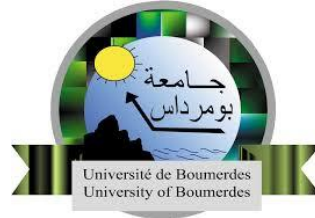


REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES



Faculté de Technologie

Thèse de Doctorat

Présentée par :

BOUMEDINE Asma

En vue de l'obtention du diplôme de **DOCTORAT - LMD** en :

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

**Intégration des contraintes liées aux matériaux
composites dans la conception et la fabrication des
produits industriels**

Devant le jury composé de :

M. Hamid AKNOUCHE	Pr, UMBB, Algérie	Président
M. Samir LECHEB	Pr, UMBB, Algérie	Directeur
M. Khaled BENFRIHA	MCF HDR, ENSAM, France	Co-Directeur
Mme. Kahina CHAHOUR	HDR, UMMTO, Algérie	Examineur
M. Wajdi ZOUAR	MCF, HDR,URCA, France	Examineur
M. Fodil MERAGHNI	Pr, ENSAM, France	Examineur
M. Hocine KEBIR	MCF HDR, France	Invité
M. Brahim SAFI	Pr, UTC, UMBB Algérie,	Invité

Année Universitaire 2022/2023



Remerciements

Après avoir rendu grâce à Dieu le Tout Puissant et Miséricordieux, je tiens à remercier vivement tous ceux qui, de près ou de loin, ont participé à la rédaction de ce document.

Je tiens à remercier le Pr. Lecheb Samir et le Dr. Benfriha Khaled, mes tuteurs de thèse, qui m'ont suivi et guidé durant ces années et m'ont conseillé sur l'orientation que celui-ci devait prendre.

Mes remerciements vont à tout le personnel que j'ai contacté durant mon stage au sein de l'ENSAM, auprès duquel j'ai trouvé un accueil chaleureux, une aide et une assistance dont j'avais besoin

De plus, je voudrais remercier chaleureusement M. Mohammedali Shirinabayan pour ses nombreux conseils qui m'ont été très utiles.

Je remercie tout particulièrement M. Pascal Omnes pour sa disponibilité, sa rigueur scientifique, ainsi que son sens de l'écoute et de l'échange.

Enfin, mes remerciements s'adressent à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin au bon déroulement de ce projet.

Résumé

Les dépôts fusionnés (FDM) représentent une technologie prometteuse qui présente de nombreux avantages ; leur modélisation s'est développée dans le domaine industriel au cours de ces dernières années. Aujourd'hui, la FDM est largement utilisée en petite série, car cette technologie optimise les chaînes d'approvisionnement en réduisant les délais et les coûts de production : ces paramètres sont essentiels dans tous les secteurs industriels. Cependant, ses points faibles ont ralenti leur adoption en tant que technologie de production dominante.

Parmi les faiblesses du procédé, on notera l'effet d'escalier, la porosité et les microcavités internes, ainsi que la finition de surface et la précision dimensionnelle. Le travail s'intéresse tout particulièrement à l'influence des paramètres de processus sur la précision géométrique et dimensionnelle des pièces imprimées par le procédé FDM.

Ce travail présente un plan factoriel complet basé sur les expériences réalisées. Les paramètres d'entrée étudiés du processus sont les dimensions associées à une géométrie constante, le type de matériaux et le type de modèle de remplissage (le maillage).

Une méthode de caractérisation des défauts associée à un modèle mathématique paramétrique a été développée à partir du plan d'expérience. En se basant sur la mesure de l'erreur par rapport au modèle théorique imprimé en 3D, cette méthode permet, à partir d'un nuage de points, de caractériser la géométrie prévisionnelle associée aux paramètres d'entrée.

Mots-clés: Fabrication additive (AM), Fabrication par filaments fusionnés (FFF), Plan d'expérience (DOE), Conception factorielle complète, Précision dimensionnelle, Composites, Modélisation mathématique, Caractérisation géométrique.

Abstract

Fused Deposition Modeling (FDM) is a promising technology with many advantages; its modeling has developed in the industrial field over the last few years. Today, FDM is widely used in small series, as this technology optimizes supply chains by reducing production times and costs: these parameters are essential in all industrial sectors. However, its weaknesses have slowed its adoption as a dominant production technology.

Weaknesses of the process include the staircase effect, internal porosity and micro-cavities, surface finish, and dimensional accuracy. This work focuses on the influence of process parameters on the geometric and dimensional accuracy of parts printed by the FDM process.

This work presents a comprehensive factorial plan based on experiments. The studied input parameters of the process are : the dimensions associated with a constant geometry, the type of materials, and the type of filling model (the mesh).

A defect characterization method associated with a parametric mathematical model resulted from the experimental design. Based on the measurement of error in relation to the theoretical model printed in 3D, the method allows characterizing the predictive geometry associated with the input parameters from a cloud of points.

Keywords : Additive Manufacturing (AM), Fused Filament Fabrication (FFF), Design of Experiments (DOE), Full Factorial Design, Dimensional Accuracy, Composites, Mathematical Modeling, Geometrical Characterization.

Table des matières

Remerciements.....	1
Résumé.....	2
Abstract	3
Table des matières.....	4
Liste des tableaux	7
Table des figures.....	8
Introduction générale.....	11
1. Problématique de recherche.....	12
2.Objectifs de recherche.....	14
3.Méthodologie de Recherche.....	15
4.Originalité de la recherche.....	16
Chapitre I. Recherche bibliographique	
I.1. Les travaux de littérature sur la précision dimensionnelle des pièces fabriqués en mode additifs.....	17
I.2. Les travaux de littérature sur la précision dimensionnelle et géométriques des pièces fabriquées en mode additifs en utilisant des méthodes numériques et mathématiques.....	34
Conclusion	48
II. Partie expérimentale	
II.1. Comment fonctionne la fabrication additive ?.....	49
II.2. Les matériaux composites et la fabrication additive.....	49
II.3. Méthodologie.....	51
II.3.1. Matériaux et traitement.....	51
II.3.2. Plan Expérimental.....	53
II.4. Procédures expérimentales	57



II.5. Markforged système.....	57
II.5. 1.Caractéristiques techniques	57
II.5.2. Eiger.....	58
II.5. 3. Matériaux de base (la Matrice).....	58
II.5. 4.Types de fibres.....	59
II.5. 5.Motif de remplissage	59
II.5. 6. Densité de remplissage	60
II.5. 7. Type de remplissage de fibre	60
II.5. 7. 1. Remplissage concentrique.....	60
II.5. 7. 2. Remplissage isotrope.....	61
II.6. Solutionix D500.....	63
II.6. 1.Spécification du système.....	64
II.7. Géomagique ContrôleX.....	64
II.8. Conclusion	65
III. Résultats et discussions	
III. Analyse des facteurs d'impact	66
III.1. Analyse des facteurs d'entrée sur l'écart moyen.....	68
▪ III.1.1. Analyse des effets normalisés.....	68
▪ III.1.2. Principaux effets pour l'écart moyen	69
▪ III.1.3. Interactions pour l'écart moyen (moyennes ajustées).....	70
▪ III.1.4. Rapport ANOVA pour l'écart moyen.....	71
• III.1.4. 1. Analyse de la variance.....	71
• III.1.4. 2. Résumé du model.....	72
• III.1.4. 3. Coefficients de variance.....	72
III.2. Analyse des facteurs d'entrée sur la variance	74
▪ III.2.1. Analyse des effets de variance normalisés.....	74
▪ III.2.2. Principaux effets sur la variance.....	75
▪ III.2.3. Interactions pour la variance.....	76
▪ III.2.4. Rapport ANOVA pour la variance.....	77

• III.2.4. 1. Analyse de variance pour variance.....	77
• III.2.4. 2. Résumé du modèle.....	78
• III.2.4. 3. Coefficients pour la variance.....	79
III.3. Modélisation mathématique elliptique.....	80
III.3.1. Composition de l'outil de calcul	83
▪ III.3.1. 1. Evaldistance.....	83
▪ III.3.1. 2. Initial guess.....	83
▪ III.3.1. 3. Jacobsys.....	84
▪ III.3.1. 4. Solve by newton	85
▪ III.3.1. 5. Syseval.....	86
▪ III.3.1. 6. Trouve-ellipse.....	87
III .4. Résultats des calculs	88
Conclusion générale.....	89

Liste des tableaux

Tableau.1 : Paramètres FDM et leurs niveaux.....	23
Tableau.2 : liste des variables de processus et leurs niveaux.....	27
Tableau. 3 : Description des paramètres de contrôle expérimentaux.....	29
Tableau. 4 Les paramètres de traitement expérimental.....	30
Tableau.5 : les facteurs et leurs niveaux.....	44
Tableau.6 : la matrice de plan expérimental.....	55
Tableau.7 : la matrice de plan expérimental avec notation Taguchi.....	56
Tableau.8 : Spécifications du scanner Solutionix.....	64
Tableau.9 : la matrice de plan expérimental avec résultats de la variance et l'écart moyen....	67
Tableau. 10 : Analyse de la variance.	71
Tableau. 11. Résumé du modèle de l'écart moyen.	72
Tableau.12: Coefficients de l'écart moyen.	72
Tableau. 13 : Analyse de la variance.....	77
Tableau. 14 : Résumé du modèle de variance..... ;.....	78
Tableau.15 : Coefficients de variance.....	78
Tableau.16: Les résultats de l'écart par rapport au calcul de la cylindricité.....	88

Table des figures

Figure. 1 : schéma de fabrication des filaments fondus.....	12
Figure. 2 : modèle CAO vs Le modèle imprimé en 3D.....	14
Figure. 3 : Juxtaposition de la force et de la précision des échantillons FDM (plus élevée = meilleure)	18
Figure. 4 : représentation des trois pièces de l'étude #1, #2, #3.....	19
Figure. 5 : Graph 1 : Effet de la stratégie de dépôt (orientation des filaments) sur le profil de température de refroidissement, Graph 2 : Profils de température à différentes températures de liquéfaction (température de l'enveloppe : 708 ° C et (b) profils de température à divers températures de l'enveloppe (température du liquéfacteur : 2708C°	20
Figure. 6 : Graph 1 : (a) Profils de température à différentes températures du liquéfacteur (température de l'enveloppe : 708 ° C) et (b) profils de température à divers températures de l'enveloppe (température du liquéfacteur : 2708 ° C) Graph 2 : Variation des profils de température en fonction des emplacements de construction des pièces.....	21
Figure. 7 : Illustration des facteurs de contrôle expérimentaux.....	24
Figure. 8 : benchmark (Conception) du modèle de référence.....	26
Figure. 9 : Les formes des trois modèles de remplissage utilisés pour fabriquer les échantillons FDM.....	28
Figure. 10 : (a) orientations d'impression des éprouvettes cylindriques ; (b) paramètres utilisés pour l'impression d'échantillons d'essai en os de chien(dog-bone), y compris l'orientation d'impression, l'angle de direction de trame et l'épaisseur de la couche.....	31
Figure. 11: (a): benchmark 1, (b): benchmark 2.....	32
Figure. 12 : Variation dimensionnelle de la surface réelle obtenue par FDM par rapport au modèle CAO.....	34
Figure. 13 : Les zones utilisées pour mesurer le GD&T forment la partie conception. La sous-figure (a) montre les faces utilisées pour mesurer la planéité () , la circularité () et la	


cylindricité () et (b) montre les plans utilisés pour mesurer l'épaisseur - trois mesures d'épaisseur sont prises sur chaque plan.....	35
Figure. 14 : approche de construction de modèles conduit à une stratégie de compensation efficace pour les produits cylindriques.....	36
Figure. 15 : Illustration de l'écart géométrique 3D entre la conception CAO et la structure imprimée.....	37
Figure. 16 : Illustration de la cartographie entrée-sortie utilisée dans le modèle d'apprentissage machine CAN.....	38
Figure. 17 : comparaisons illustrées entre les valeurs réelles et les valeurs prédites par BP et RSM.....	39
Figure. 18 : Impact de l'orientation de construction.....	39
Figure. 19 : Pièce 1, Pièce 2.....	40
Figure. 20 : Variation des VE relatifs pour des formes primitive.....	41
Figure. 21 : Schéma d'entraînement du modèle de compensation géométrique basé sur l'ANN.....	42
Figure. 22: Schematic of compensated STL file generation using trained ANN model.....	43
Figure. 23 : une section d'un élément sphérique fabriqué par le procédé AM, la relation entre le rayon de la sphère et la cuspidé.....	47
Figure. 24 : Flux général du processus d'impression 3D.....	51
Figure.25 : échantillon.....	52
Figure. 26 : (a) Composites renforcés de fibres continues (exp : fibre de carbone et fibre de verre) et (b) processus d'impression 3D Markforged®.....	53
Figure.27 : Organigramme de l'étude expérimentale.....	57
Figure.28 : Imprimante Markforged.....	58
Figure. 29 : Motif de remplissage : Hexagonale, Triangulaire, Rectangulaire.....	60

Figure. 30 : Remplissage concentrique ; Tous les murs, Coque extérieure uniquement, Trous intérieurs uniquement.....	60
Figure. 31 : Remplissage isotropique.....	61
Figure. 32 : Couche de mur.....	62
Figure. 33 : Couches de toit et de plancher.....	62
Figure. 34 : Le nombre de couches en fibre.....	63
Figure.35 : les anneaux de remplissage de fibres concentriques.....	63
Figure.36 : SolutionixD500.scanner.....	64
Figure.37 : Diagramme de Pareto des effets standardisés pour l'écart moyen.....	69
Figure. 38 : Graphique des effets principaux pour l'écart moyen.....	70
Figure. 39 : Interactions pour l'écart moyen.....	71
Figure. 40 : Diagramme de Pareto des effets normalisés pour la variance.....	74
Figure. 41 : Graphique des effets principaux pour la variance.....	75
Figure. 42 : Interactions pour la variance.....	78



Introduction générale

Introduction générale

Une technique de fabrication révolutionnaire largement adoptée de nos jours, appelée la fabrication additive, remet totalement en cause nos méthodes de production et est de plus en plus utilisée pour plusieurs raisons : à la fois simple et novatrice, elle peut améliorer la flexibilité et la commodité, réduire les coûts de fabrication et le temps de production [1, 2]. De plus, elle offre une capacité de reproduction et de création quasi illimitée, élimine le besoin d'outillage spécialisé et réduit le gaspillage de matériau [3].

Cette technique consiste en fait à superposer des couches de matières à partir des données du modèle 3D (CAO), jusqu'à ce que le modèle entier soit formé. Le procédé d'impression 3D est apparu dans les années 70 et s'est depuis développé, donnant lieu à plusieurs types de fabrication additive tels que : Modélisation par dépôt en fusion (Fused Deposition Modeling ; FDM), Modélisation d'objets stratifiés (Laminated Object Modeling ; LOM), Stéréolithographie (SLA), Frittage laser sélectif (Sélective Laser Sintering ; SLS), Fusion sur lit de poudre (Powder Bed Fusion), et Dépôt énergétique dirigé (Direct Energy Deposition).

Malgré tout le potentiel que cette technique peut offrir comparée aux procédés de fabrication soustractifs et formatifs traditionnels, elle souffre de nombreux problèmes cruciaux pour étendre son adoption. Sur l'échelle mécanique, on rencontre des problèmes de résistance au cisaillement et à la traction, et sur l'échelle dimensionnelle, une faible exactitude et précision des pièces fabriquées par ce processus [4].

Le manque de précision associée à la géométrie des pièces imprimées en 3D est une préoccupation majeure qui freine une adoption plus large des processus [5] et limite leur utilisation dans des composants critiques pour les applications aérospatiales et de défense [6] [7] [8]. Par conséquent, cela empêche la fabrication additive de devenir un processus de production primaire [9].

Le manque de précision de forme et de géométrie est un obstacle critique et les pièces présentant une haute précision sont très demandées [10, 11]. Cependant, l'optimisation et le contrôle du post-traitement sont nécessaires pour répondre aux spécifications de conception, et ce contrôle de précision de forme aura une importance vitale pour la fabrication additive (FA) [12, 13].

Introduction générale

La mauvaise répétabilité des processus reste un obstacle majeur à l'exploitation à l'échelle commerciale, car l'utilisation des composants fabriqués par ce procédé est limitée au prototypage et n'est pas adaptée à l'industrialisation.

Ce travail vise à comprendre et analyser les sources d'imprécisions géométrique et dimensionnelle des pièces imprimées en 3D en utilisant une machine de fabrication des filaments fondus appelée la Markforged MarkTwo.

Il vise également à identifier et quantifier ces imprécisions et inexactitudes en contrôlant différents paramètres dès la phase de conception et lors du choix des traitements postérieurs. La compréhension de la génération d'écart entre le modèle initial 3D et le modèle final imprimé permettra d'améliorer l'évolutivité de ce procédé et d'étendre son utilisation pour créer de meilleurs produits.

1.Problématique de recherche

L'une des technologies prometteuses pour la fabrication et la production de composants est la fabrication additive. Ce procédé présente de nombreux avantages par rapport aux procédés conventionnels.

Dans ce travail, nous avons utilisé l'une des techniques de fabrication les plus courantes : la fabrication des filaments fondus (FDM). Ce procédé est basé sur l'extrusion thermo-fusible de filaments fondus, couche par couche, à partir des données d'un modèle 3D jusqu'à ce que le modèle complet soit formé.

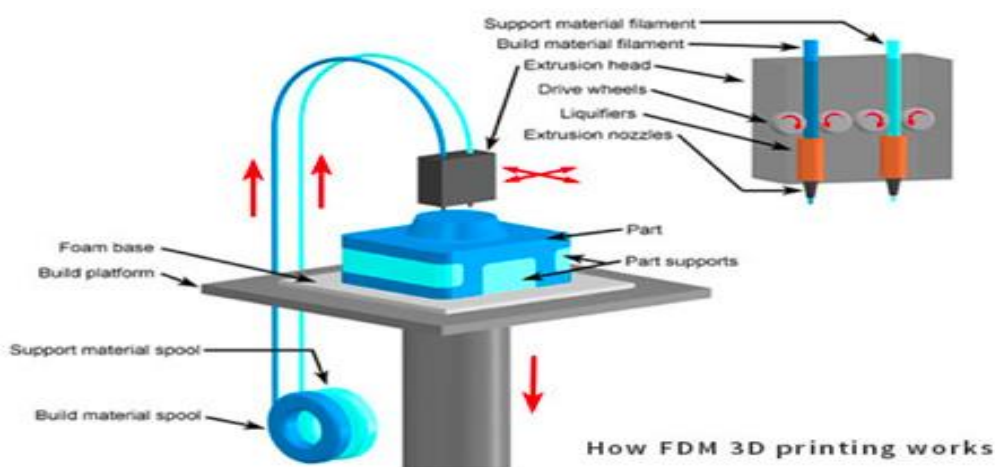


Figure. 1 : schéma de fabrication des filaments fondus

Introduction générale

Ce processus présente des avantages ainsi que des inconvénients qui freinent parfois son utilisation. Parmi les avantages, on peut citer un niveau élevé de personnalisation et d'automatisation, un délai réduit de production, la possibilité de fabriquer des géométries complexes qui seraient autrement impossibles, ainsi qu'un assemblage simplifié. Il offre également un large éventail de domaines d'application, ce qui contribue à améliorer l'approvisionnement de la chaîne logistique dans le monde industriel.

Cependant, plusieurs barrières entravent sa croissance, telles que le coût élevé des équipements et des matériaux, la porosité et les vides dans les composants, les imperfections et la mauvaise finition de surface, l'effet des marches d'escalier, la limitation des matériaux, la taille limitée des pièces fabriquées et la faible précision dimensionnelle.

Dans ce travail, nous nous intéressons à la qualité en termes de précision dimensionnelle et d'exactitude géométrique des composants fabriqués avec une machine FDM de la plateforme 4.0 du laboratoire LCPI, appelée Markforged MarkTwo.

Cette problématique de recherche a été soulevée par un ensemble de chercheurs car elle constitue un obstacle empêchant l'utilisation des composants fabriqués par le procédé de fabrication additive dans des domaines critiques [14] [15] [16] [17] [18], limitant ainsi ce procédé au prototypage rapide plutôt qu'à l'industrialisation.

La faible précision dimensionnelle a été abordée dans plusieurs travaux de recherche précédents, au cours desquels les principales sources d'erreur ont été identifiées. Par exemple, dans la FDM, on observe des erreurs mathématiques liées à l'approximation des surfaces des pièces dans le fichier standard en entrée ; des erreurs liées au matériau, telles que le retrait et la distorsion ; ainsi que des erreurs liées au processus, comme les erreurs de positionnement dans le plan XY dues au déplacement de la tête de buse et dans l'axe Z dues à l'empilement des différentes couches [19].

Le modèle imprimé en 3D peut présenter un écart de précision dimensionnelle ou un degré d'incompatibilité dimensionnelle par rapport au produit idéal CAO (dimensions nominales).

De là, notre problématique de recherche est la suivante :

Comment améliorer les précisions géométriques et dimensionnelles des composants fabriqués en mode additif ?

Introduction générale

Le modèle CAO \neq Le modèle imprimé en 3D



Figure. 2 : modèle CAO vs le modèle imprimé en 3D

Nous cherchons à améliorer le degré de compatibilité des dimensions de base du produit obtenu avec les dimensions du produit idéal (dimensions nominales) des composants imprimés avec la MARKFORGED.

2. Objectifs de recherche

Dans ce travail, nous cherchons à optimiser les paramètres de processus de fabrication additive (AM) pour obtenir des pièces présentant le moins d'imprécision dimensionnelle et géométrique.

L'objectif principal est d'analyser et de comprendre le comportement des composants fabriqués par la Markforged afin d'élaborer un modèle d'aide à la conception de composants qui anticipe les écarts potentiels. En fin de compte, nous proposerons des recommandations aux concepteurs pour réduire les itérations de conception.

Cet objectif englobe deux domaines. D'abord, sur le plan scientifique, nous développons un modèle mathématique prédictif qui anticipe les écarts potentiels dès la phase de conception. Ce même modèle sera également utilisé dans le domaine industriel pour étendre la viabilité commerciale de la fabrication additive.

L'atteinte de cet objectif constitue une étape clé pour l'adoption de ce procédé, non seulement pour le prototypage rapide, mais également pour l'industrialisation.

Introduction générale

3.Méthodologie de Recherche

La première étape de ce travail a consisté en la lecture d'articles de références bibliographiques issus du domaine de la fabrication additive. En particulier, nous avons étudié la littérature sur les processus et les méthodes développées dans la production utilisant l'impression 3D, ainsi que les contraintes qui affectent la qualité du produit final fabriqué par ce procédé.

Dans cette recherche, nous avons identifié et classé les paramètres qui influencent la qualité du produit final, que ce soit sur l'échelle mécanique en incluant les propriétés et les caractéristiques mécaniques, ou sur l'échelle de la précision géométrique et dimensionnelle.

Ces paramètres sont liés à plusieurs aspects :

La machine d'impression : vibration interne et externe, vibration de la buse, instabilité de la tension, manque d'entretien, etc.

Les paramètres d'impression : densité, maillage, type de matériau, taux de remplissage, orientation des fibres en cas de pièce renforcée, température de l'enveloppe, température de la matière extrudée, diamètre de la buse, direction de fabrication, vitesse de dépôt.

Les paramètres externes : le modèle à imprimer, qu'il s'agisse d'une géométrie simple ou complexe, la taille du composant, la vitesse de refroidissement qui dépend du type de matériau utilisé (propriété thermique), la translation du format du fichier CAD 3D au format STL.

À partir de là, nous nous sommes intéressés à la problématique de la précision et de l'exactitude de ce processus de fabrication, en prenant en compte les caractéristiques de notre imprimante, la MARKFORGED. Nous avons décidé d'étudier l'effet et l'influence de trois paramètres différents à différentes échelles sur une géométrie modèle de forme primitive cylindrique.

Le premier paramètre concerne le choix des paramètres d'impression, plus précisément le type de maillage qui représente l'architecture interne de la pièce. Nous avons la possibilité de choisir parmi différents types de maillages : triangulaire, rectangulaire, hexagonal ou solide.

Le deuxième paramètre est lié au choix du matériau utilisé. L'avantage de notre imprimante est qu'elle permet d'imprimer des pièces en composite, ce qui n'est pas possible avec d'autres machines. Le renforcement en fibres longues permettra d'améliorer les caractéristiques mécaniques des composants, mais cela introduit également d'autres paramètres perturbants tels

Introduction générale

que les caractéristiques mécaniques du matériau (viscosité, aspects thermiques, rhéologiques, etc.).

Le troisième paramètre est la taille de la pièce à imprimer, un problème qui a été évoqué à plusieurs reprises.

Après avoir sélectionné les paramètres d'entrée, nous avons mené une autre étude bibliographique afin d'identifier les méthodes et les outils d'optimisation utilisés par d'autres chercheurs.

Pour cette étude multi-paramètres, nous avons structuré les expérimentations en utilisant un plan expérimental (Design Of Experiment, DOE) basé sur un plan expérimental complet comprenant 27 essais.

4.Originalité de la recherche

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche global visant à développer une nouvelle plateforme pédagogique et de recherche 4.0 au Arts et Métiers, campus de Paris. Plusieurs doctorants travaillent sur ce projet de recherche, qui aborde les thèmes de la flexibilité des opérations de production, de la maintenance prédictive et de la fabrication additive. Que ce soit en phase de conception, de fabrication, de maintenance ou d'exploitation, la fabrication additive accroît l'efficacité et la flexibilité des processus, un terme souvent associé à l'industrie du futur.

Dans ce cadre, cette thèse vise à optimiser la conception des composants en terme de précision dimensionnelle, en agissant sur les paramètres de fabrication et de conception.

Ce qui rend cette recherche originale, c'est que nous utilisons la Markforged MarkTwo, qui permet d'imprimer des pièces en composites. La matrice ou le matériau de base est le nylon ou l'onix, renforcés en fibres longues telles que la fibre de verre, de carbone ou de Kevlar.

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Chapitre I : Recherche bibliographique

La fabrication additive (AM) ou prototypage est une technologie révolutionnaire qui permet de fabriquer des composants 3D à partir de données de modèles CAO [20] [21] [22]. Ce concept sophistiqué de conception et de fabrication de produits lui permet de devenir la troisième révolution industrielle [24]. Ce mode de production particulier permet de fabriquer des modèles complexes [25] [26] [27]. Conception polyvalente, et avec un large choix de matériaux, ce sont des caractéristiques qui entrent dans son champ d'application [28]. L'opérabilité des pièces dans des domaines critiques tels que la santé et l'aérospatiale est essentielle ; vérifier la constructibilité optimale des composants tout en assurant la précision dimensionnelle et géométrique des pièces produites est fondamental, vérifier la constructibilité optimale des composants tout en assurant la précision dimensionnelle et géométrique des pièces produites est fondamental

I.1. Les travaux de littérature sur la précision dimensionnelle des pièces fabriqués en mode additifs

Dans le but d'obtenir des composants qui présentent le moins d'imprécision géométriques et dimensionnelles des pièces fabriquées en mode additifs, différentes méthodes ont été utilisées pour optimiser ce procédé.

Certains chercheurs ont étudié l'influence de divers paramètres de processus tels que l'orientation de construction, l'épaisseur de couche, la largeur de contour, l'angle de trame (Raster Angle), le facteur de retrait (shrinkage) et le trou d'air (Air Gap) [Niteen et al]. Ils ont utilisé des méthodes numériques et mathématiques, telles que le plan d'expérience Taguchi (DOE ; design of experiment) ou la carte auto-organisée (self organizing map), pour leurs études. D'autres chercheurs ont examiné les tolérances de forme en termes d'écart entre le modèle CAO et le modèle imprimé en 3D [29].

