à théoriser la troisième révolution industrielle : la personnalisation de masse (Fig. 1). Celle-ci, par opposition à la production de masse de produits standardisés, consiste à produire massivement des produits personnalisés [2].

La fabrication additive (FA), connue également sous le nom de « l'impression 3D » est une famille de procédés de fabrication qui se base sur le principe de fabrication des pièces tridimensionnelles par l'addition de matière couche par couche, à partir d'un modèle CAO. Premièrement consacrée à la réalisation des pièces de démonstration et des prototypes, elle est aujourd'hui destinée à la fabrication des pièces fonctionnelles. On a donc passé du « prototypage rapide » à la « fabrication rapide » ou à la « fabrication directe ». Depuis sa première apparition à la fin des années 80 avec le procédé de la stéréolithographie (SLA) [3] agissant sur les polymères, cette technologie a attiré l'attention des chercheurs dans de nombreux domaines, ce qui a permis non seulement l'élargissement de la portée des matériaux supportés (polymères, métaux, céramiques, etc.), mais également la diversité des techniques utilisées ainsi que leurs domaines d'application (Fig. 2), que ça soit domestique ou industriel. Ne nécessitant pas d'outillage dédié, l'obtention des pièces en très petites séries, par ajout de matière, permet une fabrication rapide avec un coût relativement faible [1].



Figure 1. Evolution du paradigme de production [93]



Figure 2. Application des procédés de fabrication additive (en %) [1]

Le marché de la FA est aujourd'hui en pleine croissance et génère un chiffre d'affaires de plus d'un milliard de dollars pour les fabricants de machines et les sociétés de services en fabrication additive [2]. L'utilisation de ces techniques a touché un large spectre de secteurs industriels tels que l'automobile, le domaine médical, l'aéronautique, etc. (Fig. 2). Cette évolution est due aux différentes opportunités qu'offre la FA par rapport aux autres techniques de fabrication. D'abord, le principe de cette technologie est innovant et en rupture avec les procédés de fabrication conventionnels d'enlèvement de matière et de déformation plastique qui partent d'un brut ou d'un volume de matière fini, et s'éloigne également des procédés de fusion nécessitant un outil de fabrication avec une forme et un volume de départ prédéfinis [4]. La non-nécessité d'un volume de départ offre un grand avantage à cette technologie, car elle permet par le principe d'addition des couches de matière de fabriquer presque tout type de géométrie et de formes externes et internes complexes, irréalisables avec les techniques de fabrication traditionnelles, comme les pièces alvéolaires ou en «lattices» [5], [6], (Fig. 3a), les pièces en multimatériaux (avec les machines équipées de plus d'une buse pour les procédés de déposition) (Fig. 3b) ainsi que les pièces en FGM (matériaux à gradient fonctionnels), et les assemblage indémontables (i.e. pièces assemblées dès la fabrication, présentant des mobilités internes). Il n'y a donc pas de limite, théoriquement, aux formes fabricables. Cependant, les dimensions de l'espace de fabrication des machines imposent des tailles limites aux pièces.



Figure 3. Prothèse fabriquée en multi-matériaux (a), et pièce fabriquée en structure « lattice » (b)

De plus, la fabrication des volumes ab nihilo (i.e. sans commencer par un brut) permet, dans le principe, de n'utiliser que la quantité de matière nécessaire à la construction de la pièce voulue. La masse du matériau utilisé ainsi que, dans certains cas, l'énergie nécessaire à sa mise en forme sont ainsi minimisées [7]. Aussi, certains procédés acceptent des matériaux recyclés, comme l'ABS, qui peut être mis en forme par la FDM [4].

Cette technique de fabrication nécessite, dans la plupart des cas, l'intégration d'un support selon la forme de la pièce et son orientation dans la chambre de construction (Fig.4) [8], pour soutenir la pièce et éviter sa déformation lors de la fabrication. L'orientation de la pièce dans la chambre de construction est un paramètre très important qui influe directement sur la qualité des pièces fabriquées, plus particulièrement en termes de propriétés mécaniques. Le type du support ainsi que la méthode de son enlèvement une fois le stage de la fabrication est terminé diffère d'un procédé à l'autre.

Le temps de fabrication pour la FA, qui est très significatif par rapport aux procédés conventionnels, reste un majeur inconvénient, ce qui rend la FA parfaitement convenable à la fabrication des pièces unitaires ou de très petites séries puisqu'elle ne nécessite pas d'outillages dédiés onéreux. De plus, la FA est parfaitement adaptée au contexte de



Figure 4. Effet du changement d'orientation sur l'intégration du support : une orientation verticale nécessitera deux supports des deux côtés seulement.

personnalisation de masse [9].

Malgré les avantages de la FA que nous venons de citer, et en comparaison avec les procédés de fabrication classiques (l'enlèvement de matière, la déformation plastique, et la fusion), l'utilisation de la FA est encore limitée. Les points suivants décrivent les problèmes qui constituent des freins à l'essor industriel de cette technologie :

- Le coût de fabrication relativement élevé couplé à un temps de fabrication important par rapport aux procédés classiques. De plus, la préparation de la maquette numérique et sa modification (si nécessaire) et les opérations supplémentaires du post-traitement causent également une augmentation du délai de la mise en œuvre.
- L'utilisation du processus de conception traditionnel : comme nous avons mentionné auparavant, le principe de la FA est innovant et en rupture avec le principe des procédés conventionnels. Par la suite, l'utilisation du processus de conception traditionnel pour la FA empêche les concepteurs de développer des solutions innovantes qui la valorisent et qui permettent de profiter le maximum possible des avantages qu'elle offre. À l'exception de quelques lignes directrices et des méthodologies développées pour des cas isolés, ainsi que les règles de conception établies par chaque constructeur conformément à leurs systèmes de fabrication, il n'y a pas encore de méthodologies générales aidant les concepteurs à exploiter les opportunités de la FA.
- Le manque des normes définissant les tolérancements et les spécifications géométriques associées aux procédés de FA: malgré l'existence de plusieurs normes relatives à la FA, comme ISO/ASTM 52900:2015 définissant la terminologie de FA, ISO 17296-2: 2015 présentant les catégories des procédés et la matière première utilisée, ainsi que la norme ISO/ASTM 52910:2018 mettant en évidence les exigences, les lignes directrices, et les recommandations pour la conception pour la FA, il existe un manque de normes définissant les tolérances et les spécifications géométriques associées à ces procédés.
- Les grands écarts entre les spécifications du CDC et les spécifications des pièces fabriquées due à la non prise en compte, lors du processus de conception, des phénomènes physiques mises en jeu au cours de la fabrication (i.e. la température du procédé, le rétrécissement, les contraintes résiduelles, la délamination, la porosité/densité des pièces fabriquées, l'atmosphère de la chambre de construction, etc.) et leurs impacts sur la qualité de la pièce obtenue, ce qui implique l'impossibilité de prévoir en amont la qualité des pièces fabriquées.

Ces avantages/inconvénients que présente la FA doivent être pris en compte lors de la conception des pièces dédiées à la fabrication par ses procédés, ce qui a ressorti la nécessité de développer une nouvelle méthodologie de conception adéquate à la FA.

En effet, le paradigme de conception actuel est à réviser, à cause des différences considérables entre le principe de la FA et celui des procédés conventionnels. Premièrement, les matériaux utilisés pour les procédés conventionnels sont connus et réputés, homogènes, linéaires et isotropes, et leur choix ne dépend pas du choix de la machine. Ceci est totalement différent pour la FA, où la fabrication couche par couche conduit à des pièces non-homogènes avec une structure anisotrope poreuse. Le volume de construction limité des machines impose parfois une certaine orientation pour pouvoir contenir la totalité de la pièce demandée, ce qui influence plusieurs aspects notamment les propriétés mécaniques. De plus, le choix du matériau dépend du procédé à utiliser puisqu'une machine de FA ne fonctionne qu'avec une gamme restreinte de matériaux.

Deuxièmement, pour les procédés conventionnels, le concepteur prend en compte généralement les contraintes imposées par les procédés de fabrication et/ou d'assemblage qu'il a à sa disposition (et dans lesquels il possède de l'expertise), en suivant une démarche DFA ou DFM (conception pour l'assemblage / conception pour la fabrication), ainsi que - bien évidement - les contraintes imposées par le CDC. La géométrie des pièces est donc liée à ces procédés. Cependant, pour la FA, nous avons mentionné auparavant que la FA ne part pas d'un volume défini, et permet de nouvelles pistes de réflexions en termes de fabrication, d'assemblage, et de géométries réalisables (Fig.5). De plus, elle impose également de nouvelles contraintes liées à la notion du support [4], et pousse également à penser aux procédés du post-traitement.

Troisièmement, et ce qui nous importe le plus, c'est la prise en compte, lors de la phase de conception, des tolérancements et des spécifications géométriques exigées par le CDC ainsi que les contraintes imposées par la machine de fabrication à utiliser et la maîtrise des interactions produit/procédé. En effet, il va sans dire qu'un produit est conçu



Figure 5. Cas d'une pièce irréalisable par les procédés conventionnels.

suite à un besoin exprimé par le client et doit satisfaire donc aux exigences du CDC fonctionnelles, en termes des caractéristiques et des propriétés définies. Or nous savons clairement que les pièces fabriquées s'éloignent toujours de ces spécifications, ce qui oblige les concepteurs à définir des spécifications géométriques qui précisent quels sont les défauts acceptables de la pièce pour permettre la fabrication d'un produit conforme aux exigences prédéfinies. En outre, les propriétés des pièces issues de la FA, contrairement aux procédés conventionnels, dépendent également des paramètres de la machine utilisée, ce qui exige de faire ce choix lors de la conception. Dans le cas contraire, on peut se retrouver avec le cas où la conception est faite en choisissant une machine qui n'est pas disponible, ou qui est incompatible avec les spécifications renseignées (en termes de volume de construction, de précision, etc.), faute de n'avoir pas pris en compte ces paramètres lors de la phase de conception.

Pour cet objectif, une méthodologie de conception précisant bien les tâches à exécuter et guidant le concepteur tout au long de son travail se juge nécessaire. En fait, le processus de conception pour les procédés conventionnels est bien établi. Cependant, comme mentionné auparavant dans ce rapport, ce processus présente des lacunes lors de son application pour les procédés de la FA, ce qui ressortit la nécessité de développer des méthodologies de conception orientées FA. Dans la pratique, chaque constructeur développe ses propres lignes directrices de conception relatives à leurs machines et guide le concepteur dans son choix des différents paramètres de fabrication. Dans la littérature, il existe des méthodologies de conception orientées FA (à titre d'exemple [1], [2], [10], [11], [12]) qui sont appliquées seulement pour des cas isolés, ainsi que quelques-unes qui permettent une prise en compte partielle et cloisonnée des connaissances du procédé de fabrication (nous reviendrons à ces méthodologies et nous présenterons une revue de littérature détaillée dans le 2^{ème} chapitre de ce rapport).

Ainsi, le travail que nous allons présenter dans ce mémoire de thèse organisé autour de 6 chapitres dont le premier est l'introduction, va servir à présenter des réponses pour les problématiques citées.

Le deuxième chapitre comportant deux parties, va être consacré à présenter de manière synthétique l'état de l'art sur les procédés de la FA, leurs spécifiés, ainsi que les problématiques relatives à l'évaluation de la déviation dans les pièces fabriquées par ces procédés. Une revue de littérature détaillée sur les méthodologies de conception pour la FA sera également présentée pour pouvoir se positionner par rapport aux méthodologies

existantes. Le cadre méthodologique dans lequel s'inscrira la méthodologie proposée sera également présenté dans ce chapitre.

Le troisième chapitre qui représente le corps de notre thèse sert à présenter et détailler les étapes de notre méthodologie proposée. L'avantage de cette méthodologie est qu'elle est bidirectionnelle, s'inscrivant dans une démarche d'intégration conceptionfabrication. La méthodologie composée de 3 grandes étapes nommées des sections, permet à travers ces dernières de guider le concepteur dans les décisions prises, et sert à évaluer, et à compenser par la suite, les déviations survenues dans les pièces fabriquées. La première section sert à extraire les données du CDC permettant de générer la géométrie visée et choisir proprement le matériau et la machine adéquate à la fabrication. La deuxième section s'adressera aux paramètres de fabrication et tentera, à travers des méthodes statistiques de multi-optimisation, de trouver la combinaison optimale de celles-ci, permettant de minimiser la déviation dimensionnelle. À l'issue de cette section, on se retrouve avec un fichier prêt pour l'opération du tranchage. Quant à la troisième section, elle a pour objectif la modélisation de la déviation dimensionnelle survenue grâce à des modèles mathématiques dédiés à chaque forme géométrique considérée. Les taux de compensation seront extraits par la suite, avec lesquels le fichier CAO sera modifié dans le but de minimiser la déviation. Les modifications à apporter doivent être validées face aux exigences du CDC, conformément à la démarche d'«intégration conception-fabrication». A l'issue de la méthodologie on se retrouve avec un fichier FAO de la pièce prêt à la fabrication. La sauvegarde des savoirs et des savoir-faire acquis lors de la pratique de cette méthodologie est d'une importance primordiale puisqu'elle s'inscrit dans une démarche de capitalisation des connaissances préludant la diffusion et le partage de la méthodologie avec d'autres concepteurs et fabricants. Une méthode de capitalisation des connaissances et des pratiques relatives à notre méthodologie de conception sera donc présentée à la fin de ce chapitre.

Le quatrième chapitre sera consacré à la présentation de trois cas d'études servant à valider, section par section, la méthodologie proposée. Le premier cas concerne une pièce industrielle à reconcevoir pour pouvoir la fabriquer par un procédé de FA. En suivant la première section de notre méthodologie proposée, la géométrie de la pièce en question sera générée sur la base des exigences du CDC, avant de choisir le matériau et la machine de fabrication à utiliser. À cette étape, on profitera bien des possibilités offertes par la FA surtout en termes de complexité géométrique. Quant au deuxième cas d'étude, il aura pour objectif l'application de la méthode de multi-optimisation Grey Relational Analysis (GRA)

pour déterminer les paramètres de fabrication optimaux permettant de minimiser la déviation sur toutes les dimensions de la pièce-test considérée. L'Analyse de Variance (ANOVA) et le rapport signal/bruit (S/N ratio) seront également appliqués pour confirmer les résultats du GRA, et trouver les paramètres les plus/moins influençant sur la déviation. L'étude vise également à comparer les performances de deux matériaux polymères en termes de précision dimensionnelle afin de mettre le point sur l'importance du choix du matériau adéquat pour chaque application donnée. Le troisième cas d'étude s'intéressera aux modèles mathématiques développés pour les géométries circulaires et prismatiques. Le but est de modéliser la déviation et d'extraire les taux de compensation servant à compenser le fichier initial de la CAO et réaliser la pièce finale selon les exigences du CDC en termes du niveau de précision dimensionnelle requis.

Finalement, le cinquième et le dernier chapitre élaborera une synthèse critique de notre travail, dans le but de souligner les apports de la méthodologie proposée face à celles existantes, et voir comment elle a pu répondre aux problématiques soulevées au début de ce manuscrit. Ce chapitre sera également une occasion pour discuter des voies d'amélioration de notre méthodologie ainsi que les voies d'explorations futures, et d'ouvrir la porte à d'autres questions de recherche en relation avec les méthodologies de conception dédiées à la FA.

Chapitre I : Etat de l'art

Dans ce deuxième chapitre comportant deux parties, et grâce à une étude bibliographique, nous formulerons dans un premier temps une définition de la fabrication additive, ses différents procédés ainsi que leurs spécificités. Dans un deuxième temps, nous explorerons les défauts géométriques survenus dans les pièces fabriquées par la FA ainsi que les méthodes d'identification et de modélisation de la déviation. Ensuite, nous nous intéresserons plus particulièrement aux méthodologies de conception et de reconception: DFX, en focalisant sur la notion de la conception pour la fabrication additive (DfAM). Cette dernière notion sera le point de départ de ce travail de thèse.

Partie 1 : les procédés de la fabrication additive

La fabrication additive (FA) correspond à une famille de procédés de fabrication relativement nouvelle. Ils ont commencé à évoluer depuis la fin des années 80 avec l'apparition du premier procédé de FA : la stéréolithographie (1986 -1988) [13]. Plusieurs autres procédés ont été inventés, dont les techniques et les matières sur lesquelles ils agissent sont très différentes, et dont le point commun est la réalisation des pièces tridimensionnelles par l'ajout successif de matière sous forme de couches.

Pour la terminologie, la norme NF ISO / ASTM 52900 Avril 2016 [14] définit la fabrication additive comme étant « un procédé consistant à assembler des matériaux pour fabriquer des pièces à partir des données de modèle en 3D, en général couche après couche, à l'inverse des méthodes de fabrication soustractive et de fabrication de mise en forme ». Plusieurs autres termes sont utilisés pour parler de la FA comme l'impression 3D, la fabrication couche par couche, etc. De plus, la dénomination du procédé change en fonction de l'usage des pièces réalisées. On parle donc de *fabrication rapide* ou *fabrication directe* dans le cas de fabrication des pièces fonctionnelles, d'*outillage rapide* dans le cas de la fabrication d'outils, ou encore du *prototypage rapide* ou d'*impression 3D* lors de la réalisation des pièces de démonstration ou des prototypes. [15].

1. Classification des procédés de la FA

Les procédés de FA peuvent être classifiés selon plusieurs critères : selon le type d'énergie utilisée (laser, rayon UV, faisceau d'électrons, etc.), selon les matériaux supportés, ou selon l'état du matériau avant l'impression. Nous adopterons la classification de Kurth [16] qui a classifié les différents procédés de FA selon ce dernier critère. Il y a donc les procédés à base de liquide, à base de poudre, et à base de solide. Les techniques à base de liquide entraînent la solidification d'une résine liquide en contact avec un laser ou avec des rayons UV, ou la fusion puis la solidification du matériau. Les procédés agissant sur la poudre utilisent une source d'énergie ou bien des agents de liaison pour former des pièces 3D. Pour les procédés à base de solide, ils utilisent des plaques solides qui peuvent être collées avec un laser ou à l'aide d'un adhésif. [16]. Ces procédés à base de solide correspondent davantage à des procédés d'enlèvement de matière et d'assemblage. Ainsi, nous considèrerons uniquement les procédés de FA permettant de réaliser des pièces complexes, éventuellement avec support, par addition de matière sous forme liquide ou de particules [4]. La classification adoptée est schématisée sur la figure 6.



Figure 6. Classification des procédés de la FA

Une comparaison entre les avantages et les inconvénients de chaque procédé est résumée dans le tableau 1.

	Nom du procédé	Technique de fabrication	Caractéristiques			
Procédés à base de liquide	FDM (Fused Deposition Modelling) (1988- 1991) [13] SLA (stéréolithographie) (1986 – 1988) [13]	Extrusion de matière fondue puis solidification Photopolymérisation du résine liquide avec du laser ultraviolet	 + Possibilité de fabrication multi- matériaux, + Usage domestique (low-cost), - Faible précision, - Mauvais état de surface, + Grande vitesse de construction + Bonne résolution + Fabrication des assemblages indémontables - Sur-durcissement - Coût élevé 			
	DLP : digital light processing (1987) [17]	Photopolymérisation du résine liquide avec la lumière projetée par un DMD (Digital Micromirror Device),	 + Durcit une couche entière à la fois + Possibilité du choix de l'intensité de la lumière (mW/cm2) ainsi que le temps d'exposition 			
	Polyjet printing PP (1998)	Solidification de la résine injectée par les rayons UV.	 + Fabrication en multimatériaux / multi-couleurs - Faible tenue mécanique, - Manque d'options matérielles 			
Procédés à base noudre	SLS/ SLM/DLMS EBM	Fusion avec du laser/ faisceau d'électrons sur un lit de poudre	 + Utilisation de larges gammes de matériaux (métaux, céramiques, polymères) - Possibilité d'avoir une structure poreuse 			

Tableau 1: Caractéristiques des procédés de la FA

	Dépôt avec faisceau LENS/DMD	Injection de la poudre dans le laser et déposition de la matière fondue	 Opérations du post-traitement sont nécessaires. + Machines avec des volumes de construction plus grands + Pièces complétement denses ; - Gradient thermique très élevé (mauvaises propriétés mécaniques)
-	Collage de poudre (Binder jetting)	Injection du liant sur un lit de poudre	 + Haute vitesse de construction - Pièces fragiles - Nécessité d'infiltration des pièces

2. Matériaux de la FA

Contrairement aux procédés conventionnels, les matériaux utilisés dans la FA sont généralement limités dus au principe de fabrication mettant en jeu plusieurs phénomènes physiques différents de ceux produits lors de la fabrication par l'usinage CNC ou par un autre procédé conventionnel. Néanmoins, de nouveaux matériaux sont de plus en plus testés en termes de la fabricabilité par les procédés de FA. À titre d'exemple, les alliages de Titane sont très utilisés dans le procédé d'EBM, bien qu'ils ne s'usinent pas facilement [2]. En revanche, l'usinage CNC est utilisé pour façonner les matériaux mous (i.e. les mousses et les cires usinables et certains polymères), mais son utilisation est limitée à la préparation préalable des pièces pour passage à d'autres procédés [18]. La figure 7 montre les types des matériaux fabricables par chaque procédé.

rocédé	Acronymes	Therme	Photot	Metau	ceram	Comp	Bioma	Biomat Multin	
Extrusion	FFF, FDM, BMD	•	•	•	0	•	•	•	
Photopolymerization	SLA, DLP, CLIP		•	• ²	•	•	•		
Selective Laser Sintering	SLS, HSS, MJF	•			•	•			
Selective Laser Melting	SLM, DMLS, EBM			•					
Binder Jetting	BJ, 3DP			•	•		•		
Material Jetting	MJ, Polyjet, Multijet	•	•	•	•		•	•	
Directed Energy Deposition	DED, LENS, EBAM			•	0			•	

0	annonces commerciales préliminaires, mais les machines ne sont pas encore commercialisées.
•	le procédé produit des pièces ayant la densité et les dimensions finales souhaitées.
	Une étape de densification telle que le frittage est nécessaire pour donner à la pièce sa densité et ses dimensions finales.
• •	les machines commercialisées utilisant le procédé indiqué sont capables de traiter le matériau indiqué.

Figure 7. Matériaux et procédés compatibles.

3. Spécificités de la FA :

Nous avons vu dans le paragraphe précédent que la technologie de FA englobe plusieurs procédés qui se diffèrent dans plusieurs aspects : les matériaux utilisés, leurs natures, le type d'énergie utilisé, etc. Ces procédés présentent plusieurs opportunités et avantages par rapport aux autres procédés de fabrication classiques. Ces opportunités peuvent être résumées dans les points suivants [1]:

3.1 La liberté de conception

La FA donne la liberté aux concepteurs dans le choix des formes et des géométries puisqu'elle permet la fabrication des géométries plus complexes, irréalisables par les procédés classiques d'enlèvement de matière ou de mise en forme, comme les structures poreuses et les matériaux cellulaires [6], ainsi que les matériaux à gradient fonctionnels (Functionally Graded Materials) [19].

3.2 L'efficacité environnementale

Les procédés de FA se caractérisent par la fabrication des volumes ab nihilo, c.-à-d. ils ne partent pas d'un brut initial ce qui permet, dans le principe, de n'utiliser que la quantité de matière nécessaire à la construction de la pièce voulue. La masse du matériau utilisé ainsi que, dans certains cas, l'énergie nécessaire à sa mise en forme sont ainsi minimisées [7].

3.3 La flexibilité

La fabrication additive est parfaitement adaptée à la production petite série puisqu'elle ne nécessite pas d'outillages dédiés onéreux. De plus, il y a possibilité de fabriquer plusieurs pièces à la fois selon le type du procédé (les procédés à base de poudre sont de bons exemples).

3.4 Intégration du support

Pour pouvoir fabriquer des géométries complexes telles que les surplombs, les dépouilles, et les assemblages indémontables, les procédés de FA fournissent des moyens pour supporter les couches successivement fabriquées. Pour les procédés à base de poudre, la poudre inutilisable et non agglomérée dans chaque couche devient un support pour la couche suivante. L'excès de poudre est facilement éliminé par un post-traitement avec de l'air comprimé. Cependant, dans les procédés à base de poudre métallique, l'intégration du support est impérative lors la fabrication des pièces lourdes pour pouvoir les supporter et les empêcher de s'effondre (Fig. 8). Dans certains cas, des structures secondaires se jugent



Figure 8. (a) CAO de la pièce à fabriquer, (b) Pièce fabriquée avec support par le procédé SLM

nécessaires pour dissiper la chaleur dans la plateforme de construction et dans la poudre non agglomérée. Sans l'utilisation de support, les pièces métalliques fabriquées se déforment pendant l'impression en raison des contraintes résiduelles créées par le refroidissement rapide après la fusion [12]. L'enlèvement de ces structures métalliques doit être fait mécaniquement [20] par un procédé d'usinage CNC. Dans ce cas, l'orientation de la pièce et la détermination des endroits où l'ajout du support est requis doivent être étudiées minutieusement pour garantir l'accessibilité de l'outil requis pour enlever le support [21].

Pour les procédés de dépôt de matière (i.e. la machine FDM multi-buse ou le Polyjet), un matériau secondaire, sacrificielle (soluble ou pyrolyse) est déposé pour former le support (Fig. 9). La compatibilité du matériau du support avec celui de la pièce est un facteur important à prendre en considération. Pour les machines avec une seule buse, la fabrication des pièces avec support est encore possible en utilisant le même matériau que celui de la pièce, pourtant, son enlèvement manuellement posera des problèmes et influencera la qualité de la pièce imprimée, particulièrement son état de surface. Des opérations de ponçage et de polissage sont ainsi nécessaires pour obtenir un fini de surface de bonne qualité.



Figure 9. Pièce imprimée avec support en PVC (a), Pièce après enlèvement du support par dissolution dans l'eau (b)

3.5 Orientation de la pièce

L'orientation de la pièce dans la chambre de fabrication peut être décrite comme une différence angulaire entre le plan déterminant la direction de la division de l'objet en couches et le plan de base de l'objet fabriqué (Fig. 10). L'orientation peut être définie sans ambiguïté par trois valeurs angulaires. La rotation selon l'axe vertical Z n'a pas d'importance car elle n'influe pas la façon dont l'objet est divisé en couches. [22].

L'orientation des pièces au sein de la chambre de construction influe principalement sur trois aspects : la tenue mécanique, l'état de surface, et la nécessité d'intégration du support. Par la suite, un compromis doit être fait entre ces éléments.

Dû au principe de fabrication couche par couche, les pièces de la FA ont une structure anisotrope, i.e. leurs propriétés mécaniques dépendent de l'orientation au sein de la chambre de fabrication [23], [24],[25]. Cependant, et à cause des dimensions de l'espace



Figure 10. L'orientation du modèle dans la chambre de construction [22]



Figure 11. Orientation exigée par l'espace de fabrication limité



Figure 12. Impact de l'orientation sur l'état de surface : cas d'une orientation unique (a), cas d'une orientation adaptée avec une machine 5 axes (b)

de fabrication limité, une orientation particulière peut être exigée (Fig. 11), ce qui peut influencer l'état de surface, i.e. avoir un effet d'escalier sur une surface fonctionnelle (Fig. 12), ou exiger l'intégration d'un support. Les nouvelles machines 5 axes à base de poudre permettent de palier à ce problème à travers une orientation adaptative aux surfaces fonctionnelles, cependant, la tenue mécanique peut être influée surtout dans le cas des pièces métalliques issues d'une fusion non complète (i.e. les pièces ayant une structure pas totalement dense) [1].

