



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

Asma Boumedine

► To cite this version:

Asma Boumedine. Intégration des contraintes liées aux matériaux composites dans la conception et la fabrication de produits industriels. Génie des procédés. HESAM Université; Université M'hamed Bougara de Boumerdès (Algérie), 2023. Français. <NNT : 2023HESAE048>. <tel-04464984>

HAL Id: tel-04464984

<https://pastel.hal.science/tel-04464984v1>

Submitted on 19 Feb 2024

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

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



HAL Authorization

ECOLE DOCTORALE SCIENCES ET METIERS DE L'INGENIEUR

LCPI - Laboratoire Conception de Produits et Innovation

THESE

Présentée par : Asma BOUMEDINE

Soutenue le : 10/07/2023

pour obtenir le grade de : Docteur d'HESAM Université

préparée à : École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers

Spécialité : Fabrication additive

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

THESE dirigée par : BENFRIHA Khaled

et co-encadrée par : LECHEB Samir

Jury

M. Hamid AKNOUCHE	Professeur, UMBB, Algérie	Président
M. Samir LECHEB	Professeur, UMBB, Algérie	Co-Directeur
M. Khaled BENFRIHA	Maître de conférence, ENSAM, France	Directeur
Mme. Kahina CHAHOUR	HDR, UMMTO, Algérie	Rapporteure
M. Wajdi ZOUARI	Professeur, IUT, France	Rapporteur
M. Fodil MERAGHNI	Professeur, ENSAM, France	Examineur
M. Hocine KEBIR	Professeur, UTC, France	Examineur
M. Brahim SAFI	Professeur, UMBB, Algérie	Invité

**T
H
È
S
E**

Remerciement

Après avoir rendu grâce à Dieu le Tout Puissant et le 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 Pr. Lecheb Samir et 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 desquelles j'ai trouvé l'accueil chaleureux, l'aide et l'assistance dont j'ai besoin.

De plus, je voudrais remercier fortement 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 et son sens d'écoute et d'échange.

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

Sommaire

Introduction générale	1
1. Problématique de recherche.....	3
2.Objectifs de recherche.....	5
3.Méthodologie de Recherche.....	7
4.Originalité de la recherche.....	8
Chapitre I. Recherche bibliographique	
I.1. Les travaux de littérature sur la précision dimensionnelle des pièces fabriqués en mode additifs.....	9
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.....	30
Chapitre II. Process et matériaux	
II.1. Fabrication additive.....	36
II.2. Comment fonctionne la fabrication additive ?.....	36
II.3. Types des méthodes de fabrication additive.....	36
II.3. 1. Jet de liant.....	36
II.3. 1. 1. Les étapes de fonctionnement du processus de projection de liant	37
II.3. 1. 2. Paramètres d'impression.....	38
II.3.1.3. Matériaux.....	38
II.3. 1. 4. Avantages.....	38
II.3. 1. 5. Désavantages.....	39
II.3. 1. .6. La précision du jet de liant.....	40
II.3.2. Le dépôt d'énergie dirigée (DED).....	41
II.3.2. 1. Fonctionnement de dépôt d'énergie dirigée.....	41
II.3.2. 2. Matériaux.....	42
II.3.2. 3. Les avantages du DED	42
II.3.2. 4. Inconvénients du DED.....	42

II.3.2. 5. Applications du DED.....	42
II.3.2. 6. Les catégories de DED.....	43
II.3.2. 6. 1. Pièces de forme quasi nette.....	43
II.3.2. 6. 2 Ajout de fonctionnalités.....	43
II.3.3. L'extrusion de matériaux.....	43
II.3.3. .1. Avantages.....	45
II.3.3. 2. Désavantages.....	44
II.3.3. 3. Applications.....	44
II.3.3. 4. Exemples des exemples de technologie d'extrusion de matériaux.....	45
II.3.3. 5. A quoi sert l'extrusion de matière ?.....	45
II.3.3. 6. Les matériaux utilisés dans l'extrusion de matériaux.....	45
II.3.4. Fusion sur lit de poudre (PBF).....	46
II.3.4. 1. Les différents types de fusion sur lit de poudre.....	47
II.3.4. 1. 1. Frittage Laser Sélectif (SLS).....	47
II.3.4. 1. 2. Fusion laser sélective (SLM)	47
II.3.4. 1. 3. Frittage laser direct de métal (DMLS)	47
II.3.4. 1. 4. Fusion par faisceau d'électrons (EBM)	47
II.3.4. 2.Post-traitement.....	48
II.3.4. 3.Les avantages de la fusion sur lit de poudre.....	48
II.3.5. Stratification de feuille.....	48
II.3.6. Polymérisation en cuve.....	49
II.3.7. Wire Arc Additive Manufacturing (maintenant connu sous le nom de Directed Energy Deposition-Arc (DED-arc))	49
II.4. Technologies de fabrication additive.....	49
II.5. Les matériaux composites et la fabrication additive.....	49

II.5.1. Définition d'un matériau composite	51
II.5.2. Les différents types de composites renforcés de fibres	52
II.5.3. Matériaux composites renforcés de fibres longs.....	52
II.5.4. Les principales fibres utilisées comme renforts	52
II.5.5. Rôle des matrices dans les composites.....	53
II.5.6. Caractéristiques des matériaux composites.....	53
II.5.6. Inconvénients des composites.....	53
II.5.7. Catégories courantes de matériaux composites.....	54
II .5.7. Avantages des composites	55
II.5.10. Fibres Matériaux de renforcement.....	56
II.5.11. Rôle et sélection des fibres.....	57
II.5.12. Matériaux de matrice	57
II.5.13. Thermoplastiques et thermodurcissables.....	59
II.5.14. Exemples de matériaux composites	59

III. Partie expérimentale

III.1. Méthodologie.....	63
III.2. Matériaux et traitement.....	63
III.3. Plan Expérimental.....	64
III.4. Procédures expérimentales	68
III.5. Markforged système.....	68
III.5. 1.Caractéristiques techniques	68
III.5.2. Eiger.....	69
III.5. 3. Matériaux de base (la Matrice).....	69
III.5. 4.Types de fibres.....	70



III.5. 5.Motif de remplissage	70
III.5. 6. Densité de remplissage	71
III.5. 7. Type de remplissage de fibre	71
III.5. 7. 1. Remplissage concentrique.....	71
III.5. 7. 2. Remplissage isotrope.....	72
III.6. Solutionix D500.....	74
III.6. 1.Spécification du système.....	75
III.7. Géomagique ContrôleX.....	75

IV. Résultats et discussions

IV. Analyse des facteurs d'impact	77
IV.1. Analyse des facteurs d'entrée sur l'écart moyen.....	78
▪ IV.1.1. Analyse des effets normalisés.....	78
▪ IV.1.2. Principaux effets pour l'écart moyen	79
▪ IV.1.3. Interactions pour l'écart moyen (moyennes ajustées).....	80
▪ IV.1.4. Rapport ANOVA pour l'écart moyen.....	81
• IV.1.4. 1. Analyse de la variance.....	81
• IV.1.4. 2. Résumé du model.....	82
• IV.1.4. 3. Coefficients de variance.....	82
IV.2. Analyse des facteurs d'entrée sur la variance	84
▪ IV.2.1. Analyse des effets de variance normalisés.....	84
▪ IV.2.2. Principaux effets sur la variance.....	84
▪ IV.2.3. Interactions pour la variance.....	85
▪ IV.2.4. Rapport ANOVA pour la variance.....	86
• IV.2.4. 1.Analyse de variance pour variance.....	86
• IV.2.4. 2. Résumé du modèle.....	87
• IV.2.4. 3.Coefficients pour la variance.....	87
IV.3. Modélisation mathématique elliptique.....	89
IV.3.1. Composition de l'outil de calcul	92

▪ IV.3.1. 1. Evaldistance.....	92
▪ IV.3.1. 2. Initial guess.....	92
▪ IV.3.1. 3. Jacobsys.....	93
▪ IV.3.1. 4. Solve by newton	95
▪ IV.3.1. 5. Syseval.....	97
▪ IV.3.1. 6. Trouve-ellipse.....	98
Conclusion générale.....	101

Liste des figures

Figure. 1 : schéma de fabrication des filaments fondus.....	2
Figure. 2 : modèle CAO vs Le modèle imprimé en 3D.....	3
Figure. 3 : Juxtaposition de la force et de la précision des échantillons FDM (plus élevée = meilleure).....	8
Figure. 4 : représentation des trois pièces de l'étude #1, #2, #3.....	9
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°	10
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.....	11
Figure. 7 : Illustration des facteurs de contrôle expérimentaux.....	14
Figure. 8 : benchmark (Conception) du modèle de référence.....	15
Figure. 9 : Les formes des trois modèles de remplissage utilisés pour fabriquer les échantillons FDM.....	17
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.....	20
Figure. 11: (a): benchmark 1, (b): benchmark 2.....	21
Figure. 12 : Variation dimensionnelle de la surface réelle obtenue par FDM par rapport au modèle CAO.....	22
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.....	23
Figure. 14 : approche de construction de modèles conduit à une stratégie de compensation efficace pour les produits cylindriques.....	24
Figure. 15 : Illustration de l'écart géométrique 3D entre la conception CAO et la structure imprimée.....	25
Figure. 16 : Illustration de la cartographie entrée-sortie utilisée dans le modèle d'apprentissage machine CAN.....	26
Figure. 17 : comparaisons illustratives entre les valeurs réelles et les valeurs prédites par BP et RSM.....	27
Figure. 18 : Impact de l'orientation de construction.....	27
Figure. 19 : Piece 1, Piece 2.....	28
Figure. 20 : Variation des VE relatifs pour des formes primitive.....	29
Figure. 21 : Schéma d'entraînement du modèle de compensation géométrique basé sur l'ANN.....	30
Figure. 22: Schematic of compensated STL file generation using trained ANN model.....	31
Figure. 23 : une section d'un élément sphérique fabriqué par le procédé AM, la relation entre le rayon de la sphère et la cuspidé.....	34
Figure.24 types de renforts déferents.....	57
Figure.25 Classification des matériaux de matrice.....	59
Figure.26 Matrice thermoplastique.....	60
Figure.27 Matrice thermodurcissable.....	60
Figure .24 Paramètres de sélection des matériaux primaires pour une situation hypothétique pour les métaux, les céramiques et les composites métal-céramique.....	61
Figure. 25 : Flux général du processus d'impression 3D.....	63
Figure.26 : échantillon.....	63

Figure. 27 : (a) Composites renforcés de fibres continues (exp : fibre de carbone et fibre de verre) et (b) processus d'impression 3D Markforged®.....	64
Figure.28 : Organigramme de l'étude expérimentale.....	68
Figure.29 : Imprimante Markforged.....	69
Figure. 30 : Motif de remplissage : Hexagonale, Triangulaire, Rectangulaire.....	71
Figure. 31 : Remplissage concentrique ; Tous les murs, Coque extérieure uniquement, Trous intérieurs uniquement.....	71
Figure. 32 : Remplissage isotropique.....	72
Figure. 33 : Couche de mur.....	72
Figure. 34 : Couches de toit et de plancher.....	73
Figure. 35 : Le nombre de couches en fibre.....	73
Figure.36 : les anneaux de remplissage de fibres concentriques.....	74
Figure.37 : SolutionixD500.scanner.....	75
Figure.38 : Diagramme de Pareto des effets standardisés pour l'écart moyen.....	79
Figure. 39 : Graphique des effets principaux pour l'écart moyen.....	80
Figure. 40 : Interactions pour l'écart moyen.....	81
Figure. 41 : Diagramme de Pareto des effets normalisés pour la variance.....	84
Figure. 42 : Graphique des effets principaux pour la variance.....	85
Figure. 43 : Interactions pour la variance.....	46

Liste des tableaux

Tableau.1 : Paramètres FDM et leurs niveaux.....	13
Tableau.2 : liste des variables de processus et leurs niveaux.....	16
Tableau. 3 : Description des paramètres de contrôle expérimentaux.....	18
Tableau. 4 Les paramètres de traitement expérimental.....	19
Tableau.5 : les facteurs et leurs niveaux.....	32
Tableau.6 Certaines des différences significatives entre les thermodurcissables et les thermoplastiques.....	60
Tableau.7 Les différents types de résines thermodurcissables et thermoplastiques couramment.....	61
Tableau.8: la matrice de plan expérimental.....	66
Tableau.9 : la matrice de plan expérimental avec notation Taguchi.....	67
Tableau. 10 : Spécifications du scanner Solutionix.....	75
Tableau.11 : la matrice de plan expérimental avec résultats de la variance et l'écart moyen..	77
Tableau. 12 : Analyse de la variance.	81
Table. 13. Résumé du modèle de l'écart moyen.	82
Tableau.14: Coefficients de l'écart moyen.	82
Tableau. 15 : Analyse de la variance.....	86
Table. 16. Résumé du modèle de variance.....	87
Tableau.17 : Coefficients de variance.....	87
Tableau.18: Les résultats de l'écart par rapport au calcul de la cylindricité.....	100

Resumé

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.

ملخص

يمثل الترسيب المنصهر FDM تقنية واحدة لها العديد من المزايا؛ تم تطوير نماذجهم في المجال الصناعي في السنوات الأخيرة. اليوم تم تطوير FDM على نطاق واسع في سلاسل صغيرة، لأن هذه التكنولوجيا تعمل بعد ذلك على تحسين سلاسل التوريد عن طريق تقليل أوقات الإنتاج وتكاليفه: هذه العوامل ضرورية في جميع القطاعات الصناعية، أدت أوجه القصور فيها إلى إبطاء اعتمادها كتكنولوجيا سائدة في الإنتاج.

من بين نقاط الضعف في العملية: تأثير الدرج والمسامية والتجاويف الدقيقة الداخلية وتشطيب السطح بالإضافة إلى دقة الأبعاد. يهتم هذا العمل بشكل خاص بتأثير إعدادات العملية على الدقة الهندسية والأبعاد للأجزاء المطبوعة بواسطة عملية FDM.

يقدم خطة عاملة كاملة بناءً على التجارب التي تم إجراؤها؛ إعدادات الإدخال المدروسة للعملية هي: الأبعاد المرتبطة بهندسة ثابتة، نوع المواد ونوع نموذج التعبئة (الشبكة)

طريقة توصيف الخطأ المرتبطة بالنموذج الرياضي نتجت عن الخطة التجريبية. استنادًا إلى قياس الخطأ مقارنة بالنموذج النظري المطبوع ثلاثي الأبعاد، تسمح الطريقة من سحابة من النقاط بتوصيف الهندسة المتوقعة المرتبطة بمعلومات الإدخال الكلمات المفتاحية:

مضافات التصنيع؛ الترسيب المنصهر؛ تصميم المنصهر؛ تصميم عملي كامل؛ دقة الأبعاد؛ مركبات؛
النمذجة الرياضية؛ الوصف الهندسي

Introduction générale

Introduction générale

Une technique de fabrication révolutionnaire adoptée de nos jours appelée la fabrication additive. Ce procédé qui est en train de remettre totalement en cause nos méthodes de production est de plus en plus utilisée pour plusieurs raisons ; à la fois simple et novateur il peut améliorer la flexibilité et la commodité, réduire les coûts de fabrication et réduire le temps de fabrication [1, 2] et aussi la capacité de reproduction et de création quasi illimitées, éliminant l'outillage spécialisé et réduisant le gaspillage du 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 aux années 70 et avec le temps il s'est évolué, aujourd'hui on distingue plusieurs types de fabrication additive telle que : Modélisation par dépôt en fusion (Fused Deposition Modeling ; FDM), Modélisation d'objets stratifiés (Laminated Object Modelling ; LOM), Stéréolithographie (SLA), Frittage laser sélectif (Sélective Laser Sintering ; SLS), Fusion sur lit de poudre (Powder Bed Fusion), Dépôt énergétique dirigé (Direct Energy Deposition).

Malgré tout le potentiel auquel peut prétendre cette technique comparant aux procédés de fabrication soustractifs et formatifs traditionnels. Ce procédé souffre de nombreux problèmes qui sont cruciaux pour étendre son adoption. Sur l'échelle mécanique ; la 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 de la pièce imprimée en 3D est une préoccupation majeure qui empêche l'adoption plus large des processus [5] et limite leur utilisation dans des composants critiques dans les applications aérospatiales et de défense [6] [7] [8]. Par conséquent empêchant 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 de haute précision sont en demande [10,11]. Cependant, l'optimisation et le contrôle de poste -traitement est nécessaire pour répondre aux spécifications de conception et à la fois ce contrôle de précision de forme aura une importance vitale pour la fabrication additive (FA) [12, 13].

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 juste pour le prototypage et non pas pour l'industrialisation.

Introduction générale

Ce travail vise à comprendre et analyser les sources d'imprécisions géométriques et dimensionnelles des pièces imprimées en 3D en mode additif en utilisant une machine de fabrication des filaments fondus appelé la Markforged, MarkTwo.

Identifier et quantifier cette imprécision et l'inexactitude en contrôlent différents paramètres existant dès la phase de conception et du choix dans le poste traitement. Comprendre la génération d'écarts entre le modèle initiale 3D et le modèle finale imprimé peut améliorer l'évolutivité de ce procédé et étendre leur utilisation pour créer de meilleurs produits.

1.Problématique de recherche

L'une des technologies prometteuses pour la fabrication et la production des 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 qui est basé sur l'extrusion thermofusible de filaments fondus, couche par couche à partir des donnés de modèle 3D jusqu'à ce que le modèle entier soit formé.

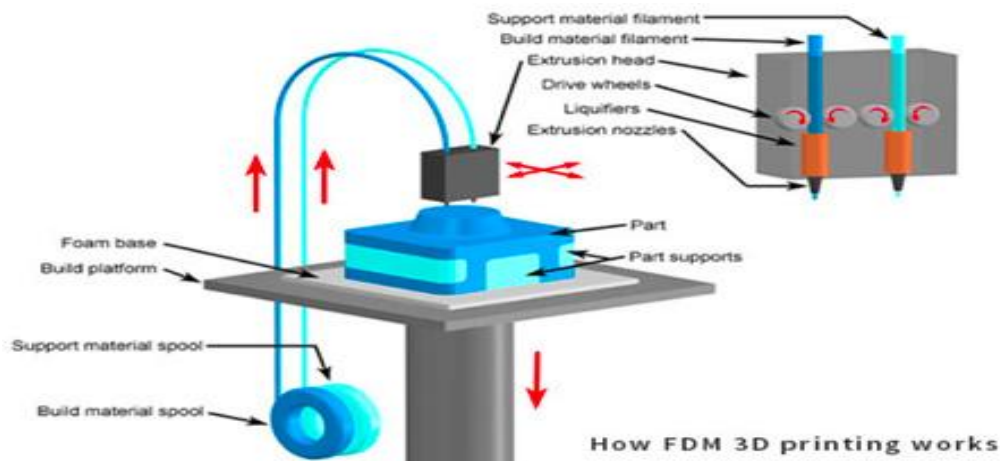


Figure. 1 : schéma de fabrication des filaments fondus

Ce processus a des avantages comme il a des inconvénients ou des points qui freinent leur utilisation. Parmi les avantages il montre un niveau élevé de personnalisation et d'automatisation, un temps réduit de production, il permet de fabriquer des géométries complexes qui pourraient ne pas être possible autrement, un assemblage simplifié. Un large

Introduction générale

éventail de domaine d'applications. Des avantages qui contribuent dans l'approvisionnement de la chaîne logistique dans le monde industriel.

Quoique plusieurs barrières entravent sa croissance ; tels que le coût 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'escaliers, les limitations de matériaux, la taille des pièces fabriquées, la faible précision dimensionnelle.

Dans ce travail on s'intéresse à la qualité en termes de précision dimensionnelles et exactitude géométriques des composants fabriqués avec une machine FDM dans la plateforme 4.0 du laboratoire LCPI appelé MARKFORGED, MarkTwo.

Cette problématique de recherche était évoquée par un ensemble de chercheurs car c'est un obstacle qui empêche l'utilisation des composants fabriqués par le procédé de fabrication additive dans des domaines critiques [14] [15] [16] [17] [18] et qui laisse ce procédé juste pour le prototypage rapide et non pas pour l'industrialisation.

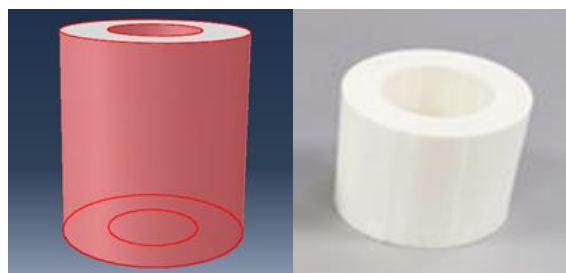
La faible précision dimensionnelle était abordée dans plusieurs travaux de recherches précédents, ils ont identifié les principales sources d'erreur. Par exemple dans la FDM, des erreurs mathématiques dues à l'approximation des surfaces des pièces dans l'entrée du fichier standard ; des erreurs liées au matériau, telles que le retrait, la distorsion ; des erreurs liées au processus telles que les erreurs de positionnement dans le plan XY dues à la translation de la tête de buse et dans l'axe Z dues au repérage des différentes couches [19].