Parmi les études réalisées sur l'optimisation, on retrouve celle de Filip Górski et al. Dans leur étude, ils ont identifié la relation entre l'orientation du modèle pendant la fabrication et la précision dimensionnelle ainsi que la répétabilité des produits obtenus. Ils ont découvert que l'orientation influence directement à la fois la précision et la répétabilité des pièces FDM de manière non linéaire et difficile à décrire mathématiquement avec un nombre restreint d'échantillons. Pour leur recherche, ils ont préparé un ensemble d'échantillons, fabriqués avec des paramètres de processus variables (X: 0 (à plat), Y: 0), (X: 90 (sur le côté), Y: 0), (X: 0, Y: 45), (X: 90, Y: 45), (X: n/a (vertical), Y: 90), et les ont mesurés à l'aide d'un scanner 3D. Ils

Chapitre I : Recherche bibliographique

ont ensuite comparé la précision avec la résistance des mêmes échantillons fabriqués par FDM dans d'autres études, en effectuant des tests de traction. Les résultats sont présentés dans la figure suivante pour les trois cas d'étude :

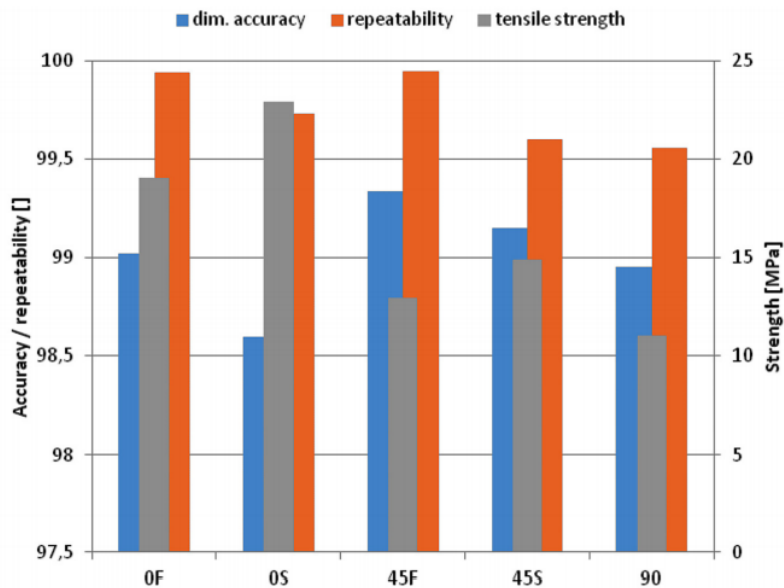


Figure. 3 : Juxtaposition de la force et de la précision des échantillons FDM (plus élevée = meilleure) [30]

Ils ont conclu que plus la taille de l'objet est grande, plus la fabrication est précise, mais cela ne s'applique qu'aux déviations relatives. Par conséquent, il n'existe pas de combinaison parfaite, ce qui justifie pleinement l'utilisation d'outils d'intelligence artificielle pour déterminer l'orientation optimale [30].

Dans une autre recherche menée par Bochmann et al, l'objectif était de comprendre la relation entre les caractéristiques du processus de fabrication des filaments fondus (FDM) et la génération d'erreurs liées à la machine. Ils ont utilisé une approche de budget d'erreur pour cette étude.

Pour cela, six pièces de contrôle ont été fabriquées sur deux machines FDM différentes (Stratasys Dimension BST 1200es et SST 1200es). Ces pièces de contrôle ont été imprimées avec deux niveaux de densité différents pour chaque machine : solide et basse densité, toutes produites en ABS.

Le travail a été divisé en trois cas d'étude, chacun utilisant un modèle spécifique :

Chapitre I : Recherche bibliographique

Pièce n° 1 : utilisée pour quantifier les erreurs de forme et la résolution dans la fabrication des filaments fondus (FDM).

Pièce n° 2 : utilisée pour étudier l'effet d'escalier sur la rugosité de surface.

Pièce n° 3 : utilisée pour estimer l'exactitude et la précision du FDM.

Grâce à cette approche, ils ont pu étudier en détail l'influence des paramètres d'impression tels que l'orientation de construction et la densité des pièces sur la forme et la résolution des composants fabriqués par FDM.

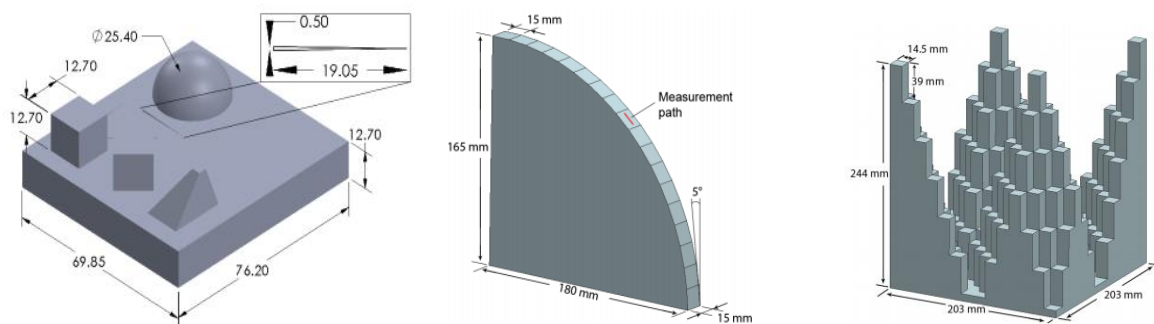


Figure. 4 : représentation des trois pièces de l'étude #1, #2, #3[31]

Pour étudier l'influence de l'effet d'escalier sur la rugosité de la surface, la pièce de contrôle #2 a été conçue avec des surfaces présentant des variations d'orientation de construction (θ) allant de 0° à 90° par intervalles de 5° .

L'évaluation de la forme a été réalisée en mesurant la rondeur de la caractéristique de l'hémisphère et en faisant des observations qualitatives de la pièce imprimée. Quant à la résolution, elle a été estimée à partir de la longueur et de la largeur minimales de la fonction de « tear drop feature ».

Pour résumer la précision estimée, ils ont mesuré le contrôle dans les directions X, Y et Z par rapport à différentes positions. Leurs résultats ont montré que la direction Z présentait la plus grande précision sur leur machine FDM [31].

Dans une autre recherche menée par Prahalad et al, l'objectif était de quantifier l'écart relatif dans l'intégrité dimensionnelle des composants complexes fabriqués par le procédé de fabrication additive. Ils ont proposé une nouvelle approche basée sur la théorie des graphes spectraux (SGT) pour améliorer la qualité critique des pièces fabriquées en mode additif. Pour cela, ils ont calculé le nombre de Fiedler invariant topologique basé sur SGT (k_2) à partir de

Chapitre I : Recherche bibliographique

mesures de coordonnées de nuages de points 3D, ce qui leur a permis de quantifier l'intégrité dimensionnelle des composants testés [32].

Une autre étude menée par Sun et al, les chercheurs ont étudié les mécanismes contrôlant la formation de liaisons dans le processus de modélisation par dépôt en fusion (FDM). Ils ont évalué la qualité de la liaison en mesurant et analysant les changements dans la mésostructure et le degré de liaison atteint aux interfaces entre les filaments adjacents du polymère.

Des mesures expérimentales des profils de température ont été effectuées pour des échantillons produits dans différentes conditions de traitement, notamment l'effet de la stratégie de dépôt (orientation des filaments), l'épaisseur de couche et les profils de température à différentes températures de lixiviant, permettant ainsi d'étudier les variations des profils de température.

Chapitre I : Recherche bibliographique

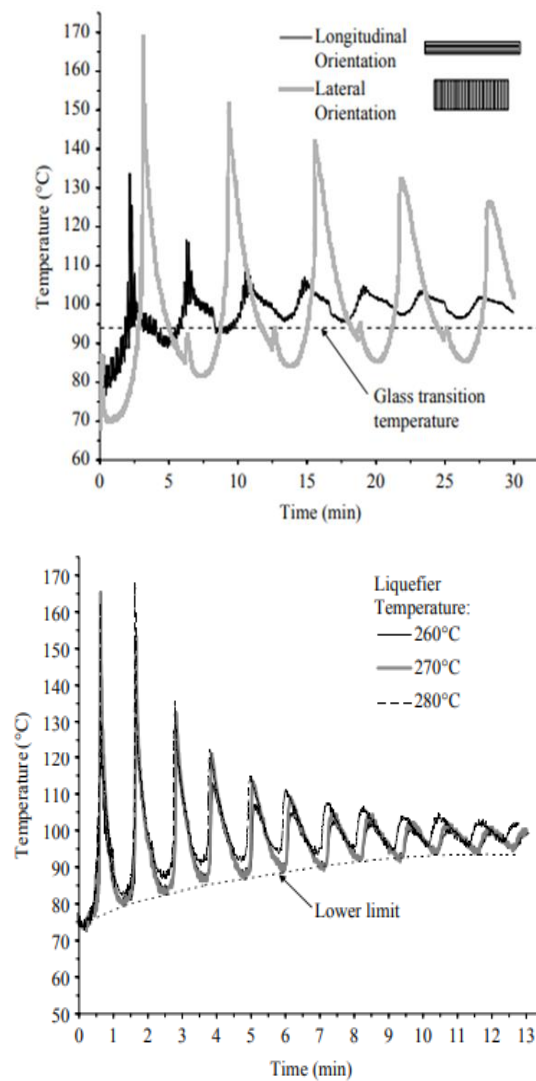


Figure. 5 : Graph 1 : Effet de la stratégie de dépôt (orientation des filaments) sur le profil de température de refroidissement, Graph 2 : Profils de température à différentes températures de liquéfaction (température de l'enveloppe : 708 ° C et (b) profils de température à diverses températures de l'enveloppe (température du liquéfacteur : 2708 ° C

Chapitre I : Recherche bibliographique

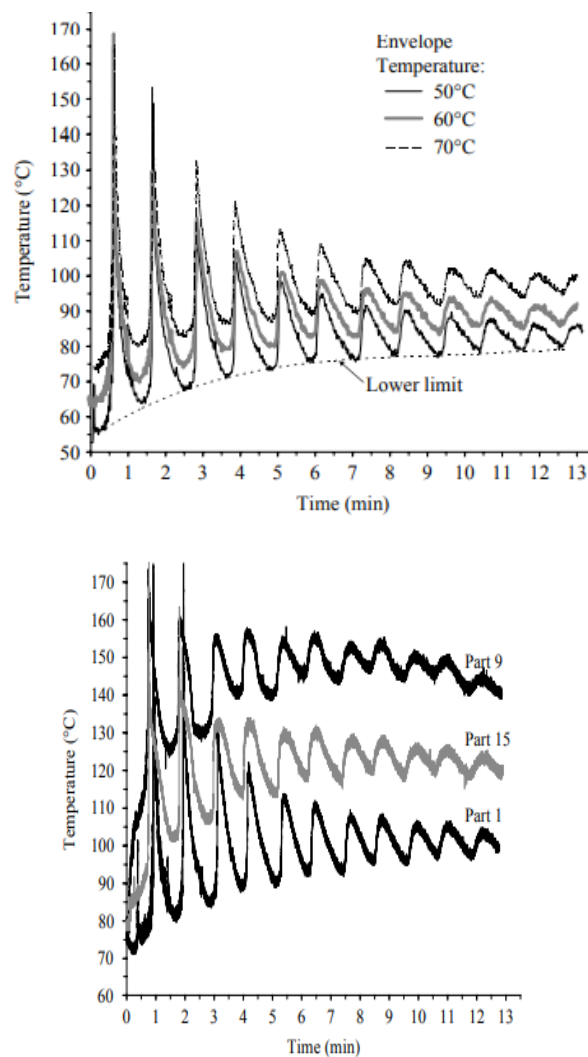


Figure. 6 : Graph 1 : (a) Profils de température à différentes températures du liquéfacteur (température de l'enveloppe : 708 ° C) et (b) profils de température à diverses températures de l'enveloppe (température du liquéfacteur : 2708 ° C) Graph 2 : Variation des profils de température en fonction des emplacements de construction des pièces [33].

Ils ont observé que le profil de refroidissement est influencé par la température de l'enveloppe, les variations du coefficient de convection et la stratégie de fabrication, qui ont également un impact sur la méso-structure et la qualité globale de la liaison entre les filaments. Pour évaluer la qualité de la liaison, ils ont examiné expérimentalement la croissance du col formé entre les filaments adjacents et leur rupture sous charge de flexion [33].

Dans une autre étude menée par Dharipalli Hyndhavi et al, l'influence des paramètres de processus tels que l'épaisseur de la couche, l'angle de trame et l'orientation de la construction sur la précision dimensionnelle des composants fabriqués par le procédé de fabrication des

Chapitre I : Recherche bibliographique

filaments fondus (FDM) a été étudiée en utilisant deux matériaux différents : l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) et l'acide poly-lactique (PLA). Ils ont également évalué l'interaction entre ces paramètres. Pour déterminer les niveaux optimaux des facteurs de paramètres pour toutes les caractéristiques dimensionnelles simultanément, ils ont utilisé l'analyse de grade relationnel de Gray (Grey Relational Grade Analysis). L'objectif était de minimiser le changement en pourcentage dans les trois caractéristiques dimensionnelles différentes : la longueur (L), la largeur (W) et l'épaisseur (T) des pièces.

Ils ont réalisé une étude expérimentale en utilisant un plan factoriel complet de 2 niveaux (23 ; 3 facteurs à 2 niveaux). La caractérisation expérimentale s'est déroulée en deux étapes : dans la première étape, les pièces ont été fabriquées en faisant varier les paramètres du processus (épaisseur de couche, angle de trame, orientation de construction), puis dans la deuxième étape, les caractéristiques dimensionnelles (L, W et T) ont été mesurées pour les pièces fabriquées.

Les résultats ont montré que pour le matériau ABS, une épaisseur de couche de 200 microns, un angle de trame de 0 degré et une orientation de construction de 90 degrés amélioreraient la précision dimensionnelle globale de la pièce fabriquée. Pour le matériau PLA, une épaisseur de couche de 200 microns, un angle de trame de 0 degré et une orientation de construction de 0 degré augmenteraient la précision dimensionnelle de la pièce fabriquée.

L'analyse expérimentale a montré que le contrôle adéquat des paramètres du procédé améliore la précision dimensionnelle des pièces fabriquées en utilisant les matériaux ABS et PLA dans le procédé FDM [34].

B.H. Lee et al. ont mené une étude dans le but d'examiner l'influence des paramètres de processus tels que l'entrefer (air gap), l'angle de trame (raster angle), la largeur de trame (raster width) et l'épaisseur de couche (layer thickness) sur les propriétés élastiques d'un prototype ABS. L'objectif était également de déterminer les paramètres optimaux pour obtenir les meilleures performances du prototype.

Pour cela, ils ont utilisé la méthode de plan d'expérience Taguchi (design of experiment) avec un plan orthogonal, qui leur a permis d'analyser l'effet principal, le rapport signal sur bruit (S/B) et d'effectuer une analyse de la variance (ANOVA) pour étudier en détail les principaux paramètres de processus qui influencent les performances du prototype.

Tableau.1 : Paramètres FDM et leurs niveaux [35]

Chapitre I : Recherche bibliographique

Symbol	FDM parameter	Unit	Level 1	Level 2	Level 3
A	Air gap	mm	Solid fine	Sparse	Double wide
B	Raster angle	Degree angles	0°/90°	45°/-45°	30°/60°
C	Raster width	mm	0.305	0.655	0.980
D	Layer thickness	mm	0.178	0.254	0.305

Les conclusions de leur étude sont les suivantes :

Les quatre paramètres étudiés (entrefer, angle de trame, largeur de trame et épaisseur de couche) ont une incidence significative sur les performances flexibles, en particulier en termes de distance de projection maximale. L'ordre de contribution des paramètres pour la distance de projection maximale était l'entrefer en premier, suivi de l'angle de trame, de l'épaisseur de couche, puis de la largeur de trame. Selon les analyses d'effet principal et d'ANOVA, les paramètres optimaux pour atteindre la distance de projection maximale du prototype étaient l'entrefer réglé au niveau 3, l'angle de trame réglé au niveau 3, la largeur de trame réglée au niveau 2 et l'épaisseur de la couche réglée au niveau 1.

Pour un angle de déplacement de 15°, les quatre paramètres ont également un effet significatif sur la distance de projection. L'ordre de contribution des paramètres pour la sortie souhaitée était l'angle de trame en premier, suivi de l'épaisseur de couche, de l'entrefer, puis de la largeur de trame. Selon les analyses d'effet principal et d'ANOVA, les paramètres optimaux étaient l'entrefer réglé au niveau 3, l'angle de trame réglé au niveau 3, la largeur de trame réglée au niveau 2 et l'épaisseur de la couche réglée au niveau 1.

Pour un angle de déplacement de 20°, les quatre paramètres ont encore une fois eu un effet significatif sur les performances souhaitées. L'ordre de contribution pour les paramètres était l'épaisseur de la couche en premier, suivi de l'entrefer, de l'angle de trame, puis de la largeur de trame. Selon les analyses d'effet principal et d'ANOVA, les paramètres optimaux étaient l'entrefer réglé au niveau 3, l'angle de trame réglé au niveau 3, la largeur de trame réglée au niveau 3, puis l'épaisseur de la couche réglée au niveau 1 [35].

Dar-Yuan Chang et al. ont proposé une nouvelle approche pour évaluer les caractéristiques de qualité des composants fabriqués à l'aide de systèmes d'extrusion par dépôt de matière fondue (FDM). L'objectif de cette étude était d'examiner les erreurs de profil et les ouvertures d'extrusion. Pour ce faire, les chercheurs ont développé une méthode de mesure utilisant une série de cylindres standard disposés le long du contour de la pièce.

Chapitre I : Recherche bibliographique

La méthode de Taguchi (plan d'expérience) a été employée pour étudier l'effet des paramètres de traitement sur les caractéristiques de qualité du produit final. Les paramètres de traitement examinés étaient la largeur de contour, la profondeur de contour, la largeur de trame et l'angle de trame, comme illustré dans la figure ci-dessous :

En utilisant cette approche, ils ont pu évaluer l'influence de ces paramètres sur les propriétés de qualité du composant fabriqué par FDM. Les résultats obtenus à partir de cette étude ont permis de mieux comprendre comment ajuster les paramètres de traitement pour optimiser la qualité du produit final.

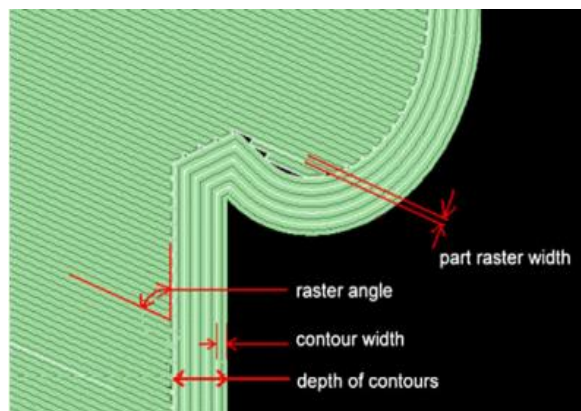


Figure. 7 : Illustration des facteurs de contrôle expérimentaux [36]

Suite à l'analyse des effets de niveau, les conclusions suivantes ont été tirées par les chercheurs:

La largeur du contour a un effet significatif et évident sur la précision du profil. Une largeur plus grande du contour conduit à une meilleure précision du profil. D'autre part, une largeur étroite donne une apparence plus dense et bien définie de la zone d'ouverture sur la couche de surface.

La profondeur du contour a une grande influence sur l'erreur de profil. Une augmentation de la profondeur du contour améliore la stabilité du formage et réduit les erreurs de profil. Cependant, son influence sur les ouvertures de surface n'est pas aussi clairement établie.

La largeur de trame et l'angle de trame, qui sont liés au parcours d'outil interne, ont moins d'effet sur l'erreur de profil. Cependant, ils jouent un rôle non négligeable dans les ouvertures de surface et ne peuvent pas être ignorés dans l'évaluation globale de la qualité du composant [36].

Chapitre I : Recherche bibliographique

Ces résultats soulignent l'importance cruciale de prendre en considération les paramètres spécifiques tels que la largeur du contour et la profondeur du contour pour optimiser la précision du profil lors de l'utilisation de la technologie FDM pour la fabrication de composants. Ils mettent également en évidence le besoin de tenir compte soigneusement des paramètres de largeur de trame et d'angle de trame pour garantir la qualité des ouvertures de surface dans les composants fabriqués par FDM.

Dans une autre étude menée par Mohammad S. Alsoufi et al, les chercheurs ont examiné la variation de la précision dimensionnelle et de la rugosité de surface des composants fabriqués à l'aide de la méthode de fabrication des filaments fondus. Différents modèles imprimés en filament thermoplastique, tels que le PLA, le PLA+, l'ABS et l'ABS+, ont été analysés. Les conclusions importantes sont les suivantes :

Les pièces imprimées de forme rectangulaire ont montré des déformations de gauchissement indésirables et des erreurs de forme liées au retrait thermique. Ces déformations variaient de moins de 3% pour le PLA et le PLA+ à 34,53% pour l'ABS et l'ABS+ par rapport à la valeur réelle de 40 mm (L) × 40 mm (L) × 15 mm (H).

Le PLA, le PLA+ et l'ABS+ ont montré des niveaux de rugosité de surface similaires, tandis que l'ABS présentait une distribution d'irrégularités de rugosité de surface, des ondulations et des défauts pour les quatre faces, y compris la face supérieure (milieu).

Le PLA et le PLA+ ont montré un excellent rapport de profil de surface avec un écart presque constant, tandis que l'ABS et l'ABS+ ont montré un rapport de profil de surface inacceptable avec une variation aléatoire de l'écart.

L'ABS se caractérise par de grandes valeurs d'asymétrie et d'aplatissement, qui diffèrent de la texture de surface des pièces imprimées en 3D FDM [37].

Dans une autre étude menée par Gamal Weheba et al, l'objectif était d'étudier l'effet des paramètres de processus sur la précision dimensionnelle et la qualité de surface des pièces fabriquées avec une nouvelle résine en utilisant le procédé de stéréo-lithographie. Un plan d'expérience et des techniques d'optimisation de Box-Behnken ont été utilisés pour déterminer les paramètres optimaux de processus.

Chapitre I : Recherche bibliographique

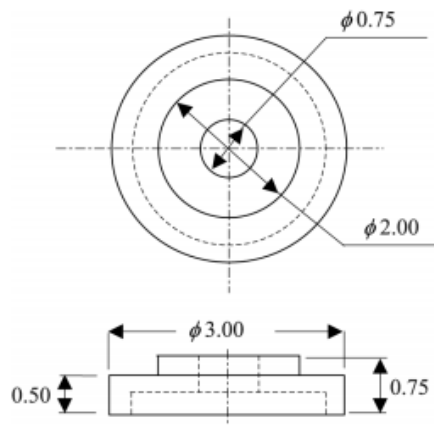


Figure. 8 : benchmark (Conception) du modèle de référence [38]

Le modèle de référence comprend deux cylindres concentriques d'un diamètre de 0,75 pouce. Le modèle de régression résultant pour le DNOM moyen en fonction des facteurs expérimentaux {profondeur de durcissement du remplissage (A), surcuisson de l'éclosion (B) et attente au niveau Z (C)} peut être exprimé de la manière suivante :

$$\text{DNOM} = 8,67029 * 10^{-3} - 5,1458A - 0,16367B + 3,16667 * 10^{-4}C + 42,96875A^2 + 142,00000B^2 + 1,51667 * 10^{-5}C^2$$

L'analyse de la variance pour les données de planéité a abouti au modèle quadratique suivant:

$$\text{Flatness} = 0,010762 - 0,98375A - 0,046867B - 1,36433C + 89,01042A^2 + 131,86667B^2 + 6,39667 * 10^{-5}C^2$$

Le modèle pour la rugosité de surface (Ra) est le suivant :

$$\text{Ra} = 0,28715 + 23,82143A + 99,00000B - 3136,16071A^2 - 11750,00000AB$$

Le modèle comprend l'interaction à deux facteurs impliquant la profondeur de durcissement du remplissage (A) et la sur-cuisson des hachures (B), ainsi que l'effet quadratique de la profondeur de durcissement du remplissage [38].

Dans une autre étude menée par Anitha et al, les chercheurs ont étudié l'influence des paramètres de processus, tels que l'épaisseur de la couche, la largeur de la route et la vitesse de dépôt, sur la précision dimensionnelle et la rugosité de surface des pièces fabriquées par le processus FDM (modélisation de dépôt par fusion). Ils ont utilisé le plan d'expériences Taguchi (design of experiment), avec trois niveaux pour chacun des trois paramètres.

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tableau. 2 : liste des variables de processus et leurs niveaux [39]

Factors	Level 1	Level 2	Level 3
Layer thickness (mm)	0.1778	0.254	0.3556
Road width (mm)	0.537	0.622	0.706
Speed deposition (mm)	100	150	200

Les résultats de l'étude ont mis en évidence ce qui suit :

- Le premier facteur (épaisseur de la couche) a montré une efficacité significative au niveau 3.
- Le deuxième facteur (largeur de la route) a montré une efficacité significative au niveau 1.
- Le troisième facteur (vitesse de dépôt) a montré une efficacité significative au niveau 3, selon l'analyse S/N (signal-to-noise ratio).

En outre, les chercheurs ont réussi à déterminer une valeur donnée pour atteindre la rugosité de surface souhaitée [39].

Dans leur étude, Ala'aldin Alafaghani et ses collaborateurs se sont fixé comme objectif d'examiner l'impact des paramètres de processus sur la précision dimensionnelle et les propriétés mécaniques des pièces imprimées en 3D par le procédé de fabrication des filaments fondus (FDM). Les paramètres de processus étudiés comprenaient le pourcentage de remplissage, le motif de remplissage, l'épaisseur de la couche et la température d'extrusion. Le matériau modèle utilisé dans l'expérimentation était le PLA (acide polylactique).

Pour mener à bien leurs expériences, les chercheurs ont opté pour un plan d'expérience Taguchi L9. Cela leur a permis de réaliser des essais de manière structurée et systématique, en manipulant les paramètres de processus selon neuf combinaisons différentes pour obtenir des données significatives et concluantes sur l'effet de ces paramètres sur les caractéristiques des pièces imprimées.

Chapitre I : Recherche bibliographique

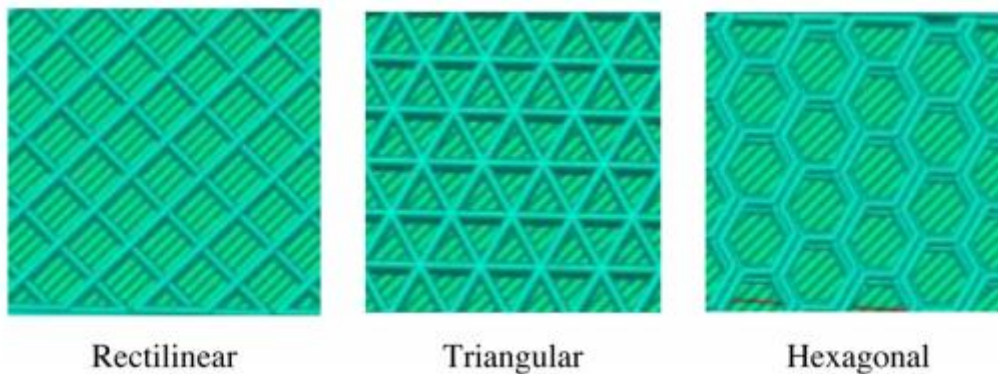


Figure. 9 : Les formes des trois modèles de remplissage utilisés pour fabriquer les échantillons FDM [40]

Selon les résultats de leur étude, les pièces fabriquées par la méthode FDM présentent une déformation plus importante (dilatation) par rapport au modèle initial (CAD) dessiné. Pour obtenir une meilleure précision dimensionnelle, les chercheurs ont conclu que des paramètres spécifiques doivent être utilisés. Une température d'extrusion plus basse, un pourcentage de remplissage réduit et un motif de remplissage hexagonal sont nécessaires pour minimiser les erreurs dimensionnelles dans les pièces fabriquées par le procédé FDM. Ainsi, une température d'extrusion de 190 °C, une épaisseur de couche de 0,20 mm, un motif de remplissage hexagonal avec un pourcentage de remplissage de 20 % ont été déterminés comme les valeurs optimales pour atteindre une meilleure précision dimensionnelle.