4. La chaîne numérique dans la fabrication

Dans ce qui précède, nous avons effectué un état de l'art sur les différents procédés de FA, leurs spécificités, leurs points communs ainsi que leurs distinctions. Nous avons vu que ces procédés permettent de construire des pièces 3D en différents matériaux (selon les machines), par une méthode de couche par couche à partir d'un modèle numérique. On abordera ce dernier point dans ce qui suit.

4.1 Historique

Autrefois, les machines de fabrication nécessitaient la présence permanente de l'opérateur. Ainsi, toutes les données concernant le projet de fabrication se présentaient sous forme « papiers ». Grâce à l'introduction de la commande numérique en 1952 au MIT en Amérique [26], on est passé à la numérisation des données, ce qui a favorisé l'apparition des outils CAO qui offrent une modélisation 3D performante et précise, et des outils FAO générant les programmes de fabrication permettant le pilotage des machines CNC. La diversité de ces données numériques et leur complexité nécessitent des outils performants de gestion, ce qui a amené à l'apparition de la notion de « chaîne numérique ».

La chaîne numérique, comme définit par [26] est «les différentes étapes qui composent la réalisation d'un projet depuis la conception jusqu'à la fabrication du produit fini, dans un environnement numérique». Cette notion est devenue un enjeu de plus en plus important dans l'industrie manufacturière, et la FA, comme tous les procédés de fabrication, n'échappe pas à ce principe.

4.2 La chaine numérique de FA

Le processus de FA se constitue de plusieurs étapes successives : la création d'un modèle géométrique, le tranchage, la génération de la trajectoire de balayage de la tête d'impression, la fabrication couche par couche, puis finalement les opérations du post-traitement. (Figure 13). On va s'intéresser aux trois premières étapes qui constituent la chaine numérique de la FA.

4.2.1 Création du modèle géométrique

Le moyen le plus courant pour la création des modèles géométriques spécialement dans le secteur industriel est la conception assistée par ordinateur (CAO). Pour la FA, une optimisation topologique peut être envisagée après la création du modèle CAO. Effectuée sur le volume créé préalablement à partir des contraintes d'efforts auxquelles la pièce est soumise, l'application de l'optimisation topologique résulte en des géométries complexes minimisant la quantité de matière à utiliser, ce qui permet de profiter de la liberté de conception et la possibilité de fabrication des géométries complexes qu'offre la FA, et permet également de minimiser le temps de fabrication.

Dans un contexte artistique, autres moyens que la CAO peuvent être utilisés comme le scan 3D et la modélisation libre [4].

4.2.2 Exportation vers STL

Une fois la pièce conçue, elle est exportée au format STL qui est un format d'échange standard pour les logiciels de tranchage. Le terme STL a été dérivé de la stéréolithographie, la première technique de FA qui a été inventée et commercialisée à la



Figure 13. Les étapes du processus de la FA

fin des années 80. Le STL est un moyen simple pour décrire un modèle CAO en termes de sa géométrie seule. Il supprime par la suite toutes les données de la construction, l'historique de modélisation, etc., tout en rapprochant les surfaces du modèle avec une série de mailles triangulaires en conservant la normale extérieure. La taille minimale de ces triangles peut être réglée dans la plupart des logiciels de CAO. Le processus de conversion au format STL est automatique, mais il est probable (dans quelques cas) que certaines erreurs se produisent au cours de cette phase. Des outils développés sont au service du concepteur pour détecter ces erreurs et les corriger (par ex. Meshmixer).

Plusieurs alternatives ont été proposées pour le STL [27]. Cependant, il est encore utilisé grâce aux avantages qu'il présente comme la facilité de la mise en œuvre de l'algorithme du tranchage ainsi que la facilité d'intégration du support [28].

4.2.3 Le tranchage

Le fichier STL subit ensuite l'opération du tranchage, où un ensemble de lignes horizontales sont entrecoupées avec le modèle CAO. L'espace entre deux plans horizontaux successifs correspond à l'épaisseur de couche qui va être fabriquée par un procédé de FA. À cette étape même, on définit quelques autres paramètres comme le style du remplissage, la densité, le stock de matière première à utiliser, etc.

4.2.4 La génération de la trajectoire de balayage

Une fois l'opération du tranchage effectuée, un dernier fichier au format compatible avec la machine de FA définissant la trajectoire de balayage de la tête d'impression (buse/laser) est exporté par le logiciel du tranchage. Notant que la trajectoire de balayage



Figure 14. Différentes trajectoires de balayage de la tête d'impression : la pièce à gauche présente moins d'interruptions (points bleus) et des transitions (les traits pointillés) contrairement à la pièce à droite.

influence sur la vitesse de fabrication mais surtout sur la qualité de la pièce fabriquée si la trajectoire de balayage contient plusieurs interruptions (Fig. 14). Certains logiciels imposent la génération intermédiaire d'un fichier au format G-code entre le tranchage et l'export final vers la machine.

5. Identification et modélisation de la déviation dans la FA

5.1 Les défauts survenus dans les pièces de FA

5.1.1 Au cours de la chaîne numérique

La chaîne numérique que nous venons de présenter est censément suffisante dans le cas où le but est la fabrication des prototypes. Cependant, elle ne l'est plus pour la réalisation des pièces fonctionnelles, car même avec le développement important dans ce domaine et la concurrence existante entre les différents développeurs et fabricants, elle connaît encore des lacunes: tout d'abord, certaines informations du modèle CAO sont perdues lors de la conversion au format STL telles que les informations volumiques, les informations sur le matériau, ainsi que les données relatives aux tolérances dimensionnelles et géométriques [26]. Du plus, la conversion du modèle CAO « nominal » au format STL « approximatif » conduit parfois à l'apparition de quelques erreurs comme les mailles triangulaires chevauchantes ou les surfaces non fermées, ce qui nécessite des retraitements du fichier STL (Fig. 15). Ces retraitements se font manuellement (presque dans la plupart du temps) ce qui présente l'inconvénient d'être dépendants de l'utilisateur qui peut, par manque d'expertise, avoir une méconnaissance de l'influence du retraitement sur la fabrication. Quelques logiciels « payants » récemment émergés au marché essayent de résoudre automatiquement les problèmes survenus dans les fichiers STL.

L'opération du tranchage que le fichier STL subit par la suite pose également plusieurs problèmes, notamment le choix de l'épaisseur de couche qui va être fabriquée ensuite sur une machine de FA. Une grande valeur d'épaisseur de couches minimisera drastiquement le temps de fabrication, cependant, elle ne permettra pas d'imprimer des formes précises, et il y'aura même risque de perdre quelques détails très fins du modèle.



Figure 15. Quelques défauts des fichiers STL : (a) surfaces intérieures chevauchantes, (b) troue dans la surface du modèle
CHAPITRE I : ETAT DE L'ART 36



Figure 16. Tranchage adaptatif [29]

Le cas contraire où l'épaisseur de couche est minime, la précision du modèle peut être améliorée mais le temps de construction ainsi que l'énergie nécessaire pour la fabrication seraient augmentés significativement, ce qui influencera le coût du prototype. Cette contradiction entre le temps de construction et la finition de surface a conduit à l'élaboration de différents algorithmes de tranchage, comme le tranchage adaptatif (Fig. 16). Ceci consiste en l'application d'une épaisseur de couche variable au lieu d'utiliser une valeur uniforme pour tout le modèle. Cela permet d'augmenter la valeur de l'épaisseur de couche dans les zones à peu de détails et la minimiser dans les zones critiques où une surface plus finie est voulue. Lors de cette opération, il faut également veiller à ce que la pièce ne comporte pas de parties plus fines que l'épaisseur minimale de couche que la machine peut déposer.

Autre problème survenant souvent lors du tranchage est le problème de confinement (Fig.17) : les tranches peuvent être complètement à l'extérieur ou à l'intérieur des bords de la géométrie. Dans certains cas, les bords des tranches peuvent être à l'intérieur dans une partie du modèle CAO et à l'extérieur dans une autre partie ce qui conduit à une distorsion de forme.



Figure 17. Problème de confinement des couches [28]



Figure 18. Effet d'escalier apparu suite à l'effet d'escalier [94] [28]

5.1.2 Au cours de fabrication

La fabrication par les procédés de FA met en jeu plusieurs phénomènes physiques qui influencent d'une manière ou d'une autre la qualité de la pièce finale. Le principe même de la FA, consistant en la déposition successive des couches de matières jusqu'à la construction du volume final, couplé avec l'opération du tranchage dite auparavant, conduit à l'effet d'escalier (Fig. 18). Cet effet ne peut pas être évité de façon complète dans les pièces fabriquées par la FA (au moins sur les machines où le sens de fabrication est toujours selon un seul axe).

Une solution « partielle » pour remédier à ce problème est fournie par les nouvelles machines 5axes qui offrent la possibilité d'orientation adaptative (mentionné auparavant au sous-paragraphe 5.1.1) de la pièce et permet, à un certain degré, d'éviter cet effet. Généralement, les opérations du post-traitement sont toujours nécessaires pour se débarrasser des surfaces portant cet effet d'escalier dans le cas où la pièce est destinée à l'utilisation dans une application de pointe.

Outre l'effet d'escalier, un autre paramètre important de fabrication qui conduit toujours à des surfaces non-finies est le style de remplissage des couches superficielles (particulièrement dans le procédé FDM). Pour des raisons de minimisation de matière et du temps de fabrication, les couches intérieures des pièces fabriquées par ce procédé peuvent être construites en utilisant des styles de remplissages aérés (Fig. 19), tandis que les



Figure 19. (a) Différent styles de remplissage entre l'intérieur et l'extérieur de la pièce, (b) pièce avec des traces visibles du fil déposé

couches inférieures et supérieures se font forcément avec un remplissage compact. Les traces du fil déposé sont inévitables et demeurent visibles, exigeant par la suite un post-traitement.

Le gradient thermique dans les pièces de la FA est également un phénomène relatif au fonctionnement propre de ces procédés qui peut causer, s'il n'est pas bien contrôlé, des défauts dégradant la qualité de la pièce fabriquée. L'historique des températures des interfaces (entre deux couches successives) joue un rôle important dans la détermination de la qualité des liaisons entre les couches déposées/fusionnées, et par conséquent des propriétés mécaniques du produit final [30]. Le contrôle du gradient thermique est d'une importance primordiale particulièrement dans les pièces métalliques, puisque leur fabrication met en jeu des températures très élevées concentrées localement pour fusionner les particules de la poudre, ce qui peut générer des contraintes résiduelles, former des fissures, causer des déformations au cours de la construction ou lors d'enlèvement du support [30], changer la structure des particules de la poudre, ou mener également à la délamination [20] (Fig. 20).



Figure 20. Délamination dans une pièce fabriquée par l'EBM : le gradient thermique empêche la liaison des couches déposées

5.2 Identification et modélisation de la déviation dans la FA

5.2.1 Identification des défauts des pièces de la FA

Malgré les avantages et les opportunités qu'elle présente, l'adoption répondue des procédés de FA est actuellement entravée par les défauts de la précision dimensionnelle et géométrique ainsi que les défauts de l'état de surface, ce qui nécessite l'évaluation de ces caractéristiques de performance. Pour ce faire, deux méthodes de mesure sont généralement utilisées: (i) prendre directement une série des mesures des caractéristiques d'une machine/procédé, ou (ii) prendre les mesures d'un objet d'analyse comparative (benchmarking object) [31]. Un objet d'analyse comparative est une pièce utilisée pour caractériser quantitativement les performances d'une machine ou d'un procédé. La

fabrication de tels objets présente deux avantages principaux : (i) la comparaison de deux procédés/machines produisant le même objet d'analyse comparative, et (ii) l'évaluation de la capacité du procédé/machine à produire des géométries avec des caractéristiques aussi proches que possible de ceux exigées par le CDC, et donc d'identifier les limitations de la machine/procédé utilisé.

En fonction de l'usage auquel ils sont destinés, Mahesh [32] définit trois types des modèles d'analyse comparative : les modèles servant à tester les propriétés mécaniques, à tester les propriétés géométriques [33], [34], et à comparer les propriétés des procédés. Plusieurs études comparatives des procédés de FA ont été menées, comme celle de Xu et al. [35] où ils ont présenté un objet d'analyse comparative permettant de comparer les procédés de SLA, SLS, FDM et LOM en fonction de certaines caractéristiques telles que les propriétés du matériau, la précision, l'état de surface, etc., et celle faite par Ippolito et al. [36] où ils ont conçu, fabriqué, et testé un modèle d'analyse comparative afin d'étudier la précision dimensionnelle et l'état de surface de plusieurs procédés de FA tels que la SLA, FDM et SLS.

L'Identification d'un défaut dans une pièce fabriquée par un procédé quel que soit ne suffit pas et n'a aucune valeur sauf si une modélisation de ce défaut est faite pour comprendre son comportement et pouvoir le contrôler. La déviation dimensionnelle, étant très répandue dans les pièces de la FA, sera l'objet de la revue de littérature suivante visant l'exploitation des méthodes de modélisation de la déviation traitées dans les différents travaux publiés.

5.2.2 Modélisation de la déviation dans les pièces de la FA

En parcourant la revue de littérature existante sur la modélisation de la déviation des formes géométriques des pièces fabriquées par les procédés de FA, on trouve qu'il y a deux approches essentielles utilisées [37]:

- a) La modification du design en introduisant une compensation définie sur la base d'un modèle prédictif. Cette catégorie peut être subdivisée en deux sous-catégories : la compensation de l'erreur due à la machine, et la compensation du rétrécissement des formes géométriques.
- b) La modification du fichier du tranchage en améliorant le maillage des zones critiques dans les formes géométriques à étudier.

Le tableau 2 présente quelques travaux qui ont été faits sur la modélisation de la déviation en suivant les deux approches définies ci-dessus. Les modèles développés ont été appliqués particulièrement sur les procédés agissant sur les polymères (SLA/FDM) puisque

ces procédés se basent sur le principe de fusion-solidification, ce qui signifie que la modélisation du rétrécissement sera faisable et la déviation dans le plan peut être modelée (selon la première approche).

Pour modéliser la déviation dans d'autres procédés de FA (spécifiquement les procédés métalliques), d'autres méthodes doivent être utilisées. D'ailleurs, les phénomènes physiques se produisant lors de la fabrication avec ces procédés, notamment en termes du comportement et du rétrécissement des matériaux, sont différents des procédés de dépôt de matière. De plus, comme les procédés à base de poudre impliquent des températures élevées, leur modélisation ainsi que leur contrôle, dans la plupart des cas, sont effectués par des méthodes numériques impliquant la modélisation thermique [38], [39], [40].

	Formes considérées	Procédé	Méthode et résultats	
Approche A	Pièces circulaires et prismatiques	SLA	 Un modèle descriptif unifié pour les deux formes a été développé. Le modèle approche bien les formes cylindriques à un intervalle de confiance de 95%. Le modèle est bien ajusté aux centres des côtés des carrés, tandis qu'il diverge aux coins, donnant lieu à des coins arrondis. 	[41]
	Pièce à géométrie polygonale	FDM.	 L'utilisation d'un modèle basé sur les matrices de transformation homogènes, à savoir, la matrice d'échelle, de rotation, et de translation Comparaison avec la méthode d'expansion de série de Fourier (FSE) Le modèle développé prédit la déviation même aux coins pointus de la géométrie, La méthode FSE n'arrive pas à approximer correctement les transitions aiguës du contour même avec un ordre N élevé. 	
	Formes cylindriques	SLA	 Les taux de compensation du fichier CAD ont été extraits à travers un modèle prédictif une réduction du rétrécissement de 10% a été remarquée. 	[43]
	Formes cylindriques et polygonales	SLA	 l'utilisation d'un modèle prédictif basé sur [39] Bonne prédiction de la déviation pour les formes cylindriques et carrées. Une approximation relativement faible pour le pentagone et le dodécagone. 	[44]
Approche		SLA	 - L'établissement d'un modèle mathématique de la machine en transférant les sources d'erreurs du procédé en des fonctions des erreurs paramétriques du système d'axes ; - L'inconvénient majeur de la méthode est son application sur des formes 2D 	[45]

Tableau 2. Des travaux	de modélisation de	e la déviation dans	les procédés de la FA
------------------------	--------------------	---------------------	-----------------------

Formes cylindriques et planes	FDM	 À travers la même approche que [45], un modèle paramétrique des erreurs de la machine FDM a été développé ; l'établissement d'une méthode de compensation de chaque section du fichier STL ; une comparaison entre les modèles des deux machines a été faite ; la réduction de l'erreur volumétrique moyenne par l'application de la méthode de compensation du fichier STL était plus faible dans la machine FDM que dans la SLA les valeurs d'erreur après l'application de la compensation sont à peu près les mêmes pour les deux machines 	[46]
Cône	SLA	 Les déviations systématiques survenues dans chaque couche ont été représentées et modélisées afin de déplacer les points du contour dans le fichier STL, couche par couche, et créer un nouveau modèle STL. La méthode a prouvé la capacité de l'algorithme utilisé à bien prédire les déviations systématiques et inattendues. 	[47]

En outre, la modélisation des procédés à base de poudre tend à se concentrer davantage sur l'étude des propriétés mécaniques plutôt que sur la précision dimensionnelle car ces pièces subissent généralement des opérations de post-traitement définissant leur précision finale.

En guise de conclusion de cette première partie, nous rappelons quelques points essentiels à propos des procédés de FA. En fait, nous avons vu qu'il y une diversité des procédés qui se différencient dans plusieurs aspects, nous avons discuté également la chaîne numérique par laquelle passe chaque modèle CAO depuis sa création jusqu'à sa réalisation. Ensuite, nous nous sommes concentrés sur la déviation dimensionnelle survenue dans les pièces de FA et les méthodes utilisées pour la modéliser et la contrôler par la suite.

Dans ce qui suit, et sur la lumière des problématiques relevées auparavant dans ce rapport concernant la nécessité d'avoir des méthodologies de conception dédiées spécifiquement à la FA, nous présenterons une revue de littérature sur les méthodologies de conception existantes. Ceci nous permettra de se positionner par rapport aux autres travaux et de trouver un point de départ pour le nôtre ;

Partie 2 : Méthodologies de conception et reconception

Le développement de nouveaux produits de haute qualité nécessite la capabilité de prévoir au début du processus de développement l'impact des décisions de la conception sur le cycle de vie du produit. Et ce car parfois lorsque les problèmes dans le produit sont découverts dans la phase de la vérification de la conception ou du test, ils peuvent être corrigés par une reconception, cependant, les coûts de reconception à cette phase sont prohibitifs.

Malheureusement, prévoir les nécessités du cycle de vie d'une manière précise au début de la phase de conception est difficile, car les informations détaillées concernant la fabrication sont difficiles à prévoir lorsque la géométrie et les spécifications du produit ne sont pas encore complètes. De plus, le nombre de problèmes que rencontre le produit tout au long de son cycle de vie, et qu'on doit prendre en considération, ainsi que leur complexité sont incontrôlables. Un manque d'informations chez le concepteur sur les détails de fabrication, l'emballage et l'entretien est possible, ce qui augmente la complexité du problème.

Pour aider les concepteurs à évaluer d'une façon précise les impacts du cycle de vie au plutôt de leurs choix de conception, les entreprises manufacturières et les chercheurs ont développé plusieurs outils d'aide à la décision lors de la conception. Ces outils sont le DFX (Design for X) ou la conception pour l'X : ils peuvent être une procédure, des lignes directrices ou un programme informatique qui analyse les indices du coût et de fabricabilité, qui vont être au service du concepteur pour l'aider dans leurs décisions. [48]

1. L'historique du processus de conception

Le processus de conception comme le définit Ullman [49] est « l'organisation et la gestion des personnes et des informations qu'ils développent lors de l'évolution d'un produit ». Ce processus, lors du XIXe siècle, était réalisé par une seule personne, qui fait la conception et la fabrication du produit entièrement grâce à la diversité des connaissances qu'il possède dans la physique, les matériaux, les procédés de fabrication, etc.

Ceci a changé au milieu du XXe siècle, lorsque les produits et les procédés de fabrication sont devenus plus compliqués, ce qui a créé le besoin d'avoir un groupe de personnes qui participent au développement des produits, chacun dans son domaine d'expertise, et ce qui a finalement donné naissance à l'approche de conception « over the

wall (Fig. 21). Dans cette approche, l'information développée par chacun est transférée à l'autre : le responsable du marketing communique un besoin perçu dans le marché au concepteur sous forme écrit ou oral. Le concepteur à son tour interprète ces informations reçues et les développe sous formes de dessins, des instructions d'assemblage, ...etc., et les transmet au fabricant. Le développement du produit se fait ainsi d'une manière « séquentielle » où les informations sont « jetées sur le mur », ce qui amène très souvent à fabriquer un produit différent de ce que le client avait à l'esprit, car la communication des informations se fait dans un sens unique.

La plupart des entreprises se sont rendus compte des faiblesses de cette approche et ont cherché un nouveau concept : l'ingénierie intégrée. Ce concept est apparu vers la fin des années 70 et le début des années 80 à travers une étude faite par des chercheurs américains pour analyser la compétitivité de l'industrie automobile japonaise. Dans le monde industriel, l'expression «Ingénierie Simultanée» est plutôt employée, «Ingénierie Concourante» prédomine quant à elle dans le monde scientifique, tandis que l'AFNOR a privilégié le terme « Ingénierie Intégrée » [50]. La norme AFNOR NFX 50415 en propose la définition suivante : « l'ingénierie intégrée est une approche qui permet une conception intégrée et simultanée des produits et de processus liés à ces derniers, y compris la production et le soutien. Elle est destinée à permettre aux développeurs de prendre en compte dès l'origine toutes les phases du cycle de vie du produit depuis sa conception jusqu'à son retrait, y compris la qualité, les coûts, les délais et les exigences des utilisateurs». Ses principaux objectifs sont donc :

- De réduire le temps de développement des produits,
- D'intégrer l'ensemble des technologies constituant un produit multitechnologiques,
- De concevoir un produit en prenant en compte l'ensemble de son cycle de vie. [51].

L'intégration de l'ensemble des contraintes liées au cycle de vie du produit en amont dans la phase de conception est un concept très important, qui est basé sur le constat que, lors d'un projet d'industrialisation, 60 à 85% des coûts d'un produit sont fixés dès



Figure 21. L'approche "over the wall" [49]

l'étape de conception alors que les coûts réellement engagés à ce stade n'en représentent que 5 à 7% [1]. Cependant, cette démarche reposant sur une auto-organisation des concepteurs en fonction des besoins de conception du produit, elle ne permet pas de piloter un projet pour atteindre des objectifs de coût et de délai de conception [51]. L'ingénierie intégrée a joué un rôle central dans la production Lean. Cependant, de son caractère pratique et de sa dépendance humaine, elle a été interprétée de différentes façons, mais elle a inspiré de nombreuses nouvelles recherches de conception et de développement de produits, comme les méthodologies DFX et son extension DFM.

2. Notions de DFX et DFM

2.1 La conception pour l'X : DFX

Le DFX (Design for X) ou la conception pour l'X est un nom générique pour les membres d'une famille de méthodologies adoptées pour améliorer le processus de conception à partir d'un point de vue particulier qui est représenté par X (Fig. 22). X représente :

- Une propriété spécifique (par exemple, le coût, la qualité, les délais, l'efficacité, la flexibilité, le risque ou l'environnement).
- Ou une phase du cycle de vie du produit (par exemple, la fabrication de pièces, l'assemblage, la distribution, le service ou le rejet) ou l'un des sous-processus (par exemple, de préhension ou d'alimentation) [52].

Le DFM (conception pour la fabrication) et le DFA (conception pour l'assemblage)



Figure 22. Processus du design for X [48]

sont les deux outils de DFX les plus courantes et les plus populaires, cependant il y a d'autres approches qui ont été développées comme la conception pour l'environnement (DFE), la conception pour la qualité (DFQ), la conception pour le coût (DFC), la conception pour la fiabilité (DFR),... etc. [49].

La finalité du DFX est à la fois l'amélioration de la compétitivité par l'augmentation de la qualité du produit, la diminution du time to market, etc., mais aussi l'aide à la rationalisation des décisions et l'augmentation de l'efficacité opérationnelle des concepteurs, et ce dès les phases amonts de conception [53].

Le succès d'une telle approche passe par sa mise en œuvre dans un environnement PLM dans lequel l'ensemble des données utiles à la conception sont stockées et rendues accessibles pour tous via les systèmes de gestion des données techniques (SGDT), et nécessite son déploiement par des experts pour concevoir les systèmes de gestion des connaissances (Knowledge Management) [54].

2.2 La conception pour la fabrication : DFM

Pour rester compétitif dans l'industrie moderne de production de masse, les produits doivent être conçus et fabriqués avec le minimum de coûts, dans un temps minimum, tout en gardant une haute qualité. Une façon d'améliorer la compétitivité des produits est la conception pour la fabrication ou le DFM (Design For Manufacturing).

Le DFM a été adopté au début des années 80 comme une stratégie d'amélioration du rendement, mais maintenant le DFM est devenu un standard industriel pour estimer le rendement et la fabricabilité dès la conception [55]. Il consiste à considérer simultanément les objectifs de la conception et les contraintes de fabrication, afin d'identifier les problèmes de fabrication lors de la conception des pièces; réduisant ainsi les délais du développement des produits et l'amélioration de la qualité [56]. La conduite de cette démarche se fait par une équipe de conception avec des représentants des services de conception et de fabrication, d'une manière à ce que les ingénieurs de fabrication de la fabricabilité des produits. Ensuite, l'apparition de la CAO et les différents outils qu'elle offre (l'analyse par les éléments finis, analyse des mécanismes, simulation d'usinage, etc.), ont facilité considérablement l'application de la DFM et ont augmenté la productivité en réduisant les itérations conception-test-reconception.

Le DFM est réalisé en effectuant une « analyse automatisée de la fabricabilité » : un processus qui consiste à analyser le design pour des problèmes potentiels de fabricabilité et à évaluer son coût de fabrication. En fait, il y a trois principales caractéristiques qui

distinguent les différents systèmes de fabricabilité l'un de l'autre: quelle l'approche prennent-ils, quelle mesure de fabricabilité utilisent-ils, et quel niveau d'automatisation obtiennent-ils [57].

3. La conception pour la fabrication additive : DfAM

Nous avons vu précédemment que les procédés de la FA sont très prometteurs en terme de possibilités qu'ils offrent: la réduction des coûts et des délais de fabrication grâce à la suppression des outillages, l'augmentation de la richesse fonctionnelle des produits, l'allègement structural, la fabrication sur mesure de formes complexes, ou l'exploitation de la complexité matériaux [53]. A côtés de ces avantages, Il y a également des limitations, comme l'espace de fabrication dont disposent les machines actuelles. Plusieurs autres paramètres sont mis en jeu lors de la FA selon le type du procédé : la tenue mécanique (qui dépend - entre autres - de l'orientation de la pièce), l'état de surface (qui dépend particulièrement de l'épaisseur des couches à déposer), le type du matériau, la nécessité d'intégration du support ou non, les paramètres de la machine de fabrication elle-même, etc. Ces spécifications que présente la FA doivent être prises en compte lors de la conception des pièces dédiées à la fabrication par ces procédés, ce qui met en avant la nécessité de développer de nouvelles méthodologies de conception dédiées à la FA.