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

De là, notre problématique de recherche est :

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

Le modèle CAO \neq Le modèle imprimé en 3D



Introduction générale

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

On essaye d'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.

Deux types de précision dans la fabrication existent, le premier est la précision dimensionnelle est un degré de compatibilité des dimensions linéaires ou angulaires avec les dimensions d'une pièce parfaitement réalisée, les écarts de dimensions étant une mesure directe de cette précision, le deuxième type est la précision de la forme ; est un degré de compatibilité de formes spécifiques avec la pièce parfaite ou avec d'autres formes, mesures directes de ce type de précision sont des écarts par rapport au cylindre idéal, à la sphère, à la ligne droite, au plan, etc...

2.Objectifs de recherche

Dans ce travail nous essayons d'optimiser les paramètres de processus de fabrication additive (AM) pour lesquels des pièces présentant le moins d'imprécision dimensionnelle géométrique sont obtenues.

L'objectif principale est d'analyser et comprendre le comportement des composants fabriqués par la Markforged afin d'extrapoler un modèle d'aide à la conception de composants qui anticipe les écarts potentiels. A la fin proposer des recommandations aux concepteurs de manière à réduire les itérations de conception.

Cet objectif couvre deux domaines, le premier à valeur scientifique ; un modèle mathématique prédictif qui anticipe les écarts potentiels dès la phase de conception, le même modèle sera utilisé dans le domaine industriel et qui permettre d'étendre la viabilité commerciale de la fabrication additive.

Cet objectif est une étape clé pour l'adoption de ce procédé non seulement pour le prototypage rapide mais pour l'industrialisation.

3.Méthodologie de Recherche

La première étape de ce travail a été par la lecture d'articles de références bibliographiques issues du domaine de la fabrication additive. En particulier, la littérature sur les processus et les méthodes développés dans la production en utilisant l'impression 3D et aussi les contraintes affectent la qualité du produit finale fabriqué par ce procédé.

Introduction générale

Pratiquement les travaux de recherche dans ce domaine ont identifiés et classés les mêmes paramètres affectants et influents la qualité du produit finale, soit sur l'échelle mécanique incluent les propriétés et les caractéristiques mécaniques, ou sur l'échelle de précision géométrique et dimensionnelle.

Ces paramètres sont liés soit à :

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

Paramètres d'impression : la densité, le maillage, le type du matériau, le taux de remplissage, à l'orientation des fibres quand une pièce renforcée, température de l'enveloppe, température de la matière extrudé, diamètre de la buse, direction de fabrication, Vitesse de dépôt.

Paramètres externes : le modèle à imprimer soit une géométrie simple ou complexe, la taille du composant, la vitesse du refroidissement qui dépend du type de matériau utilisé (propriété thermique), La translation du format du fichier CAD 3D au STL.

A partir de là, on s'est positionnée sur la problématique de précision et exactitude de ce processus de fabrication, tout en prenant en compte les caractéristiques de notre machine à impression la MARKFORGED. Nous avons décidé d'investiguer l'effet et l'influence de trois paramètres différents, une étude multiparamétrique sur différentes échelles sur une géométrie modèle de forme primitive cylindrique.

Le premier paramètre relié au choix dans les paramètres d'impression, le type de maillage qui représente l'architecture interne de la pièce car nous avons la possibilité de choisir parmi différents types ; triangulaire, rectangulaire, hexagonal ou solide.

Le deuxième paramètre lié au choix du matériau utilisé. L'avantage de l'imprimante utilisée c'est qu'elle permet d'imprimer des pièces en composites ce qui n'est pas possible avec d'autres machines. Le renforcement en fibre longs aidera à améliorer les caractéristiques mécaniques des composants mais aussi un paramètre délicat qui fait rentrer d'autres paramètres perturbants comme les caractéristiques mécaniques du matériau ; viscosité, les aspects thermiques, rhéologique....

Introduction générale

Le troisième paramètre est la taille de la pièce à imprimer, un problème évoqué à plusieurs reprises. Comme la pièce model est d'une forme cylindrique, nous avons varié la taille du rayon trois fois.

Après le choix des paramètres d'entrée, une autre étude bibliographique a été menée pour identifier les méthodes et les outils d'optimisation utilisés par les autres chercheurs.

Cette étude traite multi paramètres, nous avons structurés les expérimentations en utilisant un plan expérimental (Design Of Experiment, DOE) basé sur un plan expérimentale complet avec 27 essais.

4.Originalité de la recherche

Cette thèse s'inscrit dans le cadre d'un projet de recherche global qui consiste à développer une nouvelle plateforme pédagogique et de recherche 4.0 à Arts et Métiers, campus de Paris. Ce projet de recherche, sur lequel travail plusieurs doctorants, aborde les thèmes de la flexibilité des opérations de production, de la maintenance prédictive et de la fabrication additive. Que l'on 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 associé souvent à l'industrie du futur.

Dans ce cadre, ma thèse consiste à optimiser la conception des composants, en termes de précision dimensionnelle, en agissant sur les paramètres de fabrication et de conception.

L'originalité c'est que la Markforged-MarkTwo, elle permet d'imprimer des pièces en composites. La matrice ou le matériau de base est le nylon ou l'onyx renforcées en fibres longs tels que ; fibre de verre, de carbone, 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.

Un ensemble de chercheurs ont été intéressés par l'investigation des paramètres de processus tels que ; l'Orientation de construction, Épaisseur de couche, Largeur de contour, Angle de trame (Raster Angle), Facteur de retrait (shrinkage), Trou d'air (Air Gap) [Niteen et al] . En utilisant la méthode de plan d'expérience Taguchi (DOE ; design of experiment) ou carte auto-organisée (self organizing map), des méthodes numériques et mathématiques. D'autres chercheurs ont étudié les tolérances de forme en termes d'écart entre le modèle CAO et le modèle imprimés en 3D [29].

Parmi les études réalisées sur l'optimisation :

Filip Górski et al, Dans leur étude, ils ont identifié la relation entre l'orientation du modèle pendant la fabrication et la précision dimensionnelle et la répétabilité des produits obtenus. En conséquence, ils ont découvert que l'orientation influence directement à la fois la précision et la répétabilité des pièces FDM de manière non linéaire et assez difficile à décrire mathématiquement avec un si petit nombre de types d'échantillons. Un ensemble d'échantillons était préparé, ils ont été fabriqués avec des paramètres de processus variables (X: 0 (flat) , Y: 0), (X: 90 (side), Y: 0), (X:0 , Y:45), (X:90 , Y:45), (X: n/a (vertical) , Y: 90) et ils ont été mesurés à l'aide d'un scanner 3D. Ils ont comparé la précision avec la résistance

Chapitre I : Recherche Bibliographique

des mêmes échantillons fabriqués par FDM des autres travaux, des tests de traction ont été effectués et les résultats sont présentés dans la figure suivante pour les trois cas d'étude :

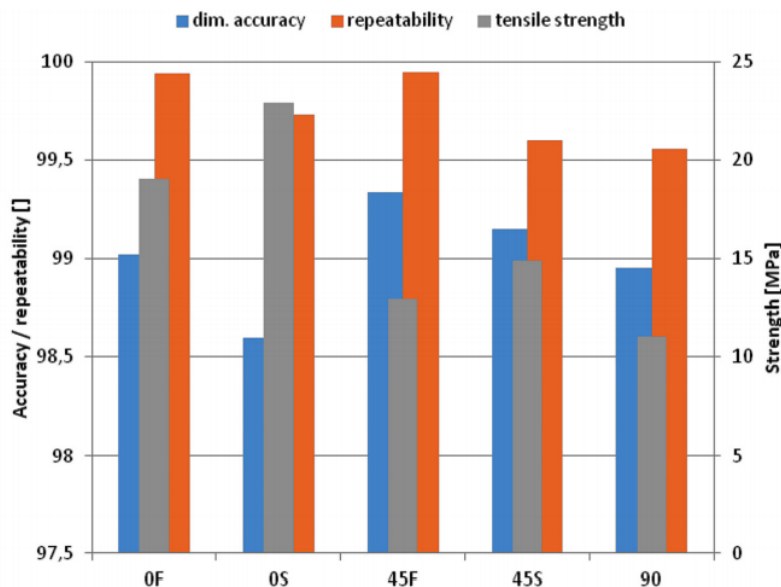


Figure. 3 : Juxtaposition de la force et de la précision des échantillons FDM (plus élevée = meilleure)

Ils en ont déduit que plus la taille de l'objet est grande, plus la fabrication est précise. Ceci ne s'applique qu'aux déviations relatives. En conclusion, il n'y a pas de combinaison parfaite, il est donc pleinement justifié d'utiliser des outils d'intelligence artificielle pour déterminer l'orientation optimale d'après eux [30].

Bochmann et al, L'objectif de leur recherche était de comprendre la relation entre les caractéristiques du processus et la génération d'erreurs (erreurs liées à la machine) dans la modélisation par la méthode de fabrication des filaments fondus (FDM) en utilisant une approche de budget d'erreur.

Cette recherche a d'abord examiné comment les paramètres d'impression tels que l'orientation de construction (build orientation) et la densité des pièces affectent la forme et la résolution des pièces FDM. Six pièces de contrôle ont été fabriquées sur deux machines FDM (Stratasys Dimension BST 1200es et SST 1200es). Les pièces de contrôle ont été imprimées avec deux niveaux de densité différents pour chaque machine : solide et basse densité, c'est des pièces produites en ABS plus.

Le travail était composé de trois cas d'étude (le modèle) :

Chapitre I : Recherche Bibliographique

- Pièce n° 1 : contrôle utilisée pour quantifier les erreurs de forme et la résolution dans la fabrication des filaments fondus (FDM).
- Pièce n° 2 : contrôle utilisée pour étudier l'effet d'escalier sur la rugosité de surface.
- Pièce n° 3 : contrôle utilisée pour estimer l'exactitude et la précision du FDM.

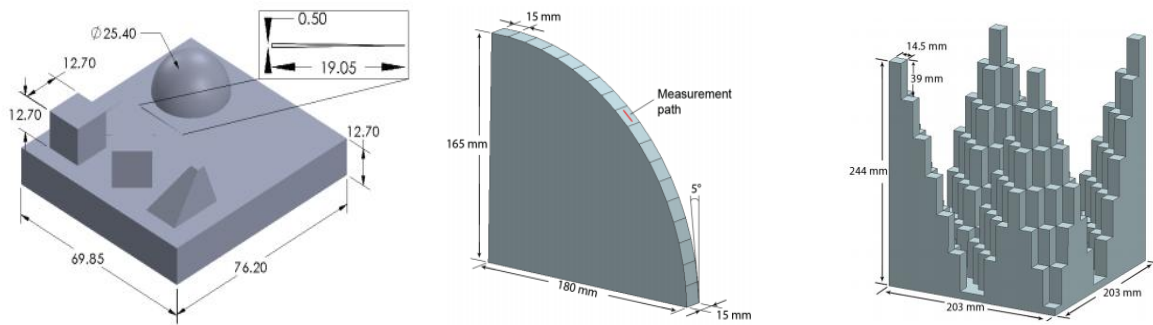


Figure. 4 : représentation des trois pièces de l'étude #1, #2, #3

Pour étudier l'influence de l'effet d'escalier sur la rugosité de la surface, pièce de contrôle #2 était conçue avec des surfaces qui variaient l'orientation de construction (θ) de $0^\circ \leq \theta \leq 90^\circ$ par intervalles de 5° .

La forme était évaluée en utilisant la rondeur mesurée de la caractéristique de l'hémisphère et des observations qualitatives de la pièce imprimée. La résolution était estimée à partir de la longueur et de la largeur minimale de la fonction de « tear drop feature ».

Ils ont résumé la précision estimée sur la base de la mesure du contrôle pour les directions X, Y et Z, respectivement, par rapport à différentes positions. Ils ont trouvé que la direction Z a la plus grande précision par rapport à leur machine FDM.

Prahalad et al, leur travail a pour objectif de quantifier l'écart relatif dans l'intégrité dimensionnelle des composants complexes fabriqués par le procédé de fabrication additive. Une nouvelle approche basée sur la théorie des graphes spectraux (SGT) était proposée pour améliorer la qualité critique des pièces fabriquée en mode additifs.

Le nombre de Fiedler invariant topologique basé sur SGT (spectral graph theory) (k_2) était calculé à partir de mesures de coordonnées de nuages de points 3D et utilisé pour quantifier l'intégrité dimensionnelle des composants testés[32].

Sun et al, ont étudié les mécanismes qui contrôlent la formation de liaisons dans le processus de modélisation par dépôt en fusion (FDM). La qualité de la liaison était évaluée en mesurant

Chapitre I : Recherche Bibliographique

et en analysant les changements dans la méso- structure et le degré de correction atteint aux interfaces entre le polymère adjacent filaments.

Des mesures expérimentales des profils de température ont été effectuées pour des échantillons produits dans différentes conditions de traitement : Effet de la stratégie de dépôt (orientation des filaments), Épaisseur de couche, Profils de température à différentes températures de liquéfacteur, Variation des profils de température

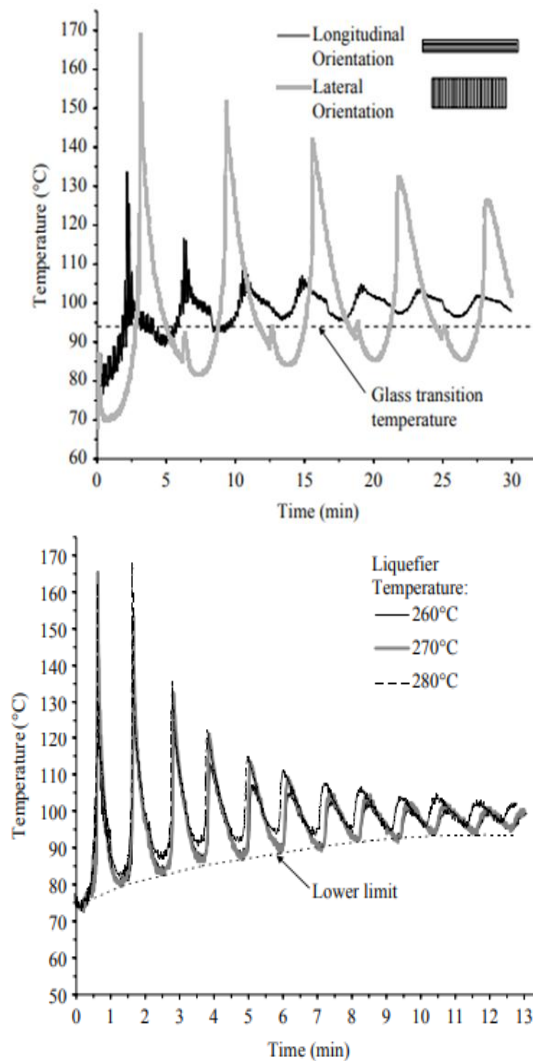


Figure. 5 : Graph 1 : Effet de la stratégie de dépôt (orientation des filaments) sur le profil de température de refroidissement, Graph 2 : Profils de température à différentes températures de liquéfaction (température de l'enveloppe : 708 ° C et (b) profils de température à diverses températures de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

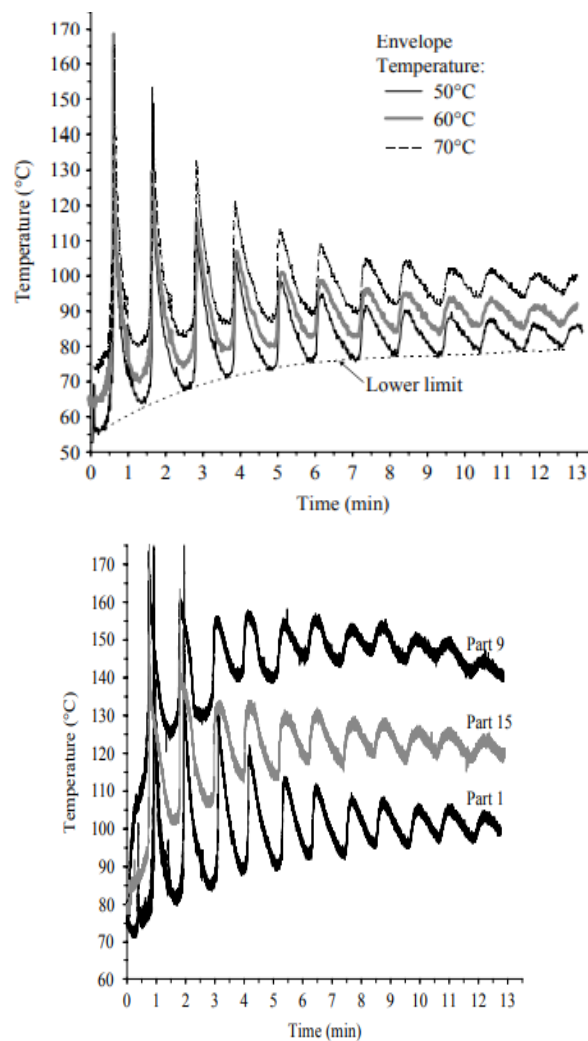


Figure. 6 : Graph 1 : (a) Profils de température à différentes températures du liquéfacteur (température de l'enveloppe : 708 ° C) et (b) profils de température à diverses températures de l'enveloppe (température du liquéfacteur : 2708 ° C) Graph 2 : Variation des profils de température en fonction des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

Ils ont constaté que le profil de température de refroidissement est affecté par la température de l'enveloppe et les variations du coefficient de convection, ainsi que par la stratégie de fabrication, qui affectent également la méso-structure et la qualité globale de la force de liaison entre les filaments. La qualité de la liaison a été évaluée expérimentalement sur la base de la croissance du col formé entre les filaments adjacents et de leur rupture sous charge de flexion [33].

Dharipalli Hyndhavi et al, ont étudié l'influence des paramètres de processus tels que l'épaisseur de la couche, l'angle de trame et l'orientation de la construction sur les précisions

Chapitre I : Recherche Bibliographique

dimensionnelles des composants fabriqués par le processus de fabrication des filaments fondus (FDM) avec deux matériaux différents, à savoir l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS). Et l'acide poly-lactique (PLA) également pour évaluer l'interaction entre ces paramètres. Ils ont utilisé l'analyse de grade relationnelle de Gray (Grey relational grade analysis) afin de déterminer l'optimal du niveau de facteur de paramètres pour toutes les caractéristiques dimensionnelles simultanément afin de minimiser le changement en pourcentage dans les trois caractéristiques dimensionnelles différentes, à savoir la longueur (L ; length), la largeur (W ; width) et l'épaisseur (T ; thickness) des pièces.

Minitab 17 a été utilisé pour effectuer 23 (3 facteurs à 2 niveaux) plan factoriel complet de l'étude expérimentale. La caractérisation expérimentale a été réalisée en deux étapes. Dans la première étape, les pièces sont fabriquées en faisant varier les paramètres du processus (épaisseurs de couche, angle de trame, orientation de construction). Dans la deuxième étape, les caractéristiques dimensionnelles (L, W et T) sont déterminées pour les pièces fabriquées.

Les résultats ont montré que l'épaisseur de couche de 200 microns, l'angle de trame de 0 degré et l'orientation de construction de 90 degrés affineront la précision dimensionnelle globale de la pièce fabriquée quand il s'agit d'un matériau ABS. L'épaisseur de couche de 200 microns, l'angle de trame de 0 degré et l'orientation de construction de 0 degré augmentent la précision dimensionnelle de la pièce fabriquée avec le matériau PLA.

L'analyse expérimentale indique que le contrôle approprié des paramètres du procédé augmente la précision dimensionnelle des pièces fabriquées à l'aide de matériaux ABS et PLA du procédé FDM [34].

B.H. Lee et al, Le but de leur travail était d'étudier l'effet des paramètres de processus, notamment (entrefer (air gap), angle de trame (raster angle), largeur de trame (raster width), épaisseur de couche (layer thickness)) sur les performances élastiques d'un prototype ABS conforme tout en déterminant le paramètre optimal. Pour cela, ils ont utilisé la méthode de plan d'expérience Taguchi (design of experiment) avec un plan orthogonal, afin d'analyser l'effet principal, le rapport signal sur bruit (S/B) et l'analyse de la variance (ANOVA) à travers leur étude des principaux paramètres de processus qui affectent les performances du prototype aussi peuvent être déterminé.