En ce qui concerne les propriétés mécaniques, différents réglages de chaque paramètre ont été nécessaires pour obtenir les propriétés mécaniques appropriées telles que la rigidité, la résistance et la ductilité.

En conclusion, lorsqu'on ajuste les valeurs des paramètres de processus du FDM, il est difficile d'atteindre simultanément une maximisation des propriétés mécaniques et une minimisation des erreurs dimensionnelles [40].

Concernant l'étude menée par Che Chung Wang et son équipe, ils ont combiné la méthode de plan d'expérience de Taguchi avec l'analyse relationnelle de Gray pour optimiser les paramètres du processus de fabrication dans la modélisation des dépôts fondus. Ils ont évalué la précision dimensionnelle, la rugosité de surface (SR) et effectué des tests de traction ultime.

Les facteurs expérimentaux et leurs niveaux de processus correspondants comprenaient l'épaisseur de la couche LT, le style de dépôt DS, le style de support SS, l'orientation de dépôt

Chapitre I : Recherche bibliographique

dans la direction Z DOZ, l'orientation de dépôt dans la direction X DOX et l'emplacement de construction BL, avec tous les paramètres ayant trois niveaux, sauf l'épaisseur de couche qui avait deux niveaux.

Tableau. 3 : Description des paramètres de contrôle expérimentaux [41]

Symbol	Control parameters	Level		
		1	2	3
A	Layer thickness(L_T), unit: mm	0.254	0.33	–
B	Deposition style (D_S)	V_n	H_n	V_S
C	Support style (S_S)	Surround	Basic	Sparse
D	Deposition orientation – Z direction (DO_Z)	L	M	H
	Deposition orientation – X direction (DO_X)	0°	45°	90°
F	Build location(B_L), unit: mm	50	100	150

Les chercheurs ont identifié des facteurs de construction significatifs pour chaque caractéristique de qualité, ainsi que les combinaisons optimales de niveaux de facteurs pour améliorer chaque caractéristique de qualité. Cette détermination a été réalisée grâce à l'utilisation de l'analyse de la variance (ANOVA).

Les résultats ont été vérifiés à l'aide de la théorie de Gray et de la technique d'évaluation de la préférence d'ordre par similarité à la solution idéale (TOPSIS).

Les conclusions des résultats sont les suivantes :

- L'épaisseur de la couche de dépôt fondu (LT) est identifiée comme le paramètre critique.
- La combinaison optimale des paramètres de contrôle pour obtenir de meilleures caractéristiques de qualité de fabrication est l'orientation du dépôt dans la direction Z (DOZ).

Pour déterminer la combinaison optimale de paramètres de fabrication prenant en compte plusieurs caractéristiques de qualité, les chercheurs ont utilisé la méthode de Taguchi conjointement avec l'analyse relationnelle de Gray (Gray relational analysis). Ils ont ainsi obtenu la combinaison optimale suivante : LT (0,254), DS (VS), SS (basique), DOZ (M), DOX (08) et BL (100) [41].

Chapitre I : Recherche bibliographique

Dans l'étude menée par T. Nancharaiah et al, les auteurs ont examiné les paramètres de processus pour optimiser le temps de traitement. Pour cela, ils ont utilisé un plan factoriel complet composé de 27 expériences, qu'ils ont ensuite réduit à 9 expériences en utilisant le plan d'expériences (design of experiment) et le réseau orthogonal (orthogonal array).

Les paramètres de traitement étudiés étaient l'épaisseur de la couche, l'entrefer (air gap) et l'angle de trame (raster angle), chacun ayant trois niveaux, comme indiqué dans le tableau :

Tableau. 4 : Les paramètres de traitement expérimental [42]

<i>Parameter</i>	<i>Notation</i>	<i>Level 1</i>	<i>Level 2</i>	<i>Level 3</i>
Layer thickness in mm	A	0.1778	0.254	0.330
Air gap in mm	B	-0.020	0.00	+0.020
Raster angle in degree	C	0 30	45	

Les chercheurs ont réalisé 9 expériences et analysé les données expérimentales obtenues à partir des pistes expérimentales en utilisant le rapport signal/bruit (S/N) et l'analyse de variance (ANOVA).

L'effet de l'angle de trame, de l'interaction entre l'épaisseur de la couche et l'angle de trame, ainsi que de l'entrefer et de l'angle de trame s'est avéré négligeable. Toutefois, il a été observé que l'épaisseur de la couche et l'entrefer ont une influence significative sur le temps de traitement. Selon l'analyse ANOVA, l'entrefer contribue à hauteur de 30,77 % du temps de traitement avec un niveau de signification de 95 %, tandis que l'épaisseur de la couche contribue à 66,57 % du temps de traitement avec un niveau de signification de 99 %.

Le temps de traitement optimal a été obtenu en utilisant une épaisseur de couche de niveau 3, un entrefer de niveau 3 et un angle de trame de niveau 2. Ainsi, l'essai numéro 9 donne le temps de traitement minimum en fonction du rapport S/N [42].

M. Hanon et son équipe ont entrepris une étude visant à examiner l'influence des paramètres de processus sur la précision dimensionnelle des pièces fabriquées en 3D par la méthode de fabrication des filaments fondus (FDM), en utilisant du matériau d'acide poly-lactique (PLA).

Chapitre I : Recherche bibliographique

Pour ce faire, ils ont créé des échantillons d'essai de traction sous forme cylindrique et en forme de "dog-bone" (os de chien) en variant plusieurs paramètres de processus.

Pour les échantillons cylindriques, les paramètres de processus étudiés comprenaient l'orientation de construction (horizontale, angle de 45° et verticale). Quant aux échantillons en forme de "dog-bone", ils ont été fabriqués en utilisant trois paramètres d'impression différents : l'épaisseur de couche (100 μm , 200 μm et 300 μm), l'angle de direction du raster (0/45°, 45/135° et 45/90°) et l'orientation de construction (Plat, Sur le bord et Droit). De plus, trois couleurs différentes de filament PLA (blanc, gris et noir) ont été utilisées dans l'étude.

La précision dimensionnelle a été évaluée en mesurant le diamètre et la longueur pour les échantillons cylindriques, ainsi que la largeur et l'épaisseur pour les échantillons en forme de "dog-bone". Dans le but de minimiser le pourcentage d'erreur, les chercheurs ont déterminé les paramètres de processus optimaux pour chacun des paramètres étudiés.

Ainsi, cette recherche a permis d'identifier les combinaisons de paramètres qui offrent la meilleure précision dimensionnelle pour les pièces imprimées en 3D par la méthode FDM avec du PLA comme matériau.

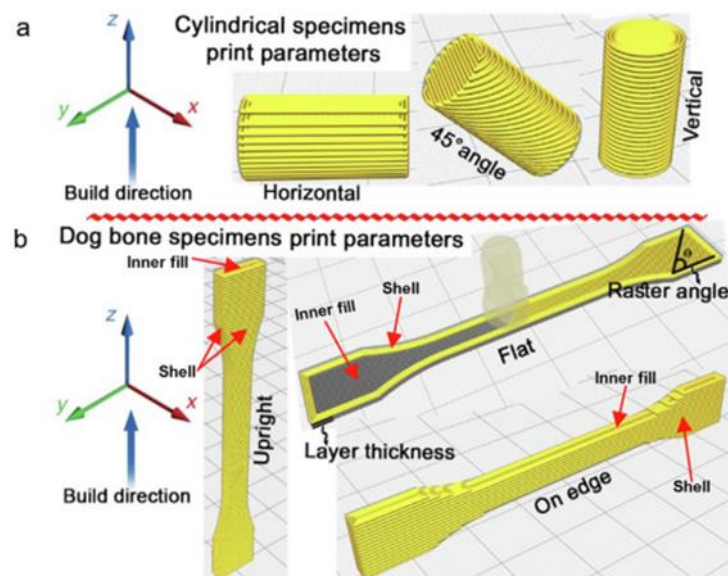


Figure. 10 : (a) orientations d'impression des éprouvettes cylindriques ; (b) paramètres utilisés pour l'impression d'échantillons d'essai en os de chien (dog-bone), y compris l'orientation d'impression, l'angle de direction de trame et l'épaisseur de la couche [43].

Chapitre I : Recherche bibliographique

Tous les échantillons d'orientation de construction (build orientation) présentaient un pourcentage de précision d'épaisseur élevé, compris entre 98,56 % et 99,64 %. Une influence remarquable a été remarquée pour le paramètre d'épaisseur de couche. Les pièces de 100 μm présentaient une précision d'épaisseur inférieure (94,69 %) avec une grande barre d'erreur par rapport aux 200 μm (98,56 %). Les meilleures précisions dimensionnelles globales ont été obtenues avec les paramètres d'impression de couleur noire/orientation de construction horizontale/[45/135°] angle de trame(raster angle) /épaisseur de couche de 200 μm , (99,63 %) et couleur noire/orientation de construction verticale/[45/135°] angle de trame/épaisseur de couche de 200 μm , (99,72 %) pour le diamètre et la longueur des spécimens cylindriques, respectivement, comme ainsi qu'orientation de construction à plat/angle de trame [45/135°]/épaisseur de couche de 300 μm , (99,56 %) et orientation de construction verticale/angle de trame [45/135°]/épaisseur de couche de 200 μm , (99,64 %) pour la largeur et épaisseur des échantillons dog-bone consécutivement[43].

Evren Yasa et al. ont entrepris une étude visant à évaluer la précision dimensionnelle et les propriétés mécaniques des composants fabriqués par le processus de modélisation par dépôt fondu (FDM). Pour cela, ils ont utilisé des géométries de référence permettant d'évaluer la précision dimensionnelle, les limitations de fabrication et l'effet d'escalier (the staircase effect), qui est considéré comme un effet inhérent au processus FDM. Les spécimens ont été fabriqués en utilisant du nylon ainsi que du nylon renforcé de fibres de carbone.

L'étude s'est principalement concentrée sur l'analyse des propriétés mécaniques, notamment la dureté et les caractéristiques de traction. Les paramètres de processus étudiés comprenaient la direction de construction (XY, YZ) et les taux de remplissage (100 %, 75 %, 50 %) avec différents types de maillage tels que triangulaire et rectangulaire.

Cette recherche vise à mieux comprendre comment les paramètres de processus, la direction de construction et les taux de remplissage peuvent influencer la précision dimensionnelle et les propriétés mécaniques des pièces fabriquées par la technologie FDM, en particulier en utilisant des matériaux tels que le nylon et le nylon renforcé de fibres de carbone.

Chapitre I : Recherche bibliographique

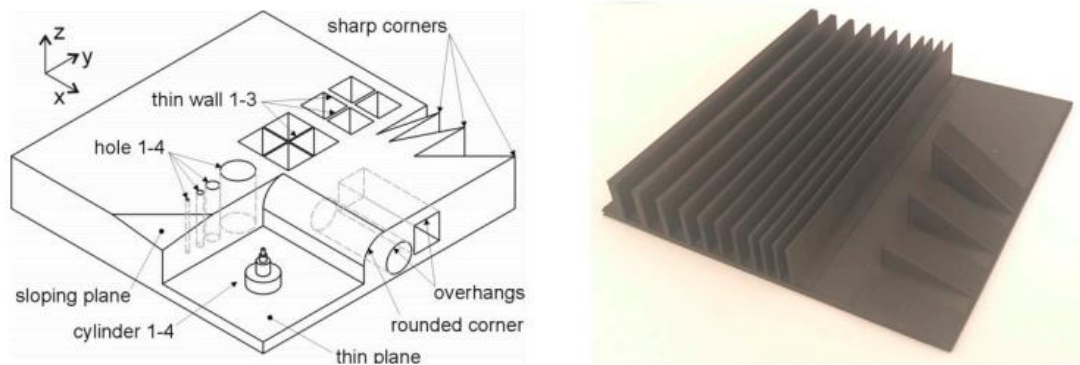


Figure. 11: (a): benchmark 1, (b): benchmark 2 [44]

Dans la partie expérimentale portant sur la précision dimensionnelle, les chercheurs ont remarqué une différence significative dans les résultats dimensionnels de la référence lorsqu'ils ont activé ou désactivé l'option "étendre les fonctionnalités minces" (expand thin features). Lorsque cette option n'était pas activée, les parois minces d'une épaisseur de 1 mm ont été mesurées à 0,806 mm et 0,788 mm dans les deux directions respectivement.

L'option "étendre les éléments minces" a eu un impact important sur les éléments de dimensions inférieures à 2 mm et pouvait considérablement modifier la précision dimensionnelle obtenue. Pour les petites bosses avec un cylindre de 5 mm et pour les diamètres des cylindres supérieurs de 5 mm, 2 mm, 1 mm et 0,5 mm, l'activation de la fonctionnalité mince a entraîné des diamètres mesurés de 5,41 mm, 2,25 mm, 1,33 mm et 1 mm, ce qui a produit des bosses plus grandes.

En ce qui concerne les repères des angles vifs, l'activation des traits fins a initialement donné des zones poreuses en raison du manque de fusion. Cependant, le deuxième benchmark concernant les parois minces et l'effet de l'angle d'inclinaison sur les marches d'escalier avec des valeurs de 0,3 et 0,4 n'a pas pu être réalisé. Il a été observé que lorsque l'épaisseur de la couche est augmentée ou l'angle d'inclinaison est réduit, l'effet d'escalier devient plus prédominant, ce qui peut affecter la qualité et la précision des pièces fabriquées par le procédé FDM [44].

Zhang et al. ont réalisé une étude visant à évaluer la précision des modèles dentaires imprimés en trois dimensions (3D) à l'aide de deux méthodes de fabrication différentes : Digital Light Processing (DLP) avec trois types de traitement numérique de la lumière - EvoDent avec des épaisseurs de couche de 50 μ m et 100 μ m, EncaDent avec des épaisseurs de couche de 20 μ m,

Chapitre I : Recherche bibliographique

30 μ m, 50 μ m et 100 μ m, et Vida HD avec des épaisseurs de couche de 50 μ m et 100 μ m. Ils ont également utilisé des imprimantes de stéréo-lithographie (SLA) avec des épaisseurs de couche de 25 μ m, 50 μ m et 100 μ m. Les modèles dentaires numériques ont été obtenus à partir de scanners de modèle D2000 et ont été comparés aux fichiers sources en trois dimensions à l'aide de Geomagic Qualify. Les résultats ont démontré que la méthode DLP présentait une précision d'impression supérieure à celle de la méthode SLA, et les paramètres optimaux pour chaque imprimante ont été déterminés en prenant en compte l'épaisseur de couche [45].

Dans une autre étude menée par Jasgurpreet Singh Chohan et al., l'impact de la vapeur de lissage sur l'amélioration de la précision dimensionnelle et de l'état de surface des implants biomédicaux fabriqués par le procédé de fabrication de filament fondu (FDM) avec de l'ABS comme matériau modèle a été étudié.

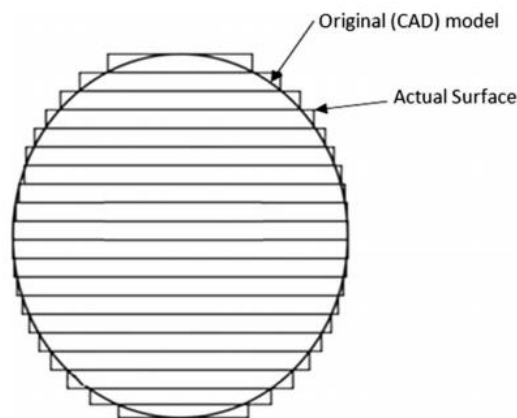


Figure. 12 : Variation dimensionnelle de la surface réelle obtenue par FDM par rapport au modèle CAO [46]

Le procédé FDM a entraîné l'apparition de marches d'escalier sur les surfaces circulaires et inclinées, ce qui a eu pour conséquence d'augmenter les dimensions des pièces lorsqu'elles étaient mesurées, conduisant ainsi à des pièces surdimensionnées. En revanche, les surfaces linéaires présentaient des dimensions réduites.

Dans les résultats de l'étude, il a été observé une réduction significative de la rugosité de surface moyenne des répliques ABS après lissage à la vapeur, avec une moyenne de 82,74 %. De plus, l'épaisseur moyenne des répliques a été réduite à 6,7103 mm après le lissage, comparée à une épaisseur moyenne de 6,8642 mm avant le traitement [46].

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.2. Les travaux de littérature sur la précision dimensionnelle et géométriques des pièces fabriquées en mode additifs en utilisant des méthodes numériques et mathématiques :

- ✚ Un groupe de chercheurs a réalisé une étude sur les précisions géométriques et dimensionnelles des composants fabriqués en mode additif en utilisant des approches numériques et mathématiques.

Tootooni et al. ont proposé une nouvelle méthode d'évaluation de l'intégrité géométrique, notamment en ce qui concerne les principales caractéristiques de dimensionnement et de tolérancement géométrique (GD&T), telles que la planéité, la circularité, la cylindricité, la déviation quadratique moyenne et le pourcentage de tolérance des composants fabriqués en mode additif (imprimés en 3D).

Ils ont étudié l'effet de certains paramètres du procédé FFF (Fused Filament Fabrication) sur l'intégrité géométrique des pièces en ABS. En particulier, ils ont examiné le pourcentage de remplissage (If) variant de 70 % à 100 % par étapes de 10 %, ainsi que la température d'extrusion (Te) allant de 220 °C à 240 °C par intervalles de 5 °C. Pour cette étude, un plan d'expériences a été utilisé pour systématiquement varier ces paramètres.

L'approche développée repose sur la théorie des graphes spectraux des valeurs propres laplaciennes, qui est utilisée en conjonction avec un cadre de modélisation appelé représentation creuse. Cette méthode permet de classer la qualité des pièces FFF en fonction de leur intégrité géométrique en utilisant un ensemble minimal de données provenant du nuage de points 3D.

Les résultats pratiques de cette étude ont abouti à une méthode rapide pour classifier l'intégrité géométrique des pièces à partir de données de nuage de points limitées. Cette méthode a montré une haute-fidélité de classification (score F > 95 %), ce qui évite le besoin de mesures de coordonnées fastidieuses.

Chapitre I : Recherche bibliographique

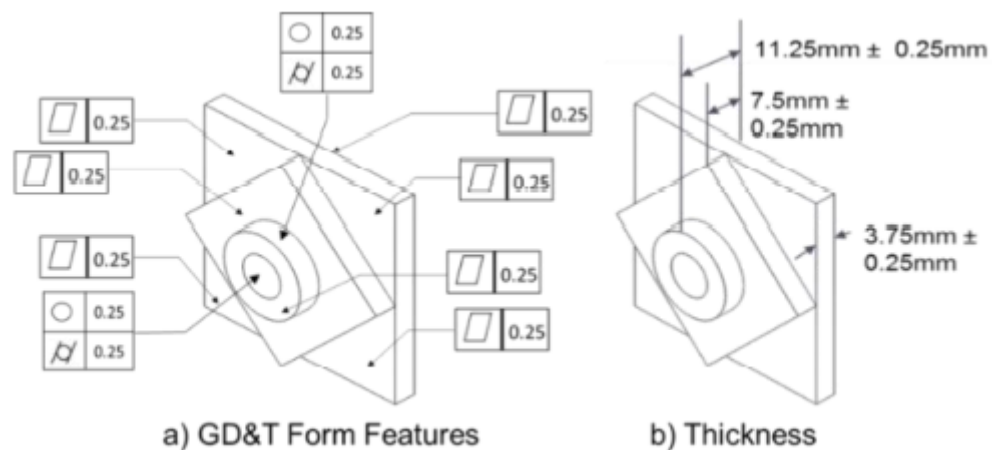





Figure. 13 : Les zones utilisées pour mesurer le GD&T forment la partie conception. La sous-figure (a) montre les faces utilisées pour mesurer la planéité () , la circularité () et la cylindricité () et (b) montre les plans utilisés pour mesurer l'épaisseur - trois mesures d'épaisseur sont prises sur chaque plan [47]

Une analyse de surface de réponse a été réalisée pour étudier l'effet du pourcentage de remplissage et de la température de l'extrudeuse (la buse) sur les paramètres GD&T (dimensionnement géométrique et tolérancement géométrique) des pièces fabriquées par le procédé FFF. Les résultats ont montré que, bien que la température de la buse (T_e) n'ait eu aucun effet statistiquement significatif (niveau de signification statistique $\alpha = 10\%$), le pourcentage de remplissage (I_f) a eu une influence importante (valeur $p < 0,05$) sur l'intégrité géométrique des pièces FFF, y compris les GD&T et d'autres caractéristiques.

Les interactions quadratiques et linéaires se sont avérées significatives dans certains cas. Cependant, l'erreur globale du modèle était substantielle ($R^2 < 40\%$). Par conséquent, il est conclu que l'évaluation de l'intégrité géométrique des pièces AM avec des caractéristiques GD&T conventionnelles et une analyse statistique est inefficace [47].

Dans le travail de Qiang Huang et al, l'objectif principal était de développer une nouvelle approche pour modéliser et prédire le retrait des pièces afin d'obtenir une meilleure précision dimensionnelle en compensant le retrait, en particulier pour les produits cylindriques. Ils ont démontré cette approche à la fois de manière analytique et expérimentale dans le contexte d'un procédé de stéréo-lithographie. Le contrôle du retrait est crucial pour surmonter les limites de précision dimensionnelle dans l'impression 3D. Grâce à leur approche de construction de modèles, ils ont réussi à mettre en place une stratégie de compensation efficace pour les

Chapitre I : Recherche bibliographique

produits cylindriques, améliorant ainsi la précision dimensionnelle globale des pièces fabriquées par ce procédé.

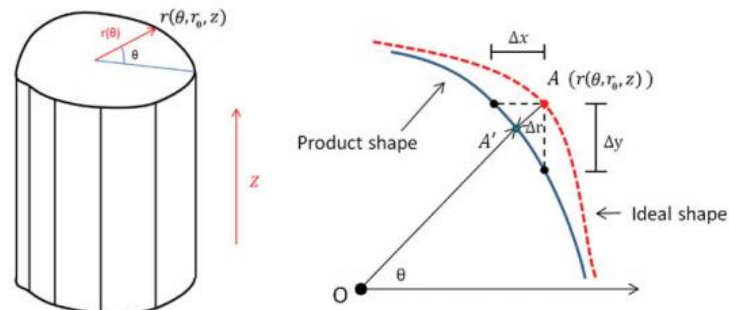


Figure. 14 : approche de construction de modèles conduit à une stratégie de compensation efficace pour les produits cylindriques [48]

Lorsqu'un effet constant de surexposition est appliqué à tous les cylindres, cela équivaut à une compensation par défaut (x_0) appliquée à chaque angle dans le modèle CAO d'origine. Le modèle de retrait prédit est alors exprimé par l'équation suivante : $E^{\wedge} [\Delta r (\theta, r_0) | \theta] \approx x_0 + \alpha^{\wedge} (r_0 + x_0)^a + \beta^{\wedge} (r_0 + x_0)^b \cos(2\theta)$.

Ce modèle de retrait présente un pouvoir prédictif pour différentes tailles de produits, et le schéma de compensation analytique permet de modifier efficacement les données d'entrée CAO en toute simplicité [48].

Dans le travail de Ling Li et al, les chercheurs ont présenté une approche innovante pour réduire les incohérences et les inexacitudes géométriques 3D des produits fabriqués par extrusion de matériaux. Ils ont développé un système de métrologie in situ, qui scanne chaque couche au moment de l'impression, fournissant ainsi un modèle 3D de la pièce telle qu'elle est imprimée. Ensuite, ils ont utilisé des algorithmes d'apprentissage automatique pour analyser les données issues de ce système de numérisation et prédire les inexacitudes géométriques 3D dans de nouvelles conceptions. Cette approche prometteuse permet d'améliorer considérablement la précision géométrique des produits et de réduire les variations potentielles lors du processus de fabrication additive.

Chapitre I : Recherche bibliographique

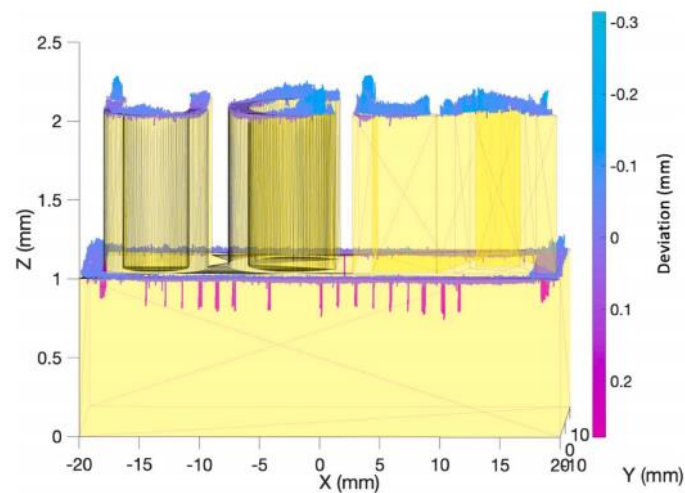


Figure. 15 : Illustration de l'écart géométrique 3D entre la conception CAO et la structure imprimée [49]

Les réseaux adversaires conditionnels (Conditional Adversarial Networks - CAN) se sont révélés être une solution efficace pour résoudre les problèmes de traduction d'image à image. Ils ont été implémentés pour traduire une image d'entrée représentant une section transversale d'un modèle CAO en une image de sortie correspondante, basée sur le profil numérisé en 3D [49]. Cette approche a permis d'obtenir des prédictions plus précises et de réaliser une conversion précise entre les images d'entrée et de sortie, contribuant ainsi à améliorer la qualité et la fidélité de la traduction des images dans le contexte de modèles CAO en 3D.