Les méthodologies de la conception pour la FA ou les DfAM (Design for Additive Manufacturing) peuvent être définis comme étant «l'ensemble des méthodes et outils permettant de prendre en compte les spécificités de la fabrication additive (technologiques, géométriques, etc.) lors des phases de conception » [53]. Ces méthodologies ont reconnu un développement significatif lors de la dernière décennie. Cette partie présente quelques travaux existants portant sur les DfAM ainsi que les classifications qui ont été proposées pour ces méthodologies.

3.1 Les classifications des DfAM

Plusieurs méthodologies de conception pour la FA ont été développées, qui diffèrent selon leurs finalités et les applications attendues d'elles.

3.1.1. Les lignes directrices de conception ;

La première méthode pour guider le concepteur était de suivre un ensemble de règles ou de lignes directrices, comme celles établies par Becker [58] :

- Utiliser les avantages fournis par les processus de la FA.
- Ne pas fabriquer les mêmes pièces conçues pour les procédés classiques.

- Ne pas tenir compte des principes de la conception mécanique traditionnelle.
- Réduire le nombre des pièces dans l'assemblage par l'intégration intelligente des fonctions ;
- Vérifier s'il y a des exemples bioniques (inspirés de la nature) pour répondre à vos tâches et qui peuvent donner un indice vers de meilleures solutions de conception.
- N'hésitez pas à utiliser la conception de formes libres car ils ne sont pas difficiles à produire.
- Optimisez votre conception pour avoir une haute résistance et un poids faible.
- Utiliser des structures creuses si elles sont utiles.
- Ne pensez pas à l'outillage, car il n'est plus nécessaire.

Il y a d'autres travaux qui ont tenté de fournir des lignes directrices pour des procédés spécifiques comme la FDM [59] [60], ou encore le DLMS [61]. Ces règles et directives sont généralement qualitatives et nécessitent d'être interprétées et appliquées à chaque cas particulier et unique, ce qui exige que le concepteur ait de très bonnes compétences et connaissances pour qu'il puisse les interpréter et les appliquer. De plus, elles sont souvent spécifiques à des procédés et des configurations de machines, et ne sont pas suffisantes pour bénéficier de toutes les capacités de la FA.

3.1.2. Des méthodologies de détermination du type du procédé à utiliser

Ces méthodologie permettent de déterminer quand utiliser la FA au lieu d'un procédé conventionnel en suivant une approche de "prototypage rapide hybride" ; Un exemple pour ce type est la méthodologie proposée par [62]: elle permet de déterminer pour un prototype multi-composants le composant qui peut être fabriqué par la FA. Cette méthodologie permet de réduire le temps et le coût de fabrication des prototypes complexes. Cependant, elle n'explore pas les avantages offerts par la FA et ne tente pas de les incorporer en amont du processus de conception.

3.1.3. Des méthodologies orientées structure

Ces méthodologies de conception tentent de mettre en œuvre une structure spécifique dans les pièces en explorant la complexité géométrique offerte par la FA. Le travail de Rosen [6] est un exemple: il a proposé une méthodologie de conception de structures cellulaires, permettant ainsi l'exploration de la complexité géométrique des pièces fabriquées par la FA, mais elle ne tente pas d'implémenter d'autres améliorations dans le produit.

3.1.4. Des méthodologies orientées assemblage

Les méthodologies de conception développées visent - dans leur globalité - la conception de chaque composant séparément. Cependant, et pour profiter le maximum possible des avantages de la FA, il est judicieux d'avoir une vue globale et de ne pas concentrer uniquement sur les composants séparés mais sur l'assemblage entier. De cette façon, des démarches de réduction du nombre de pièces constituant l'assemblage ou l'évaluation de la possibilité de réalisation d'un assemblage indémontable peuvent être envisagées. Néanmoins, les méthodologies de conception DfAM orientées assemblage son minimes par rapport à celles destinées à la conception des composants, comme prouvé par l'investigation de Laverne et al. [53] menée sur 25 publications relatives aux DfAM conception, qui montre que 12% seulement des méthodologies de conception sont orientées assemblage (Fig.23). Le travail de Boothroyds sur les DFMA (Design for Manufacture and Assembly) [63] est une référence pour les chercheurs dans ce domaine.

Rodrigue et al. [64] s'inspirent également de sa méthodologie, pour proposer une autre nouvelle orientée assemblage (Fig.24). Elle utilise le Force-Flow Diagram pour aider le concepteur à réduire le nombre des pièces constituant l'assemblage, tout en prenant en compte 4 avantages principaux de la FA : la complexité géométrique, La complexité des matériaux, la non-dépendance du coût et de la grandeur du lot, et la non-dépendance du coût et la complexité de la pièce. Le but de telle méthodologie est d'optimiser l'assemblage vers des buts définis par l'utilisateur mais particulièrement pour prévenir les défaillances.

L'inconvénient de cette méthodologie réside dans le fait qu'elle ne cherche pas à introduire les bénéfices de la FA dès la conception des composants, puisqu'elle se focalise sur l'optimisation de l'assemblage, alors que la géométrie a été définie au préalable. De plus, cette méthode met l'accent davantage sur la fiabilité de la conception alors que la façon de répondre aux besoins des utilisateurs n'est pas clairement discutée.



Figure 23. Répartition des DFAM selon le niveau systémique du produit



Figure 24. Méthodologie proposée par Rodrigue

3.1.5. Les théories classiques de conception modifiées pour la FA

Ces méthodologies cherchent à modifier le processus de conception des procédés classiques et l'adapter à la FA. Le problème avec ce type de méthodologies est qu'elles cherchent à adapter les procédés de la FA (qui sont totalement différents des autres procédés) au processus de conception classique, ce qui restreint le profit des avantages offerts par la FA et limite l'imagination et la créativité du concepteur.

Un bon exemple pour ce type de méthodologies est celle fournie par Boyard et al .[12] comprenant les cinq étapes d'une méthodologie de conception standard: la détermination des spécifications fonctionnelles, la conception conceptuelle, la conception architecturale, et la conception détaillée. Une des difficultés dans la conception du produit réside dans l'association de la fabrication et de l'assemblage par rapport aux spécifications fonctionnelles. Pour ceci, cette méthodologie propose de garder ces deux types de conception et de les exécuter simultanément. Cette méthodologie reste limitée car elle ne traite pas les produits avec des mouvements relatifs internes ou avec une complexité hiérarchique.

Kumke et al [65] à son tour propose une méthodologie DfAM qui s'inscrit dans la catégorie des méthodologies se basant sur le changement des théories classiques de conception. Après une revue de littérature sur les différents DfAM existantes, il propose un cadre méthodologique, sorte de catalogue regroupant des lignes directrices aidant le concepteur tout au long des étapes de la conception. Ce cadre intègre les méthodes DfAM et les outils existants dans des modules, en adoptant la structure générale du processus VDI 2221 [66], qui comporte 4 phases : la planification et clarification des tâches, la conception conceptuelle, la conception architecturale et la conception détaillée. La méthodologie proposée prend en compte trois aspects principaux : le degré de nouveauté du produit, l'expérience du concepteur, et le but de la conception. Ce travail important nécessite

encore l'intégration d'un module concernant les opérations du post-traitement qui sont indispensables pour certains procédés pour atteindre une haute qualité. De plus, il peut servir comme base pour le développement d'un outil logiciel dédié à la conception par les procédés de la FA.

Salonitis [11] dans son travail a adopté la méthode de conception axiomatique. Cette méthode a été créée et popularisée par le professeur Suh de l'institut MIT, pour tenter de définir le processus de conception d'une manière scientifique. Cette méthode de conception se base sur deux axiomes : l'axiome d'indépendance (i.e. chaque exigence fonctionnelle doit être indépendante), et l'axiome d'information (i.e. sélectionner l'alternative de conception avec le contenu d'information minimum). La méthode que propose Salonitis est basée sur le recensement et la cartographie des besoins du client sous formes des exigences fonctionnelles (FR : functional requirements), puis dériver les paramètres de conception (DP : design parameters), indiquant comment l'objet peut satisfaire ces FR et enfin décrire les variables de processus (PV : process variables) pour la fabrication de l'objet. La méthode proposée est simple à utiliser, surtout lorsque la décomposition des FR, DP et PV ne dépasse pas deux niveaux, autrement, le diagramme de décomposition devient très compliqué.

3.2 Les méthodologies DFAM

Les types des méthodologies présentées auparavant, malgré les avantages que présente chacune d'elles ainsi que les problématiques qu'elles tentent de résoudre, ne permettent pas un profit total des nouvelles pistes de réflexions que permet la FA et des opportunités qu'elle offre. Les méthodologies sous forme de lignes directrices ne guident pas le concepteur étape par étape dans son travail, tant que les méthodologies orientées structure/assemblage ne permettent qu'une prise en compte partielle des connaissances du procédé de fabrication. D'ailleurs ces deux aspects (structure/assemblage) peuvent être inclus comme étape intermédiaire dans une méthodologie globale DfAM. D'autre part, les méthodologies de conception classiques modifiées pour la FA s'intègrent encore dans une démarche séquentielle faisant apparaitre l'effet « over the wall ».

À cet effet, autres méthodologies DfAM dites globales ont été développées pour surmonter les problématiques citées et avoir une démarche de conception orientée FA qui prend en compte à la fois les avantages et les limitations de cette technique et dirige le concepteur vers des nouvelles pistes de réflexion sur la conception, en le guidant dans son travail étape par étape. Dans ce sens intervient le travail de Ponche [1] qui a proposé une méthodologie globale appliquée aux procédés de projection de poudre qui prend comme point de départ les contraintes liées au CDC fonctionnel ainsi que les règles métiers et les caractéristiques de la machine utilisée. Les étapes de la méthodologie sont liées entre eux soit par des données relatives aux connaissances du concepteur, soit par des informations connues comme les contraintes du CDC, les règles de conception, etc. Le rôle du concepteur est ainsi pleinement défini. Ponche a appliqué cette méthodologie sur une articulation d'un robot fabriquée par le procédé CLAD. Cette méthodologie a subi des améliorations lors des recherches qui suivent [67] mais son application est toujours restreinte aux procédés de projection de poudre. De plus, elle ne traite pas l'aspect assemblage et la performance de structure.

Une autre méthodologie développée par Vayre [2] concerne la fabrication des pièces métalliques par le procédé EBM. Après une investigation des contraintes liées à la fabrication des pièces métalliques ainsi que celles posées par le procédé EBM, il présente sa méthodologie en quatre étapes : (1) la génération de forme initiale après l'analyse du CDC fonctionnel ; (2) le choix du balançage : c.-à-d. le choix de la ou les orientations de fabrication de la pièce dans l'espace de fabrication en considérant la fabricabilité de la géométrie initiale, la qualité réalisable à l'aide du procédé, ainsi que la productivité de la future fabrication ; (3) le raffinement et l'optimisation de la géométrie ; (4) la validation de la pièce. Comme la méthodologie de Ponche ([1], [67]), celle-ci n'est applicable que sur les procédés à base de poudre.

Un autre travail abouti est celui proposé par Boyard [4]. Avec une méthodologie en 11 étapes regroupées en trois grandes phases, Boyard propose une démarche bien accomplie guidant le concepteur tout au long de son travail, pour profiter de l'opportunité qu'offre la FA en termes de fabrication de formes complexes. En ne modélisant dans un premier temps que les volumes et les surfaces fonctionnelles grâce à un graphe de fonction, il met en jeu l'optimisation topologique du solide de départ pour arriver à une pièce fabricable qui n'utilise que la quantité de matière nécessaire à sa fabrication. Il inclut une démonstration par l'application de sa méthodologie sur la reconception d'une pièce industrielle destinée à être fabriquée par la FDM.

D'après cette revue de littérature, on voit clairement qu'il y a de nombreuses méthodologies de conception développées spécifiquement pour les procédés de FA. Cependant, elles présentent encore des inconvénients majeurs. Premièrement, ces méthodologies de conception ne sont pas génériques et chacune d'entre elles est limitée à un type spécifique de procédés (Ponche et Vayre : procédés à base de poudre, Boyard : procédé de la FDM). Deuxièmement, certaines d'entre elles sont destinées à la conception d'un type spécifique de pièces, i.e. pièces relatives au secteur de l'aviation comme dans la méthodologie de Vayre [2]. Troisièmement, le principal inconvénient que nous avons constaté et que nous essayerons de résoudre plus tard est la non-prise en compte des tolérances appliquées aux pièces. Les écarts dimensionnels ou géométriques survenus dans les pièces fabriquées par la FA n'ont pas été abordés dans les méthodologies citées. De plus, ni les sources de ces écarts ont été identifiées, ni les méthodes servant à les contrôler ont été incluses.

Pour répondre à ces problématiques, nous proposons une nouvelle méthodologie DFAM qui aura pour objectif l'intégration des tolérances et des interactions produit/procédé au plus tôt dans la phase de conception. Dans la suite, le cadre méthodologique sous lequel s'inscrit notre travail est présenté. Ce cadre consiste en l'organisation du matériel et des ressources humaines pour la réalisation de la méthodologie à proposer.

4. Cadre méthodologique adopté

4.1 L'ingénierie intégrée

La méthodologie « bidirectionnelle » que nous proposons prend l'approche d'ingénierie intégrée comme un cadre, dans lequel elle peut être applicable. Concevoir en prenant en compte les contraintes imposées par la fabrication, et s'assurer de bien répondre aux exigences requises par le CDC en utilisant les moyens de fabrication (matériau, machine, procédé) choisis est la finalité de la méthodologie à proposer. Du coup, elle doit être nécessairement inscrite dans une démarche d'intégration conception-fabrication comme mentionné auparavant.

4.2 Concept de « peau/squelette »

L'entité « peau/squelette » sont en fait deux éléments géométriques permettant de représenter les composants élémentaires d'un produit. L'entité « peau » permet de décrire les surfaces fonctionnelles. On en distingue deux types : la « peau d'usage » qui regroupe les surfaces sur lesquelles sont appliqués les « flux d'énergies » circulant à travers les liaisons d'un produit, et la « peau métier » qui rassemble les surfaces fabriquées du produit. Toutes les entités « peau » peuvent être associées à des informations de type : géométrique, cotation ou tolérancement. Quant à l'entité «squelette» elle représente la fibre

neutre localisant la matière à travers laquelle seront véhiculés les « flux d'énergies » [51]. C'est un important concept, nécessaire pour pouvoir mettre en œuvre la méthodologie proposée, car il permet la filtration et la structuration de l'ensemble des données relatives à l'activité de la conception, et génère par la suite des « vues métiers ». Ceci permet à chaque concepteur de disposer des seules données dont il a besoin pour mener à bien son intervention.

4.3 Concept de moindre engagement

Les données issues de l'activité de conception dans sa totalité (la création du modèle géométrique, le dimensionnement, la représentation puis la vérification) nécessitent d'être rationalisés afin d'optimiser l'utilisation des ressources humaines disponibles. Pour répondre à cet objectif, le principe du moindre engagement doit être considéré. Ce concept permet d'exploiter les données disponibles à un instant «t» afin de ne générer que les données CAO qu'il est possible de créer à ce stade de la conception (ni plus, ni moins) [68].

Conclusion :

Durant ce chapitre, nous avons présenté, dans un premier temps, le principe de la fabrication additive (FA), les différents procédés existants, leurs spécificités, ainsi que leurs avantages et leurs limitations. Une présentation des défauts géométriques pouvant avoir lieu dans les pièces fabriquées par la FA a été faite après, puis, nous nous sommes concentrés sur les méthodes d'identification et de modélisation de ces défauts. Durant la deuxième partie de ce chapitre, nous avons présenté une revue de littérature exhaustive sur les méthodologies de conception et de reconception. Le processus de conception classique a été présenté dans un premier temps, puis l'outil de conception DFX ainsi que son extension DFM, avant d'entamer les classifications faites sur les méthodologies de conception.

Comme mentionné auparavant, les procédés de la FA imposent plusieurs règles spécifiques et interconnectées, que le concepteur doit absolument tenir en compte lors de conception de la pièce. Malgré les nombreuses méthodologies développées spécifiquement pour la FA, elles possèdent encore des désavantages comme discuté auparavant dans ce chapitre, en termes de leurs limitations pour des types spécifiques de procédés/des pièces à fabriquer, mais surtout en termes de la non prise en considération des exigences requises par le CDC en termes des caractéristiques de performance, i.e. la précision dimensionnelle et géométrique, l'état de surface, etc.

En réponse à cette problématique vient ce travail de thèse qui a pour objectif la proposition d'une nouvelle méthodologie dédiée aux procédés de la FA (DFAM) qui aura comme finalité l'intégration des tolérances et des interactions produit/procédé au plus tôt dans la phase de conception. La méthodologie aura deux buts essentiels :

- Maîtriser les phénomènes qui ont lieu lors de la fabrication et leur influence sur la pièce fabriquée en termes de précision dimensionnelle.
- Comprendre les sources de la déviation, la modéliser, et pouvoir la contrôler.

La présentation de la méthodologie sera l'objet du chapitre suivant. Trois cas d'études destinés à valider la méthodologie seront présentés également lors du quatrième chapitre.

Chapitre II : Méthodologie de prise en compte des incertitudes et des interactions produit/procédé

Ce chapitre présentera l'essence de notre travail de thèse. Il s'agit de la méthodologie que nous proposons pour la prise en compte des incertitudes et des interactions produit/procédé. La première partie de ce chapitre présentera le schéma général de notre méthodologie qui a comme finalité la génération d'un fichier FAO d'une pièce fabricable avec les spécifications préalablement déterminées dans le CDC. La deuxième partie sera consacrée à l'explication détaillée des étapes de la méthodologie, qui sont regroupées dans trois grandes sections : la 1^{ère} concerne le choix du couple matériau/machine et la génération de la géométrie. La 2^{ème} section traite quant à elle concerne l'optimisation des paramètres de fabrication, alors que la 3^{ème} section se concentre sur la modélisation de la déviation et sa compensation. Enfin, la troisième partie de ce chapitre portera sur la capitalisation des connaissances qu'on juge importante puisqu'elle permet de valoriser et enrichir l'expertise du concepteur dans la conception pour la FA à travers la pratique de la méthodologie proposée et lui permet de la réutiliser dans d'autres cas similaires.



Partie 1 : Schéma général de la méthodologie

Fichier FAO

La figure 25 présente le schéma général de la méthodologie proposée composée de 3 grandes étapes appelées des sections. La première concerne le choix du couple matériau/machine et la génération de la géométrie du solide, la deuxième vise l'optimisation des paramètres de fabrication, et la dernière cherche à compenser le fichier CAO initial par des taux de compensations en vue de minimiser les déviations. Le but final de la méthodologie est l'obtention d'un fichier FAO de la pièce en question prêt à la fabrication. L'explication exhaustive des sections de la méthodologie est présentée dans le reste de ce chapitre.

Partie 2 : Explications des sections de la méthodologie

1. Section 1 : Choix du couple matériau/machine et génération de la géométrie

La première section de la méthodologie est schématisée sur la figure 26. Bien évidemment, tout processus de conception commence par l'extraction de toutes les données nécessaires à la compréhension du besoin à partir du CDC. Cela inclut l'extraction des données relatives aux spéciations géométriques, à savoir, les surfaces et les volumes fonctionnels, aux chargements appliqués, à leurs positions, etc. Ces données constituent le point de départ de notre méthodologie.

1.1 Sélection des matériaux possibles

Le choix du matériau avec lequel on fabrique une pièce donnée est très important. Parmi les matériaux disponibles, plusieurs critères de choix peuvent être pris en compte selon les spécifications du CDC, à savoir :

- Sa nature (polymères, métaux, composites, etc.) ;
- Sollicitations mécaniques (résistance moyenne/élevée, des sollicitations particulières statiques ou dynamiques, i.e. le choc, la fatigue, etc.);
- Sollicitations physico-chimiques (frottement, érosion, abrasion, températures d'utilisation (chocs thermiques), propriétés physiques particulières (magnétisme, résistivité, électrique, dilatation, conductivité thermique, etc.);
- Selon la compatibilité entre les matériaux si la pièce est fabriquée en multimatériaux ;
- Selon le coût, la possibilité du recyclage, etc.



Figure 26. Première section de la méthodologie

Tenant en compte ces critères, ainsi que ceux exigés par le CDC, on procède à la sélection des matériaux possibles pouvant y répondre. Pour ce faire, l'utilisation des abaques est possible et simple dans le cas où le concepteur veut s'appuyer seulement sur les matériaux à sa disposition [3]. Néanmoins, on peut se référer aux approches de sélection multicritères (comme celle développée par Ashby [69]) ou ceux d'optimisation multi-objectives où des algorithmes comme l'ANN (les réseaux de neurones artificiels) et la GA (l'algorithme génétique). Une revue bien détaillée de ces méthodes est fait par [70]. Autre méthode récemment développée est celle d'Uzair [71] qui se base sur les tableaux de sélection des matériaux d'Ashby et la méthode AHP (Processus de hiérarchie analytique) [72]. Quelle que soit la méthode à suivre, la finalité est de trouver un ensemble des matériaux susceptibles de répondre aux exigences du CDC, et sur la base d'eux ainsi que la géométrie initiale du solide, de présélectionner un ensemble des machines possibles.

1.2 Présélection des machines possibles

Le choix de la machine se base sur la disponibilité dans un premier temps pour éviter le plus possible la sous-traitance et ses coûts engagés. Néanmoins, le choix dépend particulièrement du volume fabricable ou les dimensions maximales des pièces réalisables. Les dimensions des volumes de construction des machines de FA sont en général minimales ne permettant pas la fabrication des pièces de larges dimensions, ce qui impose des limitations sur les dimensions des pièces à fabriquer, ou impose une orientation particulière pour pouvoir contenir la totalité de la pièce dans l'espace de fabrication.

1.3 Génération de la géométrie

Deux voies générales se présent devant le concepteur : soit il envisage la conception d'une nouvelle pièce, soit il envisage une reconception en partant d'un fichier numérique existant ou d'une pièce existante, dans le but, par exemple, de l'adapter à la fabrication par un procédé de FA. Dans ce dernier cas, et selon la complexité de la géométrie de la pièce en question, le concepteur peut appliquer le concept de la rétroingénierie (reverse engineering) en commençant par la « numérisation » de la pièce grâce à un scanneur 3D pour obtenir un modèle numérique initial de la pièce avant d'y introduire les modifications jugées nécessaires grâce à un logiciel de CAO.

Le cas échéant où le concepteur envisage la conception d'une nouvelle pièce, la première étape sera la génération d'une géométrie initiale à partir des contraintes du CDC, en ne se focalisant dans un premier temps que sur les surfaces et les volumes fonctionnels. Ceci peut être fait directement dans un logiciel de CAO ou, par le biais d'un « graphe des fonctions » [43]. Ce graphe permet de schématiser la disposition spatiale des surfaces

fonctionnelles grâce aux « fonctions » qu'on attend de la pièce finale. L'application de telle méthode peut servir pour des pièces « simples ». Or dans le cas où la conception des pièces ayant des géométries plus complexes et/ou avec plusieurs fonctions est envisagée, le graphe des fonctions devient très complexe et l'application de cette méthode peut devenir contraignante. Autre façon pour la génération de la géométrie initiale est de mettre en jeu le concept « peau-squelette » qu'on a mentionné auparavant dans ce rapport, en utilisant des logiciels dédiés comme Hyperworks de la société Altair. Cependant, toute méthode/logiciel permettant la génération de la géométrie de la pièce en question sera convenable.

À l'issue de cette étape, une enveloppe ou un volume englobant de la pièce sera disponible, ce qui permettra de présélectionner les machines possibles à utiliser selon leurs volumes de fabrication, avant de faire le choix final selon d'autres critères, notamment le coût, la résolution, les dimensions minimales fabricables, etc. La géométrie initiale générée subira par la suite une étude statique et une optimisation topologique pour profiter des opportunités offertes par la FA en termes de possibilité de fabrication des géométries complexes, et minimiser la quantité de matière à utiliser ainsi que le coût et le temps de fabrication. L'algorithme suivi est présenté par la figure 27 et expliqué dans ce qui suit.



Figure 27. Algorithme de génération de la géométrie

1.2.1. Analyse statique

Subséquemment à la génération de la géométrie initiale, une analyse statique est recommandée pour déterminer si la pièce (étant fabriquée par le matériau choisi) résistera aux contraintes appliquées, et si elle est capable de les supporter ou s'il y a un risque qu'elle se fléchit ou, dans le pire des cas, qu'elle se casse. Si les résultats de l'étude statique ne sont pas favorables, une analyse non linéaire est envisageable. Ceci consiste à appliquer graduellement les charges de sorte qu'elles ne soient pas prises en considération à un instant donné dans les calculs, mais qu'elles augmentent progressivement et que les états d'équilibre successifs soient résolus. Ceci est bénéfique dans le cas de la fabrication par la FA, où la structure résultante de la fabrication couche par couche est non-homogène anisotrope. Ces études (statique linéaire et statique non-linéaire) même si elles augmenteront le temps de conception, elles permettent de réagir sur la géométrie initiale générée au plus tôt dans la conception et de prendre les décisions nécessaires, telles que la modification du design, ou également la modification du matériau choisi si leurs résultats n'étaient pas favorables.

Notons que la réalisation de telles études sur les logiciels de conception habituels assume que le matériau est homogène isotrope ce qui ne permet pas une analyse bien adaptée aux procédés de la FA. En effet, le principe de la FA fondé sur l'ajout successif de matière couche par couche résulte dans des pièces ayant une structure anisotrope, ce qui signifie que la résistance aux différents chargements dépendra de la direction des couches déposées comme dans le cas de la fabrication par les matériaux composites. Des logiciels avancés existent sur le marché où des pièces avec des structures différentes peuvent être analysées et simulées, cependant, l'utilisation de ces logiciels exigent le savoir-faire et l'expertise du concepteur.