Tableau.1 : Paramètres FDM et leurs niveaux

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

Ils ont conclu les points suivants :

- Les quatre paramètres (entrefer, angle de trame, largeur de trame et épaisseur de couche) étaient significatifs en termes d'incidence sur les performances flexibles résultant en une distance de projection maximale. Cependant, l'ordre de contribution des paramètres pour la distance de projection maximale était l'entrefer, l'angle de trame, l'épaisseur de couche, puis la largeur de trame. Sur la base d'analyses d'effet principal et d'ANOVA, ils ont constaté que les paramètres optimaux pour atteindre la distance de projection maximale du prototype étaient l'entrefer au niveau 3, l'angle de trame au niveau 3, la largeur de trame au niveau 2 et l'épaisseur de la couche au niveau 1.
- Pour un angle de déplacement de 15°, les quatre paramètres ont un effet significatif sur la distance de projection. Cependant, l'ordre de contribution des paramètres pour la sortie souhaitée était l'angle de trame, l'épaisseur de couche, l'entrefer, puis la largeur de trame. Sur la base de l'effet principal et des analyses ANOVA, les paramètres optimaux étaient l'entrefer au niveau 3, l'angle de trame au niveau 3, la largeur de trame au niveau 2 et l'épaisseur de la couche au niveau 1.
- Pour un angle de déplacement de 20°, les quatre paramètres ont encore une fois eu un effet significatif sur le rendement souhaité. L'ordre de contribution pour les paramètres était l'épaisseur de la couche, l'entrefer, l'angle de trame, puis la largeur de trame. Sur la base de l'effet principal et des analyses ANOVA, les paramètres optimaux étaient l'entrefer au niveau 3, l'angle de trame au niveau 3, la largeur de trame au niveau 3, puis l'épaisseur de la couche au niveau 1 [35].

Dar-Yuan Chang et al, Une nouvelle approche pour évaluer les caractéristiques de qualité des composants produits par des systèmes d'extrusion (FDM) afin d'examiner l'erreur de profil et les ouvertures d'extrusion, une méthode de mesure a été développée pour une série de cylindres standard posés sur le contour de la pièce.

La méthode de Taguchi (plan d'expérience) a été utilisée pour étudier l'effet des paramètres de traitement (processing parameters), notamment ; largeur de contour (contour width),

Chapitre I : Recherche Bibliographique

profondeur de contour (contour depth), largeur de trame (raster width) et angle de trame (raster angle), sur les caractéristiques de qualité de produit finale. Les paramètres étudiés sont présentés dans la figure ci-dessous :

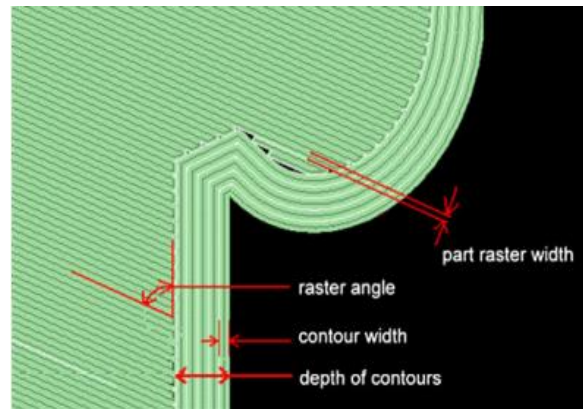


Figure. 7 : Illustration des facteurs de contrôle expérimentaux

A partir des analyses d'effet de niveau, ils ont trouvé que :

1. la largeur du contour a l'effet le plus évident ; plus la largeur est grande, meilleure est la précision du profil également, une largeur étroite donne une apparence dense et bonne de la zone d'ouverture sur la couche de surface.
2. la profondeur du contour a une grande influence sur l'erreur de profil. L'augmentation de la profondeur du contour améliore la stabilité du formage et réduit les erreurs de profil. Et, l'influence sur les ouvertures de surface n'est pas claire.
3. La largeur de trame et l'angle de trame qui se rapportent au parcours d'outil interne ont moins d'effet sur l'erreur de profil. Cependant, ils ne peuvent pas être ignorés dans l'ouverture de surface [36].

Mohammad S. Alsoufi et al, Les auteurs ont étudié la variation de la précision dimensionnelle et de la rugosité de surface des composants fabriqués par la méthode de fabrication des filaments fondus. Les modèles imprimés ont été fabriqués en filament thermoplastique, quatre types différents à savoir, PLA, PLA+, ABS et ABS+. Les conclusions suivantes ont été tirées :

* Les pièces imprimées de forme rectangulaires finales ont montré une déformation de gauchissement indésirable et des erreurs de forme dues au retrait thermique par rapport à la valeur réelle de 40 mm (L) × 40 mm (L) × 15 mm (H) allant de moins de 3% (pour PLA et PLA +) à 34,53 % (pour ABS et ABS+).

Chapitre I : Recherche Bibliographique

*PLA, PLA+ et ABS+ ont montré la même rugosité de surface, tandis que l'ABS montre une distribution d'irrégularité dans la rugosité de surface, l'ondulation et le primaire pour les quatre faces, y compris la face supérieure (milieu).

*Un excellent rapport de profil de surface pour le PLA et le PLA+, avec un écart presque constant, alors qu'un rapport de profil de surface inacceptable avec une variation aléatoire de l'écart montré par l'ABS et l'ABS+.

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

Gamal Weheba et al, La recherche visait à étudier l'effet des paramètres de processus (paramètres d'entrées) sur la précision dimensionnelle ainsi que sur la qualité de surface des pièces fabriquées avec une nouvelle résine par le procédé de stéréolithographie. Un plan d'expérience et des techniques d'optimisation de Box-Behnken ont été utilisées pour définir l'optimal paramètre de processus.

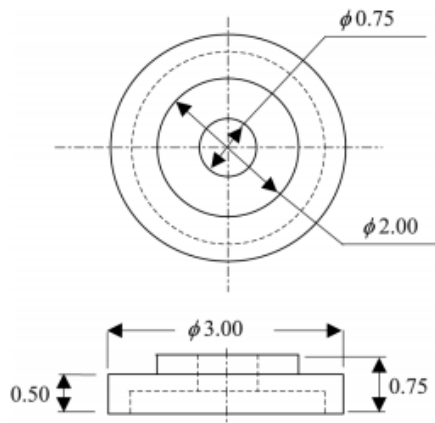


Figure. 8 : benchmark (Conception) du modèle de référence

Le modèle de référence se compose de deux cylindres concentriques avec un 0,75 pouce.

Le modèle de régression résultant représentant 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)} { fill cure depth (A), hatch overcure (B), and Z-level wait (C)} peuvent être exprimé comme suit :

$$\text{DNOM}^{\wedge} = 8.67029 * 10^{-3} - 5.1458A - 0.16367B + 3.16667 * 10^{-4}C + 42.96875A^2 + 142.00000B^2 + 1.51667 * 10^{-5}C^2$$

Chapitre I : Recherche Bibliographique

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

$$\text{Flatness} = 0.010762 - 0.98375A - 0.046867B - 1.36433C + 89.01042A^2 + 131.86667B^2 + 6.39667 \cdot 10^{-5}C^2$$

La rugosité de surface (Ra) a donné le modèle suivant :

$$R_a = 0.28715 + 23.82143A + 99.00000B - 3,136.16071A^2 - 11,750.00000AB$$

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

Anitha et al, Les auteurs ont étudié l'influence des paramètres de processus, notamment ; 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) en utilisant le plan d'expériences Taguchi (design of experiment), chacun des trois paramètres avait 3 niveaux.

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

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

Ils ont trouvé que :

- Le premier facteur était efficace au niveau 3,
- Le deuxième facteur était efficace au niveau 1
- Le troisième facteur était efficace au niveau 3 (selon l'analyse S/N). aussi ils ont déterminés une valeur donnée pour une rugosité de surface souhaité [39].

Ala'aldin Alafaghani et al, Le but de leur travail était d'étudier l'effet des paramètres de process, y compris ; le pourcentage de remplissage, le motif de remplissage, l'épaisseur de la couche et la température d'extrusion sur la précision dimensionnelle ainsi que sur les propriétés mécaniques des pièces imprimées en 3D par le procédé de fabrication des filament

Chapitre I : Recherche Bibliographique

fondu (FDM) avec le PLA (acide polylactique) comme matériau modèle. Un plan d'expérience Taguchi L9 a été utilisé pour réaliser les expériences.

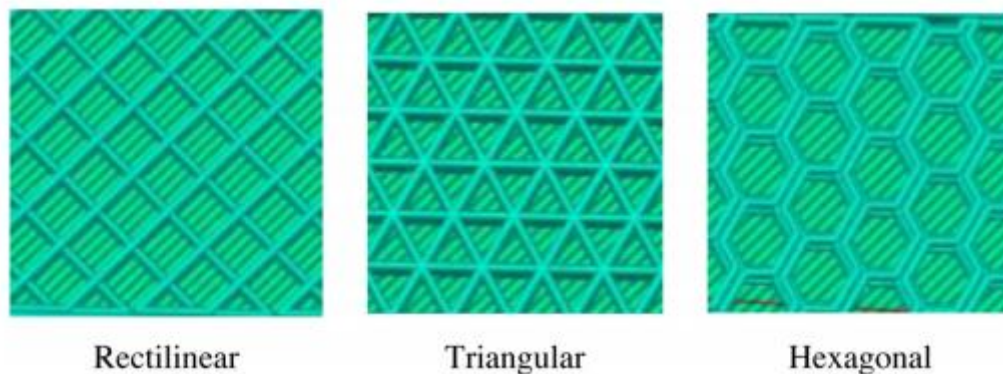


Figure. 9 : Les formes des trois modèles de remplissage utilisés pour fabriquer les échantillons FDM

Par rapport à leurs résultats les pièces fabriquées par la méthode FDM toujours elles sont déformées en plus grand (dilatation) par rapport au modèle initial (CAD) le modèle dessiner, ils concluent que pour une meilleure précision dimensionnelle une température d'extrusion faible, un pourcentage de remplissage inférieur et un motif de remplissage hexagonal sont nécessaires pour minimiser les erreurs dimensionnelles dans les pièces fabriquées par le procédé FDM. Une température d'extrusion de 190 °C, une épaisseur de couche de 0,20 mm, un motif de remplissage hexagonal et un pourcentage de remplissage de 20 % sont les valeurs des paramètres optimisés pour une meilleure précision dimensionnelle.

Pour les résultats mécaniques, différents réglages pour chaque paramètre pour obtenir la propriété mécanique appropriée (rigidité, résistance et ductilité).

Enfin, lors du réglage des valeurs des paramètres de process FDM, il n'est pas possible à la fois de maximiser les propriétés mécaniques et de minimiser l'erreur dimensionnelle [40].

Che Chung Wang et al, Ils ont intégré la méthode de plan d'expérience de Taguchi et l'analyse relationnelle de Gray afin d'optimiser les paramètres du processus de fabrication dans la modélisation des dépôts fondus. Ils ont analysé la précision dimensionnelle et la rugosité de surface (SR) ainsi que le test de traction ultime.

Les facteurs expérimentaux et leurs niveaux correspondants de processus étaient l'épaisseur de la couche LT, le style de dépôt DS, le style de support SS, l'orientation de dépôt Z direction DOZ, l'orientation de dépôt X direction DOX et également l'emplacement de

Chapitre I : Recherche Bibliographique

construction BL tous les paramètres étaient à trois niveaux seulement l'épaisseur de couche à deux niveaux.

Tableau. 3 : Description des paramètres de contrôle expérimentaux

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

Des facteurs de construction significatifs de chaque caractéristique de qualité et des combinaisons de niveaux de facteurs optimaux de chaque meilleure caractéristique de qualité ont été déterminés par l'analyse de la variance (ANOVA).

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

Résultats :

- Le paramètre critique est l'épaisseur de la couche de dépôt fondu (LT) et la combinaison optimale des paramètres de contrôle est l'orientation du dépôt – direction Z (DOZ).
- La combinaison optimale de paramètres des multiples caractéristiques de qualité de fabrication, calculée en intégrant la méthode de Taguchi avec l'analyse relationnelle de Gray (Gray relational analysis), est LT (0,254), DS (VS), SS (basique), DOZ (M), DOX (08) et BL (100) [41].

T. Nancharaiah et al, Les auteurs ont étudiés les paramètres de process afin d'optimiser le temps de traitement en utilisant le plan factoriel complet (27 expériences). Ils ont réduit le nombre d'expériences à 9 en utilisant le plan d'expériences (design of experiment) et le réseau orthogonal (orthogonal array).

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

Tableau. 4 : Les paramètres de traitement expérimental

Chapitre I : Recherche Bibliographique

<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 9 expériences sont menées et les données expérimentales obtenues à partir des pistes expérimentales sont analysées à l'aide du rapport S/N et de l'analyse ANOVA.

L'effet de l'angle de trame, l'interaction entre l'épaisseur de la couche et l'angle de trame, l'entrefer et l'angle de trame se sont avérés négligeables.

Il a été constaté que l'épaisseur de la couche et l'entrefer affectent considérablement le temps de traitement.

L'entrefer contribue à 30,77 % du temps de traitement à un niveau significatif de 95 % et l'épaisseur de la couche contribue à 66,57 % au temps de traitement à un niveau significatif de 99 % selon l'analyse ANOVA

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

M. Hanon et al, ont étudiés l'influence des paramètres de processus sur la précision dimensionnelle des pièces imprimés en 3D par la méthode de fabrication des filaments fondus (FDM) en utilisant un matériau d'acide polylactique (PLA). des échantillons d'essai de traction cylindriques et en dog-bone ont été fabriqués à divers paramètres de processus, y compris l'orientation de construction (build direction) (horizontale, angle de 45° et vertical) pour le cylindre, et les échantillons en dog-bone ont été fabriqués à trois paramètres d'impression différents : épaisseur de couche [100 µm, 200 µm et 300 µm], l'angle de direction du raster (raster angle) [0/45°, 45/135°, et 45/90°] et l'orientation de construction [Plat, Sur le bord et Droit]. Également trois couleurs différentes (blanc, gris et noir) de filament PLA a été utilisées, ils ont évalué la précision dimensionnelle en termes de diamètre et de longueur pour la partie cylindrique et de largeur et d'épaisseur pour les échantillons dog-

Chapitre I : Recherche Bibliographique

bone. Afin de minimiser le pourcentage d'erreur, ils ont défini les paramètres de processus optimaux pour tous les paramètres étudiés.

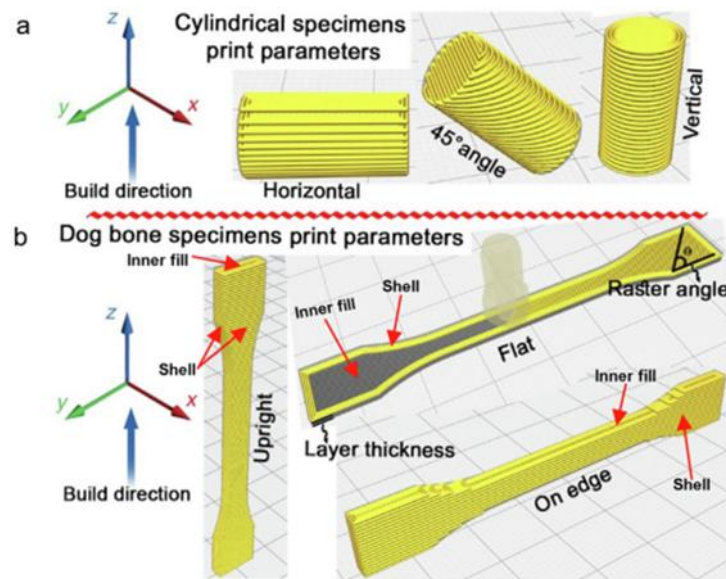


Figure. 10 : (a) orientations d'impression des éprouvettes cylindriques ; (b) paramètres utilisés pour l'impression d'échantillons d'essai en os de chien (dog-bone), y compris l'orientation d'impression, l'angle de direction de trame et l'épaisseur de la couche.

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, Le but de leur travail était d'étudier la précision dimensionnelle et les propriétés mécaniques des composants produits par la modélisation par dépôt fondu FDM. Ils ont utilisé des géométries de référence pour évaluer la précision dimensionnelle et les limites

Chapitre I : Recherche Bibliographique

de fabrication ainsi que l'effet d'escalier (the staircase effect) qui est considéré comme un effet inhérent au processus. Les spécimens ont été produits avec du nylon et du nylon renforcé de fibres de carbone. L'étude s'est concentrée sur l'étude des propriétés mécaniques (la dureté et les propriétés de traction) en tenant compte des paramètres de processus tels que la direction de construction (XY, YZ) et les taux de remplissage (100%, 75 %,50%) avec différents types de maillage tels que triangulaire, rectangulaire.

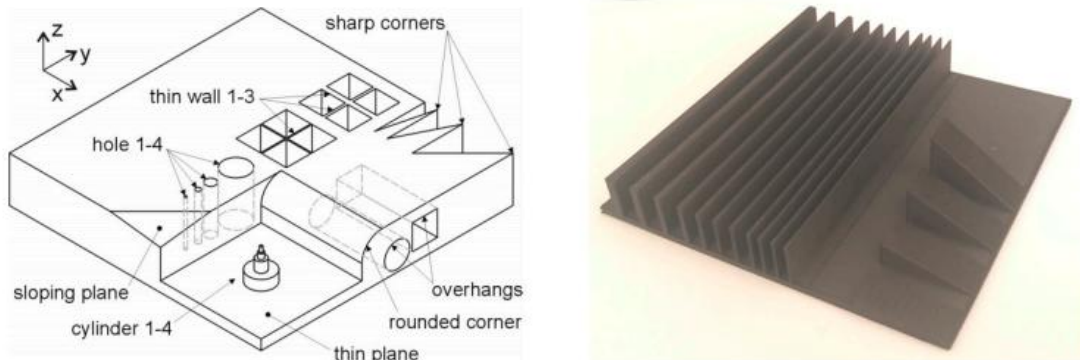


Figure. 11: (a): benchmark 1, (b): benchmark 2

Dans la partie expérimentale concernant la précision dimensionnelle, ils ont constaté que l'option étendre les fonctionnalités minces “expand thin features” faisait une différence remarquable dans les résultats dimensionnels de la référence lorsqu'elle est activée ou désactivée. Cependant, sans cette option, les parois minces d'une épaisseur de 1 mm ont été mesurées à 0,806 et 0,788 mm dans les deux directions. L'option « étendre les éléments minces » a eu un effet significatif sur les éléments de dimensions inférieures à 2 mm et pouvait modifier considérablement la précision dimensionnelle obtenue. Pour le deuxième cas qui est les petites bosses, le cylindre de 5mm et pour le diamètre des cylindres supérieurs de 5mm, 2mm, 1mm et 0,5mm. Lorsque la fonction mince était activée, les diamètres obtenus étaient de 5,41 mm, 2,25 mm, 1,33 mm à 1 mm, ce qui a donné des bosses plus grandes. Pour le repère des angles vifs (The sharp corner), lorsque les traits fins étaient activés, les premiers résultats ont montré des zones poreuses en raison du manque de fusion.

Le deuxième benchmark pour les parois minces (thin walls) et l'effet de l'angle d'inclinaison sur les parois des marches d'escalier avec 0,3 et 0,4 n'ont pas pu être produites. Si l'épaisseur de la couche est augmentée ou l'angle d'inclinaison est réduit, l'effet d'escalier (the stairs effect) devient plus dominant [44].

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Zhang et al, L'étude était basé sur l'évaluation de la précision des modèles dentaires imprimés en trois dimensions (3D) selon deux méthodes de fabrication utilisant trois types de traitement numérique de la lumière (DLP :Digital Light Processing) : 1) EvoDent ; avec des épaisseurs de couche de 50 μ m et 100 μ m , (2) EncaDent avec des épaisseurs de couche de 20, 30, 50 et 100 μ m, (3) Vida HD avec des épaisseurs de couche de 50 et 100 μ m. Et un autre modèle (SLA) imprimantes (La stéréolithographie) à différentes épaisseurs de couche de 25, 50 et 100 μ m. Les modèles ont été convertis en modèles dentaires numériques à l'aide d'un scanner de modèle D2000 et comparés en trois dimensions aux fichiers sources à l'aide de Geomagic Qualify. Les résultats ont montré que la méthode DLP a une précision d'impression plus élevée par rapport à la méthode SLA et ils ont fixé l'optimale pour chaque imprimante en tenant compte de l'épaisseur de couche [45].

Jasgurpreet Singh Chohan et al , Dans leurs travaux, ils ont étudié l'impact de la vapeur de lissage dans l'amélioration de la précision dimensionnelle ainsi que de l'état de surface des composants (implants biomédicaux) fabriqués par le procédé de fabrication de filament fondus (FDM) avec l'ABS comme matériau modèle.