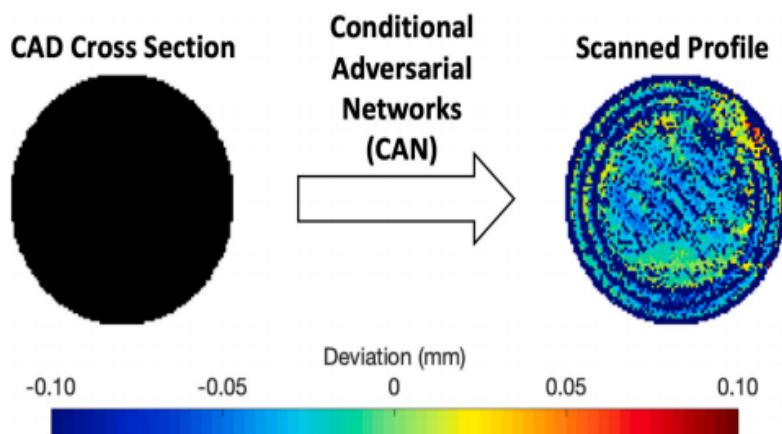


Figure. 16 : Illustration de la cartographie entrée-sortie utilisée dans le modèle d'apprentissage machine CAN [49]

Chapitre I : Recherche bibliographique

Anhua Peng et al. ont utilisé un plan d'expérience uniforme pour trouver les paramètres optimaux (réponse de sortie). Ils ont étudié la relation entre la réponse globale (erreurs dimensionnelles (DE), déformation par décollage (WD ; warp deformation) et temps de construction (BT)) et les quatre variables d'entrée : la compensation de largeur de ligne (line width), la vitesse d'extrusion (x_2), la vitesse de remplissage (x_3) et l'épaisseur de couche (x_4). Ils ont utilisé la méthodologie de surface de réponse du second ordre (RSM ; response surface methodology) pour construire une fonction polynomiale qui exprime la relation implicite entre les variables d'entrée et la réponse de sortie (x_1). Ces quatre facteurs de contrôle ont été sélectionnés pour déterminer les paramètres optimaux dans l'étude.

le RSM de second ordre obtenu était:

$$Y_{\text{rsm}} = 806 - 33763.1x_1 + 225.30x_2 + 14.81x_3 - 2759.88x_4 + 67560.93x_1^2 - 3.57x_2^2 + 0.17x_3^2 + 10607.87x_4^2 + 17.16x_1x_2 + 172.22x_1x_3 - 1.86x_2x_3 + 5.57x_2x_4 - 61.53x_3x_4.$$

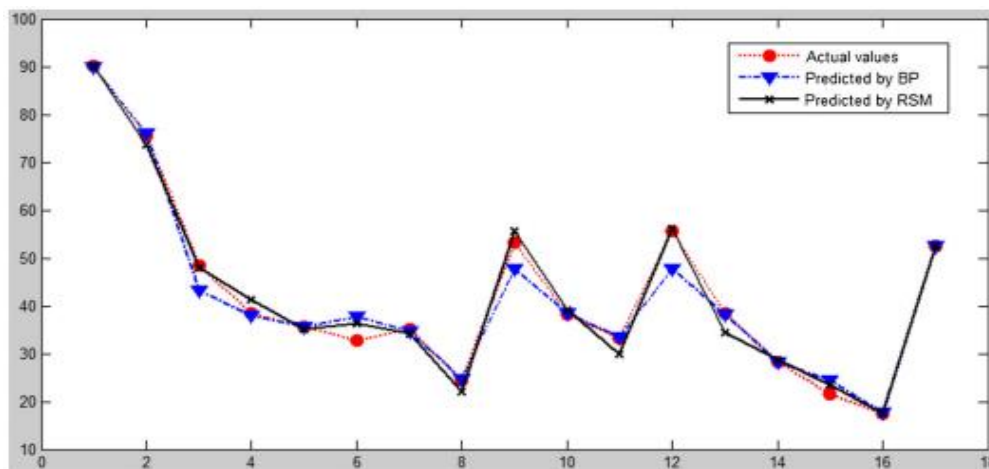


Figure. 17 : comparaisons illustratives entre les valeurs réelles et les valeurs prédites par BP et RSM [50]

Valeurs prédites par le réseau BP (Réseau de neurones artificiels avec algorithme de rétro-propagation, appelé réseau BP en abrégé) ils ont trouvé [50] :

$x_1=0.1702$, $x_2=22.4908$, $x_3=23.896$ et $x_4=0.2875$, (x) atteint la valeur minimale $\phi(x)=-132.2583$, à savoir, y_{rsm} atteint la valeur maximale 132.2583.

Ye Li et al, Dans leur travail, ils ont optimisé la direction de la construction (build direction) par une optimisation multicritère pour un modèle multi-sphère.

Chapitre I : Recherche bibliographique

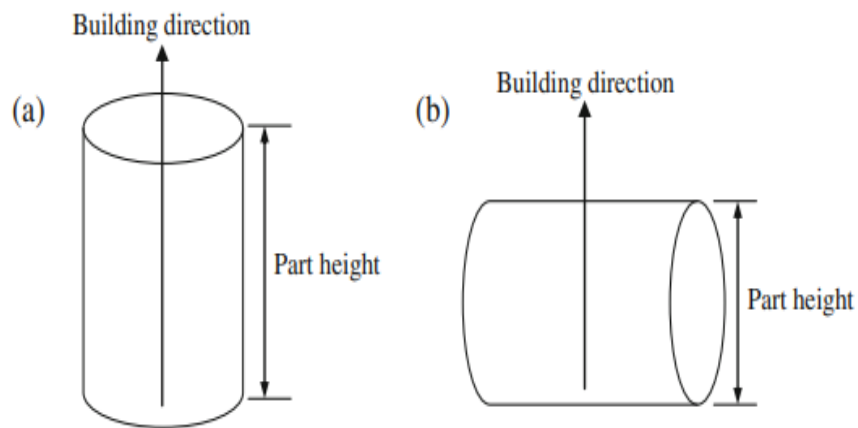


Figure. 18 : Impact de l'orientation de construction [50]

Le premier objectif de l'étude était de mesurer l'écart de volume théorique (TDV ; theoretical volume deviation) en effectuant des calculs le long de chaque direction de construction, en se basant sur la décomposition du volume. Le deuxième objectif consistait à évaluer la hauteur partielle. Pour cela, une approche exhaustive a été adoptée pour étudier les objectifs d'optimisation dans l'espace directionnel. Afin de prendre en compte l'effet concurrent de ces deux critères, les chercheurs ont utilisé un algorithme de front de Pareto (Pareto GA algorithm) [50].

Dans une autre étude menée par W. Rattanawong et al, les auteurs ont développé un système mathématique permettant d'orienter de manière optimale les composants fabriqués par des machines de prototypage rapide, tout en évaluant l'erreur volumétrique (VE) produite pendant le processus de fabrication. L'approche développée se composait de deux parties : la première partie était destinée à évaluer les volumes primitifs tels que les cylindres, les hémisphères, les cônes, les cubes et les pyramides. La deuxième partie était consacrée à la combinaison de ces caractéristiques pour des formes plus complexes.

Chapitre I : Recherche bibliographique

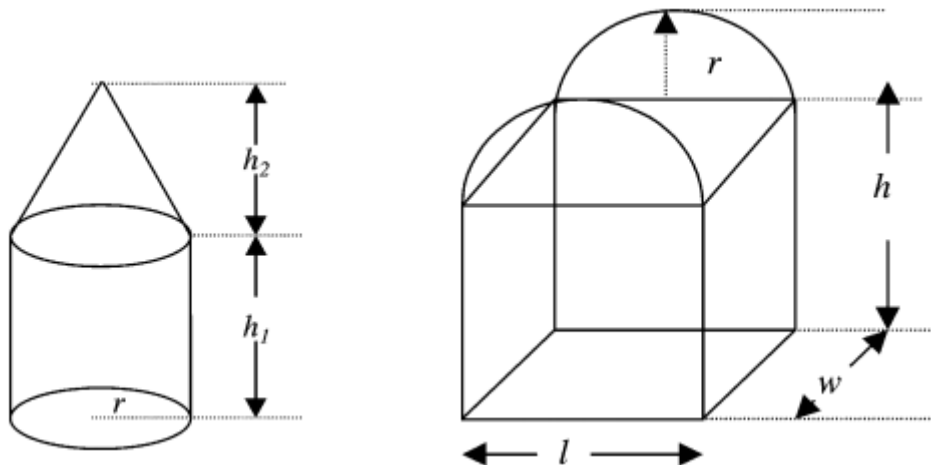


Figure. 19 : Pièce 1, Pièce 2 [51]

Le système développé offre une visualisation graphique de l'erreur volumétrique à différentes orientations et suggère l'orientation optimale qui présente le moins d'erreur volumétrique (VE) pour les pièces imprimées.

Les résultats ont démontré que la meilleure orientation de construction pour minimiser l'erreur volumétrique pour le cylindre et le cube était de 0 degrés (orientation verticale) et 90 degrés (orientation horizontale).

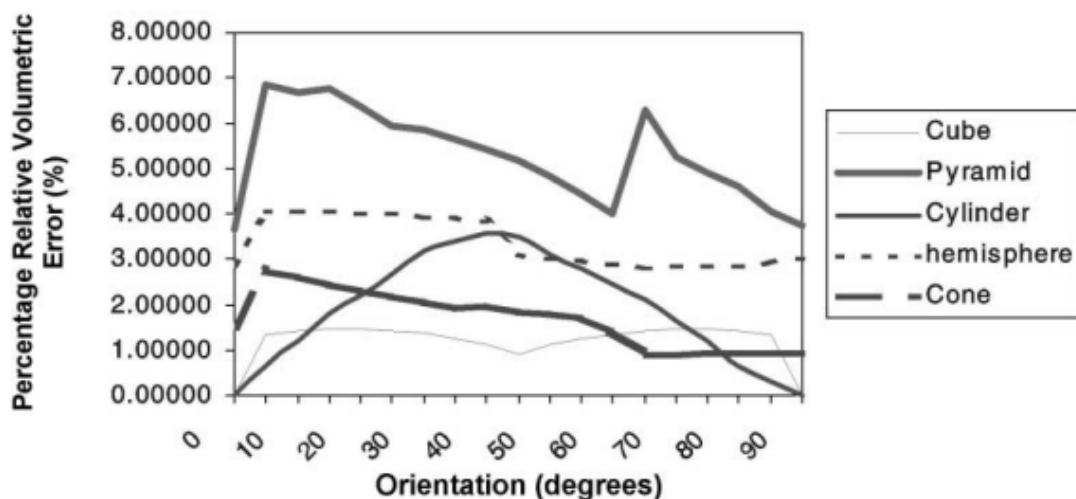


Figure. 20 : Variation des VE relatifs pour des formes primitives [51]

Chapitre I : Recherche bibliographique

L'erreur volumique (VE) relative théorique a été calculée, et le minimum a été observé pour les cônes, les hémisphères et les pyramides, pour lesquels l'orientation recommandée était de 64 degrés.

Pour la pièce numéro 1, l'erreur de volume relative théorique était la plus faible à 90 degrés, tandis que pour la pièce 2, les meilleures orientations de construction étaient 0 et 90 degrés.

L'orientation optimale des entités telles que la pyramide et l'hémisphère a été affectée par leur emplacement et leur orientation sur le composant [51].

En ce qui concerne le travail de Sushmit Chowdhury et al, ils ont développé une méthodologie en deux étapes pour la fabrication additive visant à optimiser la qualité des pièces et la faisabilité du processus.

Le modèle d'optimisation a été utilisé pour déterminer l'orientation de construction optimale en fonction de diverses mesures de qualité de la pièce, notamment l'erreur de cuspide, les problèmes de fabrication liés aux caractéristiques géométriques telles que les régions minces et les petites ouvertures fusibles, ainsi que les paramètres de la structure de support.

Ils ont également intégré une méthodologie de compensation thermique pour réduire la déformation non uniforme des composants due au réchauffement et au refroidissement du filament pendant le processus de fabrication additive, car tous ces paramètres influencent la conformité de la conception.

En outre, pour contrer les effets thermiques résultant du processus de fabrication additive, ils ont appliqué une méthodologie de compensation géométrique basée sur un réseau de neurones artificiels (ANN) sur la pièce après avoir déterminé l'orientation optimale.

Le principe de fonctionnement de l'ANN consiste à approximer les données de déformation géométrique d'une pièce en fonction des coordonnées de ses points de surface. Les expériences pour le modèle ANN conçu ont été simulées à l'aide de MATLAB Neural Network Tool-box, où $[x \ y \ z]$ représentent les coordonnées 3D d'un seul nœud sur la pièce, et $[x' \ y' \ z']$ correspondent aux coordonnées du même nœud dans son état déformé. L'emplacement du nœud déformé, $[x' \ y' \ z']$, est présenté en entrée du réseau.

Chapitre I : Recherche bibliographique

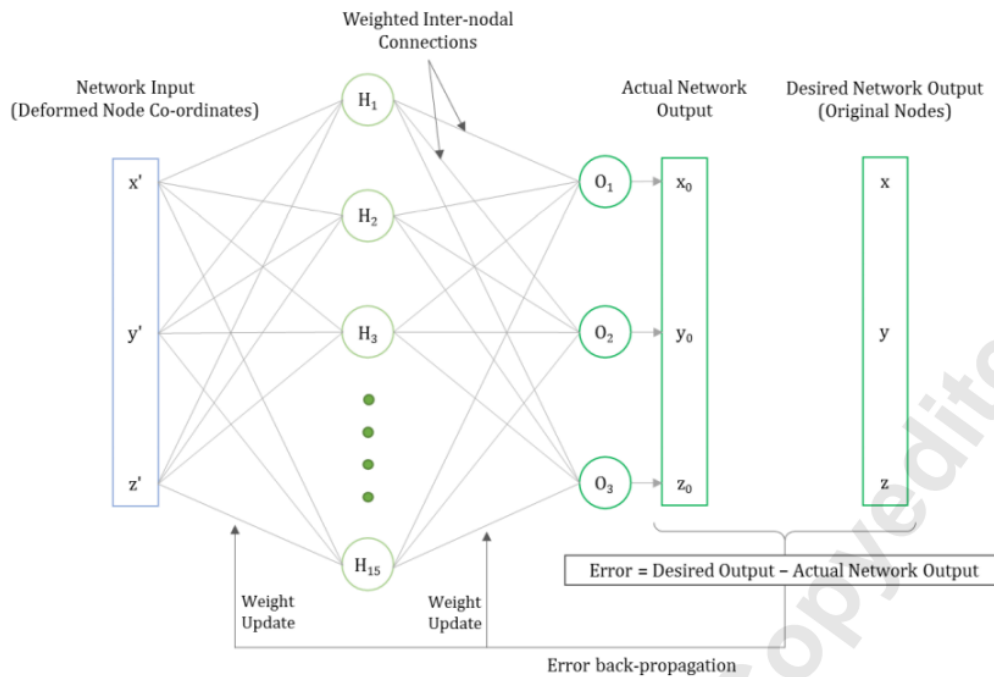


Figure. 21 : Schéma d'entraînement du modèle de compensation géométrique basé sur l'ANN [52]

L'emplacement du nœud d'origine $[x \ y \ z]$ a été présenté comme la sortie souhaitée correspondante. Une fois que la géométrie CAO a été compensée, le réseau ainsi formé a été appliqué sur la géométrie de la pièce au format STL pour obtenir une conception de pièce compensée compatible avec la machine de fabrication additive.

En utilisant la fonction "stl-write-MATLAB", ils ont généré le modèle STL complet contenant les modifications géométriques apportées grâce à la méthodologie de compensation basée sur le réseau de neurones artificiels. Ce modèle STL modifié pouvait alors être utilisé pour la fabrication additive de la pièce, assurant une meilleure précision dimensionnelle en contrecarrant les effets thermiques du processus d'impression 3D.

L'emplacement du nœud d'origine $[x \ y \ z]$ a été présenté comme la sortie souhaitée correspondante. Une fois que la géométrie CAO a été compensée, le réseau ainsi formé a été appliqué sur la géométrie de la pièce au format STL pour obtenir une conception de pièce compensée compatible avec la machine de fabrication additive.

En utilisant la fonction "stl-write-MATLAB", ils ont généré le modèle STL complet contenant les modifications géométriques apportées grâce à la méthodologie de compensation basée sur

Chapitre I : Recherche bibliographique

le réseau de neurones artificiels. Ce modèle STL modifié pouvait alors être utilisé pour la fabrication additive de la pièce, assurant une meilleure précision dimensionnelle en contrecarrant les effets thermiques du processus d'impression 3D.

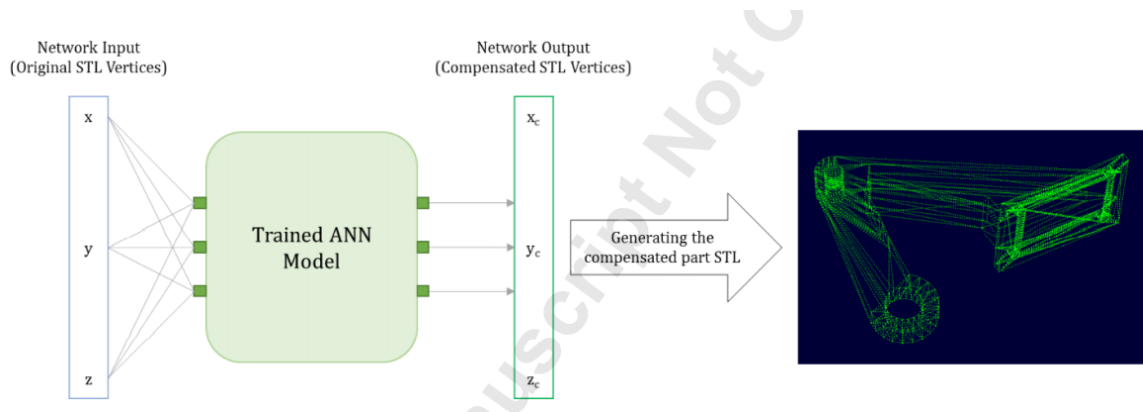


Figure. 22: Schematic of compensated STL file generation using trained ANN model [52]

Le volume minimum des structures de support a été déterminé à 29,5, tandis que le volume maximum des structures de support a été évalué à 380. L'orientation de construction optimale pour la pièce de test (qui a été réalisée sur une version modifiée du support d'avion Alcoa) a été déterminée comme étant de $\Theta = 96,01^\circ$ et $\varnothing = 0,94^\circ$ [52].

L'objectif de l'étude menée par Long Jiang et al était d'optimiser la topologie de la conception en utilisant une nouvelle méthode d'ensemble de niveaux paramétriques à distance régularisée, permettant une représentation « basée sur les limites » de la conception pour gérer les changements de forme et de topologie. Ils ont développé un cadre de calcul qui intègre la méthode d'optimisation de la topologie basée sur un ensemble de niveaux paramétriques avec le processus SLA basé sur DLP pour une conception intelligente.

Cette approche novatrice permet de réduire la complexité et les coûts liés au processus de préfabrication, tout en conservant l'intention de conception d'origine et la fonctionnalité d'origine des modèles étudiés. Les modèles simples utilisés dans l'étude étaient une poutre en porte-à-faux 3D de forme libre et une méta-structure à plusieurs échelles. Ainsi, l'approche proposée se montre efficace aussi bien pour les structures à un seul matériau que pour les structures multi-échelles et multifonctionnelles[53].

Concernant le travail d'Anoop Kumar Sood et ses collègues, leur objectif était d'étudier l'effet des paramètres de traitement, tels que l'épaisseur de la couche (A), l'orientation (B), l'angle de trame (C), la largeur de trame (D) et l'entrefer (E), sur la précision dimensionnelle des pièces

Chapitre I : Recherche bibliographique

fabriquées par le processus de modélisation par dépôt fondu (FDM). Ils ont utilisé le matériau ABS400 (acrylonitrile-butadiène-styrène) pour fabriquer les spécimens.

Pour l'expérimentation, un réseau orthogonal L27 (313) basé sur le plan d'expérience de Taguchi a été utilisé, avec cinq facteurs, chacun à trois niveaux, et quatre interactions prises en compte. Cette méthodologie leur a permis d'évaluer l'influence de ces paramètres sur la précision dimensionnelle des pièces FDM.

Tableau.5 : les facteurs et leurs niveaux [54]

Fixed factors			Control factors					
Factor	Value	Unit	Factor	Symbol	Level			Unit
					1	2	3	
Part fill style	Perimeter/Raster	-	Layer thickness	A	0.127	0.178	0.254	mm
Contour width	0.4064	mm	Orientation	B	0	15	30	degree
Part interior style	Solid normal	-	Raster angle	C	0	30	60	degree
Visible surface	Normal raster	-	Raster width	D	0.4064	0.4564	0.5064	mm
XY & Z shrink factor	1.0038	-	Air gap	E	0	0.004	0.008	mm
Perimeter to raster air gap	0.0000	mm						

Pour modéliser le processus FDM, une approche basée sur le réseau de neurones artificiels ANN avec algorithme de rétro-propagation a été utilisée. L'avantage de cette méthode réside dans sa facilité de construction d'un modèle en fonction des données d'entrée et de sortie, permettant ainsi de prédire avec précision la dynamique du processus. Chaque paramètre a été représenté par un neurone, ce qui a conduit à une couche d'entrée avec cinq neurones dans la structure ANN. En utilisant le grade de relation de gris, ils ont déterminé les niveaux optimaux des facteurs comme suit : A2 (0,178 mm), B1 (0), C1 (0), D2 (0,4564 mm) et E3 (0,008 mm), pour maximiser le grade de relation de gris.

Les résultats ont montré que le retrait était dominant le long de la longueur et de la largeur de la pièce d'essai, où l'épaisseur était toujours supérieure à la valeur souhaitée. L'analyse ANOVA a démontré que les interactions entre les facteurs BXC, BXD et BXE étaient significatives.

Pour minimiser le changement en pourcentage de la longueur, il est souhaitable d'utiliser une épaisseur de couche plus élevée (0,254 mm), une orientation de 0 degré, un angle de trame

Chapitre I : Recherche bibliographique

maximal (60 degrés), une largeur de trame moyenne (0,4564 mm) et un entrefer maximal (0,008 mm).

Pour minimiser le pourcentage de changement de largeur, un angle de trame moyen (30 degrés) et un entrefer de 0,004 mm produiront le résultat souhaité. Les niveaux des autres facteurs restent les mêmes que pour la variation en pourcentage de la longueur.

Une valeur inférieure de l'épaisseur de couche (0,127 mm), de l'orientation (0 degré) et de l'angle de trame (0 degré), ainsi qu'une valeur plus élevée de la largeur de trame (0,5064 mm) et une valeur moyenne de l'entrefer (0,004 mm) minimiseront le pourcentage de changement d'épaisseur de la pièce d'essai.

Les chercheurs ont conclu qu'un grand nombre de facteurs peuvent influencer la précision dimensionnelle, certains agissant de manière indépendante et d'autres en interaction les uns avec les autres [54].

Rajit Ranjan et son équipe ont proposé une nouvelle méthodologie de conception destinée à aider les concepteurs à créer des pièces lors de l'utilisation de la fabrication additive, en particulier la fabrication additive par fusion de poudre. Ils ont étudié la relation entre la géométrie initiale du modèle et les paramètres de traitement de la pièce lors du processus de fabrication additive. Les directives de conception développées ont pris en compte deux cas qui aident les concepteurs à créer de nouvelles conceptions légères, facilement fabriquées grâce aux processus AM.

Ils ont développé des algorithmes de calcul pour détecter les caractéristiques qui enfreignent les directives de conception, introduisant pour cela un concept d'indice de productivité (PI) qui permet de comparer les conceptions compatibles avec la fabrication additive. Cette méthode s'avère utile pour valider la faisabilité de la fabrication, car elle permet de modifier et d'ajuster les conceptions existantes pour une meilleure fabricabilité grâce aux processus AM. Ensuite, ils ont combiné les règles de conception avec l'optimisation de la topologie pour proposer des conceptions légères optimisées qui peuvent être fabriquées avec facilité en utilisant les processus AM.

Hauteur de la cuspide (Cusp Height) = Épaisseur de la tranche * cos (θ)

Où est l'angle entre l'axe de construction et la normale de la facette

Hauteur de la cuspide = Épaisseur de la tranche * sin (μ) Éq. (1)

Chapitre I : Recherche bibliographique

où μ est l'angle entre l'axe du cylindre et l'axe de construction.

Ils ont développé des relations entre la hauteur de la cuspide et l'épaisseur de la tranche pour les surfaces coniques et sphériques. L'angle entre l'axe de construction (ba) et l'axe du cône (bo) est h et l'angle du demi-cône est α .

La relation entre la hauteur de la cuspide (AC) et la géométrie du cône comme indiqué dans l'Eq. (1) est développé en utilisant la géométrie analytique Hauteur de la cuspide.

$$\text{Hauteur de la cuspide (CA)} = \text{Épaisseur de la tranche (AB)} * \sin(\theta + \alpha) \dots \dots \dots \text{Eq. (2)}$$

AB et AC représentent respectivement la hauteur de la cuspide et l'épaisseur de la tranche. Les points A et C sont donnés par :

$$C = (r * \cos \beta, r * \sin \beta)$$

$$A = (r * \cos \beta, r * \sin \beta + t)$$

$$\text{Et, } \sin \beta = 1 - (t/r)$$

Où t est l'épaisseur de la tranche et r le rayon de la sphère. Ainsi, la hauteur maximale de la cuspide est donnée par :

$$AB = AO - BO$$

$$AB = \sqrt{(r^2 - t^2 + 2tr)} - r$$

Afin de maintenir la hauteur de cuspide maximale inférieure au seuil de hauteur de cuspide donné :

$$AB \leq C$$

Au final, ils ont développé la relation suivante :

$$R \leq t^2 + c^2 / 2(t-c) \dots \dots \dots \text{Eq. (3)}$$

Cela suggère que pour satisfaire un seuil de hauteur de cuspide de « c » avec une épaisseur de tranche « t », le rayon d'une sphère doit toujours être inférieur à l'expression indiquée dans l'équation. (2). Les surfaces cylindriques, coniques et sphériques d'une pièce sont vérifiées pour la violation du seuil de hauteur de cuspide à l'aide d'équations. (1), (2) et (3), respectivement [55].

Chapitre I : Recherche bibliographique

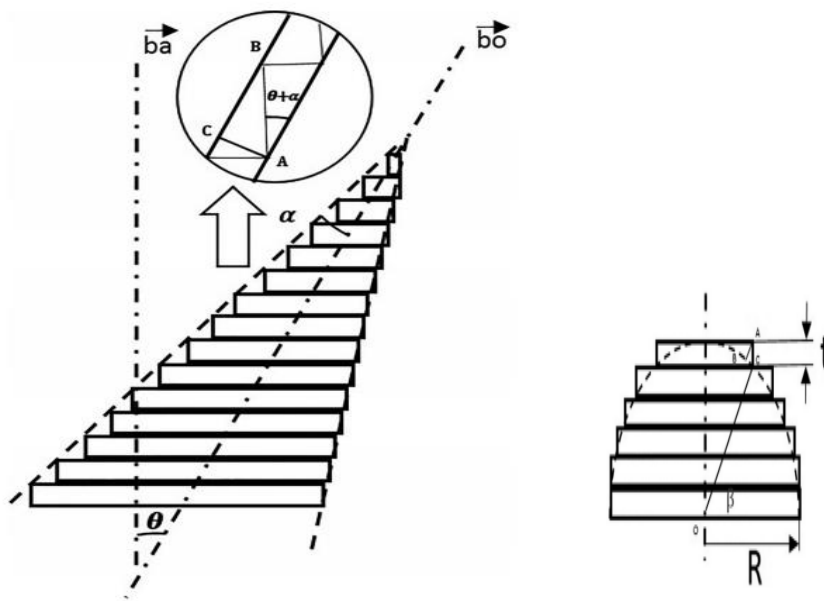


Figure. 23 : une section d'un élément sphérique fabriqué par le procédé AM, la relation entre le rayon de la sphère et la cuspidé [55]

Saigopal Nelaturi et son équipe ont présenté une approche novatrice spécifique à l'imprimante 3D, qui permet d'effectuer une correction de modèle et une analyse d'imprimabilité pour surmonter les écarts observés sur la carte d'imprimabilité. Cette approche simule le processus d'impression en divisant chaque couche imprimée en régions disjointes, avec des mesures locales distinctes de taille.

L'approche adoptée consiste à calculer des modifications ou des corrections de conception afin d'éliminer les erreurs d'impression. La tranche corrigée peut alors être sur les plans topologique et géométrique distincte de la tranche d'origine. Cette méthode permet non seulement de visualiser et d'interroger les modèles tels qu'ils seront fabriqués, mais aussi de simuler le processus pour aider les utilisateurs à prendre des décisions éclairées concernant le matériau, l'imprimante 3D et les paramètres de processus optimaux [56].

Conclusion

Les travaux traitant de la problématique de précision dimensionnelle des pièces imprimées en 3D ont permis de mettre en lumière les défis et les opportunités liés à cette technologie révolutionnaire. Ces recherches ont exploré différents facteurs qui peuvent influencer la

Chapitre I : Recherche bibliographique

précision des pièces fabriquées par impression 3D, tels que les paramètres de processus, les matériaux utilisés, la géométrie des pièces, et les méthodes d'analyse et d'inspection.