1.2.2. L'optimisation topologique

Pour des raisons relatives à la minimisation du temps de fabrication et la quantité de matière nécessaire et par la suite la réduction du coût, on fait appel à l'optimisation topologique. C'est une approche mathématique visant l'optimisation de la disposition du matériau dans l'espace de conception pour un ensemble donné de charges et de conditions limites, de sorte que la disposition résultante respecte un ensemble prescrit de performances ciblées. La combinaison de cette technique avec la FA a de majeurs avantages puisqu'elle permet l'amélioration de la conception, et permet de générer des géométries complexes irréalisables avec les procédés de fabrication conventionnels [73]. Le seul problème avec cette technique sont les itérations successives à exécuter et le

traitement manuel exercé par le concepteur sur la géométrie optimisée (en termes du lissage du maillage) pour avoir une géométrie fabricable satisfaisant les contraintes liées à la fabrication par la FA. À ce point, les nouveaux logiciels développés spécifiquement pour la FA (comme Fusion 360 de la gamme Autodesk) ont apporté de nouvelles solutions qui facilitent les manipulations manuelles du concepteur. À titre d'exemple, Fusion 360 offre la possibilité de reconstruire un nouveau modèle CAO fabricable superposé sur le modèle optimisé, en les visualisant tous les deux à la fois, sans avoir à lisser le maillage ou risquer de laisser des éléments isolés ou de perdre la continuité aux membres de la structure. Ici également, comme pour l'étude statique et l'analyse non-linéaire, les travaux traitant l'optimisation topologique et l'analyse par les éléments finis des pièces destinées à la FA sont conduits sur les logiciels ordinaires qui assument que le matériau est homogène isotrope. Autres logiciels plus avancés (comme celui de la gamme Autodesk Simulation Mechanical) permettent de faire l'analyse par EF en utilisant des matériaux anisotropes. Ceci est bénéfique puisqu'il va permette de choisir l'orientation de la pièce qui permet de maximiser la tenue mécanique, tenant compte également de l'espace de fabrication.

1.4 Choix de la machine

Le matériau et la géométrie étant déterminés ainsi que l'ensemble des machines possibles présélectionnées en se référant à leurs volumes de fabrication, on passe au choix final de la machine à utiliser. Ce choix se base sur des critères relatifs au procédé utilisé par la machine, des critères du CDC (i.e. le coût de la pièce), et des critères relatifs à la machine elle-même (le coût horaire de fabrication, les dimensions minimales fabricables, la résolution, la vitesse d'impression.)

1.4.1 Procédé de fabrication

La procédure de choix du procédé de fabrication a été beaucoup traitée dans la littérature, et plusieurs approches ont été développées pour cette fin (à titre d'exemple [69], [63], [74]). Ces approches se basent sur 2 étapes essentielles [75] : la première étape est l'évaluation de la capacité technique des procédés disponibles à réaliser une conception donnée, et la deuxième classifie les procédés choisis selon des critères économiques. Ces approches sont d'une grande importance vue la multitude des procédés de FA qui utilisent des classes des matériaux similaires, comme le SLA et la FDM pour les polymères, le SLS, SLM, et l'EBM pour les pièces métalliques. Subséquemment, lors du choix de la machine à utiliser pour une pièce donnée, un choix judicieux du procédé à mettre en jeu est nécessaire à cause des différences techniques existantes entre elles. À titre d'exemple, la SLA et la FDM, même si elles agissent toutes les deux sur les matériaux plastiques, elles

présentent des différences en termes de variété des matériaux disponibles, la qualité d'impression, et le post-traitement nécessaire. En effet, la technologie FDM étant plus populaire et plus accessible, de nombreux matériaux ont été développés avec de larges gammes de couleurs et différents diamètres de fils, contrairement à la SLA qui utilise des résines avec des couleurs limitées. La nature de ce dernier procédé rend également l'opération du post-traitement plus compliquée et consommatrice de temps ; cependant, et pour la même épaisseur de couche, la SLA permet d'avoir une précision supérieure à la FDM et une bonne qualité d'impression vu qu'elle définit la résolution par le laser et non pas par le mouvement mécanique des axes de la buse comme dans le cas de la FDM.

1.4.2 Dimensions minimales fabricables

Le choix de la machine dépend non seulement des dimensions maximales réalisables, mais également des dimensions minimales qu'une machine est capable de fabriquer. Cette capabilité dépend notamment de la résolution, i.e. la précision du déplacement de la tête d'impression (buse/laser) et de la précision du mouvement de la plateforme. Ces dimensions minimales réalisables doivent être expérimentalement définies pour chaque machine par le biais des objets d'analyse comparative (benchmarking objects) (Ch. II, partie. 1). Ces objets servent très bien à caractériser les machines et permettent de définir facilement la fabricabilité des différentes formes et dimensions par une machine donnée.

1.4.3 Coût de fabrication

Le prix horaire d'une machine est un facteur important à prendre en considération lors du choix de la machine puisqu'il influe directement sur le coût final de la pièce. Ce dernier est influencé également par le temps de fabrication qui, pour une machine donnée, résulte de la vitesse d'impression (i.e. la vitesse du déplacement lors l'impression. La vitesse du déplacement d'une forme/d'une couche à l'autre peut être négligée), du style de remplissage, et d'autres paramètres de fabrication. Le coût de fabrication C_{fab} peut être décrit d'une manière simplifiée comme suit [76]:

 C_{fab} = Coût de la conception + Coût de matière + Coût de fabrication + Coûts supplémentaires (la préparation de la machine pour la fabrication, les opérations du post-traitement, coût d'énergie utilisée, etc.).

• Le coût de la conception = Prix horaire de la conception × Temps consacré à la conception / Nombre de pièces ;

• Le coût de fabrication = Coût horaire de la machine × Temps de fabrication ;

• Coût de la matière = Facteur de structure du support × Facteur de perte × Nombre de pièces × Volume de pièces × Prix du matériau (par unité de volume) × Masse volumique ;

Où le facteur de structure du support représente le coût de matière supplémentaire utilisée pour fabriquer le support, il est généralement compris entre 1,1 et 1,5. Quant au facteur de perte, il représente le coût de poudre perdue qui ne peut pas être recyclée après la fabrication. Ce facteur est généralement compris entre 1 est 7 [71].

1.5 Choix de l'orientation

L'orientation des pièces fabriquées avec la FA influe sur trois aspects : la tenue mécanique, l'état de surface, et la nécessité d'intégration du support. Un compromis doit être donc fait entre ces éléments. En effet, comme on a mentionné auparavant, les pièces fabriquées par la FA ont une structure anisotrope. Les propriétés mécaniques dépendent par la suite de l'orientation de la pièce dans la chambre de fabrication (Fig. 28). Tenant compte de l'espace de fabrication limité, le choix de l'orientation peut conduire, dans la plupart des cas, à l'intégration d'un support.

L'intégration du support a un effet majeur sur l'augmentation significative du temps de fabrication ainsi que sur la quantité de matière à utiliser. Notons que pour les procédés à base de poudre, l'intégration du support est automatique puisque la poudre non agglomérée dans une couche sert comme support lors de la déposition de la couche qui suit (le support n'influe donc pas sur le temps d'impression dans ce cas). Cependant, selon la nature de la poudre utilisée, elle peut-être recyclée et réutilisée dans certains cas. En fait, les particules formant la poudre restante après la fabrication subissent des changements physiques lors du processus d'impression, ce qui influencera la qualité de la pièce à en fabriquer. Par la suite, la quantité de poudre à utiliser (pour la pièce et le support) ainsi que son coût bien évidement doivent être pris en compte également lors du choix de l'orientation.

L'intégration du support rend inévitable les opérations du post-traitement, ce qui



Figure 28. Effet de l'orientation des couches sur la tenue mécanique

augmente le temps et le coût de fabrication. Plusieurs procédés de post-traitement peuventêtre appliqués, i.e. l'enlèvement du support (manuellement, mécaniquement, ou par un dissolvant), le grenaillage, le sablage, le post-traitement thermique, etc. [77]. Le choix du procédé du post-traitement dépend essentiellement du type du procédé de fabrication utilisé, mais également de la finition voulue. Le temps consacré pour ces opérations est d'une grande influence le délai de mise en œuvre, ce qui exige d'en faire un choix judicieux.

2. Section 2 : Optimisation des paramètres de fabrication

Une fois le choix de la machine effectué et l'orientation de la pièce dans la chambre de construction définie, on passe à la détermination des paramètres de fabrication permettant d'atteindre les spécifications du CDC en termes de précision dimensionnelle, de qualité de surface, des propriétés mécaniques et de toute autre caractéristique de performance souhaitée. En effet, lors de la FA, plusieurs paramètres (qui varient d'une machine à l'autre) sont mis en jeu. Ces paramètres influent directement sur la qualité des pièces obtenues, ce qui exige une détermination avisée de leurs valeurs. Dans la pratique, le concepteur définit généralement les valeurs des paramètres de fabrication selon son expertise ainsi que selon d'autres facteurs comme le coût et le temps de fabrication. Cependant, ce choix n'est pas toujours optimal et reste subjectif ne garantissant pas l'achèvement de la qualité souhaitée.

Une bonne alternative est de procéder avec une des méthodes d'optimisation. Ceci consiste en une fonction dite «fonction objective», qui décrit l'objectif du processus, i.e. minimiser ou maximiser une caractéristique de performance, en un ensemble de variables d'entrée, dont on cherche la combinaison optimale, et en un ensemble de contraintes pouvant être liées à la configuration du problème et à ses caractéristiques physiques [78]. Plusieurs procédés de la FA ont été le sujet des recherches conduites en vue d'optimiser les propriétés mécaniques, la précision dimensionnelle, l'état de surface, etc., des pièces fabriquées, à titre d'exemple la FDM [79], la SLA [80], le SLM [23], l'EBM [81], le DLD (Direct Laser Deposition) [82], et le 3DP (binder jetting) [83].

Pour ce faire, des méthodes statistiques (i.e. rapport signal sur bruit (S/N), ANOVA (analyse de variance), GRA (Grey Relational analysis), surfaces de réponse (RSM), etc.), et informatiques (i.e. ANN (Réseaux de neurones artificielles), logique floue (Fuzzy logic), algorithme génétique, etc.), ou encore des combinaisons de celles-ci ont été appliquées pour modéliser et optimiser les procédés de fabrication qui sont, bien évidemment, des

systèmes complexes impliquant plusieurs paramètres qui peuvent même être contradictoires.

Le nombre des paramètres de la fonction objective, i.e. les sorties du système à optimiser (nombre des dimensions/des propriétés mécaniques/des états de surface à mesurer), est un facteur critique dans la détermination de la méthode d'optimisation à choisir. Dans le cas d'une seule sortie du système, des outils simples comme le rapport S/N ou l'ANOVA peuvent-être utilisés. Le cas échéant, l'application des méthodes dites de multi-optimisation peut être envisagée, ou, dans le cas des systèmes très complexes, des algorithmes d'apprentissage (machine Learning) peuvent-être développés et utilisés pour la modélisation et l'optimisation. L'algorithme d'optimisation suivi lors de la 2^{ème} section de notre méthodologie est montré sur la figure 29.

2.1. Choix des paramètres contrôlables et leurs niveaux

Avant de procéder à l'optimisation d'un procédé, on doit se poser la question sur les paramètres contrôlables à choisir, i.e. ceux qui sont relatifs au produit ou au processus



Figure 29. Algorithme d'optimisation des paramètres de fabrication

de fabrication, sur lequel on peut facilement agir, et qui sont plus susceptibles d'influencer la caractéristique de performance étudiée. Ce choix est un peu délicat, néanmoins, il peut se faire sur la base des travaux faits sur des cas similaires, ou à partir des recommandations des experts (fabricants, concepteurs, etc.).

2.2. Établissement du plan d'expériences

Un plan d'expérience est une suite d'essais entièrement organisés préalablement de façon à définir l'influence des différents paramètres contrôlables sur les performances du système étudié en un minimum de nombre d'essais et avec un maximum de précision.

Pour établir le plan expérimental, la méthode la plus classique est le plan factoriel qui, bien qu'il donne des résultats très satisfaisants, il a l'inconvénient majeur du grand nombre d'expérimentations à faire qui augmente d'une manière significative avec l'augmentation du nombre des paramètres. Par conséquent, on propose de faire appel aux matrices orthogonales proposées par Taguchi. Les tailles de ces matrices varient en fonctions des paramètres contrôlables à tester et en fonction de leurs niveaux. À titre d'exemple, le tableau 3 présente la matrice orthogonale L₉ qui signifie qu'il y a neuf expérimentations pour optimiser 4 paramètres variant selon 3 niveaux.

Une fois le plan d'expérience est établi selon le nombre des facteurs et leurs niveaux de variation, on peut effectuer les expérimentations selon les combinaisons définies et collecter les mesures de la caractéristique de performance visée.

N° des	Facteurs						
essais	А	В	С	D			
1	1	1	1	1			
2	1	2	2	2			
3	1	3	3	3			
4	2	1	2	3			
5	2	2	3	1			
6	2	3	1	2			
7	3	1	3	2			
8	3	2	1	3			
9	3	3	2	1			

Tableau 3. Matrice orthogonale L9

2.3. Définition des pièces tests

Une fois le plan expérimental établi, on doit choisir la géométrie sur laquelle les tests seront faits. En fait, selon la complexité de la géométrie de la pièce, selon son volume, et selon la performance à tester, plusieurs voies peuvent-être envisagées :

Dans le cas où la caractéristique de performance à optimiser est l'une des propriétés mécaniques, des prototypes pour la totalité de la pièce en question (même si elle a un large volume) doivent être fabriqués. Cependant, dans le cas où on envisage le test de l'effet des paramètres de fabrication sur la déviation dimensionnelle par exemple, on peut se restreindre aux parties les plus exigeantes de la pièce (i.e. les parties où des tolérances sévères sont requises).

Après la fabrication, c'est le tour de l'analyse statistique des résultats obtenus pour pouvoir déterminer la combinaison optimale des niveaux des paramètres permettant l'optimisation de la réponse du système.

2.4. Test de validation

Les résultats obtenus statistiquement ne seront pas valables que lorsqu'ils sont validés par un test de vérification. Ce test consiste en la ré-fabrication de la pièce-test en utilisant la combinaison des paramètres optimale obtenue préalablement. Les caractéristiques optimisées sont mesurées de nouveau pour la nouvelle pièce, et comparées avec les caractéristiques cibles. Si une amélioration dans les valeurs obtenues est constatée, on valide le test et on retient la combinaison des paramètres testés. Le cas échéant, on revient à l'étape de l'optimisation et on essaye de trouver une nouvelle combinaison, et on refait de nouveau le test de validation.

3. Section 3 : Compensation des déviations

Malgré l'application de la combinaison optimale des paramètres pour la fabrication de la pièce en question, la déviation par rapport aux dimensions nominales est inévitable. Notre but est de modéliser cette déviation afin de la prédire et la contrôler. Pour notre méthodologie, on se limitera à la modélisation dans le cas des formes primitives, à savoir, les formes circulaires et les formes carrées.

Comme mentionné dans la revue de littérature (ch. II, partie 1), trois approches sont généralement utilisées pour modéliser la déviation dans les pièces de la FA : (i) la modélisation de l'erreur due à la machine, la modélisation du rétrécissement des formes géométriques, et la modification du fichier du tranchage. Dans notre travail, on choisit de se focaliser sur la compensation du rétrécissement des formes géométriques. La plupart des travaux dans ce sens ont été conduits sur des géométries circulaires (2D et 3D). Ce que nous choisissons c'est d'étudier les formes circulaires et prismatiques à la fois ; pour simplifier la tâche et ne pas introduire plusieurs paramètres, on se contente d'étudier le rétrécissement dans le plan seulement. L'introduction de la déviation selon l'axe Z va

permettre de modéliser le rétrécissement sur tout le modèle 3D, mais ceci étant compliqué, on le laisse pour des prochaines études. L'algorithme suivi pour la modélisation et la compensation est schématisé sur la figure 30.

3.1. Modélisation de la compensation

La première étape avant d'entamer le développement d'un modèle mathématique pour décrire la déviation dans les formes circulaires et carrées est de choisir les coordonnées à utiliser. La figure 31 montre les paramètres liés à la modélisation de la déviation d'un point *P* du contour d'une forme quelconque en utilisant les coordonnées cartésiennes (Fig. 31.a)



Figure 30. Algorithme d'extraction des taux de compensation



Figure 31. Modélisation de la déviation d'un point P en coordonnées cartésiènnes (a) et en coordonnées polaires (b).

et les coordonnées polaires (Fig.31.b). Dans la représentation cartésienne, la déviation du point *P* est décrite par deux paramètres Δx et Δy représentant respectivement la déviation selon l'axe x et selon l'axe y. Cependant, pour la représentation en coordonnées polaires, la déviation d'un point P du contour peut être uniquement par un paramètre Δr qui représente la déviation selon le rayon polaire de la forme en question. On optera donc pour une représentation en coordonnées polaires (θ , r). Pour établir le modèle mathématique de la compensation, on doit différencier dans un premier temps entre :

- La modélisation du rétrécissement Δr , qui représente la déviation entre la dimension nominale et la dimension actuelle/mesurée.
- La modélisation du processus du rétrécissement *f*, qui représente le processus déviation/compensation, de sorte que si on commence par une dimension nominale *r*₀, on se retrouve avec une dimension fabriquée *r*₁ ≠ *r*₀, même après l'application d'une compensation τ(θ).

Dans le système des coordonnées polaires, avec un rayon actuel $(r(\theta, r_0(\theta)))$ et un rayon nominal $r_0(\theta)$, la déviation s'écrit comme étant :

$$\Delta r(\theta, r_0(\theta)) = r(\theta, r_0(\theta)) - r_0(\theta) \tag{1}$$

En appliquant une compensation $\tau(\theta)$, le rayon actuel s'écrira comme $r(\theta, r_0(\theta), \tau(\theta))$,

Alors que le rayon nominal cette fois-ci sera : $r_0(\theta) + \tau(\theta)$

Dans ce cas, on définit notre fonction f définissant le processus du rétrécissement comme suit :

$$f(\theta, r_0(\theta) + \tau(\theta)) = r(\theta, r_0(\theta), \tau(\theta)) - (r_0(\theta) + \tau(\theta))$$
(2)

[Notons que (1) est un cas spécial de (2), dans le cas où $\tau(\theta) = 0$, et que $\Delta r(\theta, r_0(\theta)) = f(\theta, r_0(\theta))$].

Revenons à l'équation (1), et récrivons la déviation dans ce cas :

$$\Delta r(\theta, r_0(\theta), \tau(\theta)) = r(\theta, r_0(\theta), \tau(\theta)) - r_0(\theta)$$
$$\Delta r(\theta, r_0(\theta), \tau(\theta)) = f(\theta, r_0(\theta) + \tau(\theta)) + \tau(\theta)$$
(3)

Pour pouvoir explorer le rétrécissement $\Delta r(\theta, r_0(\theta), \tau(\theta))$, nous faisons appel à l'approximation de Taylor à l'ordre 1 :

$$E(\Delta r(\theta, r_0(\theta), \tau(\theta))|\theta) = E(f(\theta, r_0(\theta) + \tau(\theta))|\theta) + \tau(\theta)$$

= $f(\theta, r_0(\theta)) + f'(\theta, r_0(\theta))\tau(\theta) + \tau(\theta)$ (4)

Dans le cas idéal, une compensation appliquée donne lieu au rayon nominal, autrement dit, cette approximation sera nulle. Dans ce cas, on trouve la valeur optimale de la compensation $\tau^*(\theta)$:

$$\tau^*(\theta) = -\frac{f(\theta, r_0(\theta))}{f'(\theta, r_0(\theta)) + 1}$$
(5)

Ce qui reste à définir c'est l'expression de $f(\theta, r_0(\theta)) = r(\theta, r_0(\theta)) - r_0(\theta)$. Comme $r_0(\theta)$ dépend de la forme de la géométrie à étudier, on doit paramétrer la fonction $r(\theta, r_0(\theta))$.

3.2. Développement du modèle mathématique

Dans le système des coordonnées polaires, et pour modéliser le rayon polaire des formes géométriques considérées, à savoir, les formes circulaires et carrées, deux voies sont possibles :

Développer un modèle mathématique modélisant la déviation sur les deux types des géométries. Dans ce cas, la bonne alternative est d'approximer r(θ, r₀(θ)) en faisant appel à la série de Fourier, définie comme suit :

$$f_N(\theta) = a_0 + \sum_{k=1}^{N} [a_k \cos(k\theta) + b_k \sin(k\theta)] + \epsilon$$
(6)

Les coefficients a_0 , a_k , et b_k sont des paramètres qui contrôlent la forme du contour réel avec des déviations. Ils peuvent être estimés à partir des mesures faites sur le contour d'une pièce fabriquée. Avec un ordre N raisonnable, la représentation des formes circulaires atteint une bonne précision d'approximation. Cependant, l'expansion de Fourier rencontre une difficulté lors de l'ajustement du modèle pour les formes polygonales, car il est nécessaire d'avoir un ordre N assez élevé pour saisir la transition pointue aux sommets
du polygone [44]. Ceci présente deux grands inconvénients : (i) une valeur de N très grande mène à l'obtention d'un modèle sur-ajusté ce qui donne une mauvaise prédictibilité, et (ii) la possibilité de ne pas avoir une cohérence de déviation tout au long du contour, spécifiquement aux sommets où des coins arrondis peuvent avoir lieu.

• Spécifier un modèle pour chaque type de géométrie.

Avec cette approche, chaque type de géométrie est associé à un modèle qui le décrit correctement. On privilège l'utilisation de cette approche-là dans notre travail.

Modèle de déviation des formes circulaires

Lors de la fabrication d'une forme circulaire, son contour subira une déformation qui le transformera probablement à une forme elliptique. Par conséquent, il est judicieux d'assimiler le rayon du contour déformé $r(\theta, r_0(\theta))$ au rayon polaire d'une ellipse. De ce fait, l'équation de du rayon à prédire $r(\theta, r_0(\theta))$ peut-être écrite comme suit :

$$r(\theta, r_0(\theta)) = r_p(\theta) = \frac{a \times b}{\sqrt{a^2 \sin^2(\theta) + b^2 \cos^2(\theta)}}$$
(7)

Où a et b sont respectivement le demi-grand axe et le demi-petit axe de l'ellipse (Fig. 32.a).

Modèle de déviation des formes carrées

Les formes prismatiques (carré, rectangle), vont subir, bien évidement comme les autres géométries, des déviations qui rendront un carré comme un rectangle, ou transformeront les deux en des rectangles avec des sommets arrondis. On modélisera donc, en coordonnées polaires, le rayon polaire d'un rectangle comme suit :

$$f(\theta, r_0(\theta)) = r_p(\theta) = \sqrt{\frac{b^2 \cos^2(\theta) + a^2 \sin^2(\theta) - |b^2 \cos^2(\theta) - a^2 \sin^2(\theta)|}{2\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)}}$$
(8)

Où a et b sont la longueur et la largeur du rectangle.

Puisque le carré est un cas spécial du rectangle, on peut tirer à partir de l'équation cidessus celle décrivant le rayon polaire d'un carré définit comme étant $r = \frac{a}{\sqrt{2}}$. Elle s'écrira comme suit :

$$f(\theta, r_0(\theta)) = r_p(\theta) = \frac{r}{2} \times \sqrt{\frac{1 - \sqrt{\cos^2(2\theta)}}{\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)}}$$
(9)

Où *a* est le côté du carré en question (Fig. 32.b).



Figure 32. Rayons polaires des formes déviées, (a) forme circulaire, (b) forme prismatique

Les valeurs des paramètres a et b figurant dans les deux modèles doivent-être définies en fonction du processus de fabrication engendrant la déviation. La méthode de détermination de leurs valeurs est le sujet du prochain paragraphe.

3.3. Paramétrage des modèles mathématiques

Le développement d'un modèle mathématique pour la modélisation de la déviation n'est pas suffisant tant que les paramètres qui le contrôlent ne sont pas définis. Ces paramètres sont à dériver à partir du comportement des formes à imprimer lors de la fabrication par l'un des procédés de la FA. Ce comportement varie d'un procédé à l'autre, puisque la technique de chaque procédé et ses caractéristiques sont différentes et influent directement sur les caractéristiques des pièces imprimées. L'étape actuelle est la détermination de ces paramètres qui contrôlent la forme du contour réel avec des déviations. Ils peuvent être estimés à partir du data des mesures effectuées sur des pièces fabriquées grâce à une courbe d'ajustement (curve fitting) qui doit ajuster parfaitement les points extraits des contours expérimentalement. Pour ceci, on passe par l'application «Curve fitting» intégrée dans Matlab, ou par le codage direct dans la fenêtre des commandes en utilisant des fonctions qui auront pour objectif la minimisation de l'écart entre les points expérimentalement enregistrés et les points obtenus par la courbe d'ajustement. La fonction à minimiser donc peut être représentée par la somme des carrés des écarts donnée par l'équation (10)

$$S = \sum_{i}^{N} |r_p(\theta_i) - r_m(\theta_i)|^2$$
(10)

Où r_p est le rayon à prédire, et r_m est le rayon mesuré à chaque angle θ_i .

Si on note ζ l'ensemble des paramètres du modèle, l'ensemble des paramètres estimés $\hat{\zeta}$ sera exprimé comme étant :

$$\hat{\zeta} = \operatorname{argmin}_{\zeta}(S) \tag{11}$$

Où *argmin* (l'argument minimum d'une fonction) représente la valeur de la variable pour laquelle la valeur de la fonction concernée (i.e. la fonction *S* présentée par l'équation (10) dans notre cas) atteint son minimum.

Une fois que ces paramètres sont trouvés, on les substitue dans l'équation de la compensation (5) pour en tirer les taux de compensation, i.e. les valeurs à ajouter à chaque rayon r_p (défini avec un angle θ_i)) pour corriger la déviation sur tout le contour de la forme en question. L'étape qui suit est la modification du fichier CAO initial en introduisant les taux de compensations trouvées, et la ré-fabrication de la pièce-test. Il ne reste à ce stade que vérifier les caractéristiques de la pièce-test fabriquée avec les exigences du CDC et valider, s'ils correspondent bien, la méthode suivie et générer le fichier FAO de la pièce en question. Le cas contraire où la déviation excède encore les exigences du CDC, une réestimation des paramètres des modèles peut être envisagée, et une réplication de la méthode décrite ci-dessus se juge nécessaire.

Partie 3 : Capitalisation des connaissances

L'application des étapes successives la méthodologie et la génération, enfin, du fichier FAO, enrichira l'expérience du concepteur en termes des choix faits du matériau, de machine, d'orientation, et enrichira également son expertise en termes de compréhension des caractéristiques de chaque procédé et leurs effets sur la qualité des pièces obtenues, mais surtout les méthodes de contrôle des caractéristiques de performances souhaitées. Dans ce sens-là, on parle de démarches de capitalisation des connaissances. Cette notion peut être définie comme étant l'extraction, la formalisation, et la sauvegarde des connaissances acquises lors de la pratique d'une activité [84]. Ceci part de l'hypothèse sur laquelle se fonde le domaine de la gestion des savoirs, affirmant que toute expérience ou connaissance peut être réfléchie, enrichie, documentée sous des supports adaptés et échangée comme des savoirs que d'autres peuvent s'approprier [85].

Il découle de ces définitions que l'activité de conception/fabrication doit-être également valorisée et sauvegardée pour enrichir l'expertise du concepteur/fabricant et devenir une référence lors des prochaines activités. Dans cette logique, la pratique de notre méthodologie proposée doit faire l'objet d'une démarche de capitalisation pour servir dans d'autres cas et enrichir l'expertise du concepteur pour la FA ainsi du fabricant utilisant les procédés de cette technologie.

Plusieurs documents peuvent être présentés à l'issue d'une démarche de capitalisation [86], comme les fiches d'information, les fiches d'expériences, les lignes directrices, etc., qui présentent, chacun d'eux, un type d'information spécifique à transmettre.