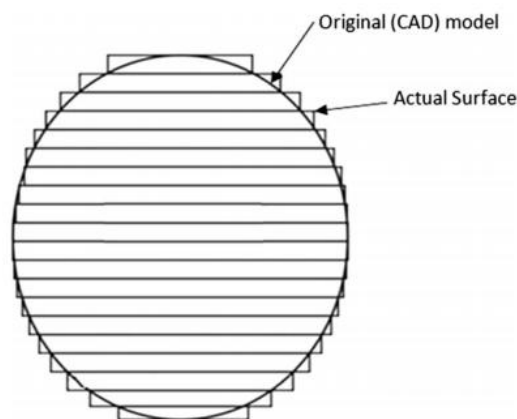


Figure. 12 : Variation dimensionnelle de la surface réelle obtenue par FDM par rapport au modèle CAO

Le procédé FDM a induit des marches d'escalier sur des surfaces circulaires et inclinées, ce qui a augmenté les dimensions des pièces lorsqu'elles sont mesurées et conduit à des pièces surdimensionnées contrairement aux dimensions réduites des pièces dans les surfaces linéaires.

Dans les résultats, Il y a eu une réduction significative de la surface moyenne rugosité (moyenne 82,74 %) des répliques ABS après lissage à vapeur. L'épaisseur moyenne des

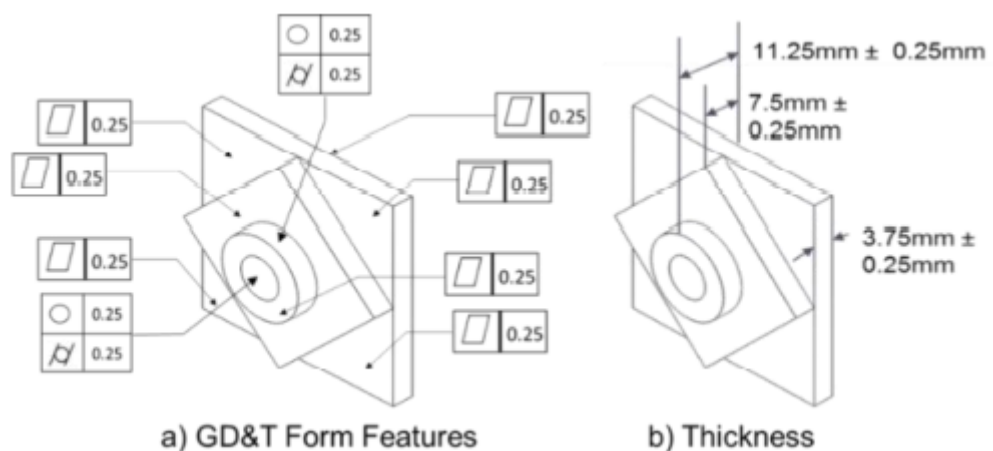
répliques après lissage est de 6.7103 mm, ce qui est réduit par rapport à l'épaisseur avant lissage (moyenne 6,8642 mm)[46].

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 ensemble de chercheurs ont étudiés les précisions géométriques et dimensionnelles des composants fabriqués en mode additifs en utilisant des méthodes numériques et mathématiques :

Tootooni et al, ont développé une nouvelle approche pour évaluer l'intégrité géométrique 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 additifs (AM, imprimés en 3D) aussi pour étudier l'effet des paramètres du procédé FFF, en particulier, le pourcentage de remplissage (If, 70 % - 100 % par étapes de 10 %) et la température d'extrusion (Te, 220 °C à 240 °C par intervalles de 5 °C) sur l'intégrité géométrique de Pièces en ABS en utilisant un plan d'expériences. L'approche est basée sur la théorie des graphes spectraux des valeurs propres laplaciennes extraites des données du nuage de points 3D en conjonction avec un cadre de modélisation appelé représentation creuse pour classer la qualité des pièces FFF en fonction de l'intégrité géométrique.

Le résultat pratique de ce travail est une méthode qui peut rapidement classer l'intégrité géométrique de la pièce avec des données de nuage de points minimales et une fidélité de classification élevée (score F > 95 %), ce qui évite les 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

Une analyse de surface de réponse a été réalisée avec le pourcentage de remplissage et la température de l'extrudeuse (la buse) en entrée et les paramètres GD&T en sortie. Il a été observé que bien que la température de la buse (T_e) n'ait montré aucun effet statistiquement significatif (niveau de signification statistique $\alpha = 10 \%$), le pourcentage de remplissage (If) est un facteur influent (valeur p 0,05) pour tous les GD&T mesurés et autres caractéristiques) sur l'intégrité géométrique des pièces FFF.

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].

Qiang huang et al, L'objectif de leur travail était de développer une nouvelle approche pour modéliser et prédire le retrait des pièces afin d'obtenir la meilleure précision dimensionnelle en compensant le retrait pour les produits cylindriques ; l'approche développée est démontrée à la fois analytiquement et expérimentalement dans un procédé de stéréolithographie. Le contrôle du retrait est crucial pour surmonter la barrière de la précision dimensionnelle dans l'impression 3D.

Leur approche de construction de modèles conduit à une stratégie de compensation efficace pour les produits cylindriques.

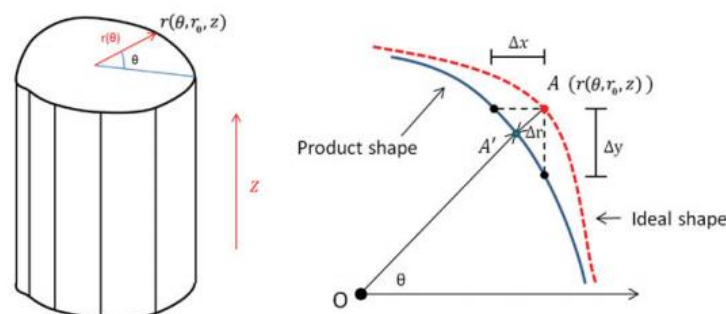


Figure. 14 : approche de construction de modèles conduit à une stratégie de compensation efficace pour les produits cylindriques

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Un effet constant de surexposition pour tous les cylindres 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 donné par l'équation : $E^{\wedge} [\Delta r (\theta ,r_0)|\theta] \approx x_0 + \alpha^{\wedge}(r_0 + x_0)^{a^{\wedge}} + \beta^{\wedge}(r_0 + x_0)^{b^{\wedge}} \cos(2\theta)$.

Ce modèle de retrait de forme à un pouvoir prédictif pour différentes tailles de produits, et le schéma de compensation analytique permet de modifier efficacement les entrées CAO en toute simplicité [48].

Ling Li et al, Ils ont présenté une approche pour réduire les incohérences et les inexactitudes 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 un modèle 3D de la pièce telle qu'imprimée. Ensuite, ils ont formé des algorithmes d'apprentissage automatique avec les données de ce système de numérisation et ont prédit les inexactitudes géométriques 3D dans les nouvelles conceptions.

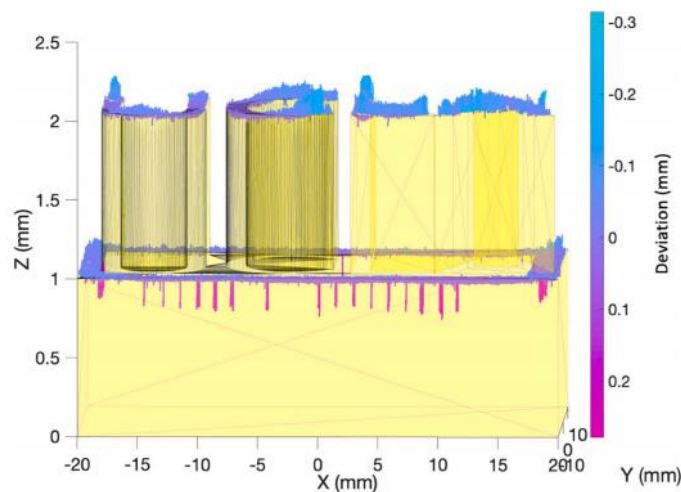


Figure. 15 : Illustration de l'écart géométrique 3D entre la conception CAO et la structure imprimée

Les réseaux contradictoires conditionnels (The conditional adversarial networks ; CAN) ont produit des prédictions plus précises, une solution aux problèmes de traduction d'image à image, ont été mis en œuvre pour traduire une image d'entrée d'une tranche d'un modèle CAO en une image de sortie de la tranche correspondante à partir du profil numérisé en 3D [49].

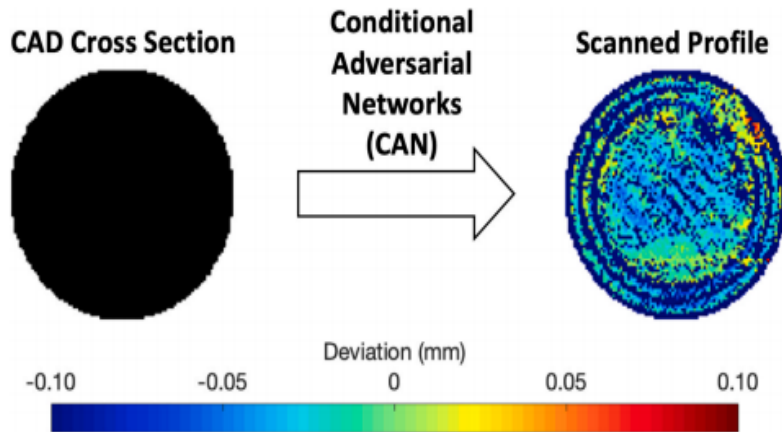


Figure. 16 : Illustration de la cartographie entrée-sortie utilisée dans le modèle d'apprentissage machine CAN

Anhua Peng et al, Afin de trouver les paramètres optimaux (réponse de sortie), un plan d'expérience uniforme a été utilisé. 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, à savoir : la compensation de largeur de ligne(line width), la vitesse d'extrusion, la vitesse de remplissage et l'épaisseur de couche sont dérivées avec la seconde ordre de réponse de méthodologie de surface (RSM ;response surface methodology) pour construire une fonction polynomiale pour exprimer la fonction implicite entre les variables d'entrée et la réponse de sortie a était utilisée, (x_1), la vitesse d'extrusion (x_2), la vitesse de remplissage (x_3) et l'épaisseur de la couche (x_4), qui sont sélectionnés comme facteurs de contrôles.

le RSM de second ordre obtenu était:

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

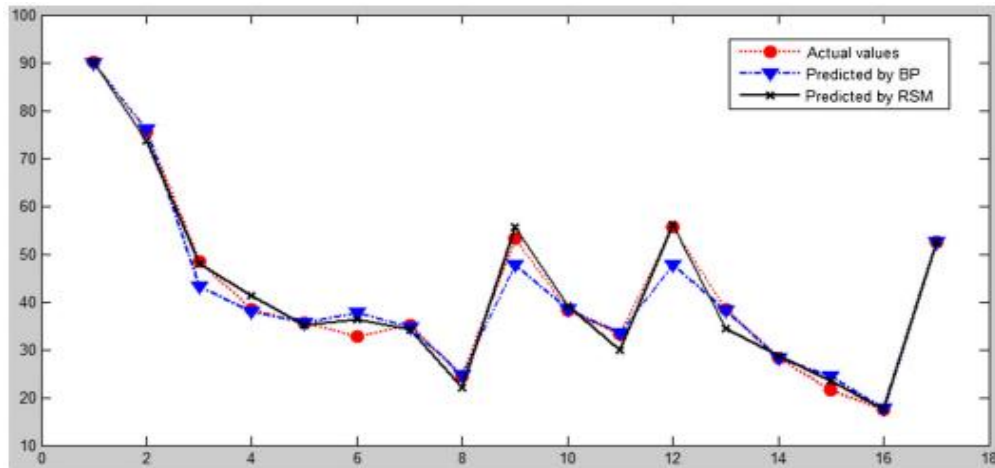


Figure. 17 : comparaisons illustratives entre les valeurs réelles et les valeurs prédites par BP et RSM

Valeurs prédites par le réseau BP (Réseau de neurones artificiels avec algorithme de rétropropagation, appelé réseau BP en abrégé) ils ont trouvé :

$x_1=0.1702$, $x_2=22.4908$, $x_3=23.896$ 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.

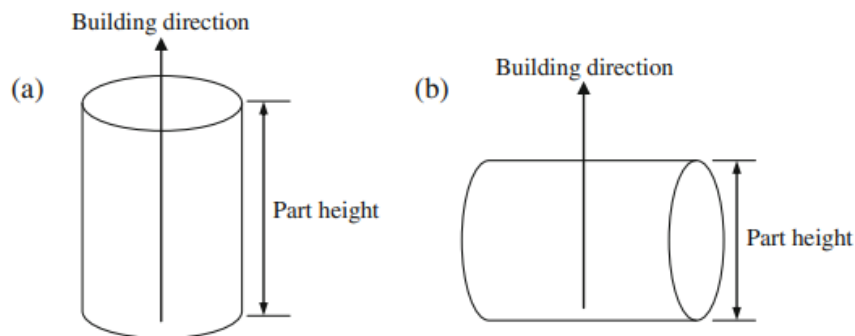


Figure. 18 : Impact de l'orientation de construction

Le premier objectif était l'écart de volume théorique (TDV ; theoretical volume deviation) qui est basé sur un calcul le long de chaque direction de construction basé sur la décomposition du volume. Le deuxième objectif était la hauteur partielle. L'étape envisagée a permis d'étudier massivement les objectifs d'optimisation dans l'espace directionnel. Afin d'étudier l'effet concurrent de ces deux critères, ils ont utilisé un front de Pareto (Pareto GA algorithm)[50].

Chapitre I : Recherche Bibliographique

W. Rattanawong et al, Les auteurs ont développé un système mathématique pour l'orientation de construction de composants fabriqués par des machines de prototypage rapide afin d'évaluer l'erreur volumétrique (VE) produite pendant la fabrication.

L'approche a été développée en deux parties. Le premier, pour les volumes primitifs tels que les cylindres, les hémisphères, les cônes, les cubes et les pyramides. Les deuxièmes parties ont été réalisées à partir de la combinaison de ces caractéristiques.

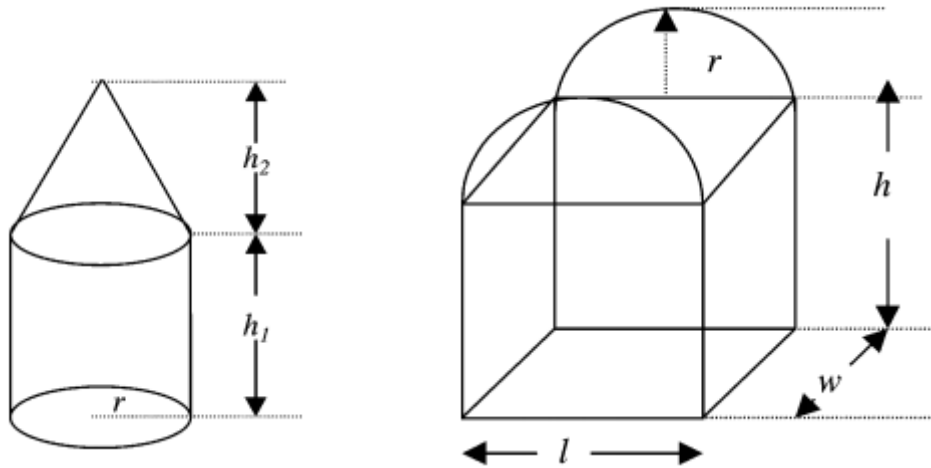


Figure. 19 : Piece 1, Piece 2

Le système développé permet de montrer graphiquement l'erreur volumétrique à différentes orientations et recommande la meilleure orientation dans laquelle les pièces présentent le moins d'erreur volumétrique (VE).

Ils ont trouvé :

La moindre erreur volumétrique pour le cylindre et le cube, l'orientation de construction recommandée est 0 et 90.

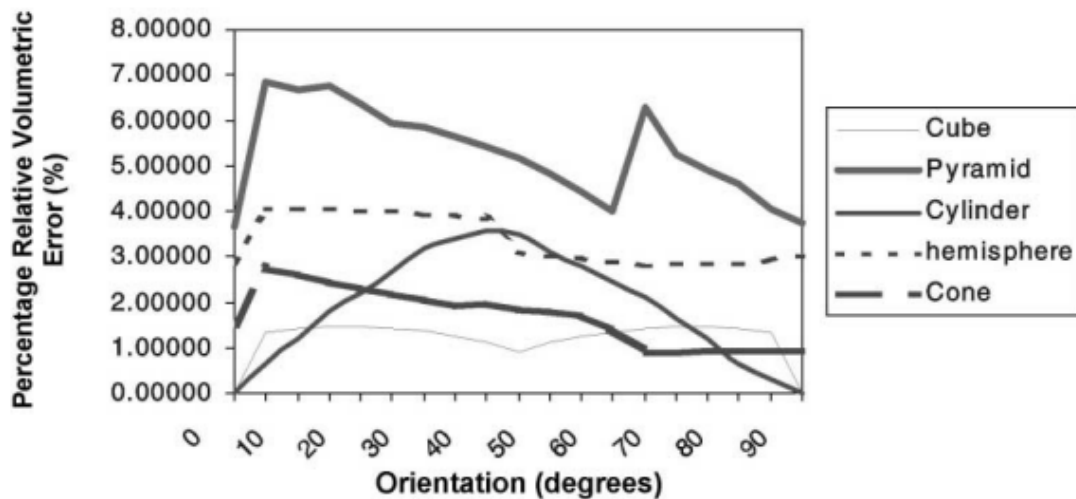


Figure. 20 : Variation des VE relatifs pour des formes primitives

L'erreur volumique (VE) relatif théorique calculé a été trouvé, le minimum est dans le cas des cônes hémisphère et pyramide dans lesquels l'orientation recommandée était de 64 degrés.

L'erreur de volume relative théorique était la plus faible à 90 degrés pour la pièce numéro 1, 0 et 90 degrés était la meilleure orientation de construction pour la pièce 2.

Pour les entités telles que la pyramide et l'hémisphère, l'orientation optimale est affectée par l'emplacement et l'orientation de ces entités sur le composant [51].

Sushmit Chowdhury et al, ont développé une nouvelle méthodologie en deux étapes pour la fabrication additive afin d'optimiser la qualité des pièces et la fabricabilité du processus.

Le modèle d'optimisation est utilisé pour déterminer l'orientation de construction optimale par rapport aux métriques de mesure de la qualité de la pièce, y compris l'erreur de cuspide (cusp error), les problèmes de fabrication pour les caractéristiques géométriques telles que les régions minces et les petites ouvertures fusibles, et les paramètres de la structure de support. Une méthodologie de compensation thermique a été intégrée pour minimiser la déformation non uniforme des composants causée par le réchauffement et le refroidissement du filament pendant le processus de fabrication additive. Tous ces paramètres affectent la conformité de la conception. Une méthodologie de compensation géométrique basée sur un réseau de neurones artificiels a été appliquée sur la pièce après la détermination de l'orientation optimale pour apporter des modifications géométriques afin de contrer les effets thermiques résultant du processus de fabrication additive.

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Le principe de fonctionnement de l'ANN est d'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 Toolbox. $[x \ y \ z]$ sont les coordonnées 3D d'un seul nœud sur la pièce, et $[x' \ y' \ z']$ sont les coordonnées du même nœud dans son état déformé. L'emplacement du nœud déformé, $[x' \ y' \ z']$ est présenté en entrée du réseau.

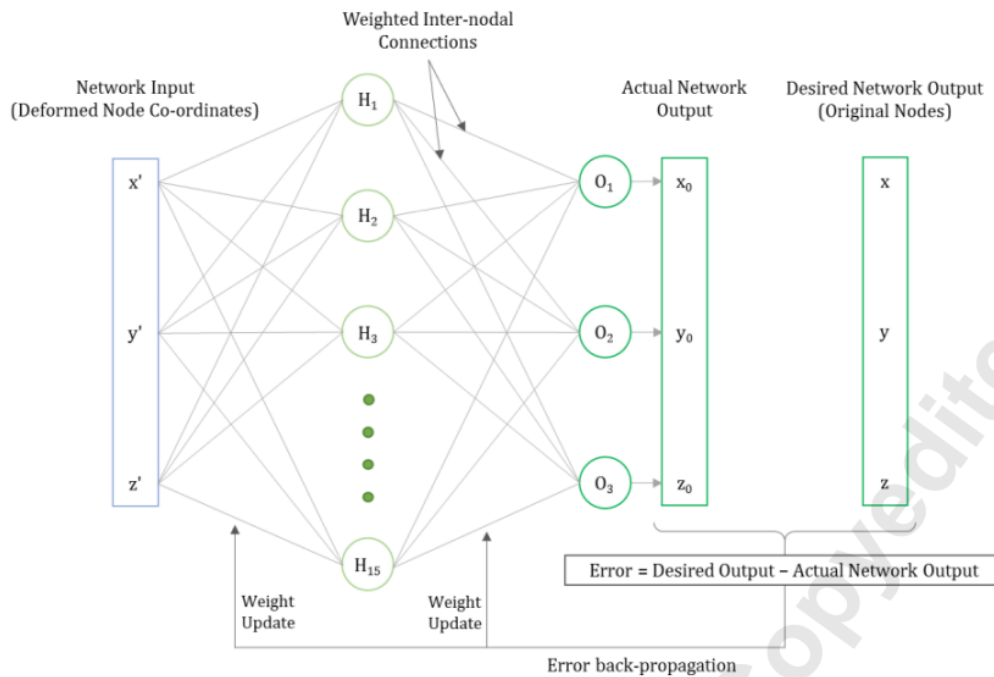


Figure. 21 : Schéma d'entraînement du modèle de compensation géométrique basé sur l'ANN

Tandis que l'emplacement du nœud d'origine $[x \ y \ z]$ est présenté comme la sortie souhaitée correspondante. Lorsque la géométrie CAO a été compensée, ils ont appliqué le réseau formé sur la géométrie de la pièce STL pour obtenir une conception de pièce compensée compatible avec la machine AM.