Grâce à ces études, nous avons pu identifier les principaux facteurs qui peuvent contribuer à l'écart dimensionnel entre les pièces imprimées en 3D et leur modèle de conception assistée par ordinateur (CAO) d'origine. Cela comprend des paramètres tels que la vitesse d'extrusion, la température de l'extrudeuse, l'épaisseur de couche, le motif de remplissage et le type de matériau.

Les recherches ont également montré que certaines combinaisons de paramètres peuvent avoir des interactions complexes, ce qui peut rendre la prédiction de la précision dimensionnelle plus difficile. Par conséquent, une approche statistique et mathématique rigoureuse est essentielle pour comprendre et optimiser le processus d'impression 3D.

Les avancées dans la modélisation, la simulation et les techniques d'analyse, ont ouvert de nouvelles perspectives pour améliorer la précision dimensionnelle des pièces imprimées en 3D. Ces approches permettent de prédire et de compenser les écarts dimensionnels de manière plus précise, ce qui est crucial pour assurer la conformité des pièces avec les spécifications de conception.

En conclusion, les travaux de recherche sur la précision dimensionnelle des pièces imprimées en 3D ont contribué à améliorer notre compréhension des facteurs qui influencent la qualité des pièces fabriquées par cette technologie. Ces avancées sont essentielles pour ouvrir de nouvelles possibilités d'application de l'impression 3D dans des domaines tels que l'industrie, la santé et l'aérospatiale. En continuant à explorer ces questions, nous pouvons faire progresser la fabrication additive vers une utilisation plus répandue et fiable dans la production de pièces hautement précises et fonctionnelles.

Chapitre II : Partie expérimentale

Chapitre II : Expérimentations

La fabrication additive, également connue sous le nom d'impression 3D, est une technologie révolutionnaire qui permet de créer des objets tridimensionnels en ajoutant progressivement des couches de matériau, contrairement aux méthodes de fabrication traditionnelles qui impliquent généralement le retrait de matériau. Cette approche innovante offre de nombreux avantages, tels que la possibilité de réaliser des formes complexes, la personnalisation de masse et une réduction des déchets matériels.

La fabrication additive a évolué au fil du temps et offre désormais diverses techniques, notamment la stéréo-lithographie (SLA), la fusion de dépôt de matière (FDM), la fusion de lit de poudre (SLS), et bien d'autres. Chaque technique présente des caractéristiques uniques et est adaptée à différents types d'applications et de matériaux.

En ce qui concerne les matériaux composites, la fabrication additive joue un rôle crucial dans leur évolution et leur adoption généralisée. Les matériaux composites sont constitués de la combinaison de deux ou plusieurs matériaux distincts, tels que des fibres de renfort intégrées dans une matrice, pour créer un matériau avec des propriétés spécifiques. La fabrication additive offre la possibilité de produire des pièces composites complexes et légères avec précision, ce qui ouvre de nouvelles perspectives pour l'industrie.

L'intégration de la fabrication additive avec les matériaux composites permet de créer des structures légères et résistantes, idéales pour l'aérospatiale, l'automobile, le médical et d'autres domaines exigeant des matériaux hautement performants. Les avantages incluent la réduction de poids, la résistance accrue, la réduction des coûts de production et la possibilité de concevoir des pièces personnalisées avec une grande précision.

II.1. Comment fonctionne la fabrication additive ?

Utilisant la conception assistée par ordinateur (CAO) ou des scanners d'objets 3D, la fabrication additive permet de créer des objets aux formes géométriques précises. Celles-ci sont construites couche par couche, comme avec un processus d'impression 3D, ce qui contraste avec la fabrication traditionnelle qui nécessite souvent un usinage ou d'autres techniques pour éliminer l'excédent de matière.

II.2. Les matériaux composites et la fabrication additive

Plusieurs matériaux ont été développés pour la FA, propres à chaque procédé. Par exemple, les métaux et les métaux hybrides sont utilisés pour le dépôt d'énergie dirigée, les photopolymères pour le jet de matériaux et les thermoplastiques pour le processus d'extrusion [57]. Les

Chapitre II : Expérimentations

polymères utilisés sont sous forme de filaments, tels que l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), le polyéthylène (PE) ou l'acide poly-lactique (PLA), le polyamide (PA ou Nylon) [58]. Les polymères purs n'atteignent pas les caractéristiques des composites, alors que l'objectif des industriels est d'avoir des matériaux plus résistants et plus légers [59]. Afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées, un renforcement approprié est ajouté à la matrice polymère [60]. Cette méthode a été entreprise par MarkForged® (Cambridge, MA, USA) ; il repose sur l'insertion d'un renfort fibreux continu dans le modèle 3D via la deuxième buse, la première extrudeuse étant pour la matrice polymère. Dickson et Al qui ont étudiés l'influence des fibres continues de verre, de carbone et de Kevlar à l'aide de la méthode de modélisation par dépôt de fil fondu, ont évalué les performances mécaniques en traction et en flexion. Ils ont constaté que l'augmentation de la teneur en fibres augmente la résistance mécanique [61]. Justo et al. Leur étude se concentre sur la caractérisation expérimentale des échantillons composites à base de nylon, ils ont trouvé une amélioration significative des propriétés mécaniques par rapport aux pièces en nylon non renforcées, bien que le processus nécessite une mise à niveau pour obtenir un compactage approprié du matériau, ce qui entraîne une diminution des propriétés finales des composites [62]. Van der Klift et al, ont testé les propriétés mécaniques du thermoplastique renforcé de fibres de carbone (CFRTP), différents types d'échantillons de test de traction ont été imprimés et soumis à des tests de traction longitudinaux [63]. Dong et al. ont expérimenté les performances de traction des matériaux composites renforcés de fibres imprimées en 3D en tenant compte de l'orientation des fibres, de la fraction volumique et de la position des fibres. Les résultats ont montré que la liaison entre la couche de fibres et la couche de Nylon est relativement faible, le module d'élasticité n'est pas affecté par la position des fibres. Le module d'élasticité et la résistance à la traction des pièces FDM pourraient être améliorés en utilisant des fibres de Kevlar [64]. Al Abadi et al. ont étudié expérimentalement et théoriquement les propriétés élastiques des structures polymères renforcées de fibres. Les fibres considérées étaient des filaments de carbone, de kevlar et de verre et une matrice de nylon. Les propriétés élastiques des échantillons imprimés en 3D ont été prédites sur la base de la rigidité volumique moyenne et le modèle numérique a été développé à l'aide d'Abaqus pour prédire les modes de défaillance et les dommages. Les résultats ont montré que la performance structurale est fortement influencée par le niveau des renforts fibreux et leur orientation [65].

Chacón et al, ont étudié l'influence de l'orientation de la construction, de l'épaisseur de la couche et de la teneur en volume des fibres sur les performances mécaniques des composites renforcés de fibres continues imprimées en 3D. Deux essais ont été réalisés Traction et flexion

Chapitre II : Expérimentations

trois points. Les résultats ont montré que les échantillons renforcés de fibres continues présentent des valeurs de résistance et de rigidité plus élevées que ceux non renforcés et que les composites renforcés de fibres de carbone présentent les meilleures performances mécaniques avec une rigidité plus élevée et que les échantillons plats présentent des valeurs de résistance et de rigidité plus élevées que les échantillons sur le bord [66]. Jayswal et al. ont caractérisé les propriétés d'un mélange de deux matériaux dont l'acide polylactique et le polyuréthane thermoplastique (TPU) pour obtenir des filaments composites pour des échantillons imprimés en 3D fabriqués avec la méthode de modélisation par dépôt fondu. Les échantillons de filaments composites ont été testés par analyse mécanique dynamique. Ils ont constaté que la résistance à la traction et le module des filaments diminuent tandis que l'allongement à la rupture augmente avec l'augmentation de la teneur en TPU dans le composite, ont également révélé une miscibilité partielle des composants polymères dans la solution de filaments composites [67].

II.3. Méthodologie :

Flux général du processus d'impression 3D :

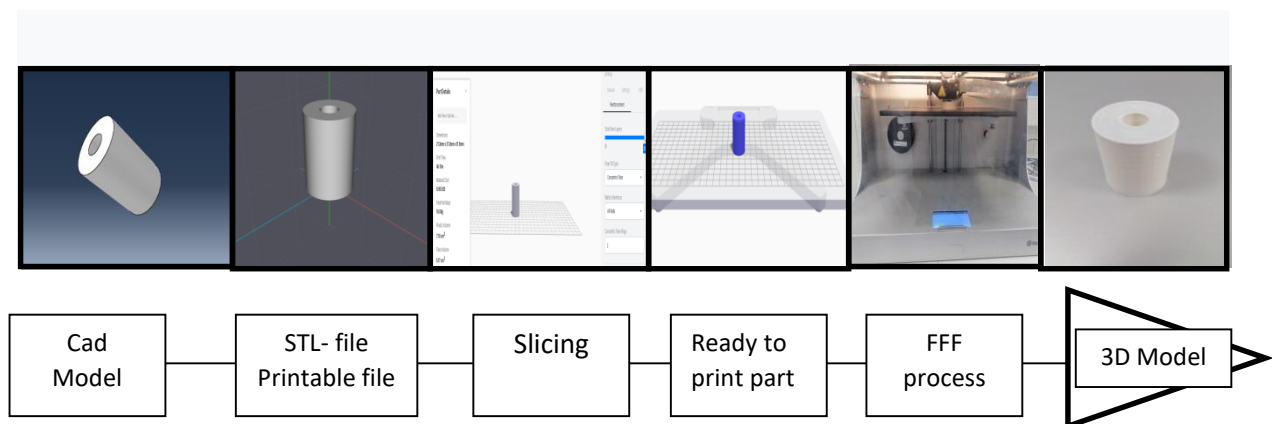


Figure.24 : Flux général du processus d'impression 3D

II.3.1. Matériaux et traitement

Dans cette section, nous étudions le modèle de base physique, représenté par un cylindre comme illustré dans la Figure.25. Le cylindre a une épaisseur fixe de $e = 10$ mm et une hauteur fixe de $h = 40$ mm. Le paramètre géométrique variable est le rayon intérieur, avec trois valeurs : $r_1 = 5$ mm, $r_2 = 10$ mm et $r_3 = 15$ mm.

Chapitre II : Expérimentations

Le matériau de matrice utilisé dans cette étude est le polyamide 6 (PA 6), qui est l'un des matériaux les plus récents pour la fabrication de pièces composites avec les imprimantes 3D Markforged. Pour renforcer le matériau, deux types de fibres ont été sélectionnés : la fibre de carbone et la fibre de verre. Ces renforts jouent un rôle crucial dans l'amélioration des propriétés mécaniques et des performances du matériau composite.



Figure. 25 : échantillon

La technique FFF (Fused Filament Fabrication) a été utilisée pour la fabrication des échantillons à l'aide de l'imprimante 3D Mark Two™ de Markforged®. Cette imprimante est équipée d'une double extrusion, ce qui permet d'imprimer des pièces composites en utilisant deux matériaux distincts : une matrice effective (comme l'Onyx ou le Nylon) et des fibres de renfort (comme la fibre de verre ou la fibre de carbone). La Figure (a) montre les différentes combinaisons possibles de matériaux de matrice et de fibres de renfort.

Le processus d'impression sur l'imprimante 3D Markforged® est illustré dans la Figure 26. (b). Comme le montre cette figure, le mécanisme d'alimentation des fibres et de la matrice est équipé de deux buses distinctes, ce qui permet d'assurer un contrôle précis lors du dépôt des matériaux et de garantir une bonne adhérence entre les fibres de renfort et la matrice effective.

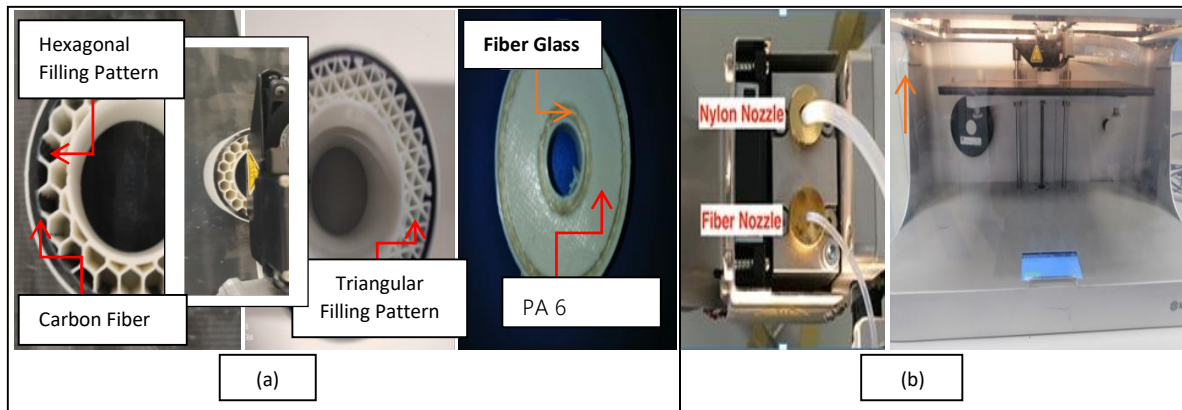


Figure. 26: (a) Composites renforcés de fibres continues (exp : fibre de carbone et fibre de verre) et (b) processus d'impression 3D Markforged®

II.3.2. Plan Experimental

Le plan expérimental adopté pour cette étude est un plan factoriel complet (DOE) basé sur un orthogonal array 3^3 . Ce plan expérimental comprend trois facteurs, et chaque facteur est évalué à trois niveaux différents.

Les facteurs sont :

- Taille de la pièce
- Matériau
- Maillage

Les niveaux des facteurs sont :

Facteur 1 :

- Niveau 1 : Rayon $r_1 = 5\text{mm}$
- Niveau 2 : Rayon $r_2 = 10\text{mm}$
- Niveau 3 : Rayon $r_3 = 15\text{mm}$

Facteur 2 :

- Niveau 1 : Polymère ; Nylon Blanc
- Niveau 2 : Nylon renforcé en fibre de verre
- Niveau 3 : Nylon renforcé en fibre de carbone

Chapitre II : Expérimentations

Facteur 3 :

- Niveau 1 : Triangulaire
- Niveau 2 : Rectangulaire
- Niveau 3 : Hexagonal

Représentation de la matrice de plan expérimental :

Triangulaire : T

Rectangulaire : R

Hexagonal : H

Nylon : N

Nylon renforcé en Fibre de verre : GF

Nylon renforcé en Fibre de Carbone : CF

Rayon: R=5 mm, R=10mm, R=15mm.

Tableau.6: la matrice de plan d'expérience

Chapitre II : Expérimentations

N° Essai	Rayon	Matériaux	Maillage
1	R=5	N	T
2	R=5	CF	T
3	R=5	GF	T
4	R=5	N	R
5	R=5	CF	R
6	R=5	G F	R
7	R=5	N	H
8	R=5	CF	H
9	R=5	GF	H
10	R=10	N	T
11	R=10	CF	T
12	R=10	G F	T
13	R=10	N	R
14	R=10	CF	R
15	R=10	G F	R
16	R=10	N	H
17	R=10	CF	H
18	R=10	GF	H
19	R=15	N	T
20	R=15	C F	T
21	R=15	GF	T
22	R=15	N	R
23	R=15	CF	R
24	R=15	G F	R
25	R=15	N	H
26	R=15	CF	H
27	R=15	GF	H

Notation Taguchi:

Tableau.7: la matrice de plan expérimental avec notation Taguchi

Chapitre II : Expérimentations

N° Essai	Rayon	Matériaux	Maillage
1	1	1	1
2	1	2	1
3	1	3	1
4	1	1	2
5	1	2	2
6	1	3	2
7	1	1	3
8	1	2	3
9	1	3	3
10	2	1	1
11	2	2	1
12	2	3	1
13	2	1	2
14	2	2	2
15	2	3	2
16	2	1	3
17	2	2	3
18	2	3	3
19	3	1	1
20	3	2	1
21	3	3	1
22	3	1	2
23	3	2	2
24	3	3	2
25	3	1	3
26	3	2	3
27	3	3	3

Chapitre II : Expérimentations

II.4. Procédures expérimentales

Nous pouvons résumer la partie expérimentale dans l'organigramme suivant :

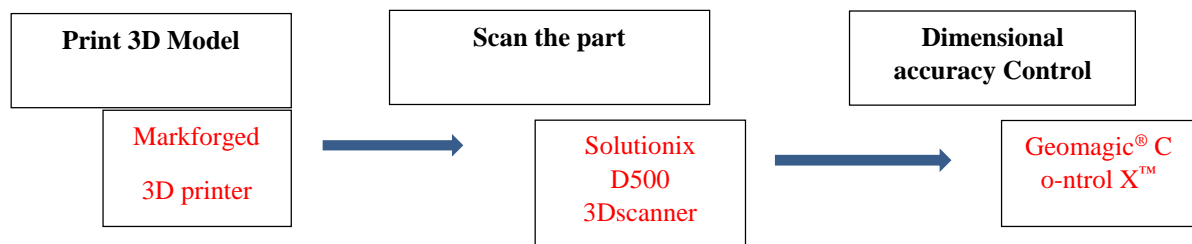


Figure.27 : Organigramme de l'étude expérimentale

Les échantillons ont été imprimés avec l'imprimante MARKFORGED-MARK Two.

II.5. Markforged système :

L'imprimante Mark Two de Markforged est une imprimante 3D de haute performance conçue pour les professionnels. Equipée de la double extrusion et développée autour de la technologie de renfort continu, elle permet de combiner des matériaux de base (Onyx, Nylon) et des matériaux de renfort (Fibre de verre, Fibre de verre HSHT, Kevlar, Fibre de carbone). La Mark Two est ainsi capable d'imprimer des pièces fonctionnelles de haute qualité, robustes et durables. Elle représente un outil de production rapide, fiable et complet pour les professionnels des secteurs de l'industrie.

II.5. 1.Caractéristiques techniques

- Technologie d'impression : Continuous Filament Fabrication (CFF)
- Volume d'impression : 320 x 132 x 154 mm
- Précision : 100 microns
- Diamètre du filament : 1,75 mm (2 extrudeurs)
- Diamètre de la buse : double extrusion 0,4mm de diamètre
- Logiciel : EIGER
- Type des fichiers : STL

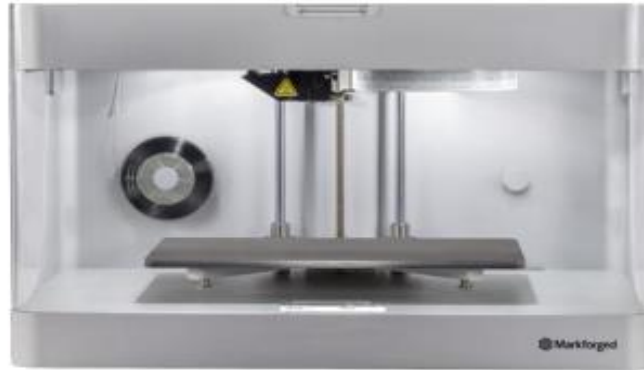


Figure.28 : Imprimante Markforged

II.5. 2. Eiger

Eiger est le logiciel open source développé aussi par l'entreprise Markforged . Ce programme transforme le fichier . STL au format G-code qui contient toutes les instructions à donner à l'imprimante pour extruder la matière et fabriquer la pièce en couches. Il comprend tout le nécessaire pour préparer un fichier 3D pour l'imprimer et l'impression est entièrement préconfigurée pour fonctionner avec l'imprimante Markforged.

II.5. 3. Matériaux de base (la Matrice)

Dans la fabrication de filaments fondus (FFF), une imprimante chauffe le filament thermoplastique pour près du point de fusion et l'extrude à travers sa buse, créant une matrice en plastique couche par couche. Les plastiques peuvent être renforcés par n'importe quel type de fibre.

- **Nylon Blanc**

Les pièces en nylon blanc sont lisses, non abrasives et faciles à peindre. Ils peuvent être renforcée avec des fibres continue.

Onyx

L'Onyx est un nylon renforcé de fibres de carbone hachées. Il est 1,4 fois plus fort et plus rigide que l'ABS et peut être renforcé avec n'importe quelle fibre continue.

Renforcement avec des fibres

La fabrication continue de filament (CFF) est une technologie exclusive qui renforce pièces imprimées en plastique avec des fibres continues sur chaque couche d'une pièce. Les

Chapitre II : Expérimentations

utilisateurs peuvent contrôler les couches renforcées, la quantité, l'orientation et le type de fibre de renforcement

II.5. 4.Types de fibres

- **Fibre de carbone**

La fibre de carbone a le rapport résistance / poids le plus élevé de nos fibres de renforcement. Six fois plus fort et dix-huit fois plus rigide que l'Onyx, renfort en fibre de carbone est couramment utilisé pour les pièces qui remplacent l'aluminium usiné.

- **Fibre de verre**

La fibre de verre est notre fibre continue d'entrée de gamme, offrant une haute résistance à un prix accessible. 2,5 fois plus résistante et huit fois plus rigide que l'Onyx.

Kevlar

Le Kevlar possède une excellente durabilité, ce qui le rend optimal pour les pièces qui supportent un chargement répété et soudain. Aussi rigide que la fibre de verre et beaucoup plus ductile, il peut être utilisé pour une grande variété d'applications.

- **Fibre de verre HSHT**

La fibre de verre haute résistance haute température (HSHT) présente la résistance de l'aluminium et une tolérance élevée à la chaleur. C'est plutôt utilisé pour les pièces fortement sollicitées à des températures de fonctionnement élevées.

II.5. 5.Motif de remplissage :

- ❖ Triangulaire
- ❖ Rectangulaire
- ❖ Hexagonal
- ❖ Solide



Chapitre II : Expérimentations

Figure. 29 : Motif de remplissage : Hexagonale, Triangulaire, Rectangulaire

II.5. 6. Densité de remplissage :

Pour un remplissage **triangulaire** : la variation est possible entre 28 % et 55 %

Pour un remplissage **Rectangulaire** : la variation est possible entre 0 % et 92 %

Pour un remplissage **Hexagonal** : la variation est possible entre 18 % et 62 %

Pour un remplissage **solide** : 100 %

II.5. 7. Type de remplissage de fibre

III.5. 7. 1. Remplissage concentrique

Le remplissage concentrique dépose la fibre autour du périmètre d'un mur. Ce type de remplissage aide principalement à résister à la flexion autour de l'axe Z et renforce les murs contre la déformation. Vous pouvez spécifier le nombre de coques de fibres souhaitées en modifiant le nombre de fibre concentrique anneaux.

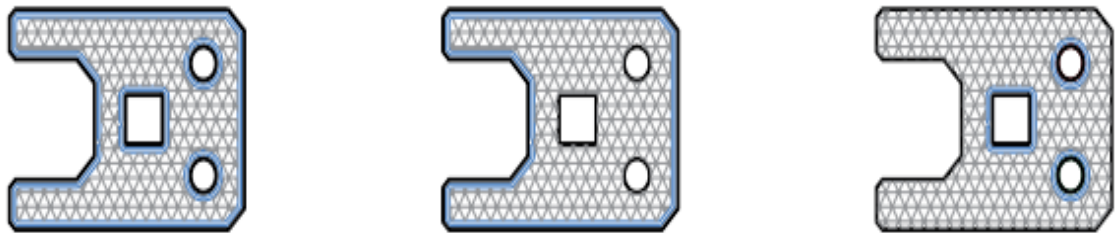


Figure. 30 : Remplissage concentrique ; Tous les murs, Coque extérieure uniquement, Trous intérieurs uniquement

- **Tous les murs**

Ce type fixe la fibre pour renforcer la coque extérieure et inter-trous, fournissant le renforcement approprié.

- **Coque extérieure uniquement**

Ce type ne fait que renforcer l'extérieur mur d'une pièce. Cela peut être utilisé pour renforcer la pièce pour le pliage ou charges d'impact appliquées sur les côtés.

- **Trous intérieurs uniquement**

Chapitre II : Expérimentations

Ce type ne fait que renforcer l'intérieur mur d'une pièce. Cela peut être utilisé pour renforcer les trous de boulons ou les cavités pour améliorer la répartition de la charge.

II.5.7.2. Remplissage isotrope

Le remplissage isotrope achemine la fibre d'avant en arrière selon un motif en zig-zag pour simuler les couches unidirectionnelles individuelles d'un composite laminé. Par défaut, les couches de fibres isotropes suivantes font pivoter les fibres de 45° pour obtenir une résistance unidirectionnelle au sein d'un groupe de fibres, mais l'ANGLE DE FIBRE peut être modifié si nécessaire. Les couches de fibre de remplissage isotrope résistent à la flexion dans le plan XY. En plus du motif de remplissage isotrope, cette option trace par défaut des anneaux concentriques autour de tous les murs pour améliorer la résistance des murs.

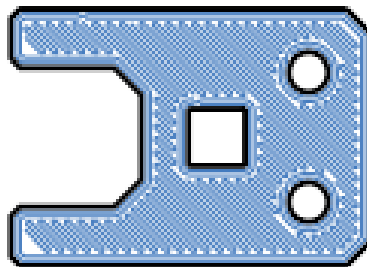


Figure. 31 : Remplissage isotropique

Couches de mur

Plus de murs rendront une pièce en plastique pur plus solide, mais réduiront également la zone dans laquelle la fibre pourra s'intégrer.

Ce paramètre peut être varié entre 1 et 4 couches.

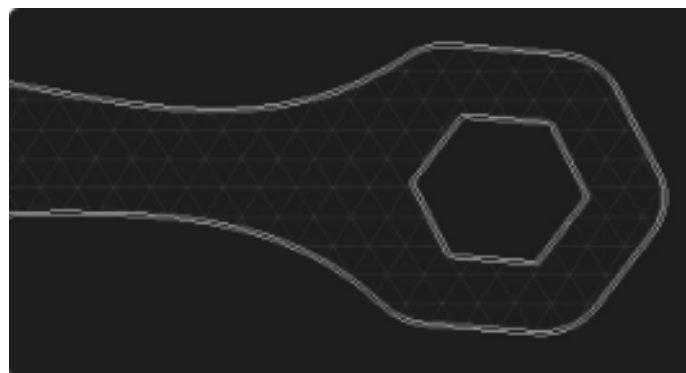


Figure. 32 : Couche de mur

Chapitre II : Expérimentations

Couches de toit et de plancher

le nombre de couches de plastique solide utilisées en haut et en bas de la pièce et la variation de ce paramètre est possible entre : 1 et 10

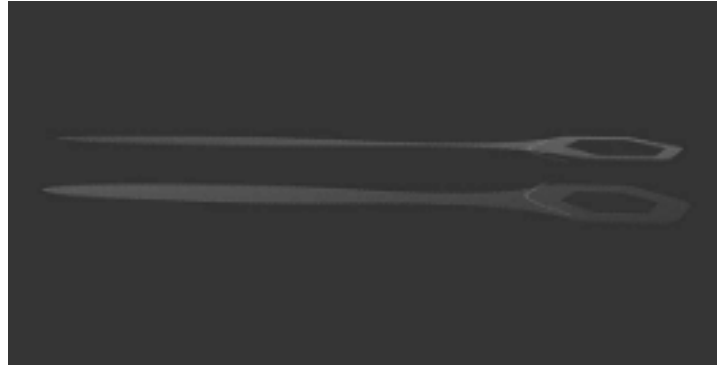


Figure. 33 : Couches de toit et de plancher

Hauteur de couche

La hauteur du calque détermine l'épaisseur de chaque tranche lors de la conversion de la pièce en une série de calques imprimables.

On ne peut pas changer cela si on utilise de la fibre :

- Fibre de verre : 0.1
- Fibre de carbone : 0.125
- Kevlar : 0.1
- HSFSG : 0.1

Le nombre total de couches

Le nombre total de couches que nous remplirons de fibre dans la pièce.