Pour notre travail, et après l'application de la méthodologie sur trois différents cas d'études (chapitre IV), on présentera une fiche synthèse capitalisant les savoir-faire développés au cours de son application en suivant la méthodologie de capitalisation fournie par [87] (Fig. 33). Cette méthodologie est organisée en 4 étapes :

1. La création du cadre de référence

La première étape après la définition de l'objet de capitalisation est la création d'un cadre de référence. Ceci consiste en la collection de toute information (connaissances, actions, des règles de fonctionnent, méthodologies, etc.) utilisée lors du développement de l'objet de capitalisation. La collecte d'information à travers une démarche chronologique en invoquant la succession des faits et des étapes préalablement suivies lors du développement de l'objet de capitalisation serve bien dans ce sens, puisqu'elle permet d'identifier les actions et leurs résultats proprement.

2. Repérage des points d'inflexions

Le cadre de référence contenant toute sorte d'information relative au développement de l'objet de capitalisation doit être restreint aux éléments pertinents uniquement en repérant des points d'inflexions, i.e. les points qui ont permis l'évolution significative de l'action. Ceci empêche de se noyer dans le flot d'information et permet de centrer le travail de capitalisation.



Figure 33. Méthodologie de capitalisation

3. Extraction et classification des savoir-faire

Les savoir-faire repérés vont subir une classification à cette étape-là. On distingue donc entre les savoir-faire *transposables* à d'autres situations, et ceux *spécifiques* à des cas ou à des acteurs de l'action. On distingue ensuite entre les savoirs *empruntés*, classiques, connus, ou liés à d'autres sources, et ceux *endogènes*, générés et créés par l'action objet de capitalisation. Ceci permet de mettre l'accent sur les savoirs transposables endogènes qui ont le plus d'importance car ils reflètent les valeurs ajoutées par l'action réalisée et sa capacité à créer et transposer des savoirs applicables à d'autres cas par d'autres acteurs.

4. Modélisation

Cette étape consiste à présenter les savoirs et les savoir-faire capitalisés dans une forme opérationnelle exploitable pour permettre leur réutilisation, et se donner également les moyens de diffusion à travers des supports, des modes d'usage, des notices, ou même à travers des logiciels dédiés à la modélisation et la gestion des connaissances [84] pour rendre le savoir développé accessible et réutilisable dans les future actions.

Conclusion

Ce chapitre a été consacré à la présentation de la méthodologie proposée ayant pour objectif la prise en compte des interactions des caractéristiques produit/procédé le plus tôt possible dans la phase de conception. Après la présentation du schéma général de la méthodologie proposée, nous avons procédé à l'explication détaillée de chaque étape. La méthodologie composée de 3 sections vise la génération d'un fichier FAO prêt à la fabrication. Le point de départ est les exigences du CDC auxquelles on revient souvent pour s'assurer de les respecter correctement et valider les décisions prises. La première section traite respectivement le choix des matériaux possibles, la présélection des machines selon les matériaux présélectionnés ainsi que le volume englobant de la pièce, la génération de la géométrie de cette dernière en se basant sur les spécifications et les exigences du CDC, et le choix final de la machine et de l'orientation dans la chambre de construction.

La deuxième section consiste en l'optimisation des paramètres de fabrication grâce aux méthodes de multi-optimisation pour déterminer la configuration optimale de la machine choisie, nécessaire pour atteindre les caractéristiques de performance souhaitées. Quant à la troisième et la dernière section, on y traite la modélisation de la déviation dans deux géométries primitives, à savoir, les formes circulaires et les formes carrées, ensuite, on procède à l'extraction des taux de compensation nécessaires pour modifier le fichier initial CAO, et générer enfin, en suivant la chaine numérique usuelle de la FA, le fichier FAO.

La méthodologie actuelle présente des réponses pour les problématiques relevées auparavant dans ce rapport et a plusieurs avantages vis-à-vis les méthodologies que nous avons à priori exposé. Tout d'abord, la méthodologie est générique, pouvant être appliquée sur n'importe quel procédé de FA sans restriction. Deuxièmement, elle permet la détermination judicieuse des paramètres de fabrication permettant d'atteindre les objectifs du CDC en termes des caractéristiques de performance souhaitées, au lieu de les déterminer hasardement par le concepteur ou le fabricant, et dernièrement, la méthodologie permet le contrôle de la déviation dimensionnelle grâce aux modèles développés, permettant, dans un premier temps, d'évaluer la déviation survenue, et dans un deuxième temps, de la compenser.

Le chapitre suivant sera l'occasion de valider la méthodologie section par section expérimentalement. Pour ce faire, trois cas d'études seront présentés ; le 1^{er} portera sur la reconception d'une pièce industrielle du secteur aéronautique ainsi que le choix du couple matériau/machine associé. Quant au 2^{ème} cas d'étude, il concernera l'optimisation des paramètres de fabrication pour diminuer la déviation dimensionnelle grâce à l'application de la méthode de multi-optimisation Grey-Taguchi, alors que le 3^{ème} cas d'étude aura comme objectif la validation des modèles mathématiques proposés pour les formes primitives choisies, à savoir les formes circulaires et les formes carrées, en vue d'évaluer et de compenser la déviation.

Chapitre III : Cas d'études et validation de la méthodologie

Le présent chapitre a pour finalité la validation expérimentale de la méthodologie proposée, section par section, via trois cas d'études. Ainsi, le 1^{er} cas d'étude présentera la démarche du choix du couple matériau/machine pour la reconception d'une pièce industrielle pour l'adapter à la fabrication par la FA, tandis que le 2^{ème} cas d'étude aura comme objectif l'application d'une méthode de multi-optimisation pour l'investigation des paramètres de fabrication optimaux permettant de minimiser la déviation dimensionnelle. La modélisation mathématique de la déviation ainsi que la modification de la CAO initiale grâce aux taux de compensation extraits seront le sujet du 3^{ème} cas d'étude.

Partie 1 : 1^{er} cas d'étude : définition du couple matériau / procédé et génération de géométrie

Ce premier cas d'étude sera consacré pour valider la première section de notre méthodologie, à savoir la détermination du couple matériau/machine, et la génération de la géométrie. Pour ce faire, nous avons choisi la pièce montrée sur la figure 34. C'est une grille de perçage servant à positionner un outil de fraisage. Fabriquée à partir d'un brut d'aluminium (AlCu4MgSi ou AlZn55MgCu) avec un procédé d'enlèvement de matière. La livraison de cette pièce prend environ 12 semaines, ce qui peut influencer terriblement la chaine de production si sa réparation se juge impossible après un état défectueux ou s'il y avait un impact de fatigue sur sa qualité. De plus son lourd poids pose des problèmes d'ergonomie pour les opérateurs. On veut par la suite la reconcevoir pour l'adapter à la FA et profiter des opportunités qu'offrent ses procédés particulièrement pour la fabrication des formes complexes et la réduction de masse des pièces produites. Les spécifications du



Figure 34. Grille de perçage

CDC sont fournies ci-dessous. (La mise en plan de la pièce est en annexe A).

- Des coussinets de guidage de l'outil de perçage doivent être insérés au niveau des perçages H1, H2 et H3 ;
- Les vis de verrouillage standard fournis par l'entreprise doivent être utilisés ;
- La profondeur des perçages doit être de 20 mm ;
- Pour les vis de verrouillage, la pièce doit résister à un effort axial de 1200 N et à un effort radial de 2500 N ;
- La pièce doit supporter un effort radial de 370 N pour les perçages H1, H2 et H3,
- La pièce doit résister à un effort axial de 5000 N pour les perçages H2, H3 et H4 ;
- Les déformations et les efforts internes de la pièce ne doivent pas dépasser respectivement 0,0931 mm et 1,29.10⁸ N/m².

1. Définition du couple matériau / machine

La FA a un nombre restreint de matériaux possibles à utiliser en comparaison avec les procédés conventionnels. Par la suite, on doit chercher un matériau utilisé dans la FA qui a les mêmes propriétés mécaniques que celui avec lequel la pièce est fabriquée premièrement.



Concernant la grille de perçage, elle est fabriquée avec l'enlèvement de matière à partir des alliages d'aluminium AlCu4MgSi ou AlZn55MgCu. Une recherche sur les matériaux disponibles pour la FA nous montre que la poudre métallique d'alliage d'aluminium AlSi10Mg est bien utilisée dans les procédés SLM et DLMS pour fabriquer des pièces du secteur aéronautique exigeant des pièces légères et denses pour supporter les efforts appliqués. Ce choix sera validé une fois testé par une étude statique sur la géométrie générée.

2. Génération de la géométrie

2.1 Génération de la géométrie initiale

Pour la réalisation de la maquette numérique, nous avons choisi de travailler avec Autodesk Fusion 360. Ce logiciel présente plusieurs avantages pour le concepteur visant le



Figure 35. La géométrie initiale générée

design des pièces fabriquées en FA puisqu'il permet la modélisation solide, paramétrique, et de maillage, et offre des outils de sculpture permettant la réalisation des formes très complexes. Nous commençons par le dessin de la mise en plan de la pièce fourni en annexe A. Selon le CDC, *les vis de verrouillage standard fournis par l'entreprise doivent être utilisés, et La profondeur des perçages doit être de 20mm.* Sauf ceci, aucune autre exigence n'est citée.

On génère donc la géométrie présentée par la figure 35 (ressemblant à celle actuellement utilisée). Le volume englobant de la pièce est de $180 \times 152 \times 20 \text{ mm}^3$. La présélection des machines se fera donc selon ce critère ainsi que celui du matériau choisi, i.e. AlSi10Mg.

2.2 Etude statique

Une fois la géométrie initiale générée, on applique par la suite le matériau choisi, i.e. AlSi10Mg, à partir de la bibliothèque des matériaux fournie par le logiciel (dans notre cas, le logiciel Fusion 360), ainsi que les contraintes et les forces appliquées sur les vis et les quatre trous de perçage comme indiqué par le CDC. On choisit également la taille du maillage du modèle : un maillage trop petit permettra une plus grande précision, cependant, il augmentera



significativement le temps du calcul. On choisit par la suite, pour notre cas, de générer un maillage de taille 2mm. Une analyse statique réussite, selon le CDC fourni, est celle où les déformations et les efforts internes de la pièce ne dépassent pas respectivement 0,0931 mm et 1,29.108 N/m². Les résultats de l'étude statique sont montrés sur les figures 36, 37, et 38, montrant respectivement le facteur de sécurité de la pièce, les contraintes de Von Mises en MPa et les déplacements internes en mm.

D'après la figure 36, le facteur de sécurité calculé pour la pièce en question est de 1,63, très suffisant pour les pièces utilisées en aéronautique où le facteur de sécurité généralement recommandé est de 1,1 à 1,5. Concernant les déplacements internes (Fig. 37), ils ont une valeur de 0,0697 mm, inférieure à celle imposée par le CDC, i.e. 0,0931mm. Quant aux contraintes de Von Mises, la limite élastique du matériau choisi est 240 MPa. La contrainte admissible pour le design actuel est donc:

Contrainte admissible = limite élastique/facteur de sécurité =147 MPa



Figure 36. Le facteur de sécurité calculé pour l'analyse statique actuelle



Figure 38. Les déplacements internes dans la pièce

La valeur exigée par le CDC, i.e. 129MPa, est par la suite incluse dans la marge des contraintes admissibles. Les critères d'analyses actuels ainsi que les exigences imposées par le CDC sont bien respectés. On valide par conséquent le choix du matériau pour notre pièce.

2.3 Optimisation topologique

Comme mentionné auparavant dans ce rapport, l'optimisation topologique sert à réduire la masse de la pièce, minimiser le temps de fabrication ainsi que la quantité de matière nécessaire pour sa réalisation, et réduire par la suite le coût de fabrication.

Sous Fusion 360, on procède à l'optimisation topologique de la géométrie initiale que nous avons validée dans le paragraphe précèdent. Une option qu'offre Fusion 360 est la possibilité de garder des



régions de la pièce où on ne veut pas enlever de la matière. Ceci permet de ne pas réduire les volumes fonctionnels et, sur la base de l'analyse faite auparavant, de garder la matière dans les régions les plus sollicitées. On choisit pour notre cas, de garder les volumes fonctionnels autour des quatre perçages, ainsi qu'autour des quatre vis de fixation comme montré (en couleur vert) sur la figure 39.



Figure 39. Régions où la matière sera préservée (en vert) avant l'optimisation topologique



Figure 40. Optimisation topologique : pièce optimisée à 40% de masse initiale.

Les autres données nécessaires pour procéder à l'optimisation, à savoir, les forces appliquées, le matériau, et la taille du maillage resterons pareilles qu'auparavant. On exécute donc l'optimisation avec une objective de réduction de masse par 40%. Cette valeur est proposée aléatoirement et n'affectera pas le calcul, puisque le logiciel permet par la suite de balayer toutes les régions où il est possible d'enlever de la matière selon les forces appliquées (sans avoir à exécuter manuellement les itérations successives), et c'est au concepteur de définir à quel point il veut réduire la masse de la pièce selon les recommandations du logiciel tout en résistant aux chargements appliqués et en gardant la continuité de la matière. Le résultat de l'optimisation topologique avec une réduction de 40% de masse est indiqué sur la figure 40.

Sur cette figure, on remarque que les bords de la pièce optimisée sont en vert, ce qui signifie que la pièce résistera bien aux charges appliquées. Cependant, on propose d'ajouter de la matière pour s'éloigner des zones sollicitées autour des perçages (zones en rouge) et garantir une bonne résistance. Depuis la barre à droite représentant les valeurs d'objectifs de la réduction de masse, on choisit de s'arrêter à une valeur de 42%. Ainsi, on est déjà loin de la zone verte, ce qui signifie que la matière peut être enlevée des zones indiquées sans affecter la résistance de la pièce aux chargements appliqués (Fig. 41).

Un solide issu de l'optimisation topologique n'est pas directement fabricable. Des traitements en termes surtout du lissage de maillage doit être faits. Ces opérations consommatrices du temps peuvent être évitées dans Fusion 360 en transférant le solide optimisé à l'espace de conception.



Figure 41. Optimisation topologique : pièce optimisée à 42% de masse initiale

De cette façon, on conçoit facilement la nouvelle géométrie sur la base de celle optimisée, comme montre la figure 42.

L'étape qui suit est la vérification du solide généré par l'optimisation topologique, i.e. vérifier si le solide généré supporte les chargements appliqués et respecte proprement les exigences du CDC. On procède par une analyse statique. Selon le CDC, la pièce doit résister à des efforts de 129MPa, et doit y avoir des déplacements internes ne dépassant pas 0,0931 mm, pareillement à la pièce réalisée par l'enlèvement de matière sur un brut d'aluminium.

D'après les figures 43 et 44 représentants respectivement les contraintes de Von mises et les déplacements internes dans le solide optimisé, on remarque que la valeur maximale des contraintes de Von Mises enregistrées est de 129.6 MPa, alors que les



Figure 42. Les géométries initiale et optimisée superposées (a) ; le solide généré (b)

déplacements sont de 0,0611mm. Les exigences citées par le CDC sont par la suite respectées et l'analyse de la géométrie optimisée est donc validée. Par conséquent, on peut confirmer la bonne génération de la géométrie voulue ainsi que le choix du matériau compatible permettant de respecter les exigences du CDC, en suivant les étapes de la première section de la méthodologie proposée.



Figure 43. Les contraintes de Von Mises dans le solide optimisé



Figure 44. Les déplacements internes dans le solide optimisé

Subséquemment, le fichier STL peut être généré directement à partir de Fusion 360 avant de le préparer pour l'opération de tranchage. A cette étape-là, nous devons définir la machine sur laquelle nous fabriquerons notre pièce.

3. Choix du couple machine / orientation

1.1 L'orientation

Le choix de l'orientation d'une pièce dans la chambre de construction dépend, comme discuté auparavant dans ce rapport de plusieurs facteurs comme la forme de la pièce, et le volume de construction, et elle influence à son tour plusieurs



aspects de la pièce finale, à savoir les propriétés mécaniques, l'état de surface, la quantité de matière à consommer pour le support, etc. Le but de cette étape est donc de trouver un compromis entre tous ces éléments.

Pour notre cas d'étude, la pièce sera fabriquée avec le procédé SLM ou DLMS, qui sont des procédés à lit de poudre, i.e. la poudre non agglomérée dans chaque couche servira comme support pour la couche qui suit sauf dans le cas des structures lourdes où des supports métalliques se jugeront nécessaires pour les supporter. La pièce en question peut se mettre en 2 positions basiques (Fig. 45). Le positionnement horizontal (Fig. 45a) ne nécessitera pas de support au contraire de celui vertical (Fig. 45b). Ceci signifie que la matière nécessaire pour le support sera minime, et que les opérations de post-traitement se restreindront à l'évacuation de la poudre et la finition des surfaces fonctionnelles, i.e. les surfaces intérieures des perçages. On privilège donc cette orientation. Ce choix implique que la chambre de construction de la machine à choisir doit permettre l'inclusion du total volume de la pièce, i.e. $180 \times 152 \times 20$ mm³.



Figure 45. Les deux orientations basiques de la pièce, (a) horizontale, (b) verticale

Fournisseurs	Nom de machine	Volume de construction (mm ³)	Diamètre du faisceau (µm)	Puissance du laser (W)
	EOS M 400	$400\times400\times400$	90	1kW
EOS	M 300-4	$300\times 300\times 400$	100	4 ×400
	EOS M 290	$250\times250\times325$	100	400
Renishaw	AM 400	$250\times250\times300$	70	400
Trumpf	TruPrint 1000	$100 \times 100 \text{ (R} \times \text{L)}$	55	2×200
	TruPrint 2000	$200 \times 200 \text{ (R} \times \text{L)}$	55	2×300
SLM	SLM 125	$125\times125\times125$	70 - 100	400
solutions	SLM 280 2.0	$280\times280\times365$	80 - 115	$2 \times 400 - 700$
DMG MORI	LASERTEC 12	$125\times125\times200$	35	200
	LASERTEC 30	$300 \times 300 \times 300$	70	600

Tableau 4. Liste des machines de FA métalliques utilisant l'alliage d'aluminium

1.1 Choix de machine

Les machines destinées à la FA métalliques sont nombreuses et disponibles avec des volumes assez grands. Cependant, plusieurs critères autres que le volume de construction doivent être pris en compte, notamment, la possibilité d'utilisation du matériau sélectionné, le coût, la résolution, la vitesse de fabrication, la nature des opérations du post-traitement, le temps du post-traitement, la possibilité du recyclage de la poudre, etc.

1.2.1. Volume de construction

Les machines destinées à la fabrication par la poudre métallique ne traitent pas toutes les mêmes types de poudre. Pour les alliages d'aluminium, les procédés utilisés sont le SLM et le DLMS comme mentionné auparavant dans cette partie. Le tableau 4 présente une liste des machines commercialisées par les grandes sociétés travaillant dans ce domaine, utilisant ces procédés. D'après ce tableau (ou généralement d'après la liste disponible chez le concepteur qui peut être plus détaillée que celle-ci), on peut sélectionner la machine qui permettra de contenir la totalité de la pièce voulue sans avoir à laisser un grand volume non utilisable (car une machine avec un volume plus grand aura automatiquement un coût plus élevé).

1.2.3. Consommation d'énergie

Un facteur important à tenir en compte lors de la FA particulièrement par les procédés métalliques est la consommation d'énergie. En fait, le laser utilisé dans ces procédés pour fusionner les particules de la poudre influence la structure la pièce résultante : plus l'intensité du laser est grande, plus la fusion sera totale et la pièce aura une

structure plus dense. Cependant, la grande intensité du laser et son application continue tout au long de la construction des couches formant la pièce conduira à la consommation d'une quantité importante de l'énergie, qui s'ajoutera à celle nécessaire au fonctionnement de la machine.

1.2.4. Le coût

Le coût de fabrication est un facteur crucial dans le choix de la machine à utiliser car il influence directement sur le coût unitaire des pièces. Comme mentionné auparavant (ch. III, partie 2), le coût de construction (qui constitue seulement une partie du coût total de fabrication) se calcule à partir du coût horaire de la machine et le temps consacré à la fabrication. Un compromis doit être donc fait pour choisir la machine la plus adéquate (en terme du volume, de précision, etc.) avec un coût s'inscrivant dans les limites posées par le CDC.

1.2 Application au cas d'étude

L'orientation choisie est celle présentée par la figure 46.a. Par la suite, on cherchera dans la liste des machines établie (tableau 4) la/les machines permettant de contenir la totalité de la pièce, sans pour autant être trop large pour ne pas augmenter le coût. Le volume de notre solide est de $180 \times 152 \times 20 \text{ mm}^3$, ce qui signifie que les machines possibles sont EOS M290, AM 400, TruPrint 2000, et SLM 280 2.0.

Le critère qui s'applique par la suite est la résolution : selon ce critère, on retient deux machines (d'après les 3 sélectionnées auparavant) : AM 400 et TruPrint 2000, qui ont un diamètre du faisceau de 70 µm et 55 µm respectivement.

La puissance du laser diffère entre les deux machines : un faisceau de 400 W pour AM 400 et deux faisceaux de 300 W pour TruPrint 2000, ce qui signifie une différence de 200 W à chaque projection, cumulée tout au long de fabrication de la pièce, impliquant une grande consommation d'énergie pour la machine TruPrint 2000. En revanche, la haute puissance du laser résulte en une structure plus dense. Tenant compte de ces facteurs-là, on choisit la machine TruPrint 2000 qui permettra une précision plus grande avec un diamètre de faisceau de 55 μ m, et aboutira à une pièce plus dense. Ce choix est à réviser une fois qu'on obtiendra les informations sur le coût horaire de chaque machine, car il peut être également un facteur décisif dans le choix final de la machine à utiliser pour la fabrication de notre pièce.

Partie 2 : 2^{ème} cas d'étude : optimisation des caractéristiques de performance

Dans cette partie, l'optimisation des caractéristiques de performance en termes de la précision dimensionnelle sera abordée. L'idée est de chercher les paramètres de fabrication « optimaux » permettant la minimisation de la déviation entre les dimensions nominales et les côtes fabriqués. Pour se faire, et comme indiqué sur le schéma de la méthodologie, on choisira une géométrie à fabriquer par un procédé de FA, et, à travers un plan expérimental définissant les paramètres de fabrication choisis ainsi que leurs niveaux, on testera la déviation dimensionnelle par rapport au nominal pour toutes les dimensions incluses dans la pièce fabriquée. Les détails de la démarche suivie seront présentés dans ce qui suit. Notons ici qu'on suppose que la déviation résultante n'est engendrée que par les paramètres de fabrication. On néglige donc l'effet possible du format STL sur la déviation, ainsi que celui des vibrations de la machine, de l'atmosphère dans la chambre de construction, etc., pour faciliter l'étude.

1. Définition de la pièce-test et établissement du plan expérimental

1.1 Choix de la géométrie

dont





Figure 46. Dessin technique de la pièce (a) et désignation des dimensions à mesurées (b)

les dimensions sont $65 \times 65 \times 10$

Nous avons choisi une pièce prismatique contenant des trous carrés et cylindriques de

 mm^3 .



Figure 47. La machine Zortrax / Orientation et positionnement de la pièce sur la plateforme / les densités de remplissage considérées

La pièce suggérée permettra de mesurer la hauteur Z, les dimensions externes (L et l), internes $(L_1, l_1, L_2, et l_2)$, et les diamètres $(D_1 et D_2)$ (Fig. 46.b). Par conséquent, trois types de précision dimensionnelle seront étudiés : selon l'axe z, selon les diamètres, et dans le plan XY.

1.2 Matériau et équipement

La fabrication de la pièce choisie a été réalisée par le procédé de la FDM, puisque c'était le procédé disponible au moment de la réalisation de cette étude. Les expérimentations ont été réalisées avec un Zortrax m200 (Fig. 47). Il s'agit d'une imprimante 3D composée d'une plate-forme de construction à translation verticale le long de l'axe z, d'une hauteur maximale de 180 mm, d'une surface de construction de 200×200 mm, ainsi qu'une buse à translation composée le long des axes x/y. Le mouvement des axes x/y est assuré par un système poulie-courroie avec un moteur pas à pas, tandis que la translation verticale le long de l'axe z est entraînée par une vis trapézoïdale. Pour le système d'extrusion, un filament de 1,75mm de diamètre est introduit dans une buse de diamètre 0,4 mm par l'intermédiaire d'un moteur pas à pas. Le milieu (M) de la plate-forme de construction a été choisi pour positionner la pièce lors de la fabrication. Le contrôle de l'imprimante est assuré via une connexion USB au PC ou avec une carte SD contenant le G-code de la pièce. La CAO de la pièce a été modélisée sous CATIA V5, exportée sous forme de fichier STL et envoyée au logiciel Z-Suite, où les paramètres de fabrication et leurs niveaux seront choisis.

Pour le matériau, nous avons choisi deux types de polymères : l'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) et l'ULTRAT, un matériau spécifique développé par la société Zortrax, constructeur de la machine utilisée dans notre étude. L'idée est de mener une étude comparative entre les performances atteintes par les deux matériaux en termes de la précision dimensionnelle. Ceci nous aidera également à comprendre comment le choix du matériau peut affecter les performances d'une pièce fabriquée sur la même machine et avec les mêmes paramètres.

1.3 Plan expérimental

Lors de la fabrication par un procédé de la FA, plusieurs paramètres entrent en jeu, c'est pourquoi il est essentiel de faire le choix entre ceux qui doivent être fixés à une valeur donnée, et ceux qu'on doit contrôler et faire varier. Ce choix se fait, dans la plupart des cas, selon l'expertise du fabricant ou selon les recommandations des experts. Dans la littérature, plusieurs travaux ont



été faits sur la déviation dimensionnelle en choisissant de fixer/varier différents paramètres [89]. Cependant, on doit garder dans l'esprit que les machines de la FA ne donnent pas toutes l'accès à la modification de ces paramètres, surtout pour les machines industrielles qui ont un système fermé permettant de ne modifier qu'un nombre limité des paramètres.

Pour notre cas, nous avons choisi trois facteurs contrôlables, à savoir :

- L'épaisseur de couche (A) : l'épaisseur de couche entraîne des déviations surtout au niveau de la hauteur des pièces à cause de l'approximation de la hauteur nominale par la déposition successives des couches [90];

- L'orientation de la pièce (B) : la position de la pièce dans la chambre de fabrication influe également sur la déviation dimensionnelle, car il découle de la précision de déplacement de la buse selon chaque axe. Des travaux ont tenté d'investiguer cet effet ([91], [92]) et ont montré que les parois verticales subissent les plus petits écarts, et que ces derniers augmentent lors d'utilisation d'un angle inférieur ou supérieur à 90° [91]. L'orientation dans la chambre de construction influe également sur la tenue mécanique comme mentionné auparavant dans ce rapport.