En utilisant la fonction `stl-write-MATLAB`, ils ont généré le modèle STL complet

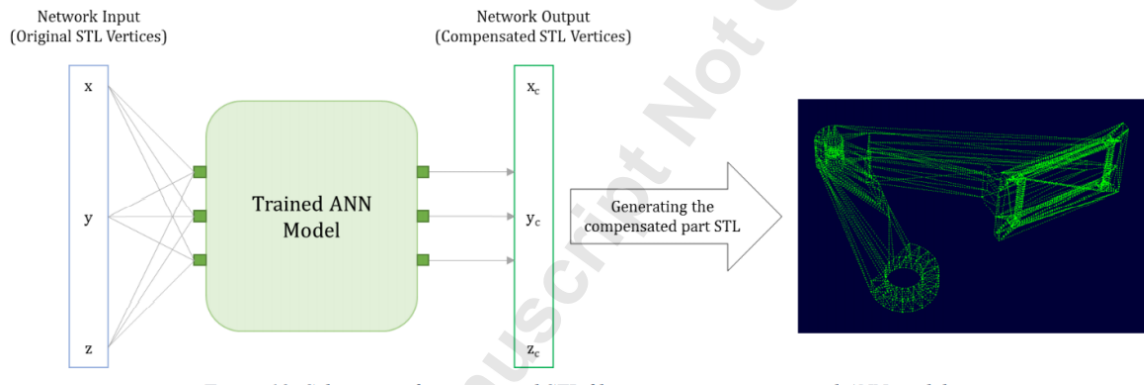


Figure. 22: Schematic of compensated STL file generation using trained ANN model

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

Long Jiang et al, L'objectif de leur étude était d'optimiser la topologie de la conception avec une nouvelle méthode d'ensemble de niveaux paramétriques à distance régularisée qui fournit une représentation « basée sur les limites » de la conception pour gérer les changements de forme et de topologie. Un cadre de calcul en synthétisant 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.

L'approche intègre la conception et la fabrication rationnelles pour réduire la complexité du processus de préfabrication coûteux en calcul. Les modèles simples étaient une poutre en porte-à-faux 3D de forme libre et une méta-structure à plusieurs échelles, de sorte que l'approche proposée est efficace à la fois pour les structures à un seul matériau mais aussi pour les structures multi-échelles et multifonctionnelles. Réduire le coût de calcul de la préfabrication sans affecter l'intention de conception d'origine ni sacrifier la fonctionnalité d'origine[53].

Anoop Kumar Sood et el, Le but de leur travail était d'étudier l'effet des paramètres de traitement, y compris l'épaisseur de la couche (A), l'orientation (B), l'angle de trame (C), la largeur de trame (D), l'entrefer (E) sur la précision dimensionnelle des pièces fabriquées par le processus de modélisation par dépôt fondu (FDM). les spécimens fabriqués ont été fabriqués avec du matériau ABSP400 (acrylonitrile-butadiène-styrène).

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Réseau orthogonal L27 (313) basé sur le plan d'expérience de Taguchi, cinq facteurs chacun à trois niveaux et quatre interactions ont été considérés.

Tableau.5 : les facteurs et leurs niveaux

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, ils ont utilisé le réseau de neurones artificiels ANN avec algorithme de rétro-propagation ; l'avantage de cette approche est qu'un modèle peut être construit très facilement sur la base des données d'entrée et de sortie et entraîné pour prédire avec précision la dynamique du processus. Chacun des paramètres a été caractérisé par un neurone et par conséquent la couche d'entrée dans la structure ANN a cinq neurones. En utilisant le grade de relation de gris, ils ont déterminé le niveau de facteur optimal comme A2(de 0,178 mm), B1(0), C1(0), D2 (0,4564 mm), E3(0,008 mm) comme maximisation du grade de relation de gris.

Il est constaté que le retrait est dominant le long de la longueur et de la largeur de la pièce d'essai où l'épaisseur est toujours supérieure à la valeur souhaitée, et le test ANOVA a montré que les interactions entre BXC, BXD, BXE sont significatives.

*Pour minimiser le changement en pourcentage de la longueur, une épaisseur de couche plus élevée (0,254 mm), une orientation 0, un angle de trame maximum (60), une largeur de trame moyenne (0,4564 mm) et un entrefer maximum (0,008 mm) sont souhaitables.

*Pour minimiser le pourcentage de changement de largeur, un angle de trame moyen (30) et un entrefer (0,004 mm) donneront le résultat souhaité. Les niveaux de facteur restants sont les mêmes que pour la variation en pourcentage de la longueur.

Une valeur inférieure de l'épaisseur de la couche (0,127 mm), de l'orientation (0), de l'angle de trame (0) et 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.

Ils en ont déduit qu'il existe un grand nombre de facteurs conflictuels indépendamment ou en interaction avec d'autres qui peuvent influencer la précision dimensionnelle [54].

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Rajit Ranjan et al, ont proposé une nouvelle méthodologie de conception qui peut aider les concepteurs à créer des pièces lors de l'utilisation de la fabrication additive (pour 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 de fabrication additive. Les directives de conception développées ont adopté deux cas qui peuvent aider les concepteurs à créer des conceptions légères entièrement nouvelles qui peuvent être facilement fabriquées à l'aide de processus AM.

Ils ont d'abord développé des algorithmes de calcul pour détecter les caractéristiques qui violent la directive de conception dans laquelle un concept d'indice de productivité (PI) a été introduit pour comparer les conceptions compatibles avec la FA. C'est une méthode utile pour effectuer la validation de la fabrication car elle permet de modifier les conceptions préexistantes et de les modifier 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 additifs légers qui peuvent être fabriqués en utilisant les processus AM avec facilité.

Hauteur de la cuspide (Cusp Height) = Épaisseur de la tranche * $\cos(\theta)$

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

Hauteur de la cuspide = Épaisseur de la tranche * $\sin(\mu)$ Éq. (1)

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 (θ_a) et l'axe du cône (θ_c) 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 développée en utilisant la géométrie analytique Hauteur de la cuspide.

Hauteur de la cuspide (CA) = Épaisseur de la tranche (AB) * $\sin(\theta + \alpha)$ 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 :

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

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

Chapitre I : Recherche Bibliographique

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].

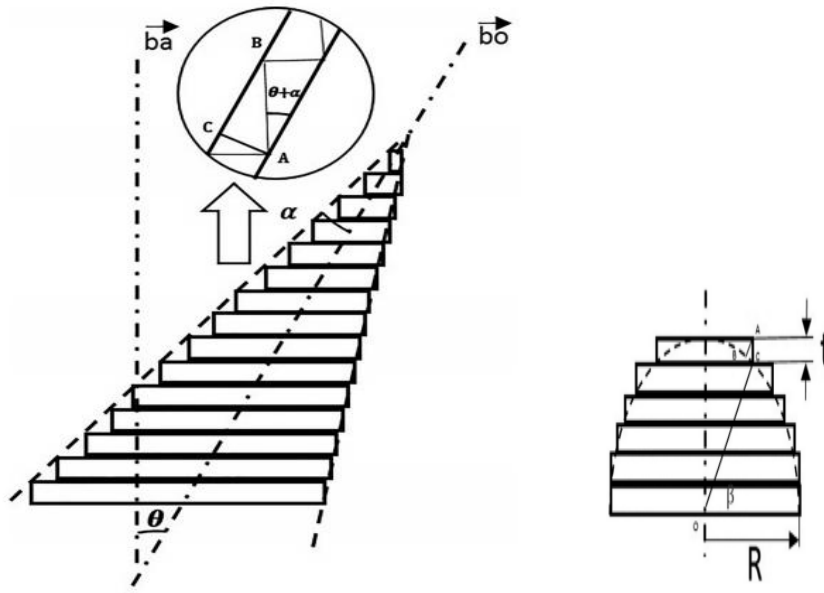


Figure. 23 : une section d'un élément sphérique fabriqué par le procédé AM, la relation entre le rayon de la sphère et la cuspide

Chapitre I : Recherche Bibliographique

Saigopal Nelaturi et al, Ils ont proposé une approche spécifique à l'imprimante pour effectuer une correction de modèle et une analyse d'imprimabilité qui surmonte les écarts en termes de carte d'imprimabilité qui simule le processus d'impression et divise chaque couche imprimée en régions disjointes avec des mesures locales distinctes de taille. L'approche adoptée calcule des modifications ou des corrections de conception pour éliminer les erreurs d'impression, la tranche corrigée peut être topologiquement et géométriquement distincte de la tranche d'origine. Ce qui conduit à visualiser et à interroger les modèles tels que fabriqués, mais simule également le processus pour aider les utilisateurs à décider quel matériau, quelle imprimante 3D et quels paramètres de processus [56].

Chapitre II : Méthodes et process

II.1. La fabrication additive

La fabrication additive (AM) ou la fabrication additive de couches (ALM) est le nom de production industrielle de l'impression 3D, un processus contrôlé par ordinateur qui crée des objets tridimensionnels en déposant des matériaux, généralement en couches.

II.2. 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.

Il existe un certain nombre de processus AM distincts avec leurs propres normes, notamment :

II.3. Types de méthodes de fabrication additive

II.3.1. jet de liant

Le jet de liant utilise des matériaux en poudre - tels que des métaux, des composites, du sable et de la céramique - qui sont étalés pour créer un lit de poudre fin selon une méthode similaire à celle utilisée dans le frittage sélectif par laser (SLS). Sauf que là où SLS utilise un laser pour coller des couches successives de poudre, le jet de liant utilise à la place une tête d'impression industrielle qui dépose sélectivement un liant liquide sur la poudre. De cette manière, des couches de matériau sont construites sur la base d'un fichier CAO jusqu'à ce que l'épaisseur de couche souhaitée soit atteinte et que l'objet 3D final soit complet. Une fois formées, les pièces doivent être durcies (si plastique) ou frittées (si métal) pour finir la pièce.

Parfois appelé "jet d'encre", le jet de liant est une méthode économique et à faible consommation d'énergie pour fabriquer des pièces à partir de supports en poudre. Utilisant moins d'énergie que des méthodes comparables en raison de l'absence de lasers dans le processus, le jet de liant utilise également des matériaux abordables, tandis que les temps de production rapides entraînent de faibles coûts d'exploitation par pièce produite, ce qui le rend idéal pour une production de masse précise et évolutive de petits mais objets précis.

Comment ça fonctionne ?

II.3.1.1. Les étapes opératoires du procédé de projection de liant :

Première étape :

Tout d'abord, une lame de revêtement étale une fine couche de matériau en poudre sur la plate-forme de fabrication.

Deuxième étape :

Un chariot de buses à jet d'encre, similaires à celles utilisées pour les imprimantes 2D de bureau, se déplace à travers le lit et libère sélectivement des gouttelettes de liant pour lier les particules de poudre ensemble. Avec le jet de liant couleur, les encres colorées sont également déposées à côté des liants lors de cette étape. Chaque goutte mesure environ 80 μm de diamètre, ce qui permet d'atteindre une bonne résolution.

Troisième étape :

Une fois la première couche terminée (basée sur une conception CAO), la plate-forme de construction descend et la surface est recouverte de plus de poudre.

Quatrième étape :

Répétez les étapes deux et trois jusqu'à ce que la dernière partie soit terminée.

Cinquième étape :

Une fois la construction terminée, la pièce doit pouvoir durcir et gagner en résistance, prête à l'emploi, après quoi de l'air sous pression peut être utilisé pour éliminer tout excès de poudre.

Sixième étape :

Certains matériaux nécessiteront une étape de post-traitement pour finir la pièce. Les pièces métallisées par jet de liaison nécessitent un traitement thermique (par exemple un frittage) ou une infiltration avec un métal à bas point de fusion, tel que le bronze. Cette étape est due au fait que certains matériaux quittent l'imprimante dans ce qu'on appelle un état «vert», ce qui signifie qu'ils ont de mauvaises propriétés mécaniques et peuvent être cassants et très poreux. Les pièces moulées au sable ne nécessitent généralement pas d'étape de post-traitement, mais les pièces colorées sont infiltrées d'acrylique pour améliorer l'éclat des couleurs.

II.3.1. 2. Paramètres d'impression

Presque tous les paramètres de processus utilisés dans la projection de liant sont prédéfinis par les fabricants de machines. Cette automatisation rend le processus facile à utiliser, mais la hauteur de couche typique varie en fonction du matériau utilisé.

Les modèles couleur utilisent généralement une hauteur de couche de 100 microns tandis que les pièces métalliques n'utilisent qu'une hauteur de couche de 50 microns. Les matériaux de moulage au sable utilisent généralement une hauteur de couche beaucoup plus élevée entre 200 et 400 microns.

II.3.1. 3. Matériaux

Les métaux et les céramiques sont des matériaux largement utilisés dans les applications de projection de liant, bien qu'il soit également possible d'utiliser d'autres matériaux en poudre, tels que le sable. De plus, des polymères comme l'ABS ou le PLA peuvent également être utilisés dans les opérations de projection de liant.

Les alliages métalliques, dont le titane, les aciers inoxydables et le cuivre, sont régulièrement utilisés en raison de leurs caractéristiques qui permettent la fabrication de pièces résistantes mais légères.

En dehors des applications industrielles, les procédés de type jet de liant ont même trouvé leur place dans la boulangerie, avec des entreprises comme The Sugar Lab utilisant l'impression 3D avec des granulés de sucre et d'eau pour créer des structures culinaires complexes.

II.3.1. 4. Avantages

Le principal avantage du jet de liant est que le processus se déroule à température ambiante, ce qui signifie que la déformation des pièces associée aux effets thermiques n'est pas un problème. En conséquence, le volume de construction des machines de projection de liant est parmi les plus importants de toutes les technologies d'impression 3D. Des machines plus grandes (jusqu'à 2200 x 1200 x 600 mm) sont généralement utilisées pour produire des moules en sable. Les systèmes de jet de liant métallique sont plus petits (jusqu'à 800 x 500 x 400 mm) mais toujours plus grands que les systèmes DMSL/SLM, ce qui permet de construire plusieurs pièces simultanément.

Le jet de liant ne nécessite également aucune structure de support. Au lieu de cela, la poudre elle-même fournit son propre support au fur et à mesure que la construction se développe. Non seulement cela supprime le besoin de post-traitement pour supprimer les supports, mais cela permet également de positionner les pièces de manière à maximiser le volume de construction.

Le jet de liant produit des pièces métalliques avec une faible rugosité de surface (aussi faible que $Ra\ 3\ \mu m$ si une étape de grenaillage est utilisée) par rapport au DMLS/SLM ($Ra\ 12-16\ \mu m$). Une rugosité de surface aussi faible est bénéfique pour les pièces avec des canaux internes et des géométries qui peuvent être difficiles à post-traiter.

La projection de liant est également plus rapide et plus économique que de nombreuses autres techniques de fabrication additive, car elle permet une construction rapide à l'aide de plusieurs buses ou trous de tête d'impression pour créer plusieurs pièces à la fois.

II.3.1. 5. Désavantage

Malgré les avantages du jet de liant, il existe également des défis associés au processus.

Les principaux problèmes associés au jet de liant sont la précision et la tolérance, qui peuvent être difficiles à prévoir en raison du retrait des pièces lors des étapes de post-traitement. Par exemple, les pièces métalliques peuvent rétrécir jusqu'à 2 % pour les petits objets et plus de 3 % pour les gros objets en raison de l'infiltration. Le frittage peut entraîner un retrait moyen de 20 % et également provoquer un gauchissement causé par le frottement entre la plaque du four et la surface inférieure de la pièce. La chaleur utilisée lors du frittage peut également ramollir la pièce et provoquer le gauchissement des zones non supportées sous leur propre poids. Bien que ces problèmes puissent être compensés pendant la construction, le retrait non uniforme peut être plus difficile à prendre en compte.

Les pièces pulvérisées de liant peuvent également présenter de mauvaises propriétés mécaniques en raison de la porosité interne. Cette porosité peut être réduite par frittage (production de pièces denses à 97 %) ou par infiltration (pièces denses à 90 %), mais elle peut laisser des vides qui conduisent à l'amorçage de fissures. En conséquence, les résistances à la rupture et à la fatigue peuvent être un problème.

Compte tenu des avantages et des inconvénients du procédé de projection de liant, il est clair qu'il est plus adapté à certaines applications qu'à d'autres.

Le jet de liant est utilisé pour la production de prototypes en couleur, de pièces métalliques à faible coût et pour la production de gros noyaux et moules en sable. En raison du faible coût

Chapitre II : Méthodes et process

et des temps de production rapides, le processus est même utilisé pour fabriquer des accessoires pour l'industrie cinématographique et utilisé par les systèmes d'impression mobiles pour produire des pièces de rechange sur le terrain pour les troupes de l'armée. L'armée américaine. Le jet de liant a également été utilisé dans la production de bijoux.

II.3.1.6. La précision du jet de liant :

La précision du jet de liant dépend des matériaux utilisés pour le processus et de l'introduction de la couleur dans la pièce.

De plus, les matériaux qui nécessitent un post-traitement peuvent rétrécir en conséquence (voir « inconvénients » ci-dessus), bien que ce rétrécissement soit souvent pris en compte lors de la phase de construction.

Par exemple, la précision dimensionnelle du métal, de la couleur ou de la céramique/du sable est :

Précision dimensionnelle :

Métal : $\pm 2 \%$ ou 0,2 mm (jusqu'à $\pm 0,5 \%$ ou $\pm 0,05$)

Pleine couleur : $\pm 0,3$ mm

Sable : $\pm 0,3$ mm

Le jet de liant utilise un agent liant déposé sur des couches de poudre. Cet agent agit comme un adhésif pour lier les poudres ensemble avant que plus de poudre ne soit ajoutée sur le dessus et liée pour constituer une pièce couche par couche.

Le processus ne nécessite pas l'utilisation de structures de support mais peut nécessiter un post-traitement, en fonction des matériaux utilisés. De plus, des liants colorés peuvent être utilisés pour créer des pièces ou des prototypes en couleur.

Compatible avec une gamme de matériaux, les étapes de fabrication exactes différeront en conséquence. Les pièces métalliques nécessiteront un frittage ou un recuit pour lier correctement les particules de poudre, mais les moules en sable créés avec le jet de liant seront prêts à l'emploi immédiatement. Bien que, dans tous les cas, vous devrez retirer l'excès de poudre de la construction avant qu'elle ne soit terminée.

Les avantages du jet de liant comprennent moins de déformation car il a lieu à température ambiante, ainsi qu'être moins coûteux que de nombreuses autres méthodes et capable de fournir une production à volume élevé.

Cependant, les pièces ont tendance à n'avoir que des propriétés mécaniques modérées et une porosité élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent ne pas convenir à toutes les exigences.

II.3.2. Le dépôt d'énergie dirigée (DED)

Le dépôt d'énergie dirigée est une méthode d'impression 3D qui utilise une source d'énergie focalisée, telle qu'un arc plasma, un laser ou un faisceau d'électrons pour faire fondre un matériau qui est simultanément déposé par une buse. Comme avec d'autres processus de fabrication additive, les systèmes DED peuvent être utilisés pour ajouter de la matière à des composants existants, pour des réparations ou occasionnellement pour construire de nouvelles pièces.

Le processus DED est connu sous d'autres noms, notamment Laser Engineered Net Shaping (LENS), Direct Metal Deposition (DMD), Electron Beam Additive Manufacturing (EBAM), Directed Light Fabrication et 3D Laser Cladding, selon l'application exacte ou la méthode utilisée.

II.3.2. 1. Fonctionnement de dépôt d'énergie dirigée

Le processus DED commence par la création d'un modèle 3D à l'aide d'un logiciel de CAO, Ce modèle est ensuite découpé en couches avec un logiciel pour représenter les couches nécessaires à la création de la pièce finie.