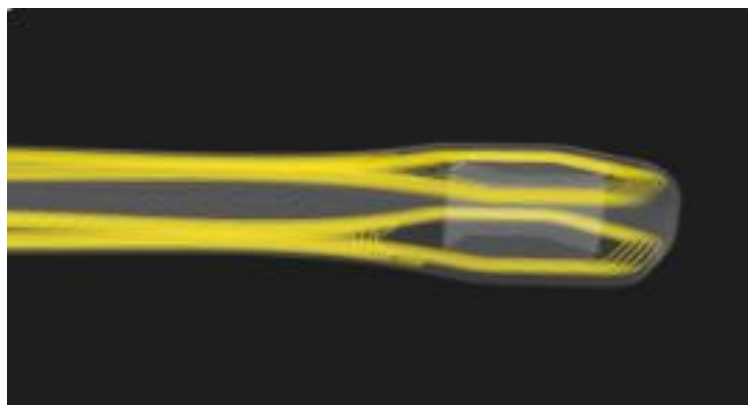


Figure. 34 : Le nombre de couches en fibre

Chapitre II : Expérimentations

Anneaux concentriques en fibre

Le nombre d'anneaux de remplissage de fibres concentriques ajoutés par couche.

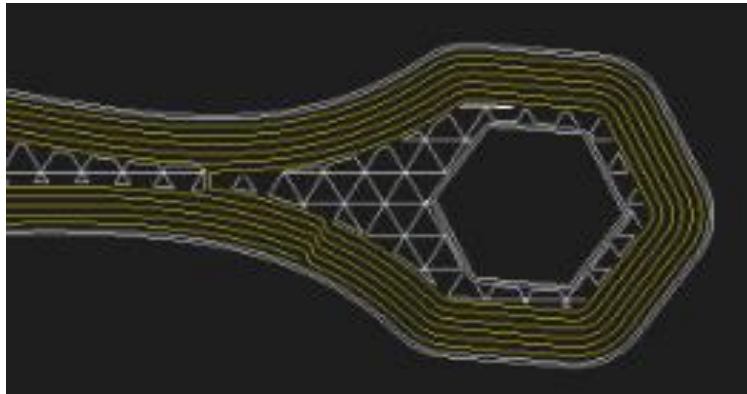


Figure.35 : les anneaux de remplissage de fibres concentriques

Après l'impression des pièces, nous sommes passés à l'étape suivante qui est le scan, une étape importante car elle permet de récupérer tous les nuages des points de la surface.

Pour cela nous avons utilisé un scanner 3D, Solutionix D500.

II.6. Solutionix D500

Un scanner 3D de bureau (Solutionix D500) est utilisé pour scanner la surface des pièces de test FFF et obtenir des mesures de coordonnées point par point de la géométrie, appelées nuage de points 3D. Le scanner laser enregistre la lumière réfléchie de la surface de la pièce comme un point dans l'espace 3D, avec un écart volumétrique maximal.

Le scanner Solutionix D500 (numérisation de petits objets 3D haute vitesse et haute qualité) utilise un module de numérisation 3D haute résolution et un système rotatif monté sur 2 axes. L'objet numérisé est placé sur l'appareil qui tourne automatiquement pendant l'opération de numérisation. Le système de deux axes de rotation assure un positionnement précis des vues ; le logiciel optimisera alors automatiquement l'alignement à la fin du cycle, produisant un maillage extrêmement propre et précis.



Figure.36: Solutionix D500 scanner

II.6. 1. Spécification du système

Tableau.8 : Spécifications du scanner Solutionix

Model :D500	Operation mode and Conditions
S/N:1N19011D0044	Scanning volume:92* 70*60
Camera resolution :2*2.0MP	Scanning Area :90*72*60mm
Point spacing 0.056mm	Light source: Blue LED

II.7. Géomagique Contrôle X

Geomagic® Control X™ est un logiciel professionnel de contrôle de qualité 3D et d'inspection dimensionnelle qui vous permet de capturer et de traiter les données des scanners 3D et autres appareils portables pour mesurer, comprendre et communiquer les résultats d'inspection pour garantir la qualité.

Les écarts géométriques des pièces fabriquées peuvent être calculés en comparant les données du nuage de points au modèle de conception assistée par ordinateur (CAO) d'origine. Un échantillon de données X_m ; Y_m ; Z_m représente les coordonnées du point de mesure, et $(X_r$,

Chapitre II : Expérimentations

Y_r, Z_r) représente la mesure correspondante de l'écart géométrique dans le X; Y; directions Z, respectivement. Et aussi la différence entre eux.

Nous notons que Geomagic Control X se compose de plusieurs étapes, telles que l'extraction du nuage de points de la conception CAO, l'alignement du scan mesuré vers la CAO et l'analyse ultérieure.

II.8. Conclusion :

La fabrication additive et les matériaux composites offrent des perspectives prometteuses dans divers domaines industriels et technologiques. Ce chapitre a mis en évidence les avancées significatives réalisées dans ces deux domaines et leur impact sur la conception et la production de pièces complexes.

Les matériaux composites jouent également un rôle important dans cette évolution. En combinant différentes matières premières, comme les fibres de carbone, les fibres de verre, les matériaux composites offrent des propriétés mécaniques améliorées et une résistance accrue tout en restant légers. Ces caractéristiques en font des candidats idéaux pour des applications exigeant à la fois résistance et légèreté, comme dans l'aérospatiale, l'automobile et le domaine médical.

Cependant, malgré tous les avantages, des défis subsistent. La sélection appropriée des matériaux composites, l'optimisation des paramètres de fabrication additive et la garantie de la qualité et de la reproductibilité des pièces imprimées restent des enjeux critiques à relever. De plus, la validation et la certification de la performance des pièces fabriquées selon ces nouvelles méthodes sont essentielles pour assurer leur adoption à grande échelle dans des applications critiques.

Chapitre III : Résultats et discussions

Chapitre III : Résultats et discussions

Le présent chapitre revêt une importance cruciale dans notre étude, car il nous permettra de présenter en détail les résultats obtenus ainsi que l'analyse approfondie des données recueillies. Nous avons effectué des investigations tant du point de vue statistique que mathématique, afin de répondre aux objectifs fixés et d'apporter des éclaircissements sur les différentes problématiques étudiées.

La première partie de cette analyse se focalisera sur l'aspect statistique. Nous avons utilisé des méthodes rigoureuses pour traiter les données collectées, en mettant en œuvre des approches telles que le plan d'expérience, l'analyse de variance (ANOVA). Ces techniques nous ont permis d'explorer les relations entre les différentes variables d'entrée et de sortie, de déterminer les facteurs influents et de comprendre l'impact de chaque paramètre sur les résultats observés.

La seconde partie de notre analyse se concentrera sur l'approche mathématique adoptée pour modéliser et prédire les comportements des matériaux composites dans le contexte de la fabrication additive. Nous avons fait usage de la géométrie numérique, et d'autres méthodes mathématiques pour développer des modèles prédictifs fiables. Ces modèles nous ont permis de comprendre les interactions complexes entre les différentes variables, de prédire les propriétés des pièces imprimées en 3D, et d'optimiser les paramètres du processus de fabrication pour obtenir des produits de haute qualité.

En somme, ce chapitre offre une synthèse des résultats obtenus à partir de nos approches statistiques et mathématiques. Nous examinerons en détail les découvertes les plus significatives, les relations entre les différentes variables, et les implications pratiques de nos analyses. Ces résultats sont essentiels pour éclairer notre compréhension des matériaux composites et de leur comportement lors de la fabrication additive, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'amélioration des processus industriels et des produits finaux.

III.1. Analyse statistique des facteurs d'impact

L'objectif de cette étude est d'explorer la corrélation entre les paramètres d'entrée, considérés comme les facteurs d'impact, et la réponse de sortie, représentée par l'écart dimensionnel. Pour ce faire, nous avons effectué une analyse de la variance (ANOVA) en utilisant le logiciel de statistiques et d'analyse de données Minitab 17. Cette approche statistique nous permet de déterminer l'influence de chaque facteur sur la variation observée dans l'écart dimensionnel, et ainsi d'identifier les facteurs les plus significatifs dans notre étude. Grâce à l'utilisation de

Chapitre III : Résultats et discussions

Minitab 17, nous avons pu effectuer une analyse rigoureuse des données et obtenir des résultats fiables pour étayer nos conclusions.

Tablea.9 : la matrice de plan expérimental avec résultats de la variance et l'écart moyen

Trials	Radius size(mm)	Material Type	Filling Pattern	Variance	Average deviation
1	1	1	1	0.0036	-0.102
2	1	2	1	0.0006	-0.0124
3	1	3	1	0.0049	0.003
4	1	1	2	0.0052	-0.258
5	1	2	2	0.0002	-0.012
6	1	3	2	0.0040	0.041
7	1	1	3	0.0048	-0.081
8	1	2	3	0.0004	0.0059
9	1	3	3	0.0043	0.039
10	2	1	1	0.0050	-0.143
11	2	2	1	0.0013	0.0353
12	2	3	1	0.0051	0.0245
13	2	1	2	0.0046	-0.160
14	2	2	2	0.0011	0.030
15	2	3	2	0.0049	0.032
16	2	1	3	0.0046	-0.150
17	2	2	3	0.0009	0.042
18	2	3	3	0.041	0.0875
19	3	1	1	0.1081	-0.309
20	3	2	1	0.0056	0.026

Chapitre III : Résultats et discussions

21	3	3	1	0.0071	0.038
22	3	1	2	0.0091	-0.195
23	3	2	2	0.001	0.01
24	3	3	2	0.0094	0.049
25	3	1	3	0.0555	-0.268
26	3	2	3	0.0024	0.0357
27	3	3	3	0.0219	-0.001

IV.1. Analyse des facteurs d'entrée sur l'écart moyen

IV.1.1. Analyse des effets normalisés

L'objectif de l'analyse des effets normalisés est de déterminer l'influence significative des différents facteurs ou combinaisons de facteurs sur la précision dimensionnelle. La Figure 37 présente le diagramme de Pareto des effets normalisés pour l'écart moyen, en prenant en compte une probabilité de rejet de l'hypothèse nulle (α) fixée à 0,05.

Les résultats montrent que le facteur B, correspondant au type de matériau utilisé, affiche la plus grande valeur d'effet normalisé, indiquant qu'il est le facteur le plus significativement lié à l'écart dimensionnel moyen. D'autre part, la combinaison BC, représentant le type de matériau et le motif de remplissage, présente la plus faible valeur d'effet normalisé, suggérant qu'elle a le moins d'influence sur l'écart dimensionnel.

En outre, l'effet normalisé critique a été calculé à 2,306. Les effets normalisés des combinaisons AB, AC, BC et C (modèle de remplissage) sont tous inférieurs à 2,306, ce qui signifie que ces quatre facteurs et combinaisons ont une influence moindre sur l'écart dimensionnel moyen.

Ces résultats mettent en évidence l'importance du facteur B, le type de matériau, dans le contrôle de la précision dimensionnelle, tandis que la combinaison BC a un impact moins significatif. Ces informations peuvent être précieuses pour optimiser le processus de fabrication additive et améliorer la précision des pièces produites.

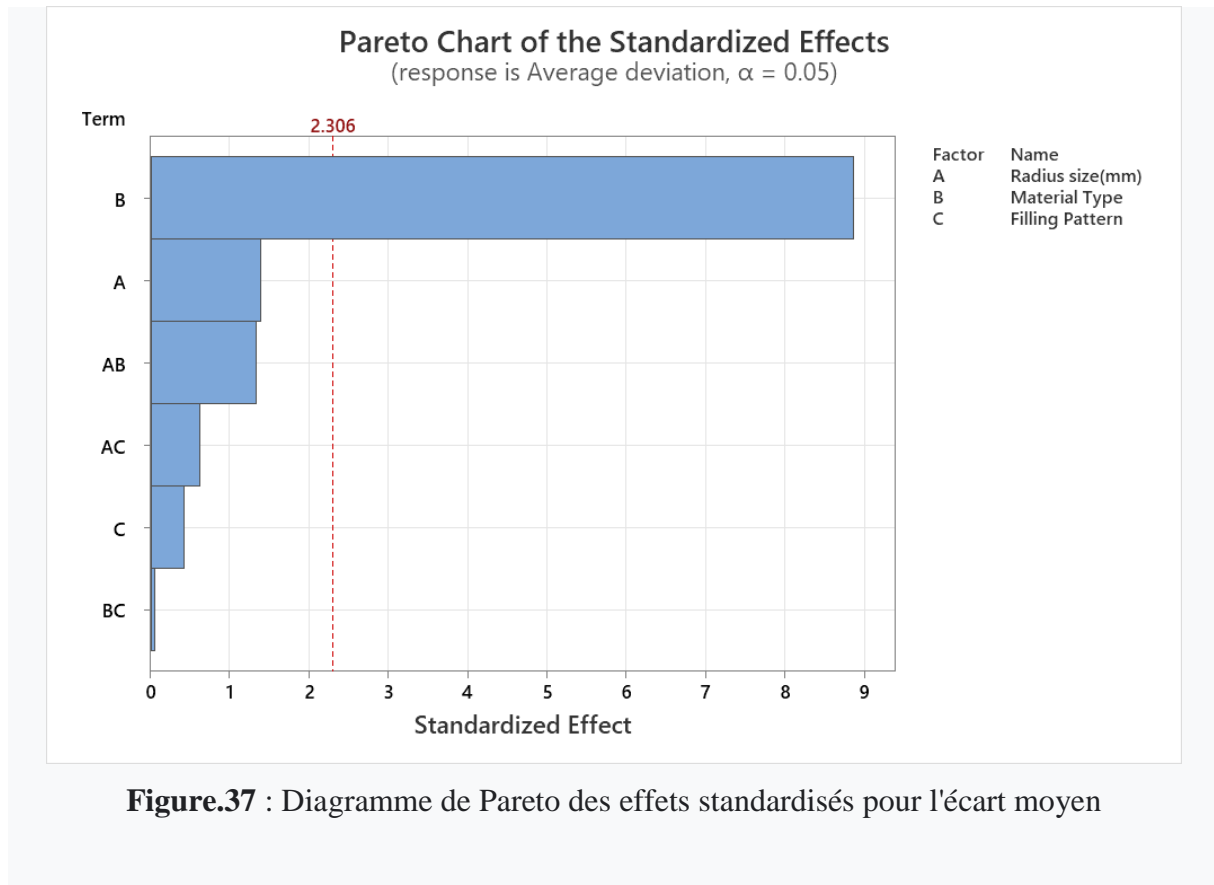


Figure.37 : Diagramme de Pareto des effets standardisés pour l'écart moyen

III.1.2. Principaux effets pour l'écart moyen

La figure. 38 indique :

Le système génère des pièces qui sont en moyenne plus petites que le modèle CAO, ce phénomène est particulièrement prononcé pour le matériau en nylon pur, tandis que les pièces sont en moyenne plus grandes pour le matériau en nylon renforcé de fibres de carbone et de fibre de verre. Ceci suggère que les fibres de renforcement ont probablement contribué à minimiser le rétrécissement thermique.

Les variations de la taille du rayon et du motif de remplissage ont peu d'influence sur les mesures, car ils se rapprochent tous de la valeur moyenne.

Le rayon pour lequel les pièces imprimées sont les plus proches du modèle CAO est $r=10\text{mm}$, ce qui indique que ce rayon spécifique offre une meilleure précision dimensionnelle.

Le matériau en nylon renforcé de fibre de carbone est classé comme le meilleur matériau en termes de précision dimensionnelle, car les pièces fabriquées avec ce matériau sont plus proches du modèle CAO que celles fabriquées avec d'autres matériaux.

Le motif de remplissage hexagonal est considéré comme le motif de remplissage le plus précis, car les pièces fabriquées avec ce motif ont montré une meilleure cohérence avec le modèle CAO.

Ces observations fournissent des informations essentielles pour choisir les matériaux et les motifs de remplissage les plus appropriés dans le processus de fabrication additive, afin d'obtenir des pièces de la plus haute précision dimensionnelle possible.

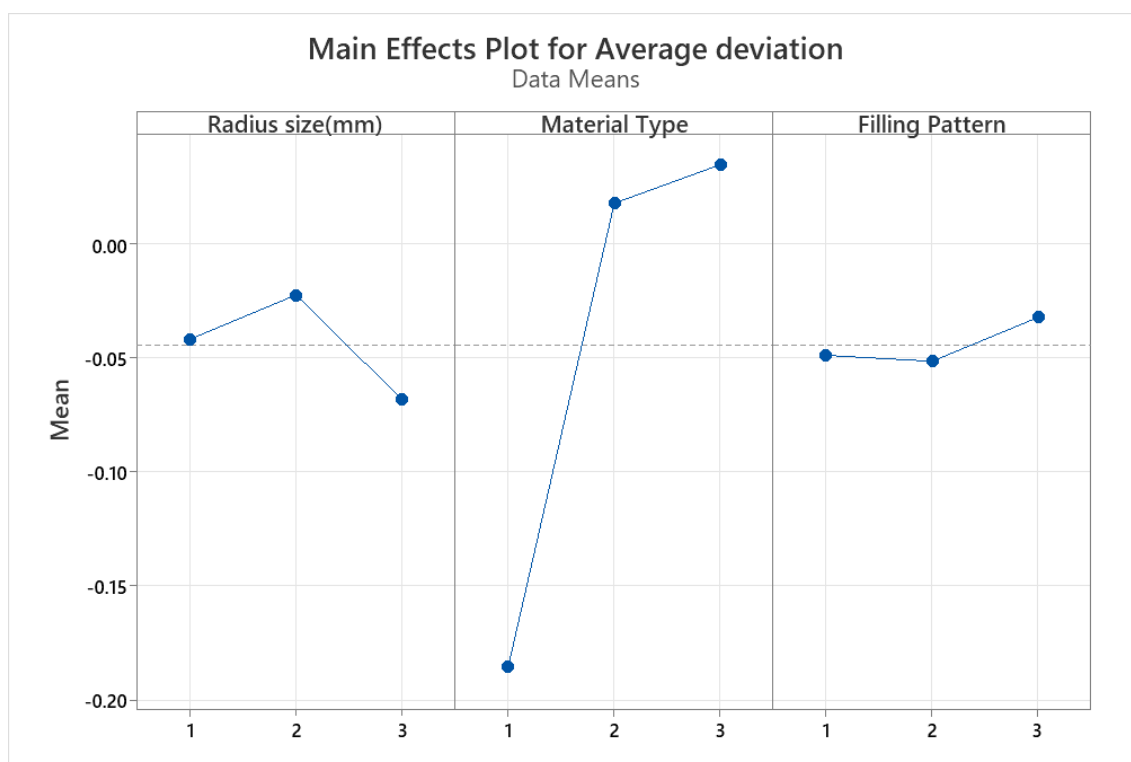


Figure. 38 : Graphique des effets principaux pour l'écart moyen

III.1.3. Interactions pour l'écart moyen (moyennes ajustées)

La Figure 40 révèle des interactions intéressantes concernant l'écart moyen (moyennes ajustées) pour différents types de matériaux et motifs de remplissage. Une observation claire est la non-linéarité des courbes associées à chaque combinaison. Plus spécifiquement, en analysant la corrélation entre la taille du rayon et le type de matériau, nous constatons qu'un rayon de 15 mm atteint une valeur moyenne maximale avec le matériau en nylon, mais cette tendance ne s'applique pas uniformément aux deux autres matériaux.

Pour les matériaux en nylon renforcé de fibres de carbone et de fibres de verre, les résultats sont similaires avec une déviation plus faible pour le nylon renforcé de fibres de carbone. En étudiant la combinaison (rayon, motif de remplissage), une interaction significative est observée, démontrée par l'intersection des courbes. Notamment, un rayon de 10 mm présente une bonne précision pour les trois types de motifs de remplissage.

Une observation intéressante provient de l'analyse de la combinaison (type de matériau, motif de remplissage), où l'on constate que le nylon affiche une précision inférieure pour les trois types de motifs de remplissage par rapport au nylon renforcé de fibres de carbone et au nylon renforcé de fibres de verre. Dans ce cas, les courbes sont pratiquement linéaires, suggérant une faible corrélation entre les paramètres et donc un impact limité sur la précision.

Chapitre III : Résultats et discussions

Ces résultats soulignent l'importance des interactions entre les facteurs étudiés, qui peuvent affecter de manière significative la précision dimensionnelle des pièces fabriquées par le processus FFF. Une compréhension approfondie de ces interactions est cruciale pour optimiser les paramètres du processus et choisir les matériaux les mieux adaptés afin d'obtenir des pièces imprimées en 3D avec la plus grande précision possible.

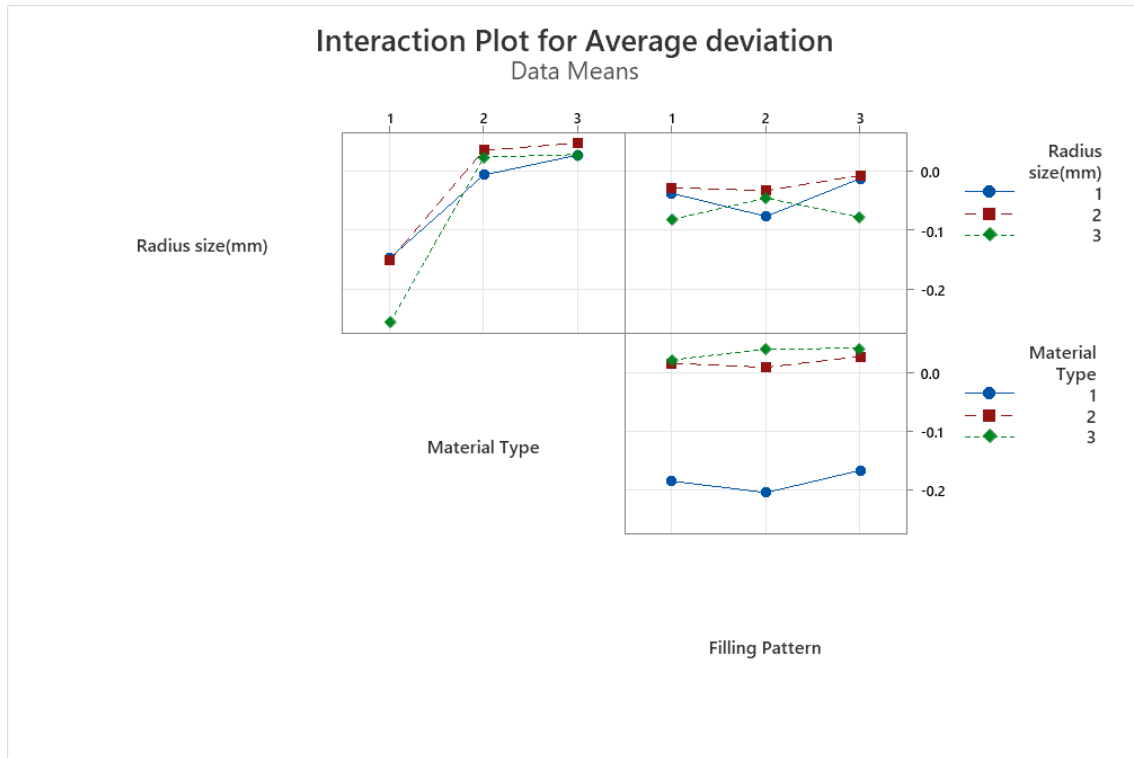


Figure. 40 : Interactions pour l'écart moyen

III.1.4. Rapport ANOVA pour l'écart moyen :

- **III.1.4. 1. Analyse de la variance**

Tableau. 10 : Analyse de la variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	18	0.307867	0.017104	7.02	0.004
Linear	6	0.280965	0.046828	19.21	0.000
Radius size(mm)	2	0.009531	0.004766	1.95	0.204

Chapitre III : Résultats et discussions

Material Type	2	0.269474	0.134737	55.27	0.000
Filling Pattern	2	0.001960	0.000980	0.40	0.682
2-Way	12	0.026902	0.002242	0.92	0.568
Interactions					
Radius	4	0.017556	0.004389	1.80	0.222
size(mm)*Material					
Type					
Radius	4	0.007857	0.001964	0.81	0.555
size(mm)*Filling					
Pattern					
Material	4	0.001489	0.000372	0.15	0.956
Type*Filling					
Pattern					
Error	8	0.019503	0.002438		
Total	26	0.327370			

- **III.1.4. 2. Résumé du model**

Tableau. 11 : Résumé du modèle de variance

S	R-sq	sq(adj)	sq(pred)
0.0493743	94.04%	80.64%	32.14%

- **III.1.4. 3.Coefficients**

Tableau.12: Coefficients de variance

Term	Coef	SE Coef	T- Value	P- Value	VIF
Constant	-	0.00950	-4.65	0.002	
	0.04417				
Radius size(mm)					

Chapitre III : Résultats et discussions

1	0.0023	0.0134	0.17	0.866	1.33
2	0.0218	0.0134	1.62	0.144	1.33
Material Type					
1	-0.1409	0.0134	-	0.000	1.33
			10.49		
2	0.0620	0.0134	4.61	0.002	1.33
Filling Pattern					
1	-0.0047	0.0134	-0.35	0.737	1.33
2	-0.0073	0.0134	-0.54	0.603	1.33
Radius size(mm)*Material Type					
1 1	0.0358	0.0190	1.88	0.097	1.78
1 2	-0.0263	0.0190	-1.39	0.203	1.78
2 1	0.0124	0.0190	0.65	0.534	1.78
2 2	-0.0038	0.0190	-0.20	0.846	1.78
Radius size(mm)*Filling Pattern					
1 1	0.0094	0.0190	0.49	0.635	1.78
1 2	-0.0272	0.0190	-1.43	0.190	1.78
2 1	-0.0006	0.0190	-0.03	0.974	1.78
2 2	-0.0030	0.0190	-0.16	0.879	1.78

Chapitre III : Résultats et discussions

Material	Type*Filling	Pattern
1 1	0.0051 0.0190 0.27	0.794 1.78
1 2	-0.0119 0.0190 -0.63	0.547 1.78
2 1	0.0031 0.0190 0.17	0.873 1.78
2 2	-0.0012 0.0190 -0.06	0.950 1.78

III.2. Analyse des facteurs d'entrée sur la variance:

III.2.1. Analyse des effets de variance normalisés:

Les effets normalisés sont présentés à la Figure.40 Les effets standardisés des facteurs A, B, C et des combinaisons AB, BC, AC, sont inférieurs à 2,306, ce qui signifie que ces six facteurs et combinaisons ont un faible impact sur la variance.