Facteurs	Unités	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
A : épaisseur de couche	(mm)	0,09	0,19	0,29
B : densité de remplissage	(%)	90	60	30
C : orientation	(°)	0	45	90

Facteurs fixes	Valeurs	Facteurs fixes	Valeurs
Température de la buse	280ºC /ABS 265ºC/ULTRAT	Style de remplissage	Hexagonal
Température du plateau	105° C	Style de remplissage pour les couches Top/bas	Rectiligne
Diamètre de la buse	0,4 mm	Vitesse de remplissage	100 mm/s
Nombre des contours	3	Vitesse de remplissage solide	100 mm/s

Tableau 5. Les facteurs contrôlables et leurs niveaux

Tableau 6. Valeurs des facteurs fixes

- La densité du remplissage (C) : la densité du remplissage n'influe pas directement sur la déviation dimensionnelle, mais elle est un facteur important à tenir en compte lors de l'étude de la tenue mécanique.

Ce choix des paramètres a été fait premièrement selon les possibilités qu'offre la machine utilisée ainsi que pour étudier simultanément la précision dimensionnelle et la tenue mécanique. Chacun des paramètres choisis prend trois niveaux, comme présenté dans le tableau 5. Les autres paramètres dans le logiciel Z-Suite ont été fixés comme indiqué de même sur le tableau 6.

L'établissement du plan expérimental peut se faire avec plusieurs méthodes, parmi lesquelles nous avons choisi les matrices orthogonales de Taguchi (OA). Ces matrices ont l'avantage de réduire le nombre d'essais à exécuter et réduire, par la suite, le temps et le coût de fabrication. Le nombre des paramètres choisis ainsi que le nombre de leurs niveaux exigent le choix de la matrice L_9 (3⁴) (Tableau 7).

Le nombre des paramètres choisis ainsi que le nombre de leurs niveaux exigent le choix de la matrice L9 (3⁴) (Tableau 7). Par conséquent, 9 essais seront exécutés pour fabriquer 9 spécimens pour chaque matériau. Les mesures des différentes dimensions des pièces fabriquées ont été effectuées à l'aide d'un pied à coulisse numérique avec un degré de précision de 0,001mm.

Pour pouvoir discerner la déviation qui a lieu et pouvoir comparer les dimensions mesurées sur les pièces des deux matériaux, on utilise le pourcentage de changement en longueur % Δ L qu'on calcule pour chaque dimension à l'aide de l'équation (12) :

$$\%\Delta L = \frac{|L - L_{CAD}|}{L_{CAD}} \times 100$$
(12)

Où L est la valeur de la longueur mesurée, et L_{CAD} est la longueur nominale.

Les pourcentages du changement en longueur ont été calculés pour chaque type de précision dimensionnelle étudiée, à savoir selon l'axe z, pour les dimensions externes et internes (plan XY) et selon les diamètres. Les tableaux indiquant ces résultats pour les pièces ULTRAT et ABS ainsi que les diagrammes associés sont présentés en Annexe B (Tableau 1 et 5, et Figures 1-4). La discussion de ces résultats sera rapportée à la fin de cette partie.

N° des essais	А	В	С
1	0.09	90	0°
2	0.09	60	45°
3	0.09	30	90°
4	0.19	90	45°
5	0.19	60	90°
6	0.19	30	0°
7	0.29	90	90°
8	0.29	60	0°
9	0.29	30	45°

Tableau 7. Plan expérimental réalisé avec la matrice orthogonale L9

2. Application de la méthode intégrée Grey-Taguchi

Comme mentionné dans le chapitre précédent, la recherche des paramètres de fabrication optimaux se fait à travers plusieurs méthodes dites de multi-optimisation. Parmi elles, nous avons choisi la méthode Grey-Taguchi, qui est simplement une combinaison de la méthode de multi-optimisation Grey Relational Analysis (GRA) servant à convertir plusieurs réponses en une seule optimisée et la méthode de Taguchi permettant l'établissement des plans d'expérience et le classement de l'ensemble des expérimentations effectuées par le biais du rapport signal sur bruit (S/N), afin de déterminer la combinaison optimale des niveaux des facteurs contrôlables.

2.1. La théorie de GRA

La théorie GRA a été appliquée avec succès dans de nombreux domaines scientifiques, tels que la finance, l'ingénierie, et même les sciences sociales [79]. L'analyse GRA s'est révélée être un outil statistique efficace et puissant pour l'analyse des résultats expérimentaux et l'optimisation des





Figure 48. Schéma de base de la méthode GRA

systèmes en la combinant avec l'une des méthodes d'établissement des plans d'expérience. Un schéma général de la théorie GRA est indiqué par la figure 48.

Les données d'entrées de cette méthode sont les caractéristiques de performance à optimiser, alors que la sortie est un coefficient permettant la classification des combinaisons des paramètres de la moins susceptible à la plus susceptible de générer les valeurs des caractéristiques de performance visées. L'idée derrière l'utilisation de cette méthode et de trouver la combinaison optimale des paramètres de fabrication, donnant lieu aux différentes caractéristiques de performance demandées. Il s'agit en fait d'une optimisation multi-objective. La théorie de cette méthode ainsi que sa mise en œuvre pour notre cas d'étude seront présentées dans les paragraphes qui suivent.

2.1.1. Prétraitement des données d'entrée

Les données d'entrées pour l'application de la GRA sont les caractéristiques de performance mesurées pour chaque combinaison de paramètres. Supposons que $x_i^{(0)}(k)$ est la valeur mesurée de la k^{ème} caractéristique pour la i^{ème} expérimentation pour i = 1,2, ..., n $\in \mathbb{N}$ et k = 1,2, ..., m $\in \mathbb{N}$. Les mesures prises de toutes les expérimentations pourraient être représentées par les séquences suivantes :

Ces mesures (données d'entrées) doivent être traitées avant d'entamer l'analyse statistique par la GRA. Ce traitement consiste en une conversion de toutes ces mesures obtenues en un ensemble de valeurs normalisées dans une plage de 0 à 1, nommées des coefficients relationnels gris (GRC), en utilisant une des équations suivantes selon le type de la caractéristique de performance en question :

a) <u>Caractéristique de performance maximale</u> (the-larger-the-better)

Dans le cas où le but est de maximiser la caractéristique de performance étudiée, e.g. maximiser la force de traction, l'équation suivante est à utiliser pour le calcul des coefficients GRC :

$$x_i^*(k) = \frac{x_i^{(0)}(k) - \min x_{(k)}^{(0)}}{\max x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)}$$
(13)

b) <u>Caractéristique de performance minimale</u> (the-smaller-the-better)

Dans le cas où le but est de minimiser la caractéristique de performance étudiée, e.g. minimiser la déviation dimensionnelle, on utilise l'équation suivante :

$$x_i^*(k) = \frac{\max x_i^{(0)}(k) - x_i^{(0)}(k)}{\max x_i^{(0)}(k) - \min x_i^{(0)}(k)}$$
(14)

c) Caractéristique de performance ciblée (desired value)

Lorsqu'une valeur objective doit être atteinte par une caractéristique de performance, e.g. une valeur bien précise d'une longueur, l'équation suivante est appropriée pour calculer les coefficients GRC :

$$x_i^*(k) = 1 - \frac{|x_i^{(0)}(k) - x_{(0)}(k)|}{\max |x_i^{(0)}(k) - x_{(0)}(k)|}$$
(15)

Les coefficients GRC calculés doivent subir un ajustement par pondération pour refléter l'effet et la contribution de chaque caractéristique de performance à la réponse finale optimisée. C'est le principe de la multi-optimisation sur lequel se base la théorie de GRA. Ces facteurs de pondération pourraient être attribués de manière égale au cas où il n'y pas d'information sur l'effet de chaque caractéristique de performance. De cette manière, la pondération sera subjective ne reflétant pas l'effet réel de chaque caractéristique de performance sur la réponse optimisée. En outre, le calcul de ces facteurs de manière objective et bien précise est faisable par la méthode de pondération par entropie. La procédure détaillée de l'application de cette méthode a été bien décrite par Chung Wang et al. [93]. Les facteurs de pondération w_i sont calculés selon cette méthode comme suit :

$$x_{iwi}^{*}(k) = x_{i}^{*}(k) \times w_{i}, \quad \sum_{i=1}^{n} w_{i} = 1$$
 (16)

2.1.2. Calcul des grades relationnels (GRG)

Les grades relationnels (GRG) Γ_i relatifs à chaque combinaison servent à définir la combinaison optimale des paramètres : celle qui a le plus grand grade.

$$\Gamma_i = \frac{\Delta_{min} + \Delta_{max}}{\Delta_{0i}^* + \Delta_{max}}, \quad 0 < \Gamma_i \le 1$$
(17)

où

$$\Delta_{0i}^{*} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \Delta_{0i}(k) , \qquad \Delta_{0i}(k) = |x_{0}^{*}(k) - x_{iwi}^{*}(k)|$$

$$\Delta_{max} = \max \max |x_{0}^{*}(k) - x_{iwi}^{*}(k)|$$
(18)

$$\Delta_{\min} = \min \min |\chi_0^*(k) - \chi_{\min}^*(k)|$$

$$\Delta_{min} = \min\min |x_0^*(k) - x_{iwi}^*(k)|$$

 $x_0^*(k)$ et $x_{iwi}^*(k)$ a sont respectivement la séquence de référence et la séquence relative spécifique.

La combinaison avec le grade Γ_i le plus grand est la combinaison des paramètres optimale. Cela doit-être prouvé par le biais d'un test de confirmation. Ce test consiste à fabriquer deux pièces, chacune avec l'un des matériaux considérés, en utilisant cette fois-ci la combinaison optimale des paramètres pour les comparer avec les expérimentations initiales et voir si les performances atteintes sont celles voulues. On assume ici que la dynamique du procédé de fabrication demeure la même pour les premières pièces ainsi que pour les pièces du test de vérification.

2.2. Application de GRA dans le cas d'étude

Pour notre cas d'étude, l'approche GRA est appliquée pour déterminer la combinaison optimale des niveaux des facteurs permettant de réduire l'écart dimensionnel, c'est-à-dire le pourcentage de changement % DL, dans chacune des dimensions des spécimens fabriqués en ABS et en ULTRAT. Subséquemment, les données d'entrées $x_i^{(0)}(k)$ seront les pourcentages de changement en longueurs mesurées pour les différentes dimensions, à savoir le pourcentage de changement en hauteur (selon l'axe z), dans les diamètres (D1 et D2), dans les dimensions extérieures (L et l), et dans les dimensions intérieures (L1, 11, L2, et 12). En résumé, 9 réponses vont être optimisées et transformées en une seule réponse, i.e. le grade relationnel (GRG). La caractéristique de performance visée est la déviation dimensionnelle qu'on cherche à minimiser, donc on utilise l'équation (14) pour

normaliser les données d'entrées. Les facteurs de pondération seront calculés par l'équation (16) puis les grades Γ_i avec l'équation (17) pour chaque matériau séparément.

Les tableaux indiquant les valeurs des facteurs de pondération ainsi que les valeurs calculées des grades GRG sont renseignées à l'Annexe B (Tableau 2, 3, 6 et 7). Pour déterminer la combinaison optimale des paramètres, nous avons procédé par la méthode intégrée Grey-Taguchi que nous avons choisi d'appliquer.

2.3. Intégration Grey-Taguchi

Comme mentionné auparavant, on appliquera dans notre cas d'étude la méthode Grey-Taguchi. La GRA étant appliquée pour la multi-optimisation, la méthode de Taguchi, particulièrement le ratio signal sur bruit (S/N), sera appliqué en considérant comme caractéristique de performance la valeur des grades GRG, en visant la maximisation de cette dernière pour en déterminer la combinaison optimale. Pour se faire, en utilisera l'équation suivante donnant lieu au rapport (S/N) du type « the-larger-the-better » [79] :

$$\eta = -10 \log \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{y_i^2} \right) \tag{19}$$

Où y_i représentent la caractéristique de performance en question, i.e. les valeurs des grades GRG calculées pour chaque matériau, et *n* est le nombre des essais.

Le tableau 8 indique les valeurs calculées du rapport S/N pour les pièces ABS et ULTRAT. Les effets principaux pour le rapport S/N calculés pour tous les niveaux des paramètres des pièces ABS et ULTRAT sont présentés sur la figure 49.

Les	Ratio S/N pour les pièces	Ratio S/N pour les pièces
essais	en ABS	en ULTRAT
1	-0,157240	-0,254989
2	-0,196065	-0,272628
3	-0,238279	-0,259194
4	-0,270746	-0,219462
5	-0,320171	-0,275586
6	-0,384938	-0,370242
7	-0,292908	-0,329278
8	-0,377043	-0,362994
9	-0,223472	-0,265909

Tableau 8. Valeurs des ratios S/N calculées pour les grades GRG des pièces en ABS et en ULTRAT.



Figure 49. Les effets principaux pour le rapport S/N calculés pour les pièces en ABS (en haut) et pour les pièces en ULTRAT (en bas) (Les nombres 1, 2, et 3 représentent les niveaux du paramètre en question)

Le niveau optimal de chaque paramètre est la valeur la plus élevée de la moyenne des valeurs de rapport S/N. Par conséquent, la combinaison optimale des paramètres de fabrication est A1B1C2 pour les deux matériaux, i.e., une épaisseur de couche de 0.09mm, une densité de remplissage de 90%, et une orientation de 45°.

Ces résultats révélés par la méthode de Grey-Taguchi peuvent être encore affirmés par d'autres outils statistiques comme l'Analyse de Variance (ANOVA) que les résultats sont montrés sur la figure 50.

Cependant, un test de confirmation demeure nécessaire. Le test consiste à fabriquer deux pièces chacune avec un des matériaux considérés, en utilisant les mêmes facteurs fixes que ceux définis précédemment (voir Tableau 6), ainsi que les facteurs contrôlables



Figure 50. Analyse de Variance (ANOVA) : Contribution de chaque paramètre

définis aux niveaux optimaux (A1B1C2). Ensuite, on mesure de nouveau les différentes dimensions considérées, à savoir la hauteur Z, les dimensions externes (L et l), internes (L1, 11, L2 12), et les diamètres (D1 and D2) (Fig.46). On compare par la suite ces valeurs mesurées avec celles prédites. Les valeurs prédites (notées P) pour chaque réponse ont été calculées comme suit :

P = moyenne de réponse pour A1 + moyenne de réponse pour B1 + moyenne de réponse pour C2 - $2 \times moyenne$ de réponse.

A titre d'exemple, ci-après les mesures prises du diamètre D1 des pièces en ULTRAT :

La moyenne de la réponse A1 est la somme des valeurs du diamètre D1 mesurées pour les essais où l'épaisseur de couche (A) est en premier niveau (les trois premiers essais):

- Moyenne de réponse pour A1 = 19,506

De même pour la densité de remplissage au niveau 1 (les essais 1, 4, et 7) :

- Moyenne de réponse pour B1 = 19,526

Et pour le paramètre d'orientation au niveau 2 (les essais 2, 4, et 9) :

- Moyenne de réponse pour C2 = 19,46

La moyenne de réponse est la moyenne des valeurs mesurées pour D1 = 19,488La valeur prédite du diamètre D1 en utilisant la combinaison optimale est donc :

 $P = 19,506 + 19,526 + 19,46 - 2 \times 19,488 = 19,515.$

Enfin, en comparant cette valeur avec celle mesurée pour la pièce de confirmation (D1= 19,77), on constate que la valeur mesurée est plus proche de la cible que celle prédite, ce qui signifie une diminution de la déviation dans le diamètre D1 lors d'utilisation de la combinaison optimale. De cette façon, on calculera les valeurs prédites pour toutes les dimensions en question. Les mesures effectuées sur les pièces fabriquées en utilisant la combinaison optimale ainsi que les valeurs prédites pour chaque dimension sont renseignées sur le tableau 9.

Il ressort clairement des valeurs des pièces ABS que certaines valeurs des dimensions mesurées sur les pièces du test de confirmation sont supérieures à celles prédites ce qui traduit une réduction de la déviation grâce à l'utilisation de la combinaison optimale.

Les essais	D1
1	19,57
2	19,4
3	19,55
4	19,58
5	19,56
6	19,41
7	19,43
8	19,5
9	19,4

		Z	D1	D2	1	L
ULTRAT	Test de confirmation	10,14	19,80	14,84	64,88	64,87
	Valeurs prédites	10,1155	19,5155	14,5511	64,8866	64,7422
3S	Test de confirmation	10,06	19,78	14,72	64,85	64,83
AF	Valeurs prédites	10,1333	19,6666	14,7033	64,6433	65,0011
		L1	11	L2	12	
RAT	Test de confirmation	19,83	19,88	14,82	14,84	
ULTI	Valeurs prédites	19,8077	19,6733	14,8255	14,6444	
ABS	Test de confirmation	19,80	19,84	14,79	14,88	
	Valeurs prédites	19,8155	19,7555	14,9155	14,7066	

Tableau 9. Les valeurs prédites VS les valeurs du test de confirmation

Ceci est vrai pour les deux cercles, D1 et D2, et pour les dimensions mesurées le long de la largeur, c'est-à-dire, l, l1 et l2. Pour la pièce ULTRAT, toutes les valeurs du test de confirmation sont plus élevées que celles prévus. Les valeurs de Z ayant une déviation positive (une expansion au lieu d'un rétrécissement), elles ont par la suite un comportement contraire aux autres valeurs. Du coup, la valeur enregistrée pour le test de confirmation doit être moins que celle prédite pour pouvoir conclure l'effet de la combinaison optimale sur la réduction de la déviation. Ceci est le cas de la pièce en ULTRAT; Quant à la pièce en ABS, la dimension mesurée selon Z subit encore une déviation néanmoins avec une différence très légère.

3. Discussion

Il découle de ce qui précède qu'il y a une amélioration notable des valeurs des dimensions mesurées sur les pièces de confirmation fabriquées en utilisant les niveaux des paramètres donnés par la combinaison optimale. Les minimes écarts encore notés peuvent être originaire des facteurs en relation avec la génération du fichier STL, ou des facteurs ayant lieu dans tous les procédés de fabrication (par ex. les vibrations de la plateforme de fabrication). De plus, ce cas d'étude n'a pris en considération que trois facteurs contrôlables, ce qui peut être encore élargi (selon la configuration de la machine et les paramètres auxquels elle donne accès) en étudiant plusieurs paramètres avec plus que trois niveaux. Bien évidemment, plus le nombre des paramètres et des niveaux pris en compte est grand, plus le système devient compliqué. A ce stade, les méthodes statistiques classiques d'établissement du plan d'expériences (comme les matrices orthogonales de Taguchi) seront inutilisables ; plutôt, on fera appel aux algorithmes ANN (réseau de neurones artificiels), GA (algorithme génétique) ou autres algorithmes de Learning machine pour exploiter plus de possibilités et pouvoir, à partir de celles-ci, de déterminer plus précisément que jamais la configuration optimale des paramètres de fabrication. Ceci doit être accompagné d'autres études visant la minimisation du temps de fabrication ainsi que la consommation de la matière première.

Les paramètres optimaux déterminés ainsi que ceux qui ont été fixés à des valeurs définies seront retenus comme « configuration optimale » à utiliser pour générer le fichier du tranchage de la pièce finale. Le cas échéant où le test de validation n'indique pas une amélioration de la précision dimensionnelle, un retour vers le classement des combinaisons optimales (les tableaux 6 et 10,



Annexe B) doit être envisagé pour choisir la 2^{ème} combinaison dans le classement et refaire le test de validation. Cependant, dans la limite des cas où cette 2^{ème} combinaison n'aboutit pas à son tour à un résultat satisfaisant, un changement des paramètres contrôlables (ou même des valeurs de ceux fixés) se jugera nécessaire.

Cette étude d'optimisation des paramètres peut être faite en prenant en considération d'autres objectifs que la précision dimensionnelle, comme l'une des propriétés mécaniques ou l'état d'une surface. L'objectif peut être également non seulement la minimisation d'une caractéristique mais l'obtention d'une valeur cible définie par le CDC (par ex. une valeur de rugosité) en utilisant toujours une des trois équations présentées auparavant dans cette partie. D'autres études plus approfondies peuvent avoir comme fin la définition des tolérancements, ce qui constitue un premier pas dans la définition des tolérances normalisées pour la fabrication additive. Plusieurs détails sur ces perspectives seront l'objet de la conclusion générale.

Partie 3 : 3^{ème} cas d'étude : modélisation de la déviation et compensation de la CAO

Cette troisième et dernière partie dans ce chapitre sera consacrée à la présentation du cas d'étude concernant la validation des modèles mathématiques développés pour modéliser la déviation dans les formes primitives, à savoir les cercles et les carrés. Le schéma présenté par la figure 50 résume les étapes à suivre pour cette fin depuis la fabrication de la pièce-test jusqu'à l'application du modèle mathématique modélisant la déviation et l'extraction des taux de compensation pour modifier la CAO initiale [94].



Figure 51. Schéma général de la méthode d'extraction des taux de compensation



Figure 52. Dessin de définition de la pièce considérée

1. Choix de la géométrie initiale

Pour ce cas d'étude, et puisque le but est d'étudier juste les formes circulaires et carrés, nous avons choisi la pièce montrée sur la figure 51. C'est une pièce prismatique de 80×80×10mm, contenant trois cylindres de diamètres 10, 20, et 30mm, et trois cubes de côtés 10, 20 et 30 mm également pour permettre le test de différentes dimensions. L'impression de la même forme avec trois différentes dimensions a pour but d'observer le changement de la déviation de la petite à la grande dimension.

2. Fabrication de la pièce-test

La fabrication de la pièce en question a été faite avec la machine Replicator 2X de Makerbot qui utilise le procédé FDM (fig.50). Cette imprimante a un volume de fabrication de $246 \times 152 \times 155$ mm³, et une buse de diamètre 0,4mm permettant de déposer un filament de 1,75mm sur la plateforme de fabrication qui



translate verticalement selon l'axe z. L'avantage de cette imprimante est l'espace de fabrication enfermé, qui aide à conserver la température à l'intérieure de la chambre de construction et garantir, par la suite, une bonne impression. Le matériau choisi pour ce cas d'étude était le PLA (Acide Polylactique). De la même façon que dans la première partie de ce chapitre, nous devons choisir les facteurs contrôlables et leurs niveaux pour déterminer la combinaison optimale des paramètres de fabrication pour cette machine. Cependant, due à l'insuffisance du temps qu'on avait lors de notre séjour en Roumanie pour mener ces expérimentations, et puisque notre but pour l'instant est la validation des

mathématiques de déviation modèles développés, nous décidons de ne pas passer par cette démarche en effectuant les expérimentations combinaison la sur optimale des paramètres, et de choisir directement les niveaux des paramètres de fabrication selon les recommandations d'un expert. Les paramètres choisis ainsi que leurs niveaux sont renseignés dans le tableau 10.



Paramètres	Valeurs	Paramètres	Valeurs
Epaisseur de couche	0,2 mm	Style de remplissage	Hexagonal
Vitesse de déposition	50 mm/s	Température d'extrusion	210 °C
Nombre des contours	2	Température du plateau	60°C
Densité de remplissage	10%	Vitesse du déplacement	150 mm/s

Tableau 10. Les paramètres de fabrication et leurs valeurs

3. Numérisation et extraction des points des contours

Une fois la pièce fabriquée, on passe à la prise des mesures. Le scanner optique 3D A*TOS Core* avec le logiciel de numérisation associé *GOM Scan* a été utilisé dans notre cas pour la mesure tridimensionnelle de la pièce en question.

Ce logiciel commande le capteur intégré avec deux caméras adjacentes fonctionnant selon le principe stéréoscopique pour numériser les données des surfaces enregistrées et les fournir au format STL. Ce fichier est transféré ensuite au logiciel *GOM Inspect* qui permet d'inspecter la déviation dans les surfaces et les dimensions selon la nominale prescrite. La figure 52 montre le fichier STL de la pièce en question, où on peut observer clairement les défauts et les déviations que présentent la pièce. A partir du fichier relatif à la pièce scannée, et en ne traitant qu'une géométrie à la fois, on extrait à l'aide d'une section transversale tranchante la géométrie à une hauteur donnée les points constituants son



Figure 53. Fichier STL de la pièce numérisée, (a) défaut d'impression sur la surface latérale du petit cylindre, (b) côtés arrondis du carré



Figure 54. Les points des contours extraits à une distance de 5 mm du haut de la pièce

Une fois ces points extraits, ils seront enregistrés dans un fichier de format .asc. Ce fichier sera ouvert ensuite dans un fichier Excel pour traiter les données enregistrées correctement. Le fichier contient les coordonnées des points selon x, y, et z. Puisqu'on aura besoin de contrôler le contour, la hauteur z ne sera pas prise en compte, et on ne retiendra que les cordonnées x et y. Ces coordonnées doivent être classées du plus petit au plus grand (selon x ou selon y) pour permettre une bonne conversion au coordonnées polaires. Si on note les coordonnées cartésiennes comme étant (x_{im} , y_{im}) pour i de 1 à N, les coordonnées polaires seront notées (θ_i , $r_m(\theta_i)$). Ces derniers seront le point du départ de l'algorithme d'extraction des taux de compensation.

4. Paramétrage des modèles mathématiques

Pour notre travail, nous allons considérer le procédé de la FDM, puisque c'est le procédé disponible au moment de réalisation de cette étude. L'effet du rétrécissement dans le procédé de la FDM est lié directement au processus de fusion-solidification qui se produit normalement dans ce procédé. Le rétrécissement qu'on note $\Delta r(\theta, r_0(\theta))$ peut-être représenté en deux étapes comme suit :

1) Lors de la fusion, une température supérieure à celle suffisante à cette opération peut engendrer une expansion de la matière, c'est-à-dire une déviation positive. De même pour le cas où une température inférieure à celle la recommandée est appliquée, la déviation va être négative. On note (Δ_x, Δ_y) , la déviation selon les axes x et y, et (x_0, y_0) un point du contour de la forme géométrique étudiée. Ceci permet de dire que :

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \Delta_x \\ y &= y_0 + \Delta_y \end{aligned}$$
(20)

Où (x, y) sont les nouvelles coordonnées du point (x_0, y_0) après la déviation.

 Une fois la matière est déposée, le matériau subit un changement de phase ce qui mène à un nouveau rétrécissement, qu'on peut représenter comme suit :

$$\begin{cases} x_1 = p_x * x \\ y_1 = p_y * y \end{cases}$$
(21)

Où (p_x, p_y) sont des facteurs d'expansion relatifs au matériau utilisé et (x_1, y_1) sont les coordonnées finales du point (x_0, y_0) après la déviation. Les coordonnées de la position finale d'un point du contour après le processus de rétrécissement s'écrivent en fonction de la position nominale comme étant :

$$\begin{cases} x_2 = p_x (x_0 + \Delta_x) \\ y_2 = p_y (y_0 + \Delta_y) \end{cases}$$
(22)

Avec ces paramètres, on refait l'écriture des modèles développés dans le chapitre précédent. Pour les formes cylindriques, le nouveau modèle s'écrira comme montré sur l'équation suivante :

$$f(\theta, r_0(\theta)) = r_p(\theta) = \frac{p_x(r_0 + \Delta_x) \, p_y(r_0 + \Delta_y)}{\sqrt{p_x^2(r_0 + \Delta_x)^2 sin^2(\theta) + \, p_y^2(r_0 + \Delta_y)^2 cos^2(\theta)}}$$
(23)

Où $p_x(r_0 + \Delta_x)$ et $p_y(r_0 + \Delta_y)$ sont les axes de la forme elliptique issue de la déviation du contour du cercle imprimé. Pour les formes carrées, l'équation (9) devient :

$$f(\theta, r_0(\theta)) = r_p(\theta) = p_x \times (\Delta_x + r_0) \sqrt{\frac{1 - \sqrt{\cos^2(2\theta)}}{\cos^2(\theta)\sin^2(\theta)}}$$
(24)

Où $p_x \times (\Delta_x + r_0)$ est le côté du carré. p_x et Δ_x sont les paramètres du modèle, et $r_0 = a/\sqrt{2}$ où a est la longueur nominale du côté du carré.