Le dépôt d'énergie dirigée fonctionne en déposant un matériau qui a été fondu sur une surface spécifiée où il se solidifie, en fusionnant des matériaux pour former une structure. Les machines DED utilisent généralement une buse montée sur un bras multi-axes qui peut se déplacer dans plusieurs directions, permettant un dépôt variable. Le processus est généralement effectué dans une chambre contrôlée avec des niveaux d'oxygène réduits. Avec les systèmes à base de faisceaux d'électrons, le processus est effectué sous vide, tandis que les systèmes à base de laser utilisent une chambre entièrement inerte lorsqu'ils travaillent avec des métaux réactifs. Il est également possible d'utiliser un gaz de protection pour envelopper la pièce et éviter la contamination lors de l'impression 3D métal.

Le DED utilise une source de chaleur pour faire fondre une poudre ou un fil lorsqu'il est déposé sur la surface d'un objet. Alors que la poudre offre une plus grande précision de dépôt, le fil est plus efficace en ce qui concerne l'utilisation du matériau.

Le matériau est ajouté couche par couche et se solidifie à partir du bain de fusion pour créer de nouvelles fonctionnalités. Les couches ont généralement une épaisseur de 0,25 mm à 0,5 mm. Les temps de refroidissement des matériaux sont très rapides à environ 1000-5000 °C par seconde. Le temps de refroidissement affecte la structure granulaire finale bien que le chevauchement dans le matériau puisse provoquer une refusion, ce qui crée une microstructure uniforme mais alternée.

Dans la plupart des cas, l'objet reste dans une position fixe pendant que le bras se déplace pour déposer le matériau. Cependant, cela peut être inversé avec l'utilisation d'une plateforme, qui se déplace tandis que le bras reste immobile.

II.3.2. 2. Matériaux

Généralement utilisé pour travailler sur des pièces métalliques, ce procédé peut également être utilisé avec des polymères et des céramiques. Presque tous les métaux soudables peuvent être fabriqués de manière additive à l'aide de DED, y compris l'aluminium, l'inconel, le niobium, l'acier inoxydable, le tantale, le titane et les alliages de titane et le tungstène.

II.3.2. 3. Les avantages du DED :

Les avantages du dépôt d'énergie dirigée incluent la capacité de contrôler la structure du grain, ce qui permet d'utiliser le procédé pour la réparation de pièces fonctionnelles de haute qualité. Cela nécessite un équilibre entre précision et vitesse, car des vitesses plus élevées correspondent à un niveau de précision inférieur et à une microstructure moins cohérente.

Le DED permet la production de pièces relativement grandes avec un minimum d'outillage.

Ce processus permet également la création de composants avec des gradients de composition ou des structures hybrides utilisant plusieurs matériaux avec des compositions différentes

II.3.2. 4. Inconvénients du DED :

La finition créée variera en fonction du matériau utilisé et peut nécessiter un post-traitement pour obtenir l'effet souhaité. L'utilisation de matériaux pour le DED est encore relativement limitée et les processus basés sur la fusion nécessitent encore des recherches supplémentaires pour les faire passer à une utilisation courante.

II.3.2. 5. Applications du DED

Le dépôt d'énergie dirigée peut être utilisé pour fabriquer des pièces, mais est généralement utilisé pour la réparation ou pour ajouter de la matière à des composants existants. D'une manière générale, les demandes de DED se répartissent en trois catégories ; pièces de forme quasi nette, ajouts de fonctionnalités et réparation.

II.3.2. 6. Les catégories de DED

II.3.2. 6. 1. Pièces de forme quasi nette

DED peut produire des pièces similaires à celles créées avec un usinage conventionnel. Cela signifie que, pour que DED soit choisi, ces pièces doivent être destinées à des applications où la fabrication conventionnelle est coûteuse ou lente. Cela rend le processus idéal pour produire des pièces usinées à partir de métaux coûteux ou difficiles à couper. En conséquence, DED se prête à la production d'articles tels que des supports aérospatiaux, des réservoirs et des nervures. La fabrication de pièces Near-Net-Shape a tendance à être principalement utilisée dans les secteurs de l'aérospatiale, de la défense, de l'énergie et de la marine. Bien que ce processus puisse offrir une conception de produit améliorée, un gain de temps et des réductions de coûts, il n'est pas considéré comme adapté aux petites applications à volume élevé en raison de la structure de prix fixe et des exigences de post-traitement.

II.3.2. 6. .2. Ajout de fonctionnalités

Étant donné que DED peut être utilisé pour imprimer sur des pièces existantes, il est idéal pour ajouter des fonctionnalités supplémentaires aux pièces existantes. Les progrès de la robotique et des logiciels multi-axes ont permis de construire des formes de plus en plus complexes, ce qui est particulièrement utile si la fonctionnalité ajoutée est coûteuse à produire avec des techniques conventionnelles.

Le DED permet également d'utiliser plusieurs métaux en changeant la matière première pendant l'impression. Pour y parvenir avec succès, il existe des considérations techniques importantes concernant la conception et les propriétés de liaison pour des métaux différents.

II.3.3. L'extrusion de matériaux

L'extrusion de matériaux est une technique de fabrication additive (FA) qui dépose un filament continu de matériau composite ou thermoplastique pour construire des pièces 3D couche par couche. Le filament est alimenté à partir d'une bobine à travers une buse d'extrusion chauffée, qui chauffe le matériau et le dépose sur une plate-forme de construction. Bien qu'il ne soit pas aussi précis ou rapide que d'autres processus de fabrication additive, la technologie d'extrusion de matériaux et les matériaux sont peu coûteux, ce qui en fait la méthode d'impression 3D la plus populaire pour une utilisation domestique de qualité amateur. Dans un cadre industriel, l'extrusion de matériaux est utilisée pour le prototypage rapide.

Chapitre II : Méthodes et process

Le processus d'extrusion de matériau fonctionne comme suit :

Une buse chauffée dépose le matériau dans une plate-forme de construction pour créer la première tranche transversale de l'objet final

D'autres couches sont ajoutées au besoin, chaque couche fusionnant avec la dernière soit à la suite d'un contrôle de la température, soit par l'utilisation d'agents chimiques.

II.3.3. .1. Avantages

L'extrusion de matériaux offre une gamme d'avantages, comme suit :

- ☐ Faibles coûts d'installation et de fonctionnement
- ☐ Large choix de supports d'impression disponibles
- ☐ Facile à apprendre et convivial
- ☐ Capable de produire des pièces avec une tolérance d'impression de +/- 0,1 (+/- 0,005")
- ☐ Temps d'impression relativement rapide pour les pièces fines ou petites
- ☐ Processus à basse température
- ☐ L'équipement est de petite taille et peut être utilisé à la maison
- ☐ Aucune surveillance requise

II.3.3. 2. Désavantages :

Malgré les nombreux avantages, il existe également un certain nombre d'inconvénients associés au processus d'extrusion de matériaux, comme suit :

- Les supports imprimés sont toxiques
- Le processus peut laisser des lignes de calque visibles
- La création de pièces de résolution plus fine ou le dépôt sur une large zone d'impression peut augmenter considérablement le temps d'impression
- La tête d'extrusion doit rester en mouvement pour éviter que le matériau déposé ne rebondisse
- Peut nécessiter du matériel de soutien pour certaines structures
- Les pièces sont susceptibles de se déformer, de se délaminer et d'autres problèmes liés aux fluctuations de température
- Tend vers une faible résistance des pièces le long de l'axe Z vertical.

II.3.3. 3.Applications

L'extrusion de matériaux est utilisée dans les secteurs commerciaux, de la recherche et des amateurs en raison de sa faible complexité, de sa facilité de mise en œuvre et de sa compatibilité avec les matériaux disponibles dans le commerce. Les applications incluent la création de prototypes et de systèmes d'ingénierie fonctionnelle, y compris à des fins cliniques.

II.3.3. 4. Exemples des exemples de technologie d'extrusion de matériaux

Des exemples de technologie d'extrusion de matériaux comprennent la fabrication de filaments composites (CFF), la fabrication de filaments fondus (FFF) et la modélisation par dépôt fondu (FDM).

Semblable à d'autres processus d'impression 3D, l'extrusion de matériau consiste à tirer le matériau à travers une buse où il est chauffé et déposé couche par couche. La buse est capable de se déplacer horizontalement le long d'une plate-forme, qui monte et descend au fur et à mesure que chaque couche est déposée. Afin d'obtenir des résultats précis, le matériau extrudé doit être alimenté à travers la buse sous forme de flux constant sous une pression constante.

Avec CFF, deux buses de tête d'impression sont utilisées à la fois, l'une suivant le processus d'extrusion de matériau habituel pour créer la coque externe et la matrice interne de la pièce, tandis que l'autre dépose un brin continu de fibre composite à l'intérieur des pièces imprimées pour ajouter de la résistance. Cela peut créer des pièces avec une résistance comparable au métal.

L'extrusion de matériaux est couramment utilisée sur les imprimantes 3D domestiques et de loisir bon marché, bien qu'elle se retrouve également dans des environnements plus industriels, comme pour la construction de bâtiments par extrusion de béton ou pour la fabrication de tissus et d'organes humains pour la profession médicale.

II.3.3. 5. A quoi sert l'extrusion de matière ?

La technologie de fabrication additive par extrusion de matériaux consiste à faire passer un filament continu de matériau thermoplastique ou composite à travers une buse d'extrusion pour construire des pièces 3D.

Le filament en plastique est chauffé et déposé sur une plate-forme de construction en couches, l'extrusion de matériau étant couramment utilisée dans les environnements

domestiques, de fabrication et industriels où il est utilisé pour créer des prototypes non fonctionnels et un prototypage rapide rentable pour les itérations d'un produit.

II.3.3. 6. Les matériaux utilisés dans l'extrusion de matériaux :

L'extrusion de matériaux peut s'adapter à l'utilisation d'une gamme de matériaux, les plus populaires étant les thermoplastiques comme l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), les polyamides aliphatiques (PA, alias Nylon), le polystyrène à fort impact (HIPS), l'acide polylactique (PLA) et polyuréthane thermoplastique (TPU).

Plus récemment, des matériaux plastiques tels que le polyéther éther cétone (PEEK) et le polyétherimide (PEI) ainsi que des matériaux pâteux tels que la céramique, le béton et le chocolat ont été extrudés avec succès à l'aide de cette technique.

L'extrusion de matière peut également être utilisée avec des matériaux composites tant que la matière thermoplastique de base est présente en quantité suffisante pour garantir la fusion entre les couches. Cela signifie que des matériaux tels que le bois, le métal et même la fibre de carbone peuvent être inclus dans les pièces imprimées.

L'extrusion de matériaux est une technique de fabrication additive (ou d'impression 3D) couramment utilisée qui est utilisée à la fois au niveau national par les amateurs et dans les environnements industriels. Capable de déposer une gamme de matériaux pour construire des pièces 3D, il fonctionne en déposant des couches individuelles de matériau à travers une buse chauffée (ou des buses) sur une plate-forme de construction.

Bien que d'autres techniques de fabrication additive soient plus rapides à produire des objets plus grands et offrent également un niveau de qualité supérieur à l'extrusion de matériaux, cette technique est encore largement utilisée pour le prototypage en raison de sa facilité d'utilisation et des coûts d'installation et d'exploitation relativement peu coûteux.

II.3.4. Fusion sur lit de poudre (PBF)

La fusion sur lit de poudre (PBF) est un processus de fabrication additive et fonctionne sur le même principe de base en ce que les pièces sont formées en ajoutant de la matière plutôt qu'en la soustrayant par des opérations de formage conventionnelles telles que le fraisage. Le processus PBF commence par la création d'un modèle CAO 3D, qui est numériquement « découpé » en plusieurs couches discrètes. Pour chaque couche, un chemin de balayage de source de chaleur est calculé qui définit à la fois le contour de la limite et une certaine forme

de séquence de remplissage, souvent un motif raster puisque la source de chaleur est généralement un faisceau d'énergie (par exemple un laser).

Chaque couche est ensuite collée séquentiellement les unes sur les autres. Les processus PBF étalent le matériau en poudre sur la couche précédemment jointe, prêt pour le traitement de la couche suivante, de sorte que la fabrication est discrète plutôt que continue (bien que chaque couche soit entièrement consolidée en couches adjacentes). Une trémie fournit le matériau en poudre qui est ensuite étalé uniformément sur la zone de la plate-forme de construction du lit de poudre via un rouleau ou une lame. L'épaisseur optimale de chaque couche de poudre étalée dépend des conditions de traitement et du matériau utilisé, mais des valeurs de 25 à 100 μm sont courantes.

II.3.4. 1. Les différents types de fusion sur lit de poudre :

Il existe plusieurs variantes de PBF, qui sont désignées par la source de chaleur utilisée et le type de matériau assemblé. Les deux types dominants sont le faisceau laser (PBF-LB) et le faisceau d'électrons (PBF-EB) et ont des technologies brevetées sous chacun. Chaque variante offre des avantages et des inconvénients, de sorte que l'adéquation doit être évaluée application par application. Des exemples sont listés ci-dessous :

II.3.4. 1. 1. Frittage Laser Sélectif (SLS)

SLS est un terme de marque et est PBF-LB. Le processus fritte généralement des matériaux polymères en poudre tels que le nylon et la polyéthercétonecétone (PEKK).

II.3.4. 1. 2. Fusion laser sélective (SLM)

SLM est un terme de marque et comparable à SLS en ce qu'un laser est utilisé pour fournir de la chaleur (donc tombant sous PBF-LB), mais le laser fait fondre complètement la poudre plutôt que de la fritter. Le procédé s'applique aux poudres métalliques telles que : les alliages d'aluminium ; titane et ses alliages; et acier inoxydable. Des métaux plus exotiques (par exemple, le tungstène) peuvent être traités mais ont tendance à être davantage basés sur l'application. Une atmosphère inerte (généralement de l'argon) est incluse dans la chambre de construction pour empêcher l'oxydation et/ou la nitruration du matériau consolidé.

II.3.4. 1. 3. Frittage laser direct de métal (DMLS)

DMLS est une marque commerciale d'EOS GmbH, une société allemande de fabrication additive, dont le fonctionnement est similaire à celui de SLM. Bien que le terme « frittage »

soit utilisé, une fusion complète est obtenue. TWI a la particularité d'être la première entité britannique à disposer d'un processus certifié de fabrication via cette technologie.

II.3.4. 1. 4. Fusion par faisceau d'électrons (EBM)

L'EBM est un procédé comparable au SLM, remplaçant le laser par un canon à électrons (d'où un procédé PBF-EB). En raison de l'utilisation d'un faisceau d'électrons, la chambre de construction utilise un vide au lieu d'une atmosphère inerte, bien qu'une petite quantité de gaz inerte (généralement de l'hélium) soit utilisée pour permettre un meilleur contrôle du processus.

II.3.4. 2. Post-traitement

Le post-traitement des pièces PBF est généralement nécessaire pour mieux les activer dans leurs applications prévues : cela est particulièrement vrai pour les métaux et les alliages. Cela peut se produire pour les raisons suivantes :

- Améliorer les propriétés mécaniques (via un traitement thermique)
- Réduire les contraintes résiduelles (via un traitement thermique)
- Améliorer la finition de surface (par polissage chimique ou laser et/ou grenaillage abrasif)

II.3.4. 3. Les avantages de la fusion sur lit de poudre

Les avantages de la fusion du lit d'alimentation incluent :

- Réduction du gaspillage de matériel et des coûts (rapport achat-vol supérieur)
- Amélioration des temps de développement de la production
- Activation du prototypage rapide et de la production à faible volume
- Capable de construire des pièces fonctionnellement graduées
- Pièces entièrement personnalisées lot par lot, éliminant les conceptions fixes
- Bonne résolution par rapport aux autres procédés de fabrication additive
- Recyclage efficace de la poudre non fondue
- Capacité à joindre de nombreuses qualités de matériaux, y compris la céramique, le verre, les plastiques, les métaux et les alliages
- Élimination du besoin de montages d'usinage

II.3.5. Stratification de feuille

La stratification des feuilles peut être divisée en deux technologies ; la fabrication d'objets laminés (LOM) et la fabrication additive par ultrasons (UAM). La fabrication d'objets stratifiés est adaptée à la création d'objets ayant un attrait visuel ou esthétique et utilise des couches alternées de papier et d'adhésif. UAM utilise le soudage par ultrasons pour assembler des tôles minces ; Procédé basse énergie et basse température, l'UAM peut être utilisé avec différents métaux tels que l'aluminium, l'inox et le titane.

II.3.6. Polymérisation en cuve

Ce processus utilise une cuve de photopolymère de résine liquide pour créer un objet couche par couche. Des miroirs sont utilisés pour diriger la lumière ultraviolette qui durcit les couches successives de résine par photopolymérisation.

II.3.7. Wire Arc Additive Manufacturing (maintenant connu sous le nom de Directed Energy Deposition-Arc (DED-arc))

La fabrication additive à l'arc au fil utilise des sources d'alimentation et des manipulateurs de soudage à l'arc pour créer des formes 3D par dépôt à l'arc. Ce processus utilise couramment du fil comme source de matériau et suit un chemin prédéterminé pour créer la forme souhaitée. Cette méthode de fabrication additive est généralement réalisée à l'aide d'un équipement de soudage robotisé.

II.4. Technologies de fabrication additive

Les technologies AM peuvent être globalement divisées en trois types.

- Le premier est le frittage dans lequel le matériau est chauffé sans être liquéfié pour créer des objets complexes à haute résolution. Le frittage laser direct de métal utilise de la poudre métallique tandis que le frittage sélectif au laser utilise un laser sur des poudres thermoplastiques afin que les particules collent ensemble.
- La deuxième technologie AM fond complètement les matériaux, cela comprend le frittage direct de métal au laser qui utilise un laser pour faire fondre des couches de poudre métallique et la fusion par faisceau d'électrons, qui utilise des faisceaux d'électrons pour faire fondre les poudres.
- Le troisième grand type de technologie est la stéréolithographie, qui utilise un processus appelé photopolymérisation, par lequel un laser ultraviolet est tiré dans une cuve de

résine photopolymère pour créer des pièces en céramique résistantes à la torsion capable de supporter des températures extrêmes.

II.5. 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 polymères utilisés sont sous forme de filaments, tels que l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS), le polyéthylène (PE) ou l'acide polylactique (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. Étudiant 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, ils ont évalué en traction et en flexion les performances mécaniques. 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 coupons 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, L'objectif de leur étude est d'accroître les connaissances sur le processus d'impression 3D CFRTP et utiliser ces connaissances pour améliorer le processus d'impression 3D afin d'obtenir des matériaux CFRTP plus résistants [63]. Dong et al. Expérimenté la propriété 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 élastique et la résistance à la

traction des pièces FDM pourraient être améliorés en utilisant des fibres de Kevlar [64]. Al Abadi et al Étudier 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 coupons 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 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. 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.5.1. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est un matériau solide qui résulte lorsqu'au moins deux substances différentes, chacune avec ses propres caractéristiques, sont combinées pour créer une nouvelle substance dont les propriétés sont supérieures à celles des composants d'origine dans une application particulière.

Le terme composite fait spécifiquement référence à un matériau structural (tel que le plastique) dans lequel un matériau fibreux (tel que le carbure de silicium) est incorporé.

Les caractéristiques remarquables des composites sont obtenues en intégrant les fibres d'une substance dans une matrice hôte d'une autre. La résistance des fibres individuelles peut être exploitée si elles sont intégrées dans une matrice qui agit comme un adhésif, liant les fibres ensemble et donnant de la force au matériau.

Les fibres rigides fournissent une résistance structurelle au composite, tandis que la matrice protège les fibres contre les contraintes environnementales et les dommages physiques et assure la stabilité thermique. La combinaison fibre-matrice réduit également le risque de rupture complète ; si une fibre tombe en panne, la fissure peut ne pas s'étendre à d'autres fibres, tandis qu'une fissure qui commence dans un matériau monolithique (ou unique) continue généralement de se propager jusqu'à ce que ce matériau tombe en panne.

II.5.2. Les différents types de composites renforcés de fibres :

Les composites renforcés de fibres peuvent être classés en quatre groupes selon leurs matrices:

- les composites à matrice métallique (MMC),
- les composites à matrice céramique (CMC),
- les composites carbone/carbone (C/C)
- les composites à matrice polymère (PMC) ou composites polymères.

En ce qui concerne les renforts, il en existe différents types, tels que les fibres de carbone, les fibres de verre, les fibres aramides, les fibres naturelles, etc.

II.5.3. Matériaux composites renforcés de fibres longs

Les plus utilisés en raison de leur légèreté et d'excellentes propriétés mécaniques, sont des matériaux composites de matrice polymère avec des armatures de fibres. Ces matériaux en remplacent d'autres (principalement métalliques) dans les applications où la relation propriétés mécaniques-poids influence de manière décisive les coûts de maintenance du produit.

Les matrices organiques peuvent être thermoplastiques, thermodurcissables ou élastomères.