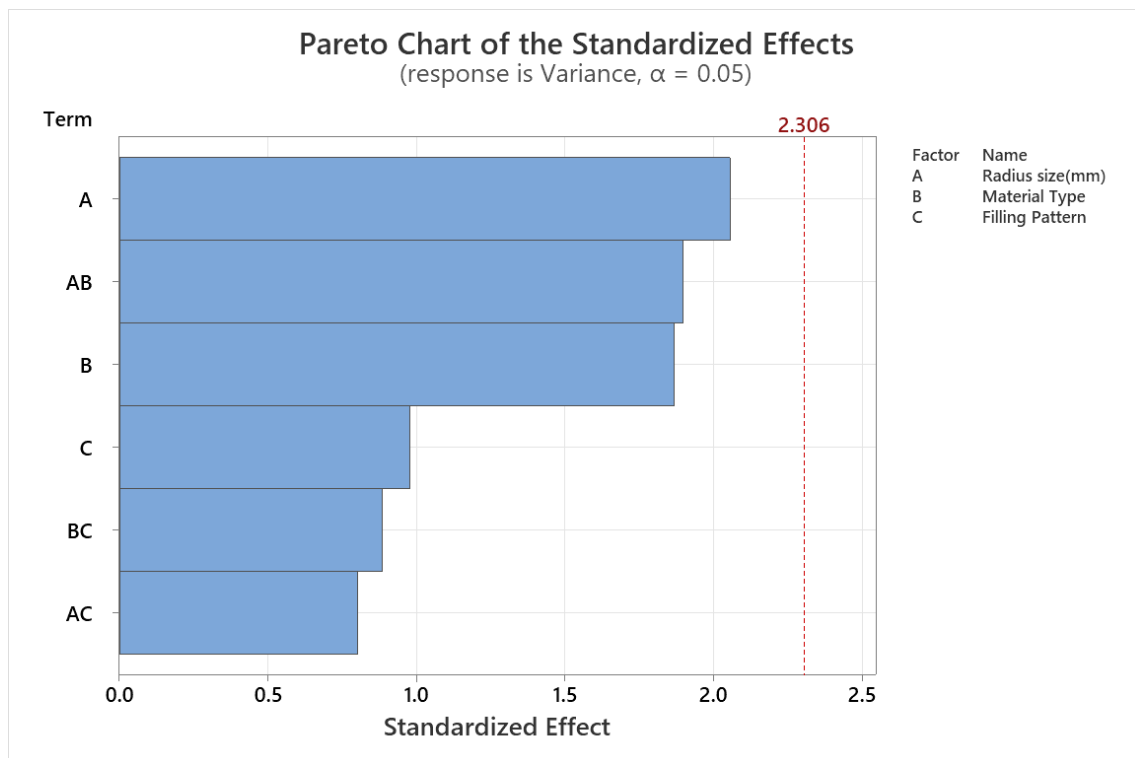


Figure. 40: Diagramme de Pareto des effets normalisés pour la variance

III.2.2. Principaux effets sur la variance

La figure. 41 indique que:

- Les rayons de 5 mm et 10 mm engendrent un faible écart. En revanche, la variance pour le rayon de 15 mm est nettement supérieure à celle des autres rayons. Il est observé que plus le rayon est grand, plus la dispersion est élevée.
- La variance pour le matériau en nylon (PA6) est considérablement plus élevée que celle du matériau renforcé de carbone.
- Le motif de remplissage triangulaire et hexagonal présente approximativement la même variance, tandis que le motif de remplissage rectangulaire affiche un écart plus faible.

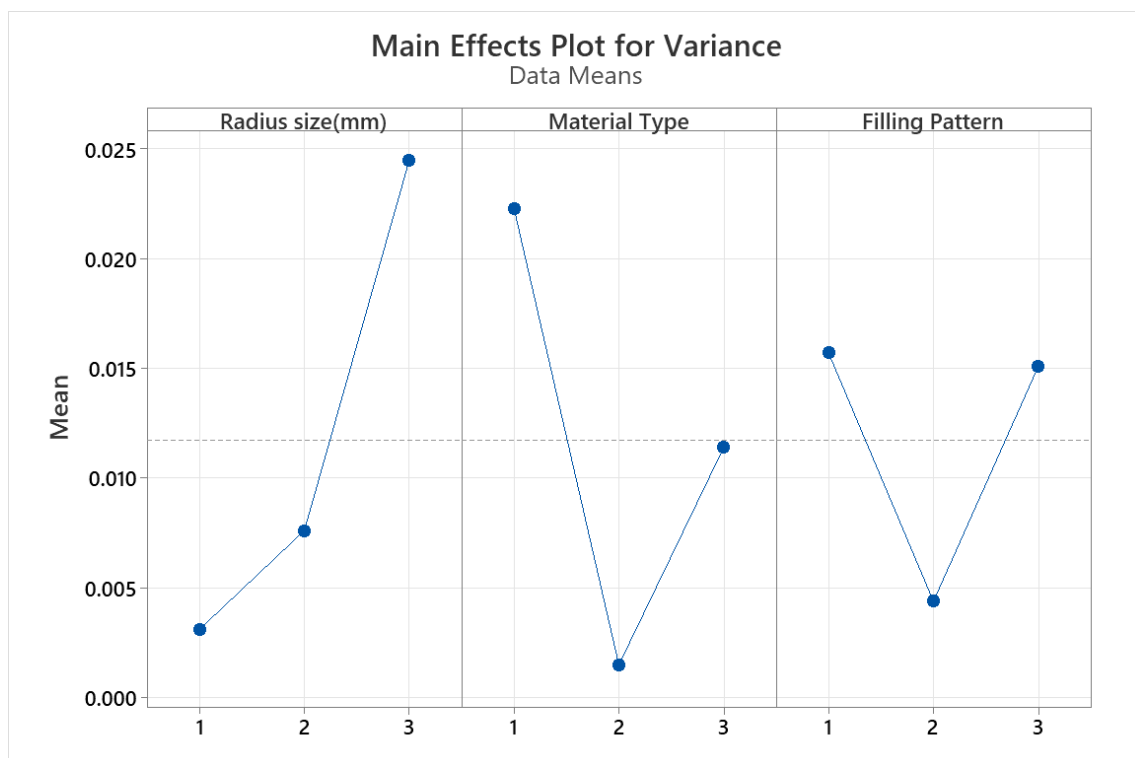


Figure. 41 : Graphique des effets principaux pour la variance

III.2.3. Interactions pour la variance

Les courbes présentées dans la Figure 42 mettent en évidence une interaction croisée entre les trois facteurs étudiés.

Chapitre III : Résultats et discussions

L'interaction entre les paramètres "taille du rayon" et "type de matériau" indique que la valeur maximale de variance est atteinte avec le nylon pour un rayon de 15 mm.

Pour le matériau en nylon renforcé de fibre de carbone, la valeur de variance n'est pas affectée par la taille du rayon. En effet, pour les rayons de 5 mm, 10 mm et 15 mm, la variance reste très faible.

En ce qui concerne la combinaison (rayon, motif de remplissage), on constate que les motifs de remplissage triangulaires et rectangulaires avec un rayon de 5 mm et 10 mm présentent une variance très faible. Toutefois, le rayon de 15 mm associé au motif de remplissage triangulaire atteint une valeur de variance maximale de 0,040. En ce qui concerne le motif de remplissage hexagonal, la variance avec le rayon le plus petit ($r = 5$ mm) est pratiquement nulle, tandis que pour les rayons de 10 mm et 15 mm, des valeurs légèrement différentes de variance sont observées.

Les résultats de corrélation entre le type de motif de remplissage et le matériau adopté varient en fonction du type de remplissage utilisé. L'écart est pratiquement nul pour le nylon renforcé de fibre de carbone avec les trois types de motifs de remplissage. Quant au motif de remplissage hexagonal, le nylon et le nylon renforcé de fibre de verre ont tous deux donné des valeurs de variance similaires, d'environ 0,024.

Chapitre III : Résultats et discussions

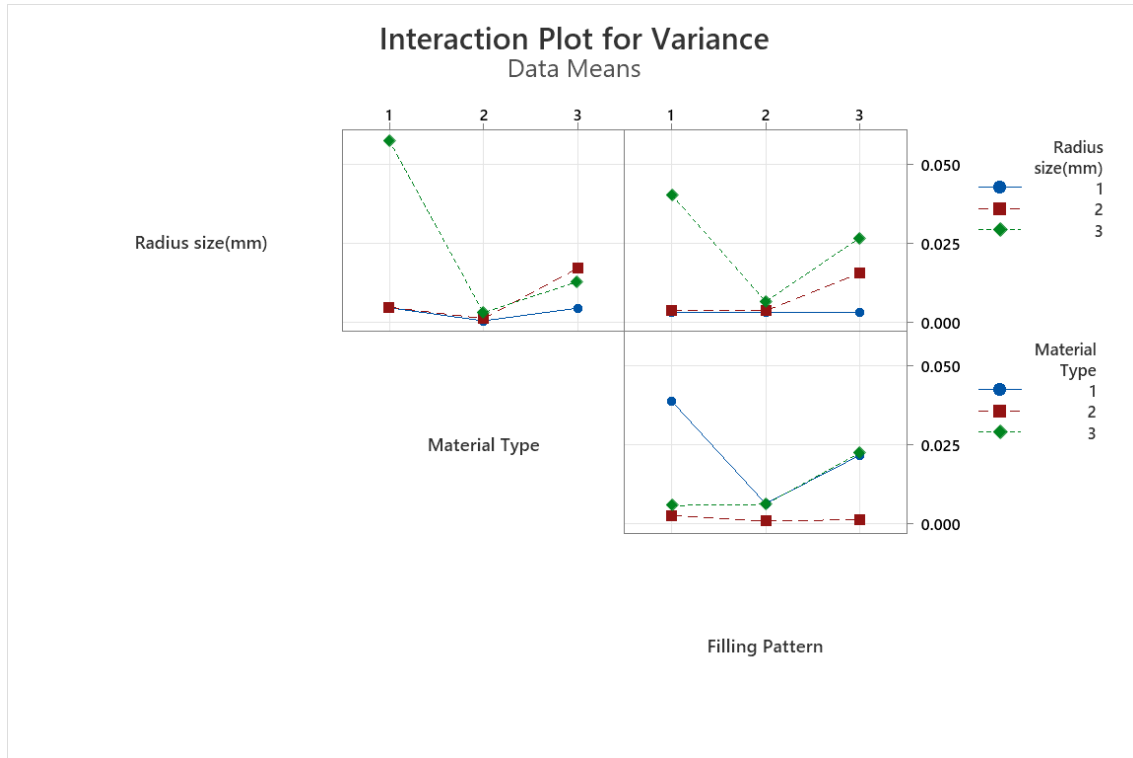


Figure. 42 : Interactions pour la variance

III.2.4. Rapport ANOVA pour la variance

III.2.4. 1. Analyse de variance pour variance

Tableau. 13 : Analyse de la variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	18	0.011234	0.000624	2.01	0.158
Linear	6	0.004951	0.000825	2.66	0.101
Radius size(mm)	2	0.002279	0.001139	3.67	0.074
Material Type	2	0.001944	0.000972	3.13	0.099
Filling Pattern	2	0.000728	0.000364	1.17	0.357
2-Way Interactions	12	0.006283	0.000524	1.69	0.233
Radius size(mm)*Material Type	4	0.003583	0.000896	2.89	0.094

Chapitre III : Résultats et discussions

Radius	40.001283	0.000321	1.03	0.446
size(mm)*Filling				
Pattern				
Material	40.001417	0.000354	1.14	0.403
Type*Filling				
Pattern				
Error	80.002483	0.000310		
Total	260.013717			

III.2.4. 2. Résumé du modèle

Tableau. 14: Résumé du modèle de variance

	R- S	R-sq	sq(adj)	R- sq(pred)
	0.0176162	81.90%	41.18%	0.00%

III.2.4. 3. Coefficients

Tableau. 15 : Coefficients pour la variance

	SE	T-	P-	
Term	Coef	Coef	Value	Value VIF
Constant	0.01173	0.00339	3.46	0.009
Radius size(mm)				
1	-0.00479	-1.80	0.110	1.33
	0.00861			
2	-0.00479	-0.86	0.416	1.33
	0.00411			
Material Type				
1	0.01055	0.00479	2.20	0.059 1.33
2	-0.00479	-2.13	0.066	1.33
	0.01023			
Filling Pattern				

Chapitre III : Résultats et discussions

1	0.00397	0.00479	0.83	0.431	1.33
2		-0.00479	-1.53	0.164	1.33
		0.00734			
Radius					
size(mm)*Material					
Type					
1 1		-0.00678	-1.35	0.215	1.78
		0.00913			
1 2	0.00751	0.00678	1.11	0.300	1.78
2 1		-0.00678	-1.98	0.083	1.78
		0.01343			
2 2	0.00371	0.00678	0.55	0.599	1.78
Radius					
size(mm)*Filling					
Pattern					
1 1		-0.00678	-0.60	0.567	1.78
		0.00405			
1 2	0.00736	0.00678	1.09	0.309	1.78
2 1		-0.00678	-1.15	0.284	1.78
		0.00779			
2 2	0.00326	0.00678	0.48	0.644	1.78
Material					
Type*Filling					
Pattern					
1 1	0.01265	0.00678	1.87	0.099	1.78
1 2		-0.00678	-1.27	0.238	1.78
		0.00864			
2 1		-0.00678	-0.44	0.673	1.78
		0.00297			
2 2	0.00660	0.00678	0.97	0.359	1.78

III.3. Modélisation mathématique « elliptique » :

Dans chaque section du cylindre imprimé, la mesure géométrique fournit un ensemble de N points de coordonnées $(R_i, \theta_i)_{1 \leq i \leq N}$ dans le plan local (r, θ) . On fait l'hypothèse (non limitative mais qui permet de simplifier les algorithmes) que les angles θ sont régulièrement répartis sur le cercle, soit $\theta_i = (i - 1) 2\pi/N$. On cherche une ellipse, centrée sur l'origine du repère, passant au plus près de ces N points. Plus précisément, une telle ellipse est caractérisée par l'équation suivante dans le plan (r, θ) :

$$r(\theta) = \frac{a}{(\cos^2(\theta - \bar{\theta}) + \tau^2 \sin^2(\theta - \bar{\theta}))^{1/2}}$$

Où a représente la longueur d'un des demi-axes, $\tau = a/b$ représente le rapport d'aspect des deux demi-axes 'a' et 'b' et enfin $(\bar{\theta})$ est l'inclinaison de l'ellipse par rapport à axe horizontal : pour $k \in \mathbb{Z}$, quand $\theta = \bar{\theta} + k\pi$ alors le rayon est 'a', et quand $\theta = \bar{\theta} + \pi/2 + k\pi$ alors le rayon est 'b'. Notons que pour une ellipse donnée, cette représentation n'est pas unique : pour $k \in \mathbb{Z}$ on peut ajouter arbitrairement $k\pi$ à $\bar{\theta}$ sans changer l'expression de r .

La suite de cette section présente des conditions théoriques et un algorithme pratique permettant de trouver 'a', 'τ' et 'θ̄' tels que la quantité suivante soit minimale

$$J(a, \tau, \bar{\theta}) = \sum_{i=1}^N [R_i - r(\theta_i)]^2 \quad (1)$$

Notons que $|R_i - r(\theta_i)|$ n'est pas exactement la distance du point (R_i, θ_i) à l'ellipse d'équation $\theta \rightarrow r(\theta)$ donc on ne va pas trouver exactement l'ellipse "la plus proche" au sens des distances, mais l'ellipse qui minimise (1).

Obtention d'un système non linéaire en écrivant des conditions d'optimalité du premier ordre :

En écrivant les conditions d'optimalité du premier ordre $\frac{\partial J}{\partial a}(a, \tau, \bar{\theta}) = \frac{\partial J}{\partial \tau}(a, \tau, \bar{\theta}) = \frac{\partial J}{\partial \bar{\theta}}(a, \tau, \bar{\theta}) = 0$ et désignant :

$$g_i = (\cos^2(\theta_i - \bar{\theta}) + \tau^2 \sin^2(\theta_i - \bar{\theta}))^{1/2},$$

On obtient les expressions suivantes :

$$-\frac{1}{2} \frac{\partial J}{\partial a}(a, \tau, \bar{\theta}) = \sum_{i=1}^N [R_i - a/g_i] \frac{1}{g_i} = 0 \quad (2)$$

Chapitre III : Résultats et discussions

$$\left(\frac{1}{2\tau a}\right) \frac{\partial J}{\partial \tau} (a, \tau, \bar{\theta}) = \sum_{i=1}^N [R_i - a/g_i] (\sin^2(\theta_i - \bar{\theta})) / g_i^3 = 0 \quad (3)$$

$$\frac{1}{a} \frac{\partial J}{\partial \bar{\theta}} (a, \tau, \bar{\theta}) = \sum_{i=1}^N [R_i - a/g_i] ((1 - \tau^2) \sin(2(\theta_i - \bar{\theta}))) / g_i^3 = 0 \quad (4)$$

En éliminant a des trois égalités (2)-(3)-(4), on obtient le système 2×2 (non linéaire) suivant, dont les inconnues sont $(\tau, \bar{\theta})$:

$$\sum_{i=1}^N \frac{R_i}{g_i} \times \sum_{i=1}^N \frac{\sin^2(\theta_i - \bar{\theta})}{g_i^4} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{g_i^2} \times \sum_{i=1}^N \frac{R_i \sin^2(\theta_i - \bar{\theta})}{g_i^3} = 0 \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^N \frac{R_i}{g_i} \times \sum_{i=1}^N \frac{\sin(2(\theta_i - \bar{\theta}))}{g_i^4} - \sum_{i=1}^N \frac{1}{g_i^2} \times \sum_{i=1}^N \frac{R_i \sin(2(\theta_i - \bar{\theta}))}{g_i^3} = 0 \quad (6)$$

Algorithme de Newton pour résoudre le système (5) – (6)

Le système (5)–(6) est un système non linéaire de deux équations à deux inconnues, qui sont τ et $\bar{\theta}$. Une fois ces valeurs trouvées, nous pouvons calculer « a » par l'une des trois expressions (2) à (4). Soient $F1(\tau, \bar{\theta})$ la fonction du membre gauche de (5) et $F2(\tau, \bar{\theta})$ la fonction du membre gauche de (6). L'algorithme de Newton appliqué au système (5)–(6) consiste à générer une suite $(\tau_n, \bar{\theta}_n)_{n \geq 1}$ destinée à converger vers une solution du système. Listons les trois étapes habituelles de l'algorithme de Newton.

Déterminer un point de départ

Comme on le sait, l'algorithme de Newton convergera si et seulement si son point de départ est suffisamment proche de la solution. Nous avons opté pour l'idée suivante : nous calculons la distance entre les couples de points diamétralement opposés qui sont fournis ; le maximum de ces valeurs est une approximation raisonnable de $2a$ qui est le grand diamètre de l'ellipse, l'angle correspondant à ce couple de points est une approximation raisonnable de $\bar{\theta}$, la distance entre les deux points obtenus par une rotation d'angle $\pi/2$ est une approximation raisonnable de $2b$ qui est le petit diamètre de l'ellipse.

Mise à jour

Soit $A(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1})$ la matrice jacobienne de $(F1, F2)$ in $(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1})$:

Chapitre III : Résultats et discussions

$$A(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial F_1}{\partial \tau}(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1}) & \frac{\partial F_1}{\partial \bar{\theta}}(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1}) \\ \frac{\partial F_2}{\partial \tau}(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1}) & \frac{\partial F_2}{\partial \bar{\theta}}(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1}) \end{pmatrix}$$

La mise à jour est écrite

$$(\tau_n, \bar{\theta}_n) = (\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1}) - \left(A^{-1}(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1}) \begin{pmatrix} F_1(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1}) \\ F_2(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1}) \end{pmatrix} \right)^T$$

Le calcul de A est effectué dans la procédure "jacobsys" du programme ; le calcul de (F1, F2) dans la procédure "evalsys". Cette opération est la mise à jour usuelle de l'algorithme de Newton et ne présente donc aucune originalité ; nous y avons toutefois ajouté quelques garde-fous :

- La variable τ étant un rapport de deux longueurs, elle doit rester positive, ce qui n'est pas automatiquement assuré par cette mise à jour ; si $\tau_n < 0$ alors nous annulons la mise à jour de cette variable : $\tau_n = \tau_{n-1}$,
- Nous imposons à la variable τ_n de ne pas dépasser une valeur limite si la valeur de P (la fonction de (1)) évaluée en $(\tau_n, \bar{\theta}_n)$ est supérieure à la valeur précédente de P en $(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1})$. Le calcul des valeurs de P est effectué dans la procédure "evaldistance" du programme. Cette valeur limite peut être ajustée si besoin ; nous avons choisi 20, valeur au-delà de laquelle on peut considérer que l'algorithme est en train de diverger si de plus P a augmenté au lieu de diminuer. Si τ_n dépasse cette valeur limite, nous réinitialisons τ_n à la valeur 1 (une autre valeur pourrait être choisie).

Tests d'arrêt

Ce sont deux tests assez classiques ; nous arrêtons les mises à jour lorsque l'un des deux critères suivants est rempli :

- a. Toute norme de $(F_1(\tau_n, \bar{\theta}_n), F_2(\tau_n, \bar{\theta}_n))$ est inférieure à une tolérance fixée par l'utilisateur ; si ce critère est satisfait, alors l'algorithme a rempli sa mission : trouver le couple $(\tau, \bar{\theta})$ tel que (5)–(6) soit satisfait (à la tolérance près).

Chapitre III : Résultats et discussions

- b. Le nombre d'itérations de l'algorithme dépasse un seuil fixé par l'utilisateur ; si ce critère est rempli, alors l'algorithme n'a pas rempli sa mission ; cette sauvegarde est nécessaire pour que l'algorithme se termine s'il ne converge pas.

Cet algorithme permet de calculer la valeur du grand axe "a", du petit axe "b" dont on déduit l'écart de cylindricité $c = |a - b|$.

III.3.1. Composition de l'outil de calcul

L'outil de calcul se compose de 6 algorithmes qui sont comme suit :

III.3.1. 1. Evaldistance:

```
evaldistance.m
1 function dist = evaldistance(x0,aguess,coord)
2   N = size(coord,1);
3
4   dist = 0;
5   thetaguess = x0(2);
6   tauguess2 = (x0(1))**2;
7
8   for i = 0:(N-1)
9     thetai = i*2*pi/N;
10    Ri = sqrt((coord(i+1,1))**2+(coord(i+1,2))**2);
11    Rthi = aguess/sqrt((cos(thetai - thetaguess))**2 + (sin(thetai - thetaguess))**2 * tauguess2);
12    dist = dist + (Ri - Rthi)**2;
13  endfor
14
15
16
17  endfunction
```

III.3.1. 2. Initialguess

```
initialguess.m
1 function [x0 , aguess] = initialguess (coord)
2   N = size(coord,1);
3   x0 = zeros(2,1);
4
5   dmax = 0;
6   for i = 1:N/2
7     i1 = i + N/2;
8     dm = sqrt(coord(i,1)**2+coord(i,2)**2) + sqrt(coord(i1,1)**2+coord(i1,2)**2);
9     if(dm > dmax)
10      dmax = dm;
11      i2 = i + floor(N/4);
12      i3 = mod(i2 + N/2,N);
13      if(i3 == 0)
14        i3 = 1;
15      endif
16      dmin = sqrt(coord(i2,1)**2+coord(i2,2)**2) + sqrt(coord(i3,1)**2+coord(i3,2)**2);
17      restheta = (i-1)*2*pi/N;
18      restau = dmax/dmin;
19    endif
20  endfor
21  x0 = [restau ; restheta];
22  aguess = dmax/2;
23  endfunction
```

Chapitre III : Résultats et discussions

III.3.1. 3. Jacobsys

```
thetaguess = x(2);
tauguess = x(1);
tauguess2 = (x(1))**2;

N = size(coord,1);

rsurg = 0;
sincsur4 = 0;
sin2sur4 = 0;
unsurg2 = 0;
rsincsur3 = 0;
rsin2sur3 = 0;

rsurgtau = 0;
rsurgthe = 0;
unsurg2tau = 0;
unsurg2the = 0;
sincsur4tau = 0;
sincsur4the = 0;
rsincsur3tau = 0;
rsincsur3the = 0;
sin2sur4tau = 0;
sin2sur4the = 0;
rsin2sur3tau = 0;
rsin2sur3the = 0;

for i = 0:N-1
    thetai = i*2*pi/N;
    Ri = sqrt((coord(i+1,1))**2+(coord(i+1,2))**2);
    gi = sqrt((cos(thetai - thetaguess))**2 + (sin(thetai - thetaguess))**2 * tauguess2);

    rsurg = rsurg + Ri/gi;
    rsurgtau = rsurgtau - Ri * (sin(thetai - thetaguess))**2 * tauguess / (gi)**3;
    rsurgthe = rsurgthe - Ri * (sin(2*(thetai - thetaguess)) * (1 - tauguess2)) / (2*(gi)**3);

    sincsur4 = sincsur4 + (sin(thetai - thetaguess))**2/(gi)**4;
    sincsur4tau = sincsur4tau - 4 * (sin(thetai - thetaguess))**4 * tauguess / (gi)**6;
    sincsur4the = sincsur4the - sin(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**4 - 2 * (sin(thetai -
thetai - thetaguess))**2 * sin(2*(thetai - thetaguess)) * (1 - tauguess2) / (gi)**6;

    sin2sur4 = sin2sur4 + sin(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**4;
    sin2sur4tau = sin2sur4tau - 4 * (sin(thetai - thetaguess))**2 * sin(2*(thetai - thetaguess)) *
tauguess / (gi)**6;
    sin2sur4the = sin2sur4the - 2 * cos(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**4 - 2 * (sin(2*(thetai -
thetai - thetaguess))**2 * (1 - tauguess2) / (gi)**6;
```

Chapitre III : Résultats et discussions

```
unsurg2 = unsurg2 + 1.0/(gi)**2;
unsurg2tau = unsurg2tau - 2 * (sin(thetai - thetaguess))**2 * tauguess / (gi)**4;
unsurg2the = unsurg2the - (sin(2*(thetai - thetaguess)) * (1 - tauguess2)) / (gi)**4;

rsincsur3 = rsincsur3 + Ri * (sin(thetai - thetaguess))**2/(gi)**3;
rsincsur3tau = rsincsur3tau - 3 * Ri * (sin(thetai - thetaguess))**4 * tauguess / (gi)**5;
rsincsur3the = rsincsur3the - Ri * sin(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**3 - 3 * Ri * (sin(thetai -
thetaguess))**2 * sin(2*(thetai - thetaguess)) * (1 - tauguess2) / (2*(gi)**5);

rsin2sur3 = rsin2sur3 + Ri * sin(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**3;
rsin2sur3tau = rsin2sur3tau - 3 * Ri * sin(2*(thetai - thetaguess)) * (sin(thetai - thetaguess))**2
* tauguess / (gi)**5;
rsin2sur3the = rsin2sur3the - 2 * Ri * cos(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**3 - 3 * Ri *
(sin(2*(thetai - thetaguess)))**2 * (1 - tauguess2) / (2*(gi)**5);

endfor
A = zeros (2,2);

A(1,1) = rsurgtau * sincsur4 - unsurg2tau * rsincsur3 + rsurg * sincsur4tau - unsurg2 *
rsincsur3tau;

A(1,2) = rsurgthe * sincsur4 - unsurg2the * rsincsur3 + rsurg * sincsur4the - unsurg2 *
rsincsur3the;

A(2,1) = rsurgtau * sin2sur4 - unsurg2tau * rsin2sur3 + rsurg * sin2sur4tau - unsurg2 *
rsin2sur3tau;

A(2,2) = rsurgthe * sin2sur4 - unsurg2the * rsin2sur3 + rsurg * sin2sur4the - unsurg2 *
rsin2sur3the;

End function
```