5. Estimation des paramètres des modèles

Une estimation efficace des paramètres du modèle est indispensable afin d'appliquer le modèle mathématique représentant l'écart paramétrique aux écarts observés. Cette estimation peut être faite à partir des données mesurées ($\theta_i, r_m(\theta_i)$) grâce à une courbe d'ajustement. Matlab présente plusieurs fonctions dites d'optimisation servant à résoudre des problèmes linéaires/non linéaires, avec/sans contraintes. Pour notre cas, nous allons utiliser la fonction *fminsearch* qui fait partie des fonctions d'optimisation non linéaire sans contraintes. *fminsearch*(*fun*, x_0) trouve le minimum d'une fonction scalaire *fun* de plusieurs variables, en commençant par une valeur initiale x_0 . La fonction *fun* à minimiser est considérée comme étant la somme des carrés des écarts donnée par l'équation (10). Les paramètres $\zeta = \{p_x, p_y, \Delta_x, \Delta_y\}$ à estimer pour les modèles des formes cylindriques et prismatiques peut être trouvés à partir de l'équation suivante :
$$\hat{\zeta} = \operatorname{argmin}_{\zeta} \sum_{i}^{N} |r_p(\theta_i) - r_m(\theta_i)|^2$$
(25)

Comme expliqué dans le 4ème paragraphe de cette partie, nous extrayons les points relatifs au contour de chacun des trois cylindres contenus dans notre pièce à une hauteur de 5mm à partir du haut. Ainsi nous avons extrait 306 points pour le contour du petit cylindre, 488 pour le moyen, et 613 points pour le grand cylindre. Pareillement, on extrait les points des contours des trois carrés à une hauteur de 5 mm à partir du haut de chaque carré. Ainsi nous avons extrait 252 points pour le contour du petit carré, 468 points pour le moyen, et 677 points pour le grand carré. Ces points sont, bien évidemment, en coordonnées cartésiennes, on les exprime par la suite en coordonnées polaires ($\theta_i, r_m(\theta_i)$). Ensuite, en utilisant l'équation (25) ainsi que les équations (23) et (24) des modèles mathématiques représentant la déviation respectivement pour les cylindres et les carrés, on trouve aisément les valeurs des paramètres estimés $\zeta = \{p_x, p_y, \Delta_x, \Delta_y\}$. Les valeurs des paramètres estimés pour les cylindres respectivement dans les tableaux 11 et 12.

6. Extraction des taux de compensation

On rappelle l'équation (5) représentant la compensation optimale $x^*(\theta)$ à appliquer pour un rayon nominal r_0 :

$$\tau^*(\theta) = -\frac{f(\theta, r_0(\theta))}{f'(\theta, r_0(\theta)) + 1}$$
(5)

La fonction $f(\theta, r_0(\theta))$ n'est que le modèle développé présenté par l'équation (23) pour les cylindres et l'équation (24) pour les carrés. On remplace donc par les paramètres estimés trouvés dans les équations (23) et (24), puis dans l'équation (5) pour extraire les taux de compensation à appliquer à chaque point extrait des contours de différentes formes intégrées dans notre pièce.



Les équations de compensation relatives à chaque forme géométrique étant trop compliquées et longes, on ne les posera pas ici. A titre d'exemple, ci-dessous l'équation de compensation $\tau^*(\theta)$ relative au cylindre moyen :

	Petit cylindre	Moyen cylindre	Grand cylindre
p_x	0.9146	0.9764	0.9644
p_y	1.3002	0.9150	0.9828
Δ_x	0.3419	0.1267	0.3926
Δ_y	-1.1970	0.8656	0.1425

Tableau 11. P	aramètres	estimés	pour l	es 3	cylindres
---------------	-----------	---------	--------	------	-----------

	Petit carré	Moyen carré	Grand carré
p_x	0.7655	0.9766	0.9250
Δ_{χ}	1.0223	0.1080	0.7710

Tableau 12. Paramètres estimés pour les 3 carrés

$$\frac{p_x p_y (\Delta_x + 10) (\Delta_y + 10)}{\sqrt{\left(p_y^2 \cos(\theta)^2 (\Delta_y + 10)^2 + p_x^2 \sin(\theta)^2 (\Delta_x + 10)^2\right)}} - 10}{p_x p_y \left(2p_x^2 \cos(\theta) \sin(\theta) (\Delta_x + 10)^2 - 2p_y^2 \cos(\theta) \sin(\theta) (\Delta_y + 10)^2\right) (\Delta_x + 10) (\Delta_y + 10)}{2 \left(p_y^2 \cos(\theta)^2 (\Delta_y + 10)^2 + p_x^2 \sin(\theta)^2 (\Delta_x + 10)^2\right)^{\frac{3}{2}}} - 1$$

Ce qui reste maintenant c'est de modifier la CAO initiale par ces taux de compensation.

7. Modification de la CAO

Les taux de compensation étant extraits, on les utilise pour modifier la CAO initiale de la pièce en question. Ceci consiste à modifier les rayons des différentes formes géométriques en ajoutant le taux de compensation relatif à chaque angle θ : Le rayon nominal étant $r_0(\theta)$, le nouveau rayon sera $r_0(\theta) + \tau^*(\theta)$.

Les nouveaux points des contours des formes géométriques seront transférés à CATIA v5



Étape actuelle dans la méthodologie

pour redessiner la pièce. L'étape qui suit maintenant est la vérification de la validité des modèles mathématiques développées, en fabriquant la nouvelle pièce, la numériser, et extraire à partir d'elle les points constituants les contours des formes géométriques pour tester la déviation et la comparer avec la première pièce. Les résultats sont reportés dans le paragraphe suivant.

Pareillement pour la première pièce, la pièce compensée a été fabriquée, numérisée, et les points constituants le contour de chaque géométrie (à une hauteur pareille que la première pièce) ont été extraits. Les déviations dans les formes prismatiques et cylindriques avant et après l'application de la compensation sont illustrées respectivement sur les figures 54, 55, 56, et 57. Les courbes en bleu sont relatives à la déviation des formes avant la compensation, alors que les courbes en rouge représentent la déviation des contours des formes après l'application de la compensation.



Figure 55. Les courbes des déviations dans les carrés (depuis le haut : le grand, le moyen, et le petit carré) avant (en bleu) et après (en rouge) l'application de la compensation



















D'après les figures ci-dessus, on note les remarques suivantes :

- Concernant le moyen et le grand carré, il est clair que la déviation a été réduite de manière significative sur toutes les arêtes. Une amélioration est remarquée surtout dans les côtés gauche et inférieur du carré moyen ainsi qu'une légère amélioration dans la déviation enregistrée sur les deux autres cotés. Pour le grand carré, la déviation a été améliorée pour tous les côtés sauf le bord inférieur. En ce qui concerne le petit carré, il montre des écarts pour les quatre côtés. En fait, le bord supérieur montre une amélioration du rétrécissement enregistré, avec une valeur de déviation de -0,02 mm après l'application de la compensation ; une réduction de la déviation est remarquée surtout dans le côté droit bien que le rétrécissement remarqué dans la pièce non-compensée s'est transformé en expansion.

- Quant à la déviation dans les coins des carrés, elle est représentée - dans le cas idéal où les coins sont parfaitement pointus - par une ligne strictement verticale séparant les courbes décrivant la déviation dans chaque côté du carré. À la lumière de cela, le petit carré présente des coins déformés arrondis tandis que la déviation des coins est moins remarquable dans le moyen et grand carré.

- Pour le grand cylindre, la déviation moyenne a diminué de 81% de sa valeur initiale. La déviation a été réduite généralement sur tout le contour sauf pour la partie (π , $(3\pi/2)$ où la valeur de la déviation est restée presque la même mais avec un indice positif (expansion au lieu de rétrécissement). Une amélioration dans les valeurs de la déviation enregistrée dans le cylindre moyen est observée également. En fait, elle a diminué de 69% après l'application de la compensation. Quant au petit cylindre, l'allure de la courbe de la déviation a légèrement changée, cependant on constate une diminution de 29% de la déviation moyenne dans le cylindre compensé.

9. Discussion

Ce cas d'étude avait pour objectif la modélisation de la déviation dimensionnelle qui a lieu dans les pièces fabriquées en FA. Nous avons spécifié un modèle mathématique décrivant la déviation dans le plan xy à chaque forme géométrique considérée, à savoir, les cylindres et les cubes. Un modèle décrivant la compensation a été également développé en vue de calculer les taux de compensation à ajouter au rayon nominal à chaque angle θ .

En résumé, nous pourrions affirmer que les modèles proposés prédisent bien la déviation et aident à son réduction, comme prouvé par la pièce compensée, néanmoins de manière irrégulière toute au long du contour considéré. Toutefois, il y réside encore quelques problèmes à résoudre, liés notamment à la déformation notée dans les coins des carrés, particulièrement lorsque la forme à imprimer est de petite taille. En fait, un des inconvénients de la fabrication par la FDM est l'impossibilité de réaliser des angles vifs dans les formes imprimées. Ceci est dû au principe de procédé lui-même car la déposition du matériau se fait par une buse, contrairement au procédé de fusion de poudre où les angles vifs sont réalisables puisque la tête d'impression dans ce cas, c.-à-d. le laser, permet un pointage plus précis sur le lit de la poudre. En outre, il va sans dire que la réalisation des formes de petite taille avec précision est stimulante, puisqu'elle exige des déplacements minutieux de la tête et la plateforme d'impression des machines FDM. De plus, les petites formes imprimées subissent un refroidissement plus rapide, ce qui entraîne davantage de déformations, en particulier dans les angles des formes prismatiques.

On note également que nous nous sommes concentrés uniquement que sur le rétrécissement du matériau comme source de déviation. En fait, comme mentionné auparavant dans ce manuscrit, le rétrécissement n'est qu'un facteur parmi plusieurs d'autres entraînant la déviation dans les pièces de la FA. Le contrôle de tous les élément-sources de déviation à la fois s'avère irréalisable à cet instant. Cependant, de futures études peuvent être envisagées en prenant comme point de départ nos modèles de compensation développés, en visant l'établissement des intervalles de tolérances atteintes sur chaque axe de la machine étudiée. De plus amples détails sur les possibles voies d'amélioration et de recherche seront présentés lors du dernier chapitre de ce manuscrit.

Partie 4 : Capitalisation des connaissances développées suite à la méthodologie proposée

Comme mentionné auparavant dans ce rapport, l'application de la méthodologie proposée pour générer un fichier FAO prêt à être destiné à la fabrication, enrichira l'expérience du concepteur en termes des différents choix faits et lui permet de bien comprendre les caractéristiques des procédés et leurs effets sur la qualité des pièces obtenues, et de maîtriser leurs méthodes de contrôle. Pour assembler ces savoirs et savoirfaire et permettre leur réutilisation par d'autres acteurs dans d'autres études, on fait appel à la démarche de capitalisation expliquée au chapitre III (Fig.33). La fiche présentant l'application de cette démarche sur notre méthodologie est résumée sur la figure 56. Après la détermination de l'objectif de capitalisation, i.e. l'activité de conception à travers la méthodologie proposée, nous avons défini le cadre de référence, i.e. les savoirs, les savoirfaire, les connaissances techniques, les démarches, etc., extraits des trois sections de la La dernière étape est la création des modèles (des programmes, des fiches d'informations, des bases de données) à partir de ces savoirs retenus pour les rendre réutilisables et diffusables.



Conclusion

Ce quatrième chapitre nous a servi à présenter trois cas d'études à travers lesquels nous avons pu valider, section par section, notre méthodologie proposée dans le 3^{ème} chapitre.

Le 1^{er} cas d'étude nous a servi pour valider la première section de notre méthodologie proposée. Grâce à elle, nous avons procédé à une reconception d'une pièce industrielle fabriquée usuellement par un procédé d'usinage CNC pour l'adapter à la fabrication par la FA. Le suivi de la méthodologie nous a permis de choisir la machine convenable selon le matériau/le volume englobant/ la précision etc., et de bien profiter de la FA en termes de la possibilité de fabrication des formes complexes issues de l'optimisation topologique. La pièce résultante respecte bien les exigences du CDC en termes des forces internes et des déplacements. De plus, sa masse est inférieure à celle fabriquée par les procédés conventionnels, ce qui implique une facilité d'utilisation par les opérateurs.

Le 2^{ème} cas d'étude relatif à la seconde section de la méthodologie a permis d'exploiter une méthode de multi-optimisation en vue d'obtention de la configuration optimale des paramètres de fabrication permettant la minimisation de la déviation dimensionnelle. En choisissant un ensemble de paramètres contrôlables, nous avons établi un plan expérimental grâce aux matrices orthogonales de Taguchi, sur la base duquel nous avons procédé à la fabrication des pièces tests. Puis, à l'aide de la méthode GRA ainsi que d'autres méthodes statistiques, nous avons pu trouver la combinaison optimale des paramètres de fabrication. Les résultats expérimentaux ont montré une amélioration dans la minimisation de la déviation de la pièce fabriquée en utilisant la combinaison optimale des paramètres de fabrication statistiquement trouvée par la méthode GRA. Cette étude était l'occasion également pour comparer les performances de deux matériaux polymères et mettre l'accent sur l'importance de faire un choix judicieux du matériau pour une application donnée.

Quant au 3^{ème} cas d'étude, il était consacré à la compréhension de la source de déviation, sa modélisation et puis, le plus important, sa compensation comme l'explique exhaustivement la 3^{ème} section de notre méthodologie. A ce stade, nous nous sommes concentrés sur deux géométries primitives, à savoir, les formes circulaires et carrées. Deux modèles mathématiques ont été proposés pour modéliser la déviation qui a lieu dans le procédé FDM, procédé disponible au moment de réalisation de l'étude. Deux autres modèles servant à modéliser la compensation découlant de chacun des deux premiers modèles ont été utilisés pour extraire les taux de compensation avec lesquels la CAO initiale sera modifiée. L'estimation des paramètres des modèles a été faite grâce aux données expérimentales. La méthodologie suivie a permis ainsi la minimisation de la déviation dans les formes circulaires et carrées fabriquées après l'application des taux de compensation. La démarche de compensation a prouvé, par conséquent, son efficacité malgré quelques problèmes qui persistent encore et nécessitent de plus amples études, notamment pour assurer un profil régulier de la déviation et, plus particulièrement, pour étudier la déviation et la contrôler non seulement dans le plan XY, mais également selon l'axe Z. Ceci exige une compréhension approfondie du comportement de la déviation dimensionnelle selon chaque axe et son interaction avec les autres axes, ce qui constituera une voie possible pour comprendre comment se produisent les distorsions dans les profils des pièces fabriquées en FA. Les trois cas d'étude, étant amené avec succès, permettent de valider notre méthodologie de conception DfAM proposée.

L'application de telle méthodologie et son suivi régulier, en effectuant les différentes expérimentations et en prenant chaque fois des décisions en termes du matériau/de machine/d'orientation/des paramètres de fabrication, ainsi que le développement des modèles de déviation et de compensation etc., enrichit sans doute l'expérience du concepteur, et développe, à chaque fois, des nouveaux savoirs et savoir-faire surtout. Ces connaissances doivent être capitalisées et diffusées pour qu'elles soient réutilisables dans d'autres cas similaires. À cette fin, nous avons consacré la dernière partie de ce chapitre pour présenter une fiche de capitalisation des connaissances développées lors de l'application et la validation de notre méthodologie de conception. La méthode de capitalisation suivie dans cette fiche consiste en l'extraction de toutes les connaissances développées lors de chaque section de la méthodologie (savoirs / savoir-faire / technique / décision prise, etc.), puis leurs filtration pour en garder celles qui marquent le suivi de la méthodologie avant de les classifier en des connaissances empruntées / endogènes, et transposables / spécifiques.

Conclusion général et perspectives

Ce dernier chapitre a pour objectif de synthétiser ce travail de thèse et d'en tirer nos contributions dans l'avancement de la recherche académique dans le domaine de la fabrication additive (FA) ainsi que les perspectives et les voies d'amélioration en découlant.

Sachant que la première étape est la bonne compréhension de l'état de l'art, nous avons consacré un chapitre entier pour en présenter et discuter les lacunes existantes. Ainsi, nous avons bien compris la variété des procédés de la FA existants et leurs points communs ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients l'un face à l'autre. Nous avons mis l'accent sur la nécessité d'avoir des méthodologies de conception dédiées à ces procédés pour tenir compte des possibilités offertes et des limitations imposées. Nous avons ainsi, à travers une revue de littérature exhaustive sur ces méthodologies développées, de trouver le « knowlegde gap » sur lequel se concentrera notre travail et portera nos contributions ; c'est l'intégration, au plus tôt dans la phase de conception, des incertitudes et des interactions des caractéristiques produit/procédé.

Par conséquent, nous avons proposé notre méthodologie constituée de trois grandes sections. La première se concentre sur la traduction des spécifications du CDC pour générer la géométrie initiale et choisir, par la suite, le couple matériau/machine ainsi que l'orientation de la pièce dans la chambre de fabrication. La deuxième section porte sur l'optimisation des paramètres de fabrication en vue de minimiser la déviation dimensionnelle, tandis que la troisième section focalise sur la modélisation et la compensation de cette déviation. La validation de la méthodologie proposée a été bien faite grâce à trois cas d'études expérimentaux.

Notre méthodologie proposée répond effectivement aux problématiques soulevées auparavant. Tout d'abord, la méthodologie a le grand avantage d'être générale, applicable pour tous les procédés de la FA et non restreinte à un seul type comme celles discutées dans l'état de l'art. Un deuxième avantage est sa bonne structuration qui permet de guider le concepteur dans son travail d'une manière séquentielle, et lui permet de valider ses décisions vis-à-vis les exigences du CDC, étape par étape lors de l'application de la méthodologie. De plus, elle présente une démarche de multi-optimisation qui offre la possibilité de chercher la bonne configuration des paramètres de fabrication quelles que soit les caractéristiques de performances considérées et les optimiser toutes à la fois. Et puis, finalement, elle permet la compréhension du comportement de la déviation grâce aux modèles descriptifs développés pour les formes usuelles à savoir les formes circulaires et les formes carrés, et permet plus particulièrement de compenser la déviation survenue.

Néanmoins, quelques points restent encore à étudier profondément concernant surtout la deuxième et la troisième section de notre méthodologie.

Premièrement, l'exercice des méthodes de multi-optimisation avec un plan expérimental établi par les méthodes classiques comme les matrices orthogonales que nous avons utilisées. Nous savons très bien que la considération de plusieurs paramètres de fabrication en vue de les optimiser exige la réalisation d'un nombre assez élevé des essais ce qui influencera le coût et la consommation du matériau. De plus, ces méthodes classiques d'établissement des plans d'expérience ne permettent pas l'exploitation de toutes les possibilités offertes des combinaisons des paramètres, ce qui nous incite à croire fermement à la nécessité de passer à l'application des nouveaux algorithmes informatiques tels que les réseaux de neurones artificiels (ANN) et les algorithmes du machine Learning.

Deuxième point, c'est le choix de la géométrie sur laquelle les expérimentations de la multi-optimisation doivent avoir lieu. Dans notre cas d'étude, nous avons choisi une pièce assez petite avec des trous en formes primitives, ce qui ne reflète pas totalement le cas réel. En effet, si notre finalité est d'optimiser les paramètres de fabrication dans le but de minimiser la déviation dimensionnelle qui a lieu, cette étude doit être faite sur seulement la/les dimensions concernées, bien évidemment, ce qui exige de choisir une géométrie adéquate pour en faire les tests, spécifiquement dans le cas où la conception de pièces volumineuses est l'objectif de l'application de la méthodologie. Ce choix devient un vrai challenge lorsqu'on fait face aux pièces spéciales contenant des courbures et pas seulement des formes usuelles.

Quant au troisième point, il est relatif au type de précision étudiée, qui se limite dans notre méthodologie à la précision dimensionnelle. Or, dans l'idéal, la méthodologie doit fournir des clés pour comprendre également les sources de la déviation géométrique et les démarches pour la contrôler, chose qui était assez difficile car il fallait étudier non seulement les deux types de précision séparément, mais plutôt l'interaction entre les deux.

Ces trois points ne portent pas atteinte à la validité et la capacité de la méthodologie proposée à guider le concepteur dans son travail et l'aider à exploiter les possibilités offertes par les procédés de la FA, mais constituent plutôt des voies d'améliorations de la méthodologie pour élargir son application et la rendre un outil clé en main. Dans cette optique, nous présentons dans ce qui suit les perspectives de ce travail et les possibilités de prolongements ainsi que les points pouvant être des sujets de recherche à approfondir dans des futurs travaux :

 L'amélioration de la démarche de compensation de la déviation pour pouvoir réaliser avec précision les tolérances demandées :

Nous avons démontré dans notre approche suivie pour compenser la déviation que le modèle développé pour modéliser la compensation a été validé expérimentalement et a pu effectivement réduire la déviation. Cependant, cette démarche peut être encore améliorée en visant non seulement la réduction de la déviation mais son contrôle pour qu'elle s'inscrive dans un intervalle de tolérance prédéfini par l'utilisateur et pouvoir réaliser une tolérance visée avec précision. Ceci nous amène à la deuxième perspective de ce travail.

2- L'établissement des normes de tolérancement relatives aux procédés de la FA :

Bien que de nombreuses normes liées à la FA ont été établies, il existe un manque de normes définissant les tolérances et les spécifications géométriques associées aux procédés de la FA. De plus, des lacunes sont constatées en termes des normes décrivant les défauts acceptables et leurs méthodes de contrôle. Du coup, un travail plus approfondi doit y avoir lieu pour étudier à la fois la déviation dimensionnelle et géométrique encourues et leurs interactions, et les contrôler dans un deuxième temps par des modèles mathématiques plus avancés. Ceci n'est guère évidement possible car l'établissement des normes définissant les tolérancements se heurte à de nombreux obstacles, particulièrement le nombre croissant des machines de la FA et les différentes configurations qu'elles ont. De plus, et pour des raisons concurrentielles, la plupart des machines dans le marché sont fermées, ne donnant pas accès aux différents paramètres de fabrication et limitant ainsi l'expérience du concepteur dans les lignes directrices fournies par la société fabricante de la machine en question. Autre point important à tenir en compte est la multitude des procédés de la FA existants (ainsi que ceux nouveaux qui continuent à émerger dans le marché) ce qui constitue un challenge pour en discuter les possibilités et les limitations et les inscrire dans une démarche de normalisation.



Annexe A : Mise en plan de la grille de perçage utilisée dans le 1^{er} cas d'étude

N° of trial	Z	D1	D2	l	L	L1	l1	L2	12
1	1,40	2,15	3,53	0,60	0,31	1,40	1,10	2,00	2,40
2	1,40	3,00	3,07	0,15	0,42	1,00	2,00	1,07	2,40
3	1,10	2,25	3,40	0,34	0,38	2,20	1,30	2,20	1,73
4	0,50	2,10	3,33	0,11	0,35	1,30	1,95	1,67	2,60
5	1,10	2,20	2,13	0,17	0,43	2,05	1,80	2,53	2,27
6	0,80	2,95	4,47	0,49	0,23	1,70	1,90	2,47	2,87
7	2,50	2,85	2,87	0,14	0,23	1,80	2,00	2,87	2,40
8	2,40	2,50	4,40	0,55	0,22	1,80	1,70	2,33	2,13
9	2,20	3,00	2,93	0,08	0,40	0,95	2,00	1,13	2,13

Annexe B. Application de la théorie GRA pour les pièces ABS et ULTRAT

Tableau B1. Valeurs des pourcentages de changement en longueur pour les pièces en ULTRAT

w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	Somme
0,1139	0,1073	0,1151	0,1147	0,1105	0,1140	0,0948	0,1132	0,1165	1

Tableau B2. Facteurs de pondération calculées pour les pièces en ULTRAT

Nº d'assai	z*w1	D1*w2	D2*w3	l*w4	L*w5	L1*w6	l1*w7	L2*w8	l2*w9
n u essai	(k=1)	(k=2)	(k=3)	(k=4)	(k=5)	(k=6)	(k=7)	(k=8)	(k=9)
1	0,06266	0,10134	0,04602	0,00000	0,06312	0,07296	0,09482	0,05450	0,04797
2	0,06266	0,00000	0,06904	0,09785	0,00789	0,10945	0,00000	0,11319	0,04797
3	0,07975	0,08942	0,05260	0,05736	0,02367	0,00000	0,07375	0,04192	0,11650
4	0,11393	0,10730	0,05589	0,10798	0,03945	0,08208	0,00527	0,07546	0,02741
5	0,07975	0,09538	0,11506	0,09448	0,00000	0,01368	0,02107	0,02096	0,06168
6	0,09684	0,00596	0,00000	0,02362	0,10258	0,04560	0,01054	0,02515	0,00000
7	0,00000	0,02630	0,07890	0,10123	0,10258	0,03648	0,00000	0,00000	0,04797
8	0,00570	0,01850	0,00329	0,01012	0,11047	0,03648	0,03161	0,03354	0,07538
9	0,01709	0,00000	0,07561	0,11473	0,01578	0,11401	0,00000	0,10900	0,07538

Tableau B3. Les coefficients GRC multipliés par les facteurs de pondération - ULTRAT Parts

N° d'essai	Δ(k=1)	Δ(k=2)	Δ(k=3)	Δ(k=4)	Δ(k=5)	Δ(k=6)	Δ(k=7)	Δ(k=8)	Δ(k=9)	GRG
1	0,93734	0,89866	0,95398	1,00000	0,93688	0,92704	0,90518	0,94550	0,95203	0,97107
2	0,93734	1,00000	0,93096	0,90215	0,99211	0,89055	1,00000	0,88681	0,95203	0,96910
3	0,92025	0,91058	0,94740	0,94264	0,97633	1,00000	0,92625	0,95808	0,88350	0,97060
4	0,88607	0,89270	0,94411	0,89202	0,96055	0,91792	0,99473	0,92454	0,97259	0,97505
5	0,92025	0,90462	0,88494	0,90552	1,00000	0,98632	0,97893	0,97904	0,93832	0,96877
6	0,90316	0,99404	1,00000	0,97638	0,89742	0,95440	0,98946	0,97485	1,00000	0,95827
7	1,00000	0,97370	0,92110	0,89877	0,89742	0,96352	1,00000	1,00000	0,95203	0,96280
8	0,99430	0,98150	0,99671	0,98988	0,88953	0,96352	0,96839	0,96646	0,92462	0,95907
9	0,98291	1,00000	0,92439	0,88527	0,98422	0,88599	1,00000	0,89100	0,92462	0,96985

Tableau B4. Les séquences des déviations et les grades GRG associées - ULTRAT Parts