Les matrices ou résines thermodurcissables sont les plus utilisées dans les matériaux composites à haute performance. Ces résines produisent un produit solide, insoluble et non fixable par une série de réactions chimiques appelées durcissement ou réticulation. En revanche, les thermoplastiques fondent lorsqu'ils sont exposés à la chaleur.

II.5.4. Les principales fibres utilisées comme renforts sont :

- ☐ Fibres de verre
- ☐ Fibres de carbone
- ☐ Fibres de bore
- ☐ Fibres céramiques
- ☐ Fibres métalliques
- ☐ Fibres aramides
- ☐ Fibres naturelles : sisal, chanvre, lin, etc.

Quel que soit le type de matériau dont ils sont faits, les fibres peuvent apparaître sous forme de stratification, de tapis ou de tissus.

Un autre type de produits qui sont incorporés dans le matériau composite fibre-résine sont les charges et les additifs. Ils sont ajoutés dans le but de fournir des caractéristiques particulières au matériau ou de réduire son coût.

Le nombre de produits ajoutés varie en fonction des propriétés que nous voulons atteindre. L'objectif général est d'améliorer la maniabilité et le produit.

II.5.5. Rôle des matrices dans les composites

- Transférer les contraintes entre les fibres
- Fournir une barrière contre un environnement défavorable
- Protéger la surface des fibres de l'abrasion mécanique
- Déterminer la résistance au cisaillement interlaminaire
- Déterminer la tolérance aux dommages des composites
- Déterminer la résistance au cisaillement dans le plan
- Déterminer la processabilité des composites
- Déterminer la résistance à la chaleur des composites

II.5.6. Caractéristiques des matériaux composites

- Résistance et module spécifiques élevés, ainsi qu'une résistance à la fatigue et une tolérance aux dommages de fatigue élevées
- Anisotrope
- Matériaux concevables ou personnalisables pour la microstructure et les propriétés

Chapitre II : Méthodes et process

- Production à la fois du matériau et de la structure ou du composant en une seule opération - fabrication d'une géométrie complexe, flexible et en forme de filet
- Résistance à la corrosion et durabilité
- Autres propriétés fonctionnelles uniques - amortissement, faible CTE (coefficient de dilatation thermique)

II.5.7. Inconvénients des composites

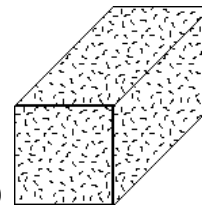
- Coût élevé de fabrication des composites
- La caractérisation mécanique d'une structure composite est plus complexe qu'une structure métallique
- La réparation des composites n'est pas un processus simple comparé à celui des métaux
- Les composites n'ont pas une combinaison élevée de résistance et de ténacité à la rupture par rapport aux métaux.
- Les composites n'offrent pas nécessairement des performances supérieures dans toutes les propriétés utilisées pour la sélection des matériaux : résistance, ténacité, formabilité, joignabilité, résistance à la corrosion et abordabilité.

II.5.8. Catégories courantes de matériaux composites

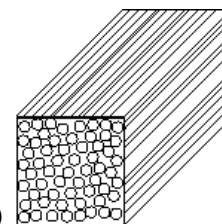
Sur la base de la forme de renforcement, les matériaux composites courants peuvent être classés comme suit [68] :

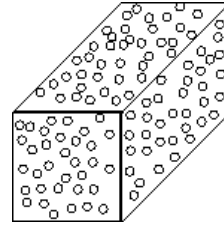
1. Fibres comme renfort (Fibrous Composites) :

a. Composites renforcés de fibres aléatoires (fibres courtes)

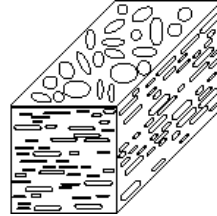


b. Composites renforcés de fibres continues (fibres longues)

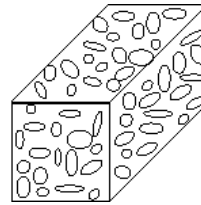




2. Particules comme renfort (composites particulaires) :



3. Flocons plats comme renfort (Flake composites) :



4. Charges comme renfort (composites de charge) :

II.5.9. Avantages des composites

Différents matériaux conviennent à différentes applications. Lorsque les composites sont sélectionnés par rapport aux matériaux traditionnels tels que les alliages métalliques ou le bois, c'est généralement en raison d'un ou plusieurs des avantages suivants :

➤ **Coût:**

- Prototypes
- Production de masse
- Regroupement partiel
- Entretien
- Durabilité à long terme
- Le temps de fabrication
- Maturité de la technologie

➤ **Masse :**

- Poids léger
- Répartition du poids

➤ **Force et rigidité :**

- Rapport résistance/poids élevé
- Résistance directionnelle et/ou rigidité

➤ **Dimension:**

- Large parts
- Special geometry

➤ **Propriétés de surface:**

- Résistance à la corrosion
- Résistance aux intempéries
- Finition de surface sur mesure

➤ **Propriétés thermiques:**

- Faible conductivité thermique
- Faible coefficient de dilatation thermique

➤ **Propriété électrique :**

- Rigidité diélectrique élevée
- Non magnétique
- Transparence radar

Notez qu'il n'y a pas de solution unique pour tous les matériaux dans le monde de l'ingénierie. De plus, les facteurs ci-dessus peuvent ne pas toujours être positifs dans toutes les applications. Un ingénieur doit peser tous les facteurs et prendre la meilleure décision en sélectionnant le ou les matériaux les plus appropriés pour le projet en cours.

II.5.10. Fibres Matériaux de renforcement

La fonction principale des fibres est de porter les charges le long de leurs directions longitudinales. Les agents de renforcement de fibres courants comprennent

Aluminium, oxyde d'aluminium, silice d'aluminium

- Amiante
- Béryllium, carbure de béryllium, oxyde de béryllium
- Carbone (Graphite)
- Verre (verre E, verre S, verre D)
- Molybdène
- Polyamide (polyamide aromatique, aramide), par exemple, Kevlar 29 et Kevlar 49

- Polyestère
- Quartz (silice fondue)
- Acier
- Tantale
- Titane

Tungstène, mono-carbure de tungstène

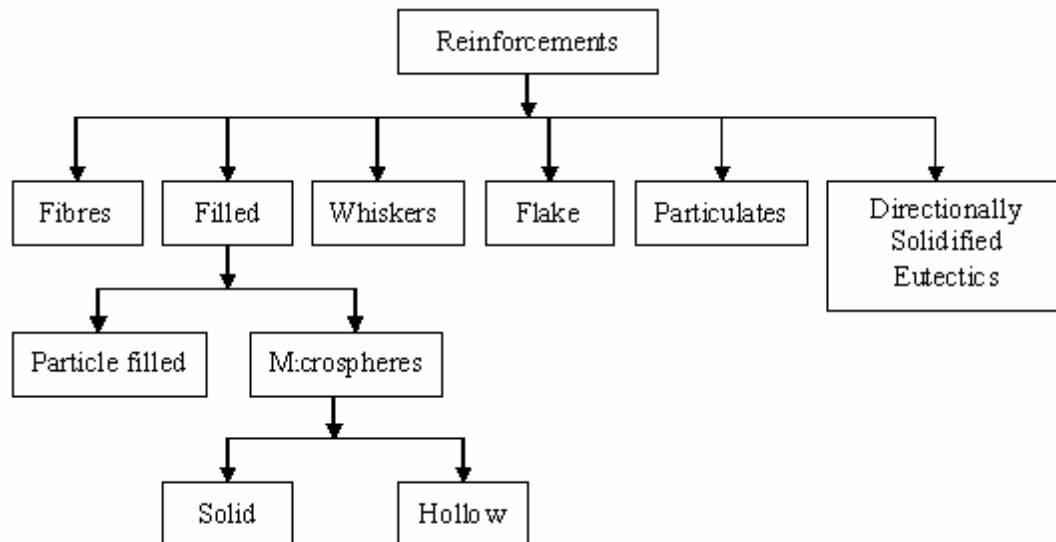


Figure.24 types de renforts différents

II.5.11. Rôle et sélection des fibres

Les points à noter lors de la sélection des renforts incluent la compatibilité avec le matériau de la matrice, la stabilité thermique, la densité, la température de fusion, etc. L'efficacité des composites renforcés de manière discontinue dépend de la résistance à la traction et de la densité des phases de renforcement. La compatibilité, la densité, la stabilité chimique et thermique du renfort avec le matériau de la matrice sont importantes pour la fabrication du matériau ainsi que pour l'application finale. La déformation de discordance thermique entre la matrice et le renfort est un paramètre important pour les composites utilisés dans les applications de cyclage thermique. C'est une fonction de différence entre les coefficients de dilatation thermique de la matrice et de l'armature. Le procédé de fabrication choisi et le renforcement affectent la structure cristalline.

II.5.12. Matériaux de matrice

Chapitre II : Méthodes et process

Les principales fonctions de la matrice sont de transférer les contraintes entre les fibres de renforcement (maintenir les fibres ensemble) et de protéger les fibres des dommages mécaniques et/ou environnementaux. Une exigence de base pour un matériau de matrice est que sa contrainte à la rupture doit être supérieure aux fibres qu'il contient.

La plupart des matrices sont constituées de résines pour leur grande variation de propriétés et leur coût relativement faible. Les matériaux de résine courants comprennent

- **Resin Matrix**

- Epoxy
- Phenolic
- Polyester
- Polyurethane
- Vinyl Ester

Parmi ces matériaux résineux, les polyesters sont les plus largement utilisés. Les époxydes, qui ont une adhérence plus élevée et moins de retrait que les polyesters, viennent en deuxième position pour leurs coûts plus élevés.

Bien que moins courantes, les matrices sans résine (principalement des métaux) peuvent encore être trouvées dans des applications nécessitant des performances plus élevées à des températures élevées, en particulier dans l'industrie de la défense.

- **Matrice métallique**

- Aluminium
- Cuivre
- Plomb
- Magnésium
- Nickel
- Argent
- Titane

- **Matrice non métallique**

- Céramique

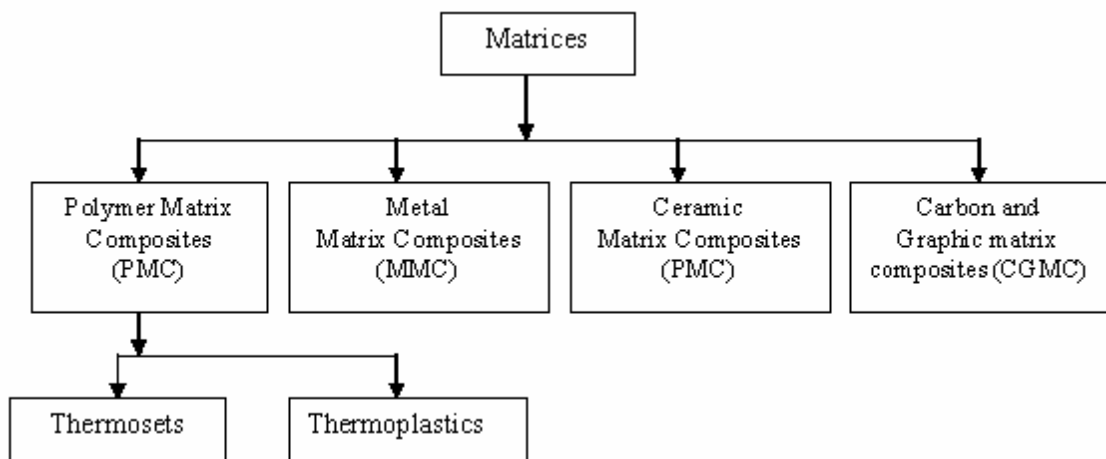


Figure.25 Classification des matériaux de matrice

En général, les types de matériaux de matrice suivants sont disponibles :

- Matériau thermodurcissable ;
- Matériau thermoplastique ;
- Carbone ;
- Métaux ;
- Céramique ;
- Matrice de verre.

II.5.13. Thermoplastiques et thermodurcissables

Un matériau thermodurcissable est celui qui, lorsqu'il est durci par la chaleur ou une réaction chimique, se transforme en un matériau infusible et insoluble. Les résines thermodurcissables subissent une réaction de réticulation chimique irréversible lors de l'application de chaleur. D'autre part, les thermoplastiques ne subissent pas de réaction chimique lors de l'application de chaleur. Ils fondent simplement lors de l'application de chaleur et de pression pour former un composant. Les thermoplastiques peuvent être ramollis et ils subissent des changements importants et rapides de viscosité avec des variations de température. Les thermoplastiques peuvent être ramollis à plusieurs reprises par chauffage et durcis par refroidissement.

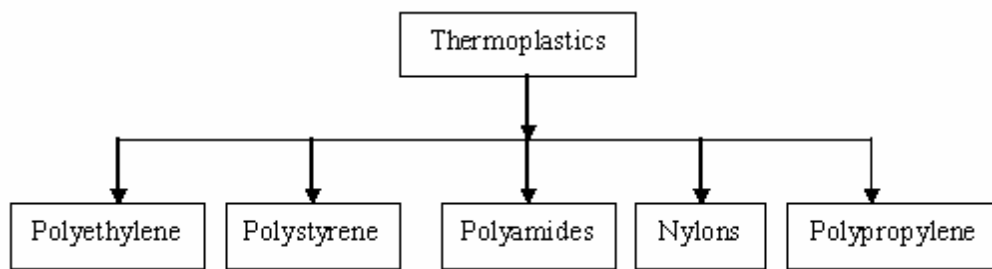


Figure.26 Matrice thermoplastique

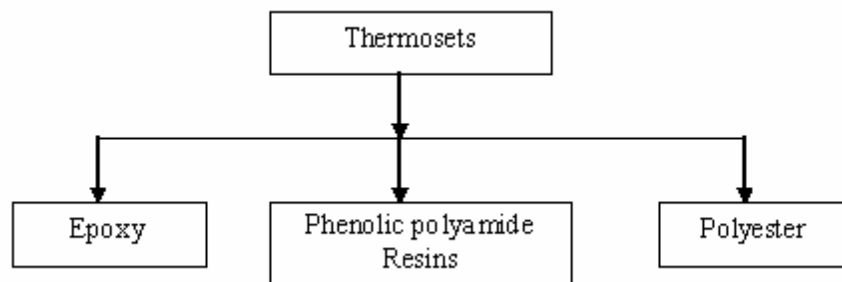


Figure.27 Matrice thermodurcissable

Tableau.6 Certaines des différences significatives entre les thermodurcissables et les thermoplastiques sont indiquées ci-dessous:

Thermodurcissables	Thermoplastiques
<ul style="list-style-type: none">• Le coût de la résine est faible.	<ul style="list-style-type: none">• Le coût de la résine est légèrement plus élevé.
<ul style="list-style-type: none">• Les thermodurcissables présentent un retrait modéré.	<ul style="list-style-type: none">• Le retrait des thermoplastiques est faible
<ul style="list-style-type: none">• La ténacité à la rupture interlaminaire est faible.	<ul style="list-style-type: none">• La ténacité à la rupture interlaminaire est élevée.
<ul style="list-style-type: none">• Les thermodurcissables présentent une bonne résistance aux fluides et solvants.	<ul style="list-style-type: none">• Les thermoplastiques présentent une faible résistance aux fluides et aux solvants.
<ul style="list-style-type: none">• Les propriétés mécaniques du composite sont bonnes.	<ul style="list-style-type: none">• Les propriétés mécaniques du composite sont bonnes.
<ul style="list-style-type: none">• Les caractéristiques de préimprégnabilité sont excellentes.	<ul style="list-style-type: none">• Les caractéristiques de préimprégnabilité sont médiocres.

Chapitre II : Méthodes et process

- | | |
|--|--|
| • Prepreg shelf life and out time are poor. | • La durée de conservation et le temps d'attente du préimprégné sont excellents. |
|--|--|

Tableau.7 Les différents types de résines thermodurcissables et thermoplastiques couramment utilisés sont les suivants :

Thermodurcissables	Thermoplastiques	Thermodurcissables	Thermoplastiques
• Ester phénolique et cyanate	• Polypropylène	• Ester phénolique et cyanate	• Polypropylène
• Polyesters et esters vinyliques (Polyamide)	• Nylon	• Polyesters et esters vinyliques (Polyamide)	• Nylon
• Polyimides	• Poly-éther-imide (PEI)	• Polyimides	• Poly-éther-imide (PEI)
• Epoxies	• Poly-éther-sulfone (PES)	• Epoxies	• Poly-éther-sulfone (PES)
• Bismaléimide (BMI)	• Poly-éther-éther-cétone (PEEK)	• Bismaléimide (BMI)	• Poly-éther-éther-cétone (PEEK)

II.5.14. Exemples de matériaux composites

- Plastiques renforcés de fibres :
 - Classé par type de fibre :
 - Bois (fibres de cellulose dans une matrice de lignine et d'hémicellulose)
 - Plastique renforcé de fibre de carbone (CRP)
 - Plastique renforcé de fibre de verre (GRP) (officieusement, "fibre de verre")
 - Classé par matrice :
 - Composites thermoplastiques
- thermoplastiques à fibres courtes
- thermoplastiques à fibres longues ou thermoplastiques renforcés de fibres longues
- thermoplastiques mats de verre
- thermoplastiques renforcés de fibres continues

Chapitre II : Méthodes et process

- Composites thermodurcissables

Carbone-carbone renforcé (fibre de carbone dans une matrice de graphite)

- Composites à matrice métallique (MMC) :

- Fonte blanche
- Métal dur (carbure dans matrice métallique)
- Stratifié métal-intermétallique

Composites à matrice céramique :

- Os (hydroxyapatite renforcée de fibres de collagène)
- Cermet (céramique et métal)
- Béton

Composites matrice organique/granulats céramiques

- Béton bitumineux
- Composite dentaire
- Mousse syntactique
- Nacre
- Armure Chobham (voir armure composite)

- **Bois d'ingénierie**

- Contreplaqué
- Panneau à copeaux orientés
- Composite bois plastique (fibre de bois recyclée dans matrice polyéthylène)
- Pykrete (sciure de bois dans une matrice de glace)

Papier ou textiles imprégnés de plastique ou laminés

- Arborite
- Formica (plastique)

Chapitre III : Partie expérimentale

Chapitre III : Expérimentations

Dans ce travail, la technique FFF est adoptée, le processus est basé sur le dépôt de couches successives de matériau fondu sur la plaque de construction à travers une buse chauffée selon des données de conception assistée par ordinateur (CAO) 3D. Dans le processus FFF, la fabrication du composant 3D passe par de nombreuses étapes. La figure montre le processus général d'impression 3D, de la modélisation au produit final.

III.1. Méthodologie :

Flux général du processus d'impression 3D :

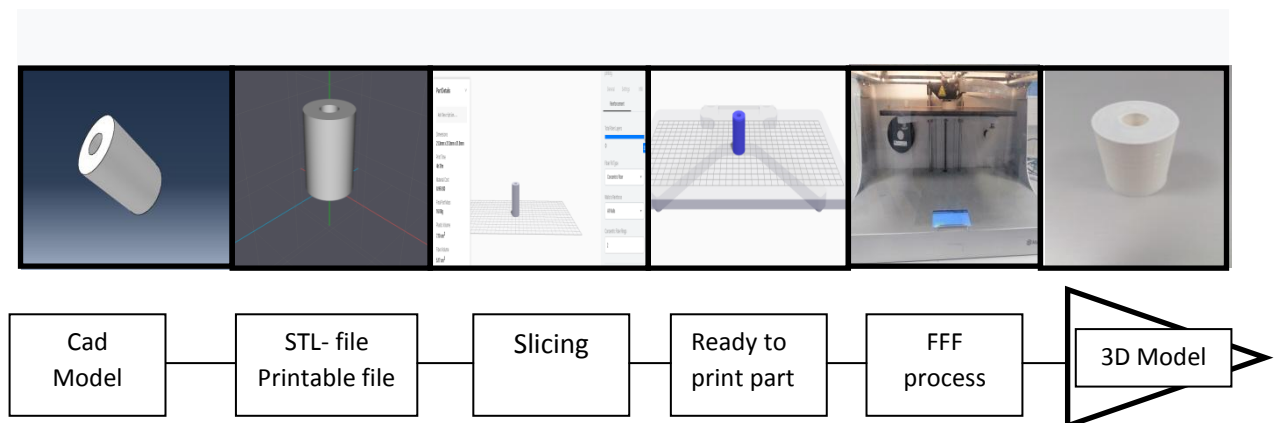


Figure.25 : Flux général du processus d'impression 3D

III.2. Matériaux et traitement

La base physique (échantillon) du modèle étudié est un cylindre illustré à la Fig avec une épaisseur et une hauteur fixe de $e = 10$ mm et $h = 40$ mm respectivement. Le paramètre géométrique variable est le rayon intérieur : $r1 = 5$ mm, $r2 = 10$ mm, $r3 = 15$ mm. La matière première est le polyamide 6 (PA 6), qui se présente comme l'un des matériaux de matrice les plus récents pour la fabrication de pièces composites avec les imprimantes 3D Markforged. Pour le renfort, deux types de garnissage ont été choisis : fibre de carbone et fibre de verre.