III.3.1. 4. Solve_by_newton

Chapitre III : Résultats et discussions

```
solvebynewton.m
2 A = zeros (2,2);
3 N = size(coord,1);
4
5 x = x0;
6 iter = 0;
7 fx = syseval (x,coord)
8
9 while ( norm(fx) > toler && iter < maxiter)
10
11 rsurg = 0;
12 unsurg2 = 0;
13
14 thetares = x(2);
15 taures = x(1);
16 taures2 = taures**2;
17
18 for i = 0:N-1
19   thetai = i*2*pi/N;
20   Ri = sqrt((coord(i+1,1))**2+(coord(i+1,2))**2);
21   gi = sqrt((cos(thetai - thetares))**2 + (sin(thetai - thetares))**2 * taures2);
22
23   rsurg = rsurg + Ri/gi;
24   unsurg2 = unsurg2 + 1.0/(gi)**2;
25 endfor
26 ares = rsurg / unsurg2;
27 bres = ares / taures;
28
29 dist = evaldistance(x,ares,coord)
30 if(iter == 0)
31   distanc = dist +1;
32 endif
33
34 A = jacobsys(x,coord);
35 b = -fx;
36 dx = A\b;
37 x=x+dx;
38 if(x(1) < 0)
39   x(1) = x(1) - dx(1);
40 endif
41 if(x(1) > 20 && dist > distanc)
42   x(1) = 1.0;
43 endif
44 fx = syseval(x,coord)
45 iter = iter+1;
46 distanc =dist;
47 endwhile
48
49 rsurg = 0;
50 unsurg2 = 0;
51
52 thetares = mod(x(2),2*pi);
53 taures = x(1);
54 taures2 = taures**2;
55
56 for i = 0:N-1
57   thetai = i*2*pi/N;
58   Ri = sqrt((coord(i+1,1))**2+(coord(i+1,2))**2);
59   gi = sqrt((cos(thetai - thetares))**2 + (sin(thetai - thetares))**2 * taures2);
60
61   rsurg = rsurg + Ri/gi;
62   unsurg2 = unsurg2 + 1.0/(gi)**2;
63 endfor
64 ares = rsurg / unsurg2;
65 bres = ares / taures;
66
67 dist = evaldistance(x,ares,coord)
68
69 endfunction
```

III.3.1. 5. Syseval

Chapitre III : Résultats et discussions

```
syseval.m
1 function z = syseval (x,coord)
2
3     z = [0 ; 0];
4
5     thetaguess = x(2)
6     tauguess2 = (x(1))**2
7
8     N = size(coord,1);
9     rsurg = 0;
10    sincsurg4 = 0;
11    sin2surg4 = 0;
12    unsurg2 = 0;
13    rsincsurg3 = 0;
14    rsin2surg3 = 0;
15
16    for i = 0:N-1
17        thetai = i*2*pi/N;
18        Ri = sqrt((coord(i+1,1))**2+(coord(i+1,2))**2);
19        gi = sqrt((cos(thetai - thetaguess))**2 + (sin(thetai - thetaguess))**2 * tauguess2);
20
21        rsurg = rsurg + Ri/gi;
22        sincsurg4 = sincsurg4 + (sin(thetai - thetaguess))**2/(gi)**4;
23        sin2surg4 = sin2surg4 + sin(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**4;
24        unsurg2 = unsurg2 + 1.0/(gi)**2;
25        rsincsurg3 = rsincsurg3 + Ri*(sin(thetai - thetaguess))**2/(gi)**3;
26        rsin2surg3 = rsin2surg3 + Ri*sin(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**3;
27    endfor
28
29
30    z(1) = rsurg * sincsurg4 - unsurg2 * rsincsurg3;
31    z(2) = rsurg * sin2surg4 - unsurg2 * rsin2surg3;
32 endfunction
33
```

III.3.1. 6. Trouve-ellipse

```
trouveellipse (1).m
1 N=10;
2 coord = zeros(N,2);
3
4 #exemple: on se donne les points d'une ellipse de grand axe a et petit axe b, pivotée d'un angle de rotation 0.356 radians
5 #et on ajoute une perturbation aléatoire de 5%
6 a = 1.55;
7 b=1.5;
8 tau = a/b;
9 tau2=tau**2;
10 ht = 0.356;
11
12 Pert = rand (N,1);
13
14
15 for i = 0:(N-1)
16     thetai = i*2*pi/N;
17     Ri = a/sqrt((cos(thetai - ht))**2 + (sin(thetai - ht))**2 * tau2) * (1.0 + 0.05*Pert(i+1,1));
18     coord(i+1,1) = Ri * cos(thetai);
19     coord(i+1,2) = Ri * sin(thetai);
20 endfor
21
22 #debut du programme; on doit fournir le tableau coord à N points (N=10 ci-dessus) et deux coordonnées;
23 #par convention le premier point est celui d'angle 0, le second d'angle 2pi/N, comme dans l'exemple ci-dessus
24
25
26 #il faut un itéré initial pour la méthode de Newton
27 [x0 , aguess] = initialguess(coord)
28
29 #avec cet itéré initial, la somme des carrés des distances vaut
30 dinit = evaldistance(x0,aguess,coord)
31
32 #On résout par Newton
33 toler = 1.e-12;
34 maxiter = 20;
35 [ares , bres , thetares] = solvebynewton(x0,toler,maxiter,coord)
36
37 #Résultat et somme des carrés des distances
38 xres = [ares/bres ; thetares];
39 dfinal = evaldistance(xres,ares,coord)
40
41 if(dfinal > dinit)
42     # Au cas où le processus ne fonctionne pas (parfois Newton ne converge pas)
43     printf("le processus n'a pas convergé\n")
44 endif
```


Chapitre III : Résultats et discussions

III .4 . Résultats des calculs :

Les résultats concernant l'écart par rapport au calcul de la cylindricité sont essentiels pour évaluer la précision dimensionnelle des pièces imprimées en 3D. La modélisation des pièces réelles sous forme d'ellipses et le calcul des axes majeur et mineur permettent de quantifier les variations géométriques et d'identifier les éventuelles erreurs d'impression.

En analysant ces écarts, nous pouvons déterminer si la machine utilisée est répétitive et si les paramètres de traitement appliqués sont adéquats. Une faible variance dans les mesures indique une meilleure stabilité de l'imprimante, ce qui est essentiel pour garantir une production fiable et reproductible.

Ces résultats offrent des informations précieuses pour la mise en place de processus de correction et d'optimisation des paramètres d'impression. En identifiant les sources d'imprécision, il devient possible de prendre des mesures correctives spécifiques pour améliorer la qualité des pièces produites.

Tableau.16 : Les résultats de l'écart par rapport au calcul de la cylindricité

	r=5mm	r=10mm	r=15mm	r=5mm	r=10mm	r=15m m	r=5mm	r=10mm	r=15 mm
	Triangulaire			Rectangulaire			Hexagonal		
Nylon	0.1075m m	0.1184m m	0.0949m m	0.1014m m	0.0946m m	0.0998 mm	0.1mm	0.1032m m	0.096 mm
Nylon+ Glass Fiber	0.0961m m	0.1041m m	0.1067m m	0.0981m m	0.1159m m	0.0893 mm	0.0935m m	0.1049m m	0.103 5mm
Nylon+ Carbon fiber	0.1097m m	0.1137m m	0.1016m m	0.1112m m	0.1086m m	0.1301 mm	0.1045m m	0.1068m m	0.115 3mm

Conclusion générale

Cette étude évalue et analyse l'effet des paramètres de traitement, y compris la taille du rayon, le type de matériau et le motif de remplissage sur la précision dimensionnelle de la phase de conception à la phase de validation des composants fabriqués par le procédé FFF.

Les résultats montrent que :

- le type de motif de remplissage n'a pas d'importance significative sur la précision pour ce cas d'étude. Le type de matériau affecte le plus la précision dimensionnelle.
- ♣ Le rayon de 15 mm présentait la plus grande imprécision par rapport aux tailles de 5 mm et 10 mm, ce qui signifie que plus la pièce est grande, plus la précision dimensionnelle est faible.
- ♣ Le nylon renforcé de fibre de verre est classé comme le meilleur type de matériau avec une inexactitude dimensionnelle inférieure à celle de la fibre de carbone renforcée de nylon et du nylon.

La modélisation des pièces imprimées réelles permet de caractériser chaque section (couche) comme une ellipse ; l'algorithme permet de calculer la valeur du grand axe et du petit axe dont on déduit l'écart de cylindricité.

La faible variance indique que la machine est répétitive et, par conséquent, il est judicieux d'essayer de corriger les erreurs d'impression.

Le travail d'identification de l'influence des facteurs permettra dans le futur un travail d'analyse de se focaliser sur les plus influents. Pour une meilleure précision en impression 3D, la méthode simplifiée de correction des paramètres d'entrée sera encore plus pertinente. Une fois ce processus de correction mis en place pour une imprimante donnée, la répétition d'expériences pour les mêmes ensembles de pièces sera nécessaire afin d'évaluer les plages de tolérance associées.

En conclusion, cette étude a permis de mieux comprendre les facteurs qui influencent la précision dimensionnelle en impression 3D et a jeté les bases pour des améliorations futures dans le domaine. L'optimisation des paramètres de traitement et la prise en compte judicieuse des matériaux permettront d'atteindre des niveaux de précision plus élevés,

Chapitre III : Résultats et discussions

renforçant ainsi la fiabilité et l'applicabilité de la fabrication additive dans diverses industries et applications.

References

- [1] Bourell D, Leu M and Rosen D 2009 Roadmap for additive manufacturing—identifying the future of freeform processing (The University of Texas at Austin Laboratory for Freeform Fabrication Advanced Manufacturing Center).
- [2] Levy G, Schindel R and Kruth J-P 2003 Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives CIRP Ann. 52 589–609.
- [3] Gibson, I., Rosen, D. W., and Stucker, B., 2010, Additive manufacturing technologies, Springer.
- [4] Sood A, Ohdar R and Mahapatra S 2009 Improving dimensional accuracy of fused deposition modeling processed part using grey taguchi method Mater. Des. 30 4243–52.
- [5] Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., and Donmez, A., 2015, "Additive Manufacturing: Current state, future potential, gaps and needs, and recommendations," Transactions of the ASME, Journal of Manufacturing Science and Engineering, 137(1), p. 014001. Doi :10.1115/1.4028725.
- [6] Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., and Donmez, A., 2015, "Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations," ASME J. Manuf. Sci. Eng., 137(1), p. 014001.
- [7] Sushmit Chowdhury, Kunal Mhapsekar. PART BUILD ORIENTATION OPTIMIZATION AND NEURAL NETWORK BASED GEOMETRY COMPENSATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS. Journal of Manufacturing Science and Engineering, Copyright (c) 2017 by ASME.
- [8] Amir M. Aboutaleb, Mark A. Tschopp, Multi-Objective Accelerated Process Optimization of Part Geometric Accuracy in Additive Manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering OCTOBER 2017, Vol. 139 / 101001-1 Copyright VC 2017 by ASME.
- [9] Kruth J 1991 Material in-process manufacturing by rapid proto-typing techniques CIRP Ann. 40 603–14.
- [10] D. Bourell, J. Beaman, M. C. Leu, and D. Rosen, "A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead," Proceedings of RapidTech, pp. 24–25, 2009.
- [11] M. Salmi, K.-S. Paloheimo, J. Tuomi, J. Wolff, and A. Mäkitie, "Accuracy of medical models made by additive manufacturing (rapid manufacturing)," Journal of Cranio-Maxillofacial Surgery, vol. 41, no. 7, pp. 603–609, 2013.
- [12] C. Beyer, "Strategic implications of current trends in additive manufacturing," Journal of Manufacturing Science and Engineering, vol. 136, no. 6, p. 064701, 2014.

- [13] B. N. Turner and S. A. Gold, "A review of melt extrusion additive manufacturing processes: III. materials, dimensional accuracy, and surface roughness," *Rapid Prototyping Journal*, vol. 21, no. 3, pp. 250–261, 2015.
- [14] Huang, Y., Leu, M. C., Mazumder, J., and Donmez, A., 2015, "Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations," *ASME J. Manuf. Sci. Eng.*, 137(1), p. 014001.
- [15] Sushmit Chowdhury, Kunal Mhapsekar PART BUILD ORIENTATION OPTIMIZATION AND NEURAL NETWORK BASED GEOMETRY COMPENSATION FOR ADDITIVE MANUFACTURING PROCESS. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Copyright (c) 2017 by ASME.
- [16] Amir M. Aboutaleb, Mark A. Tschopp, Multi-Objective Accelerated Process Optimization of Part Geometric Accuracy in Additive Manufacturing, *Journal of Manufacturing Science and Engineering* OCTOBER 2017, Vol. 139 / 101001-1 Copyright VC 2017 by ASME.
- [17] Mojtaba Khanzadeh, Prahalada Rao, Quantifying Geometric Accuracy with Unsupervised Machine Learning : Using Self-Organizing Map on Fused Filament Fabrication Additive Manufacturing Parts, *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. Vol. 140 / 031011-1 Copyright VC 2018 by ASME.
- [18] Sood A, Ohdar R and Mahapatra S 2009 Improving dimensional accuracy of fused deposition modeling processed part using grey taguchi method *Mater. Des.* 30 4243–52.
- [19] B. Esmailian, S. Behdad, B. Wang, The evolution and future of manufacturing: A review, *J. Manuf. Syst.* 39 (2016) 79–100, <https://doi.org/10.1016/j.jmsy.2016.03.001>.
- [20] Huang Y, Leu MC, Mazumder J, Donmez A (2015) Additive Manufacturing: Current State, Future Potential, Gaps and Needs, and Recommendations. *ASME J Manuf Sci Eng* 137(1), 014001. Doi :10.1115/1.4028725.
- [22] Kruth JP, Leu MC, Nakagawa T (1998) Progress in Additive Manufacturing and Rapid Prototyping, *CIRP Ann Manuf Technol* 47(2), 525–540. Doi :10.1016/s0007-8506(07)63240-5.
- [23] Levy GN, Schindel R, Kruth JP (2003) Rapid manufacturing and rapid tooling with layer manufacturing (LM) technologies, state of the art and future perspectives 2003, *CIRP Ann Manuf Technol* 52(2), 589–609. Doi :10.1016/s0007-8506(07)60206-6.
- [24] Chua CK, Leong KF, 2015 3D printing and additive manufacturing: principles and applications, fourth edition of rapid prototyping, ISBN: 978-981-4571-40-1, Doi:10.1142/9008.
- [25] Adanur S, Jayswal A (2021), Additive manufacturing of interlaced fibrous structures. *J Rapid Prototyp* Vol. 27 No. 4, pp. 671-681. <https://doi.org/10.1108/rpj-05-2020-0095>.
- [26] Melnikova R, Ehrmann A, Finsterbusch K (2014) 3D printing of textile-based structures by Fused Deposition Modelling (FDM) with different polymer materials. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering* 62(), 012018. Doi :10.1088/1757-899x/62/1/012018.

- [27] Quan Z, Wu A, Keefe M, Qin X, Yu J, Suhr J, B, JH, Kim BS, Chou TW (2015). Additive manufacturing of multi-directional preforms for composites : opportunities and challenges. *Mater.Today* Vol. 18 No. 9, pp. 503-512. Doi: 10.1016/j.mattod.2015.05.001 .
- [28] Wohlers Associates, (2013) Additive Manufacturing and 3D Printing State of the Industry. Wohlers Associates, Fort Collins, CO, Wohlers Report.
- [29] Niteen P Brahmabhatt, Vikram V Patel, Mittal P Brahmabhatt. IJSRD - Optimization of Process Parameters of ABS Material Made by Fused Deposition Modeling - A Review. *International Journal for Scientific Research & Development* | Vol. 3, Issue 01, 2015 | ISSN (online): 2321-0613.
- [30] Filip Górski, Wiesław Kuczko, Radosław Wichniarek. INFLUENCE OF PROCESS PARAMETERS ON DIMENSIONAL ACCURACY OF PARTS MANUFACTURED USING FUSED DEPOSITION MODELLING TECHNOLOGY. Volume 7, No. 19, Sept. 2013, pp. 27–35 DOI : 10.5604/20804075.1062340.
- [31] Bochmann, L., Bayley, C., Helu, M., Transchel, R., Wegener, K., & Dornfeld, D. (2015). Understanding error generation in fused deposition modeling. *Surface Topography: Metrology and Properties*, 3(1), 014002. Doi :10.1088/2051-672x/3/1/014002.
- [32] Rao, P. K., Kong, Z., Duty, C. E., Smith, R. J., Kunc, V., & Love, L. J. (2015). Assessment of Dimensional Integrity and Spatial Defect Localization in Additive Manufacturing Using Spectral Graph Theory. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 138(5), 051007. Doi :10.1115/1.4031574.
- [33] Sun, Q., Rizvi, G. M., Bellehumeur, C. T., & Gu, P. (2008). Effect of processing conditions on the bonding quality of FDM polymer filaments. *Rapid Prototyping Journal*, 14(2), 72–80. Doi :10.1108/13552540810862028.
- [34] Hyndhavi, D., Babu, G. R., & Murthy, S. B. (2018). Investigation of Dimensional Accuracy and Material Performance in Fused Deposition Modeling. *Materials Today: Proceedings*, 5(11), 23508–23517. Doi: 10.1016/j.matpr.2018.10.138.
- [35] Lee, B. H., Abdullah, J., & Khan, Z. A. (2005). Optimization of rapid prototyping parameters for production of flexible ABS object. *Journal of Materials Processing Technology*, 169(1), 54–61. Doi: 10.1016/j.jmatprotec.2005.02.259 .
- [36] Chang, D.-Y., & Huang, B.-H. (2010). Studies on profile error and extruding aperture for the RP parts using the fused deposition modeling process. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 53(9-12), 1027–1037. Doi :10.1007/s00170-010-2882-1.
- [37] Mohammad S. Alsoufi*, Abdulrhman E. Elsayed. Surface Roughness Quality and Dimensional Accuracy—A Comprehensive Analysis of 100% Infill Printed Parts Fabricated by a Personal/Desktop Cost-Effective FDM 3D Printer. DOI : 10.4236/msa.2018.91002 Jan. 5, 2018 11 *Materials Sciences and Applications*.

- [38] Weheba G, Sanchez-Marsa, A, (2006) Using Response Surface Methodology to Optimize the Stereolithography Process. *Rapid Prototyp. J.* Vol.12(2), pp. 72–77. <https://doi.org/10.1108/1355254061065240>.
- [39] R.Anitha, S. Arunachalam, P. Radhakrishnan. Critical parameters influencing the quality of prototypes in fused deposition modeling. [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00980-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00980-3).
- [40] Alafaghani, A., & Qattawi, A. (2018). Investigating the effect of fused deposition modeling processing parameters using Taguchi design of experiment method. *Journal of Manufacturing Processes*, 36, 164–174. Doi: 10.1016/j.jmapro.2018.09.025.
- [41] Chung Wang, C., Lin, T., & Hu, S. (2007). Optimizing the rapid prototyping process by integrating the Taguchi method with the Gray relational analysis. *Rapid Prototyping Journal*, 13(5), 304–315. Doi :10.1108/13552540710824814.
- [42] T. Nancharaiah. Optimization of Process Parameters in FDM Process Using Design of Experiments, *International Journal on Emerging Technologies* 2(1): 100-102 (2011).
- [43] M. Hanon, László Zsidai and Q. Ma, Accuracy investigation of 3D printed PLA with various process parameters and different colors, *Materials Today: Proceedings*, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.12.1246>.
- [44] Yasa, E., & Ersoy, K. (2019). Dimensional Accuracy and Mechanical Properties of Chopped Carbon Reinforced Polymers Produced by Material Extrusion Additive Manufacturing. *Materials*, 12(23), 3885. Doi :10.3390/ma12233885.
- [45] Zhang, Z., Li, P., Chu, F., & Shen, G. (2019). Influence of the three-dimensional printing technique and printing layer thickness on model accuracy. *Journal of Orofacial Orthopedics / Fortschritte Der Kieferorthopädie*, 80(4), 194.
- [46] Chohan, J. S., & Singh, R. (2016). Enhancing dimensional accuracy of FDM based biomedical implant replicas by statistically controlled vapor smoothing process. *Progress in Additive Manufacturing*, 1(1-2), 105–113. Doi :10.1007/s40964-016-0009-4
- [47] Tootooni, M. S., Dsouza, A., Donovan, R., Rao, P. K., Kong, Z. (James), & Borgesen, P. (2017). Assessing the Geometric Integrity of Additive Manufactured Parts From Point Cloud Data Using Spectral Graph Theoretic Sparse Representation-Based Classification. Volume 2 : *Additive Manufacturing; Materials*. Doi :10.1115/msec2017-2794
- [48] Huang, Qiang ; Nouri, Hadis; Xu, Kai; Chen, Yong; Sosina, Sobambo; Dasgupta, Tirthankar (2014). [IEEE 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) - Taipei (2014.8.18-2014.8.22)] 2014 IEEE International Conference on Automation Science and Engineering (CASE) - Predictive modeling of geometric deviations of 3D printed products - A unified modeling approach for cylindrical and polygon shapes.
- [49] Ling Li, Ryan McGuan, Robert Isaac, Pirouz Kavehpour, Robert Candler. Improving precision of material extrusion 3D printing by in-situ monitoring & predicting 3D geometric deviation using conditional adversarial network. <https://doi.org/10.1016/j.addma.2020.101695>
- [50] Peng, A., Xiao, X., & Yue, R. (2014). Process parameter optimization for fused deposition modeling using response surface methodology combined with fuzzy inference system. *The*

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 73(1-4), 87–100. Doi :10.1007/s00170-014-5796-5

[51] W. Rattanawong, S. H. Masood, P. Iovenitti. A volumetric approach to part-build orientations in rapid prototyping. December 2001 Journal of Materials Processing Technology 119(1-3) s:348-353

[52] Sushmit Chowdhury, Kunal Mhapsekar and Sam Anand. Part build orientation optimization and neural network based geometry compensation for additive manufacturing process. Journal of Manufacturing Science and Engineering.

[53] Long Jiang, Hang Ye, Chi Zhou, Shikui Chen, Wenyao Xu. Parametric topology optimization toward rational design & efficient prefabrication for additive manufacturing. MSEC2017-2954

[54] Anoop Kumar Sood, R.K. Ohdar, S.S. Mahapatra. Improving dimensional accuracy of Fused Deposition Modelling processed part using grey Taguchi method. Materials and Design 30 (2009) 4243–4252.

[55] Rajit Ranjan, Rutuja Samant, Sam Anand, Integration of Design for Manufacturing Methods With Topology Optimization in Additive Manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering JUNE 2017, Vol. 139 / 061007-1.

[56] Saigopal Nelaturi, Walter Kim, Tolga Kurtoglu. manufacturability feedback and model correction for additive manufacturing. Journal of Manufacturing Science and Engineering APRIL 2015, Vol 137 / 021015-1.

[57] Afrose MF, Masood SH, Iovenitti P, Nikzad M, Sbarski I (2016) Effects of part build orientations on fatigue behaviour of FDM-processed PLA material. Prog Addit Manuf 1 :21–28. Doi :10.1007/s40964-015-0002-3.

[58] Yao SS, Jin FL, Rhee KY, Hui D, Park SJ (2017) Recent advances in carbon fiber reinforced thermoplastic composites : a review, Composites : Part B 142 (2018) 241–250. Doi: 10.1016/j.compositesb.2017.12.007.

[59] Sobha AP, Sreekala PS, Narayanankutty SK (2017) Electrical, thermal, mechanical and electromagnetic interference shielding properties of PANI/FMWCNT/TPU composites. Prog. Org. Coat. vol. 113, 168–174. Doi : 10.1016/j.porgcoat.2017.09.001.

[60] Melenka GW, Cheung BKO, Schofield JS, Dawson MR, Carey JP, (2016) Evaluation and prediction of the tensile properties of continuous fiber-reinforced 3D printed structures, Compos. Struct 153 (2016) 866–875. Doi: 10.1016/j.compstruct.2016.07.018.

[61] Dickson AN, Barry JN, mcdonnell KA, Dowling DP (2017) Fabrication of continuous carbon, glass and kevlar fibre reinforced polymer composites using additive manufacturing. Addit Manuf. 16 146–152. doi: 10.1016/j.addma.2017.06.004.

[62] Justo J, Tavara K, Garcia-Guzman L, Paris F (2017) Characterization of 3D printed long fibre reinforced composites, Compos. Struct. 185 (2018) 537–548. Doi: 10.1016/j.compstruct.2017.11.052.

[63] Van der Klift F, Koga Y, Todoroki A, Ueda M, Hirano Y, Matsuzaki R (2016) 3D printing of continuous carbon fibre reinforced thermo-plastic CFRTP tensile test specimens. *Open J. Compos. Mater.* 6 (2016) 18–27.

[64] Dong G, Tang Y, Li D, Zhao YF (2018) Mechanical properties of continuous Kevlar fiber reinforced composites fabricated by fused deposition modeling process, *Procedia Manuf.* 26 (2018) 774–781. doi: 10.1016/j.promfg.2018.07.090.

[65] Al Abadi H, Thai HT, Paton-Cole V, Patel VI (2018) Elastic properties of 3D printed fibre-reinforced structures. *Compos. Struct.* 193 (2018) 8–18. Doi: 10.1016/j.compstruct.2018.03.051.

[66] Chacón JM, Caminero MA, Núñez PJ, Caminero MA, Chacón JM, García-Plaza E, García-Moreno I, Reverte JM (2019) Additive manufacturing of continuous fiber reinforced thermoplastic composites using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties, *Compos Sci Technol* 181 (2019) 107688. doi: 10.1016/j.compscitech.2019.107688.

[67] Jayswal A, Adanur S (2021) Characterization of polylactic acid/thermoplastic polyurethane composite filaments manufactured for additive manufacturing with fused deposition modelling, *J. Thermoplast. Compos. Mater.*, pp. 1-22. <https://doi.org/10.1177/089270572111062561>.



Asma BOUMEDINE

**Intégration des contraintes
liées aux matériaux
composites dans la conception
et la fabrication du produits
industrielle**

**HESAM
UNIVERSITÉ**

Résumé : Les dépôts fusionnés (FDM) représentent une technologie prometteuse qui a de nombreux avantages ; leur modélisation s'est développée dans le domaine industriel au cours de ces dernières années. Aujourd'hui la FDM est largement développée en petite série, car cette technologie optimise alors les chaînes d'approvisionnement par réduction des délais et coûts de production : ces paramètres sont essentiels dans tous les secteurs industriels. Ses points faibles ont ralenti leur adoption en tant que technologie de production dominante.

Parmi les faiblesses du procédé on notera l'effet d'escalier, la porosité et les micro-cavités internes, la finition de surface ainsi que la précision dimensionnelle. Le travail s'intéresse tout particulièrement à l'influence des paramètres de processus sur la précision géométrique et dimensionnelle des pièces imprimées par le procédé FDM.

Ce travail présente un plan factoriel complet basé sur les expériences réalisées. Les paramètres d'entrée étudiés du processus sont : les dimensions associées à une géométrie constante, le type de matériaux et le type de modèle de remplissage (le maillage).

Une méthode de caractérisation des défauts associée à un modèle mathématique paramétrique a découlé du plan d'expérience. Sur la base de la mesure d'erreur par rapport au modèle théorique imprimé en 3D, la méthode permet à partir d'un nuage de points de caractériser la géométrie prévisionnelle associée aux paramètres d'entrée.

Mots clés : Fabrication additive (AM), Fabrication de filaments fusionnés (FFF), Plan d'expérience (DOE), conception Factorielle complète, Précision dimensionnelle, Composites, Modélisation mathématique, Caractérisation géométrique.

Abstract : Fused Deposition Molding (FDM) is a promising technology with many advantages; its modeling has developed in the industrial field over the last few years. Today, FDM is largely developed in small series, as this technology optimizes supply chains by reducing production times and costs: these parameters are essential in all industrial sectors. Its weaknesses have slowed its adoption as a dominant production technology.

Weaknesses of the process include the staircase effect, internal porosity and micro-cavities, surface finish and dimensional accuracy. This work focuses on the influence of process parameters on the geometric and dimensional accuracy of parts printed by the FDM process.

This work presents a comprehensive factorial plan based on experiments. The studied input parameters of the process are: the dimensions associated with a constant geometry, the type of materials and the type of filling model (the mesh).

A defect characterization method associated with a parametric mathematical model resulted from the experimental design. Based on the measurement of error in relation to the theoretical model printed in 3D, the method allows from a cloud of points to characterize the predictive geometry associated with the input parameters.

Keywords : Additive manufacturing (AM), Fused Filament Fabrication (FFF), Design of experiment (DOE), Full factorial design, Dimensional accuracy, Composites, Mathematical modelling, Geometrical characterization.