N° d'essai	Z	D1	D2	1	L	L1	l1	L2	12
1	1,40	1,20	1,73	0,54	0,29	1,15	0,95	1,53	1,87
2	1,20	2,25	2,67	0,43	0,15	1,35	1,75	1,13	1,93
3	1,00	1,95	1,93	0,54	0,31	1,85	1,30	2,67	1,87
4	1,70	2,25	3,33	0,45	0,08	1,20	1,80	1,47	2,80
5	1,70	2,25	2,80	0,54	0,25	2,25	1,70	2,47	2,00
6	1,30	2,60	3,87	0,29	0,54	1,85	1,65	3,53	2,87
7	0,50	2,35	2,87	0,46	0,15	2,30	1,70	2,53	2,47
8	0,50	2,85	3,87	0,22	0,54	1,75	2,75	3,07	3,00
9	0,30	3,30	3,13	0,37	0,08	1,05	2,20	1,47	2,60

Tableau B5. Valeurs des pourcentages de changement en longueur pour les pièces en ABS parts

w1	w2	w3	w4	w5	w6	w7	w8	w9	Somme
0,1089	0,1126	0,1101	0,1037	0,1131	0,1117	0,1156	0,1134	0,1109	1

Tableau B6. Facteurs de pondération calculées pour les pièces en ABS

N° d'essai	z*w1 (k=1)	D1*w2 (k=2)	D2*w3 (k=3)	l*w4 (k=4)	L*w5 (k=5)	L1*w6 (k=6)	l1*w7 (k=7)	L2*w8 (k=8)	l2*w9 (k=9)
1	0,02333	0,11260	0,11011	0,00000	0,06032	0,10275	0,11555	0,09452	0,11093
2	0,03888	0,05630	0,06194	0,03458	0,09425	0,08488	0,06420	0,11342	0,10440
3	0,05443	0,07239	0,09979	0,00000	0,05655	0,04021	0,09309	0,04096	0,11093
4	0,00000	0,05630	0,02753	0,02964	0,11310	0,09829	0,06099	0,09767	0,01958
5	0,00000	0,05630	0,05505	0,00000	0,07163	0,00447	0,06741	0,05041	0,09788
6	0,03110	0,03753	0,00000	0,07903	0,00000	0,04021	0,07062	0,00000	0,01305
7	0,09331	0,02760	0,05161	0,02470	0,09425	0,00000	0,06741	0,04726	0,05220
8	0,09331	0,01942	0,00000	0,10373	0,00000	0,04914	0,00000	0,02205	0,00000
9	0,10887	0,00000	0,03785	0,05433	0,11310	0,11169	0,03531	0,09767	0,03915

 Table 7. Les coefficients GRC multipliés par les facteurs de pondération – ABS parts

Table 8. Les séquences des déviations et les grades GRG associées – ABS parts

N° of trial	Δ(k=1)	Δ(k=2)	∆(k=3)	Δ(k=4)	Δ(k=5)	Δ(k=6)	∆(k=7)	Δ(k=8)	Δ(k=9)	GRG
1	0,97667	0,88740	0,88989	1,00000	0,93968	0,89725	0,88445	0,90548	0,88907	0,98206
2	0,96112	0,94370	0,93806	0,96542	0,90575	0,91512	0,93580	0,88658	0,89560	0,97768
3	0,94557	0,92761	0,90021	1,00000	0,94345	0,95979	0,90691	0,95904	0,88907	0,97294
4	1,00000	0,94370	0,97247	0,97036	0,88690	0,90171	0,93901	0,90233	0,98042	0,96931
5	1,00000	0,94370	0,94495	1,00000	0,92837	0,99553	0,93259	0,94959	0,90212	0,96381
6	0,96890	0,96247	1,00000	0,92097	1,00000	0,95979	0,92938	1,00000	0,98695	0,95665
7	0,90669	0,97240	0,94839	0,97530	0,90575	1,00000	0,93259	0,95274	0,94780	0,96684
8	0,90669	0,98058	1,00000	0,89627	1,00000	0,95086	1,00000	0,97795	1,00000	0,95752
9	0,89113	1,00000	0,96215	0,94567	0,88690	0,88831	0,96469	0,90233	0,96085	0,97460



Figure. 1. Pourcentage de changement selon l'axe Z



Figure. 2. Pourcentage de changement dans les dimension internes (1) et externes (L)

129

ANNEXES 130



Figure. 3. Pourcentage de changement dans le diamètre du grand cercle (D1) et du petit cercle (D2)



Figure. 4. Pourcentage de changement dans les dimensions internes et externes du grand carré (l1, L1) et du petit carré (l2, L2)

Références

- [1] R. Ponche, "Méthodologie de conception pour la fabrication additive, application à la projection de poudres," Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2013.
- [2] B. Vayre, "Conception pour la fabrication additive, application à la technologie EBM," Université Grenoble Alpes, 2014.
- [3] C. Margueray and L. Vollard, "Fabrication additive métallique : technologies et opportunités," 2015.
- [4] N. Boyard, "Méthodologie de conception pour la réalisation de piéces en Fabrication Additive," l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2015.
- [5] A. Obaton, A. Bernard, G. Taillandier, and J.-M. Moschetta, "Fabrication additive et besoins en contrôle," 2015, doi: 10.1051/ metrolo/gy 2015 0001.
- [6] D. W. Rosen, "Computer-aided design for additive manufacturing of cellular structures," *Comput. Aided. Des. Appl.*, vol. 4, no. 1–6, pp. 585–594, 2007, doi: 10.1080/16864360.2007.10738493.
- [7] C. McAlister and J. Wood, "The potential of 3D printing to reduce the environmental impacts of production," in *ECEEE 2014 Industrial Summer Study Proceedings*, 2014, pp. 213–221.
- [8] Mike Ayre, "DMLS design guide V4." https://prezi.com/q55mkdhc7dwo/dmlsdesign-guide-v4/.
- [9] E. Atzeni, L. Iuliano, P. Minetola, and A. Salmi, "Redesign and cost estimation of rapid manufactured plastic parts," *Rapid Prototyp. J.*, pp. 308–317, 2010, doi: 10.1108/13552541011065704.
- [10] E. Rodriguez and A. Alvares, "A STEP-NC implementation approach for additive manufacturing," *Procedia Manuf.*, vol. 38, no. 2019, pp. 9–16, 2019, doi: 10.1016/j.promfg.2020.01.002.
- [11] H. Rodrigue, M. Rivette, V. Calatoru, and S. Richir, "Une méthodologie de conception pour la fabrication additive," 2011, [Online]. Available: http://hdl.handle.net/10985/6721.
- [12] K. Salonitis, "Design for additive manufacturing based on the axiomatic design method," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 87, no. 1–4, pp. 989–996, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-8540-5.
- [13] N. Boyard, M. Rivette, O. Christmann, and S. Richir, "A design methodology for parts using Additive Manufacturing," 6th Int. Conf. Adv. Res. Virtual Phys. Prototyping, VR@P 2013, no. Segonds 2011, pp. 399–404, 2014, [Online]. Available: http://www.scopus.com/inward/record.url?eid=2-s2.0-84892146918&partnerID=40&md5=2cf75968bb62d09df5c1adcab326ff3f.
- [14] G. N. Levy, R. Schindel, and J. P. Kruth, "Rapid Manufacturing and Rapid Tooling With Layer Manufacturing (Lm) Technologies, State of the Art and Future Perspectives," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 52, no. 2, pp. 589–609, 2003.

- [15] "NF ISO / ASTM 52900 Avril 2016." https://www.iso.org/obp/ui#iso:std:isoastm:52900:ed-1:v1:en (accessed Oct. 14, 2016).
- [16] J. Kruth, "Material Increase Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques," Ann. CIRP (Collège Int. pour l'Étude Sci. des Tech. Prod. Méchanique), Vol. 40 No. 2, pp. 603–14., vol. 40, 1991.
- [17] "ti.com.".
- [18] I. Gibson, D. W. Rosen, and B. Stucker, "Additive manufacturing technologies: Rapid prototyping to direct digital manufacturing," 2010, pp. 9–12.
- [19] W. Gao *et al.*, "The status, challenges, and future of additive manufacturing in engineering," *Comput. Des.*, vol. 69, pp. 65–89, 2015, doi: 10.1016/j.cad.2015.04.001.
- [20] W. J. Sames, F. A. List, S. Pannala, R. R. Dehoff, and S. S. Babu, "The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing," *Int. Mater. Rev.*, 2016, doi: 10.1080/09506608.2015.1116649.
- [21] N. Chen and M. C. Frank, "A method for metal AM support structure design to facilitate removal," in 28th Annual International Solid Freeform Fabrication Symposium, 2017, pp. 1516–1524.
- [22] F. Górski, W. Kuczko, and R. Wichniarek, "Influence of Process Parameters on Dimensional Accuracy of Parts Manufactured Using Fused Deposition Modelling Technology," *Adv. Sci. Technol. – Res. J.*, vol. 7, no. 19, pp. 27–35, 2013, doi: 10.5604/20804075.1062340.
- [23] I. Tolosa, F. Garciandía, F. Zubiri, F. Zapirain, and A. Esnaola, "Study of mechanical properties of AISI 316 stainless steel processed by 'selective laser melting', following different manufacturing strategies," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 51, no. 5–8, pp. 639–647, 2010, doi: 10.1007/s00170-010-2631-5.
- [24] S. Rivera, M. Panera, D. Miranda, and F. J. Belzunce Varela, "Development of dense and cellular solids in CRCOMO alloy for orthopaedic applications," *Procedia Eng.*, vol. 10, pp. 2979–2987, 2011, doi: 10.1016/j.proeng.2011.04.494.
- [25] L. Villalpando, H. Eiliat, and R. J. Urbanic, "An optimization approach for components built by fused deposition modeling with parametric internal structures," *Procedia CIRP*, vol. 17, pp. 800–805, 2014, doi: 10.1016/j.procir.2014.02.050.
- [26] R. Bonnard, "Proposition de chaîne numérique pour la fabrication additive.," Ecole Centrale de Nantes (ECN), 2010.
- [27] E. Umaras and M. S. G. Tsuzuki, "Additive Manufacturing Considerations on Geometric Accuracy and Factors of Influence," *IFAC-PapersOnLine*, vol. 50, no. 1, pp. 14940–14945, 2017, doi: 10.1016/j.ifacol.2017.08.2545.
- [28] P. M. Pandey, N. V. Reddy, and S. G. Dhande, "Slicing procedures in layered manufacturing: a review," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 9, no. 5, pp. 274–288, 2003, doi: 10.1108/13552540310502185.
- [29] Q. Sun, G. M. Rizvi, C. T. Bellehumeur, and P. Gu, "Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 14, no.

2, pp. 72–80, 2008, doi: 10.1108/13552540810862028.

- [30] S. Moylan, J. Slotwinski, A. Cooke, K. Jurrens, and M. A. Donmez, "An additive manufacturing test artifact," *J. Res. Natl. Inst. Stand. Technol.*, vol. 119, pp. 429– 459, 2014, doi: 10.6028/jres.119.017.
- [31] M. Mahesh, "Rapid prototyping and manufacturing benchmarking," National University of Singapore, 2004.
- [32] N. Decker and A. Yee, "A simplified benchmarking model for the assessment of dimensional accuracy in FDM processes," vol. 5, no. 2, pp. 145–154, 2015, doi: 10.1504/IJRAPIDM.2015.073573.
- [33] F. A. Cruz Sanchez, H. Boudaoud, L. Muller, and M. Camargo, "Towards a standard experimental protocol for open source additive manufacturing: This paper proposes a benchmarking model for evaluating accuracy performance of 3D printers," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 9, no. 3, pp. 151–167, 2014, doi: 10.1080/17452759.2014.919553.
- [34] F. Xu, Y. S. Wong, and H. T. Loh, "Toward generic models for comparative evaluation and process selection in rapid prototyping and manufacturing," *J. Manuf. Syst.*, vol. 19, no. 5, pp. 283–296, 2001, doi: https://doi.org/10.1016/S0278-6125(01)89001-4.
- [35] R. Ippolito, L. Iuliano, and A. Gatto, "Benchmarking of Rapid Prototyping Techniques in Terms of Dimensional Accuracy and Surface Finish," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 1, pp. 157–160, 1995, doi: 10.1016/S0007-8506(07)62296-3.
- [36] Z. Zhu, S. Keimasi, N. ANWER, L. Mathieu, and L. Qiao, "Review of Shape Deviation Modeling for Additive Manufacturing," in *International Joint Conference* on Mechanics, Design Engineering & Advanced Manufacturing (JCM 2016), 2016, pp. 205–241, doi: 10.1007/978-3-319-45781-9_25.
- [37] F. R. Liu, Q. Zhang, W. P. Zhou, J. J. Zhao, and J. M. Chen, "Micro scale 3D FEM simulation on thermal evolution within the porous structure in selective laser sintering," *J. Mater. Process. Technol.*, vol. 212, no. 10, pp. 2058–2065, Oct. 2012, doi: 10.1016/J.JMATPROTEC.2012.05.010.
- [38] L. E. Loh *et al.*, "Numerical investigation and an effective modelling on the Selective Laser Melting (SLM) process with aluminium alloy 6061," *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 80, pp. 288–300, 2015, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2014.09.014.
- [39] T. H. C. Childs, M. Berzins, G. R. Ryder, and A. Tontowi, "Selective laser sintering of an amorphous polymer - Simulations and experiments," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 213, no. 4, pp. 333–349, 1999, doi: 10.1243/0954405991516822.
- [40] L. Xu, Q. Huang, A. Sabbaghi, and T. Dasgupta, "Shape Deviation Modeling for Dimensional Quality Control in Additive manufacturing," in *Proceedings of the ASME 2013 International Mechanical Engineering Congress and Exposition IMECE2013*, 2013, pp. 1–6, doi: https://doi.org/10.1115/IMECE2013-66329.

- [41] Z. Zhu, N. Anwer, and L. Mathieu, "Shape Transformation Perspective for Geometric Deviation Modeling in Additive Manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 75, pp. 75–80, 2018, doi: 10.1016/j.procir.2018.04.038.
- [42] Q. Huang, J. Zhang, A. Sabbaghi, and T. Dasgupta, "Optimal Offline Compensation of Shape Shrinkage for 3D Printing Processes," ... 2012 Annu. Meet., no. 2, pp. 1–24, 2012, [Online]. Available: http://www.people.fas.harvard.edu/~sabbaghi/huang_zhang_sabbaghi_dasgupta.pdf.
- [43] Q. Huang, H. Nouri, K. Xu, Y. Chen, S. Sosina, and T. Dasgupta, "Predictive Modeling of Geometric Deviations of 3D Printed Products – A Unified Modeling Approach for Cylindrical and Polygon Shapes," 2014.
- [44] K. Tong, E. A. Lehtihet, and S. Joshi, "Parametric error modeling and software error compensation for rapid prototyping," *Rapid Prototyp. J.*, 2003, doi: 10.1108/13552540310502202.
- [45] K. Tong, S. Joshi, and E. A. Lehtihet, "Error compensation for fused deposition modeling (FDM) machine by correcting slice files," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 14, no. 1, pp. 4–14, 2008, doi: 10.1108/13552540810841517.
- [46] Z. Zhu, N. Anwer, and L. Mathieu, "Deviation Modeling and Shape Transformation in Design for Additive Manufacturing," *Procedia CIRP*, vol. 60, pp. 211–216, 2017, doi: 10.1016/j.procir.2017.01.023.
- [47] J. W. Herrmann et al., "New Directions in Design for Manufacturing," in Proceedings of the ASME 2004 International Design Engineering Technical Conferences and Computers and Information in Engineering Conference, Sep. 2004, pp. 853–861, doi: 10.1115/DETC2004-57770.
- [48] D. G. Ullman, *The mechanical design process*. Boston: McGraw-Hill Higher Education, 2010.
- [49] C. Dartigues, "État de l'art sur l'ingénierie concourante," Université Claude Bernard Lyon 1.
- [50] X. Godot, "Interactions Projet / Données lors de la conception de produits multitechnologiques en contexte collaboratif," l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2013.
- [51] T. Tomiyama, P. Gu, Y. Jin, D. Lutters, C. Kind, and F. Kimura, "Design methodologies: Industrial and educational applications," *CIRP Ann. - Manuf. Technol.*, vol. 58, no. 2, pp. 543–565, 2009, doi: 10.1016/j.cirp.2009.09.003.
- [52] F. Laverne, F. Segonds, N. Anwer, and M. Le Coq, "Conception pour la fabrication additive : un état de l'art," 2015, [Online]. Available: (hal-01148720).
- [53] F. Laverne *et al.*, "Dfam in the Design Process : a Proposal of Classification To Foster Early Design," in *CONFERE 2014 CROATIE*, 2014, pp. 1–12.
- [54] M. K. Shahzad, M. Tollenaere, S. Hubac, and A. Siadat, "Extension des méthodes DFM pour l'industrialisation de produits microélectroniques," 2011.
- [55] O. Kerbrat, P. Mognol, and J. Y. Hascoët, "A new DFM approach to combine machining and additive manufacturing," *Comput. Ind.*, vol. 62, no. 7, pp. 684–692,

2011, doi: 10.1016/j.compind.2011.04.003.

- [56] S. K. Gupta, W. C. Regli, D. Das, and D. S. Nau, "Automated Manufacturability Analysis : A Survey," *Res. Eng. Des.*, pp. 168–190, 1997, doi: https://doi.org/10.1007/BF01596601.
- [57] R. Becker, A. Grzesiak, and A. Henning, "Rethink assembly design," Assem. Autom., vol. 25, no. 4, pp. 262–266, 2005, [Online]. Available: http://www.emeraldinsight.com/doi/full/10.1108/01445150510626370.
- [58] G. A. Teitelbaum, L. C. Schmidt, and Y. Goaer, "EXAMINING POTENTIAL DESIGN GUIDELINES FOR USE IN FUSED DEPOSITION MODELING TO REDUCE BUILD TIME AND MATERIAL VOLUME," in the ASME 2009 International Design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering, 2009, pp. 1–10.
- [59] RedEye, "Design for Additive Manufacturability: FDM Basics," 2014.
- [60] M. T. Samperi, "Development of design guidelines for metal additive manufacturing and process selection," The Pennsylvania State, 2014.
- [61] M. Rivette, J.-Y. Hacoët, and P. Mognol, "A graph-based methodology for hybrid rapid design," *Proc. Inst. Mech. Eng. Part B J. Eng. Manuf.*, vol. 221, pp. 685–697, 2007.
- [62] G. Boothroyd, "Product design for manufacture and assembly," *Comput. Des.*, vol. 26, no. July, pp. 505–520, 1994, doi: 10.1016/0010-4485(94)90082-5.
- [63] M. Kumke, H. Watschke, and T. Vietor, "A new methodological framework for design for additive manufacturing," *Virtual Phys. Prototyp.*, vol. 11, no. 1, p. 3, 2016, doi: 10.1080/17452759.2016.1139377.
- [64] J. Jänsch and H. Birkhofer, "The development of the guideline vdi 2221 the change of direction," in *Proceedings DESIGN 2006, the 9th International Design Conference*, 2006, pp. 45–52.
- [65] R. Ponche, O. Kerbrat, P. Mognol, and J. Y. Hascoet, "A novel methodology of design for Additive Manufacturing applied to Additive Laser Manufacturing process," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 30, no. 4, pp. 389–398, 2014, doi: 10.1016/j.rcim.2013.12.001.
- [66] A. Thibault, "Contribution à l'intégration produit : processus de fabrication, application au domaine de la forge," Arts et Métiers ParisTech, 2008.
- [67] X. Godot, A. Siadat, and P. Martin, "Proposition d'une méthodologie de modélisation géométrique en contexte collaboratif," *Ingénierie Numérique Collab.*, 2009.
- [68] M. F. Ashby, Y. J. M. Bréchet, D. Cebon, and L. Salvo, "Selection strategies for materials and processes," *Mater. Des.*, vol. 25, no. 1, pp. 51–67, 2004, doi: 10.1016/S0261-3069(03)00159-6.
- [69] A. Daghouri, K. Mansouri, and M. Qbadou, "Information system performance evaluation and optimization using AHP and TOPSIS: Construction industry case," in *Proceedings of the 2018 International Conference on Optimization and*

Applications, ICOA 2018, 2018, no. Mcdm, pp. 1–8, doi: 10.1109/ICOA.2018.8370589.

- [70] U. Khaleeq, A. Siadat, M. Rivette, and A. A. Baqai, "Integrated product-process design to suggest appropriate manufacturing technology : a review," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2016, doi: 10.1007/s00170-016-9765-z.
- [71] U. K. uz Zaman, M. Rivette, A. Siadat, and S. M. Mousavi, "Integrated productprocess design: Material and manufacturing process selection for additive manufacturing using multi-criteria decision making," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 51, no. December 2017, pp. 169–180, 2018, doi: 10.1016/j.rcim.2017.12.005.
- [72] S. Desai, B. Bidanda, and M. R. Lovell, "Material and process selection in product design using decision-making technique (AHP)," *Eur. J. Ind. Eng.*, vol. 6, no. 3, pp. 322–346, 2012, doi: 10.1504/EJIE.2012.046666.
- [73] M. Akerdad, A. Aboutajeddine, and M. Elmajdoubi, "Supporting Product Development Activities By Reverse Engineering Technique," 2020.
- [74] Y. Louvigny, J. Nzisabira, B. Meunier, and P. Duysinx, "L'optimisation topologique et la fabrication additive, amélioration de la chaine de conception," in *14e colloque national AIP-Primeca*, 2015, no. 73, pp. 1–5.
- [75] A. M. Lovatt and H. R. Shercliff, "Manufacturing process selection in engineering design. Part 1: the role of process selection," *Mater. Des.*, vol. 19, no. 5, pp. 205– 215, 1998, doi: https://doi.org/10.1016/S0261-3069(98)00038-7.
- [76] A. Thibault, A. Siadat, M. Sadeghi, R. Bigot, and P. Martin, "Knowledge formalization for Product-process integration applied to forging domain," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 44, no. 11–12, pp. 1116–1132, 2009, doi: 10.1007/s00170-009-1928-8.
- [77] C. Lindemann, U. Jahnke, M. Moi, and R. Koch, "Analyzing Product Lifecycle Costs for a Better Understanding of Cost Drivers in Additive Manufacturing," 2012.
- [78] I. Bahnini, M. Rivette, A. Rechia, A. Siadat, and A. Elmesbahi, "Additive manufacturing technology: the status, applications, and prospects," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2018, doi: 10.1007/s00170-018-1932-y.
- [79] A. P. Markopoulos, W. Habrat, N. I. Galanis, and N. E. Karkalos, "Modelling and Optimization of Machining with the Use of Statistical Methods and Soft Computing," in *Design of Experiments in Production Engineering*, 2016.
- [80] U. K. uz Zaman, E. Boesch, A. Siadat, M. Rivette, and A. A. Baqai, "Impact of fused deposition modeling (FDM) process parameters on strength of built parts using Taguchi's design of experiments," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 101, no. 5–8, pp. 1215–1226, 2019, doi: 10.1007/s00170-018-3014-6.
- [81] S. O. Onuh and K. K. B. Hon, "OPTIMISING BUILD PARAMETERS FOR IMPROVED SURFACE FINISH IN STEREOLITHOGRAPHY," Int. J. Mach. Tools Manuf., vol. 38, no. 4, 1998, doi: 10.1016/S0890-6955(97)00068-0.
- [82] C. Wang, X. Tan, E. Liu, and S. Tor, "Process parameter optimization and

mechanical properties for additively manufactured stainless steel 316L parts by selective electron beam melting," *Mater. Des.*, 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.03.035.

- [83] N. Shamsaei, A. Yadollahi, L. Bian, and S. M. Thompson, "An overview of Direct Laser Deposition for additive manufacturing; Part II: Mechanical behavior, process parameter optimization and control," *Addit. Manuf.*, vol. 8, pp. 12–35, 2015, doi: 10.1016/j.addma.2015.07.002.
- [84] H. Chen and Y. F. Zhao, "Process parameters optimization for improving surface quality and manufacturing accuracy of binder jetting additive manufacturing process," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 22, no. 3, pp. 527–538, 2016, doi: 10.1108/RPJ-11-2014-0149.
- [85] M. Carret, "Capitalisation des connaissances," 2013.
- [86] C. Fall and A. A. Ndiaye, "Méthodologie de capitalisation valorisation des expériences des projets et programmes du FIDA en Afrique de l'ouest et du centre," 2005.
- [87] Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture (FAO), "Les bonnes pratiques à la FAO : Une démarche de capitalisation d'expériences pour un apprentissage continu," 2013.
- [88] G. Graugnard and V. Quiblier, "Note de synthèse du module de formation 'Introduction a la capitalisation d'expériences'.," 2006.
- [89] I. Bahnini, D.-C. Anghel, A. Rizea, U. K. uz Zaman, and A. Siadat, "Accuracy Investigation of Fused Deposition Modeling (FDM) Processed ABS and ULTRAT parts," J. Eng. Res., 2020.
- [90] T. Lieneke, V. Denzer, G. A. O. Adam, and D. Zimmer, "Dimensional Tolerances for Additive Manufacturing: Experimental Investigation for Fused Deposition Modeling," *Procedia CIRP*, vol. 43, pp. 286–291, 2016, doi: 10.1016/j.procir.2016.02.361.
- [91] A. Boschetto and L. Bottini, "Accuracy prediction in fused deposition modeling," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, vol. 73, no. 5–8, pp. 913–928, 2014, doi: 10.1007/s00170-014-5886-4.
- [92] A. Boschetto and L. Bottini, "Design for manufacturing of surfaces to improve accuracy in Fused Deposition Modeling," *Robot. Comput. Integr. Manuf.*, vol. 37, pp. 103–114, 2016, doi: 10.1016/j.rcim.2015.07.005.
- [93] C. Chung Wang, T. Lin, and S. Hu, "Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis," *Rapid Prototyp. J.*, vol. 13, no. 5, pp. 304–315, 2007, doi: 10.1108/13552540710824814.
- [94] I. Bahnini, U. K. uz Zaman, M. Rivette, N. Bonnet, and A. Siadat, "Computer-aided design (CAD) compensation through modeling of shrinkage in additively manufactured parts," *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-04924-8.
- [95] F. Rovere and G. Rochat, "bearingpoint.com," Industrie 4.0, évolution ou

révolution ? (Partie 1/2). https://www.bearingpoint.com/fr-fr/blogs/blog-industry/industrie-40-évolution-ou-révolution-partie-12/.

- [96] J. C. Najmon, S. Raeisi, and A. Tovar, "2 Review of additive manufacturing technologies and applications in the aerospace industry," *Addit. Manuf. Aerosp. Ind.*, pp. 7–31, 2019, doi: 10.1016/B978-0-12-814062-8.00002-9.
- [97] "my3dchoice," *OPTIMIZE 3D PRINTED OBJECTS VARIABLE SLICING*. https://www.my3dchoice.ch/knowledge-base/variable-slicing/.
- [98] B. Stucker, "Additive Manufacturing Technologies: Technology Introduction and Business Implications," *Front. Eng. 2011 Reports Leading-Edge Eng. from 2011 Symp.*, vol. 0, pp. 5–14, 2011.