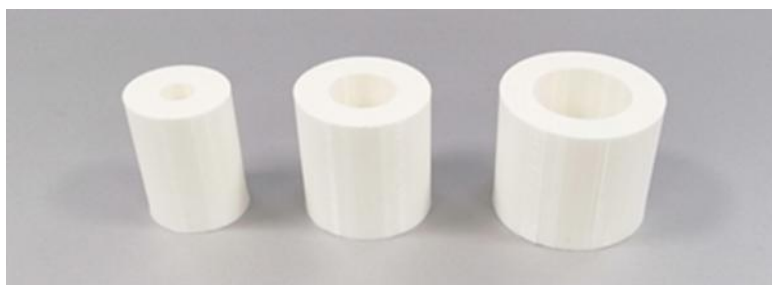


Figure. 26 : échantillon

Chapitre III : Expérimentations

La technique FFF utilisant l'imprimante 3D Mark Two™ Markforged® a été utilisée pour fabriquer les échantillons. C'est une machine bi-matière équipée d'une double extrusion, une pour la matrice effective et une pour la fibre continue. Il permet d'imprimer des pièces composites en combinant des matériaux de matrice (Onyx, Nylon) avec des fibres de renfort, voir Figure (a) (Fibre de verre, Fibre de carbone). Le processus d'impression de l'imprimante 3D Markforged® est présenté à la figure. 27. (b). Comme le montre cette figure, le mécanisme d'alimentation des fibres et de la matrice est muni de deux buses.

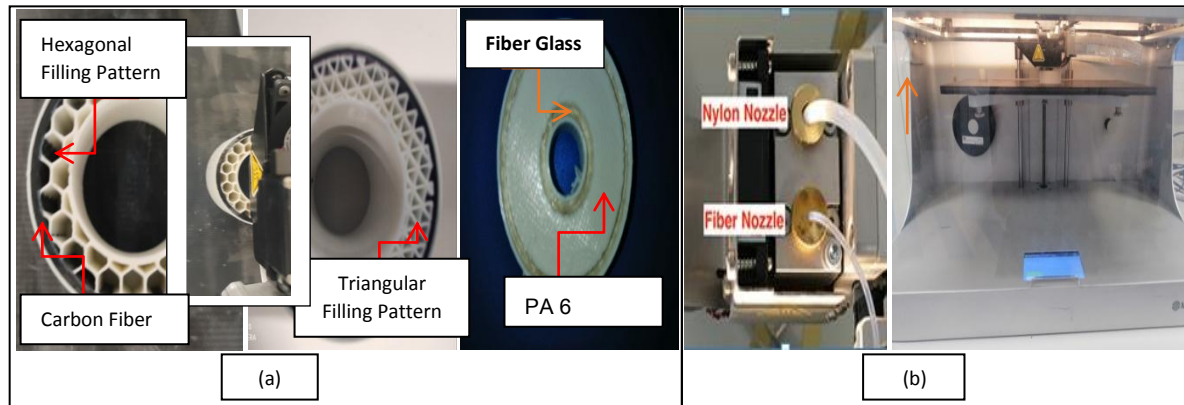


Figure. 27: (a) Composites renforcés de fibres continues (exp : fibre de carbone et fibre de verre) et (b) processus d'impression 3D Markforged®

III.3. Plan Experimental

Full factorial design (DOE), orthogonal array 3^3 . Il est composé de trois facteurs et chaque facteur à trois niveaux.

Les facteurs sont :

- Taille de la pièce
- Matériau
- Maillage

Les niveaux des facteurs sont :

Facteur 1 :

- Niveau 1 : Rayon $_1 = 5\text{mm}$
- Niveau 2 : Rayon $_2 = 10\text{ mm}$

Chapitre III : Expérimentations

- Niveau 3 : Rayon₃= 15mm

Facteur 2 :

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

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.8: la

d'expérience

matrice de plan

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

Chapitre III : Expérimentations

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

Chapitre III : Expérimentations

Notation Taguchi:

Tableau.9: la matrice de plan expérimental avec notation Taguchi

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

III.4. Procédures expérimentales

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

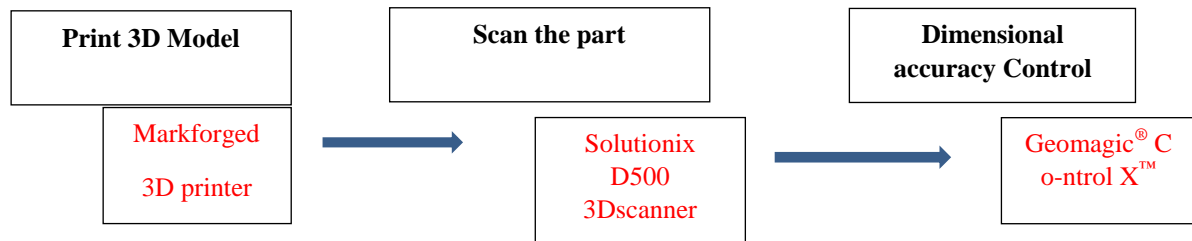


Figure.28 : Organigramme de l'étude expérimentale

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

III.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.

III.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

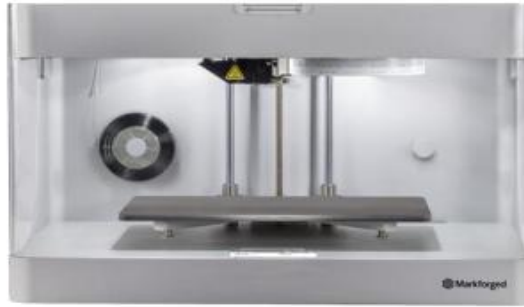


Figure.29 : Imprimante Markforged

III.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.

III.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 renforcés avec n'importe quelle fibre continue et fonctionnent mieux pour un travail non marquant tenue, manipulation répétée et pièces cosmétiques.

- **Onyx**

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. Onyx définit la barre pour la finition de surface, la résistivité chimique et la tolérance à la chaleur.

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

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

III.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 résistantes et huit fois plus rigides que l'Onyx, fibre de verre le renforcement donne des outils solides et robustes.

▪ **Kevlar**

Kevlar possède une excellente durabilité, ce qui le rend optimal pour les pièces qui éprouvent 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. Cinq fois plus fort et sept fois plus rigide qu'Onyx, c'est mieux utilisé pour les pièces chargées à des températures de fonctionnement élevées.

III.5. 5.Motif de remplissage :

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



Figure. 30 : Motif de remplissage : Hexagonale, Triangulaire, Rectangulaire

III.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 %

III.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. On peut modifier le point de départ de la fibre en modifiant le paramètre pour centre de rotation de démarrage lors de l'affichage d'une tranche de couche 2d ou groupe en vue interne

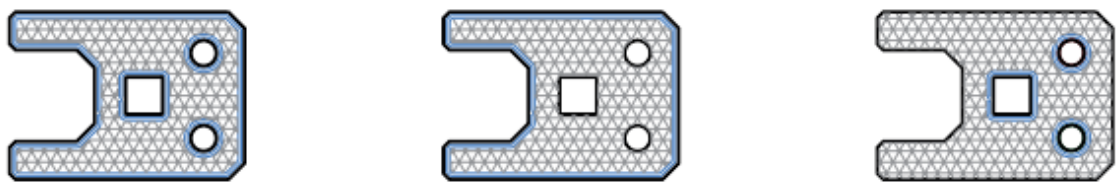


Figure. 31: Remplissage concentrique ; Tous les murs, Coque extérieure uniquement, Trous intérieurs uniquement

Tous les murs

Ce type fixe la fibre pour renforcer la coque extérieure et intérieure trous, fournissant le renforcement propriétés des deux.

Coque extérieure uniquement

Chapitre III : Expérimentations

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 la partie.

Trous intérieurs uniquement

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 lorsque de compression ou de torsion hors axe des forces sont appliquées aux trous intérieurs.

III.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.

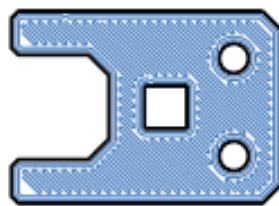
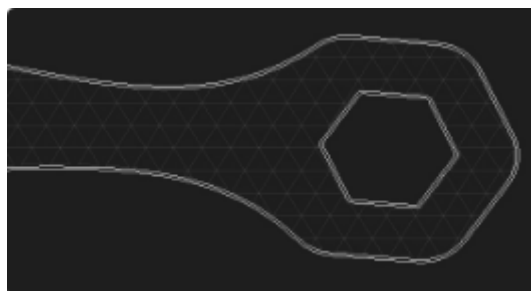


Figure. 32 : Remplissage isotropique

Couches de mur

Sélectionnez l'épaisseur des parois de la pièce. 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.



Chapitre III : Expérimentations

Figure. 33 : Couche de mur

Couches de toit et de plancher

Sélectionnez le nombre de couches de plastique solide utilisées en haut et en bas de la pièce.

Habituellement, la variation de ce paramètre est possible entre : 1 et 10



Figure. 34 : 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
- HSFG : 0.1

Le nombre total de couches

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

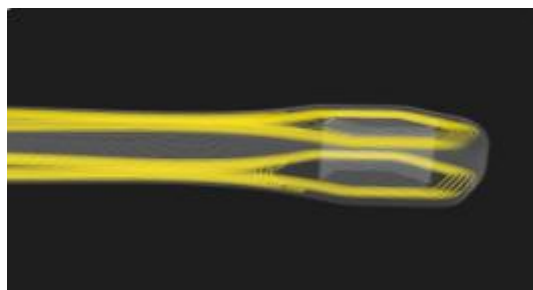


Figure. 35 : Le nombre de couches en fibre

Anneaux concentriques en fibre

Chapitre III : Expérimentations

Le nombre d'anneaux de remplissage de fibres concentriques ajoutés par couche. Plus il y a de sonneries, plus votre part est forte.

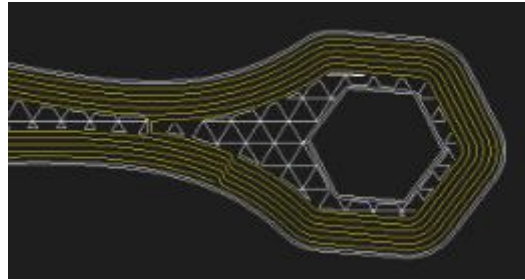


Figure.36 : les anneaux de remplissage de fibres concentriques

Après l'impression des pièces, nous avons passé 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.

III.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.37: Solutionix D500 scanner

III.6. 1.Spécification du système

Tableau. 10 : 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

III.7. Géomagique Contrôle X

Geomagic® Control X TM 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, 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.

Chapitre III : Expérimentations

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.

Chapitre IV : Résultats et discussions

Chapitre IV : Résultats et discussions

Ce chapitre présente les résultats et l'analyse des deux parties statistique et mathématique.

IV.1. Analyse statistique des facteurs d'impact

L'objectif est d'étudier la relation entre les paramètres d'entrée (facteurs d'impact) et la réponse de sortie (écart dimensionnel). L'analyse de la variance (ANOVA) a été réalisée à l'aide du Logiciel de statistiques et d'analyse de données Minitab 17.

Tablea.11 : 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

Chapitre IV : Résultats et discussions

18	2	3	3	0.041	0.0875
19	3	1	1	0.1081	-0.309
20	3	2	1	0.0056	0.026
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 si un facteur ou une combinaison de facteurs à une influence significative sur la précision dimensionnelle. La figure.38 montre le diagramme de Pareto des effets normalisés pour l'écart moyen, dans lequel la probabilité de rejeter l'hypothèse nulle (α) a été fixée à "0,05". Le facteur B (type de matériau) et la combinaison BC (type de matériau/motif de remplissage) affichent respectivement les valeurs les plus élevées et les plus basses des effets normalisés. Cela signifie que B a été classé comme le facteur le plus lié à l'écart dimensionnel moyen, tandis que la combinaison BC a été classée comme le facteur le moins lié. De plus, l'effet normalisé critique a été calculé à 2,306. Les effets normalisés des combinaisons AB, AC, BC et C (modèle de remplissage) sont inférieurs à 2,306, ce qui signifie que ces quatre facteurs et combinaisons affectent moins l'écart dimensionnel moyen.

Chapitre IV : Résultats et discussions

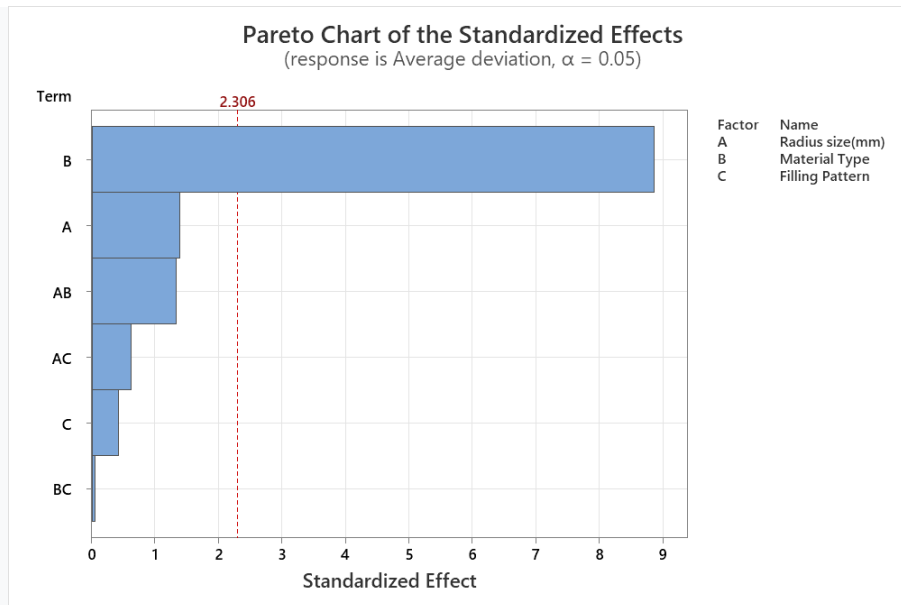


Figure.38 : Diagramme de Pareto des effets standardisés pour l'écart moyen

IV.1.2. Principaux effets pour l'écart moyen

La figure. 39 indique :

Le système génère des pièces qui sont en moyenne plus petites que la CAO, cela est particulièrement vrai 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

Les fibres de renforcement ont probablement empêché le rétrécissement thermique.

- La taille du rayon et le motif de remplissage ont peu d'influence sur les mesures car ils sont tous proches de la valeur moyenne.
- Le rayon pour lequel les pièces imprimées sont les plus proches du modèle CAO est $r=10\text{mm}$.
- Le nylon renforcé de fibre de carbone est classé comme le meilleur matériau car il est plus précis.
- Le motif de remplissage hexagonal est considéré comme le motif de remplissage le plus précis.

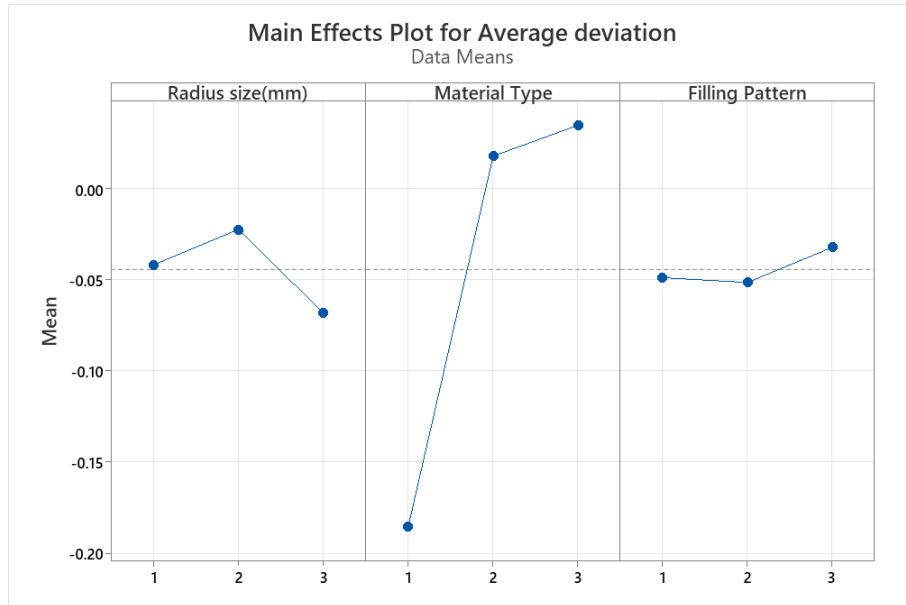


Figure. 39 : Graphique des effets principaux pour l'écart moyen

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

L'observation de la figure.40 montre la non-linéarité des courbes correspondant aux différents types de matériaux et motifs de remplissage. Pour l'analyse de la corrélation entre la taille du rayon et le type de matériau, on observe que, pour une valeur de rayon de 15 mm, la valeur moyenne maximale est atteinte avec le nylon, mais ce n'est plus vrai pour les deux autres matériaux.

Pour le matériau nylon renforcé de fibres de verre, les résultats obtenus sont similaires à ceux renforcés de fibres de carbone avec une déviation plus faible.

Pour la combinaison (rayon, motif de remplissage), on observe une forte interaction se manifestant par l'intersection des courbes. La taille de rayon $r = 10$ mm présentait une bonne précision avec les trois types de motif de remplissage.

Nous pouvons remarquer à partir de la combinaison (type de matériau, motif de remplissage), que le nylon présentait une précision inférieure avec les trois types de motifs de remplissage par rapport à la fibre de carbone renforcée de nylon et à la fibre de verre renforcée de nylon ; les courbes sont pratiquement linéaires ce qui projette une faible corrélation des paramètres et donc un faible impact sur la précision.

Chapitre IV : Résultats et discussions

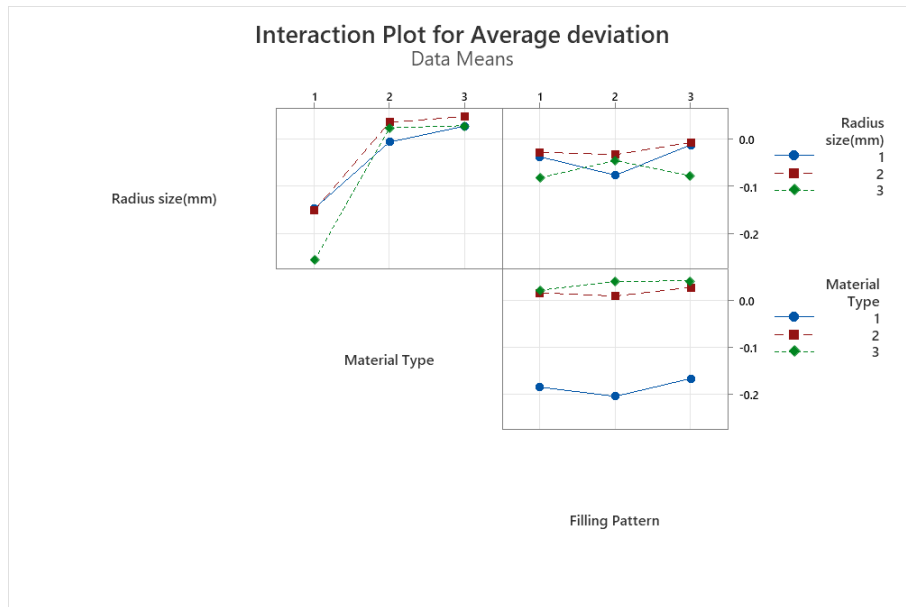


Figure. 40 : Interactions pour l'écart moyen

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

• IV.1.4. 1. Analyse de la variance

Tableau. 12 : 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
Material Type	2	0.269474	0.134737	55.27	0.000
Filling Pattern	2	0.001960	0.000980	0.40	0.682
2-Way Interactions	12	0.026902	0.002242	0.92	0.568
Radius size(mm)*Material Type	4	0.017556	0.004389	1.80	0.222
Radius size(mm)*Filling Pattern	4	0.007857	0.001964	0.81	0.555

Chapitre IV : Résultats et discussions

Pattern	
Material	4 0.001489 0.000372 0.15 0.956
Type*Filling	
Pattern	
Error	8 0.019503 0.002438
Total	26 0.327370

• IV.1.4. 2. Résumé du model

Tableau. 13 : Résumé du modèle de variance

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

• IV.1.4. 3.Coefficients

Tableau.14: Coefficients de variance

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

Chapitre IV : Résultats et discussions

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
-----	---------	--------	-------	-------	------

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
-----	---------	--------	-------	-------	------

Chapitre IV : Résultats et discussions

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

IV.2.1. Analyse des effets de variance normalisés :

Les effets normalisés sont présentés à la Figure.41 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.

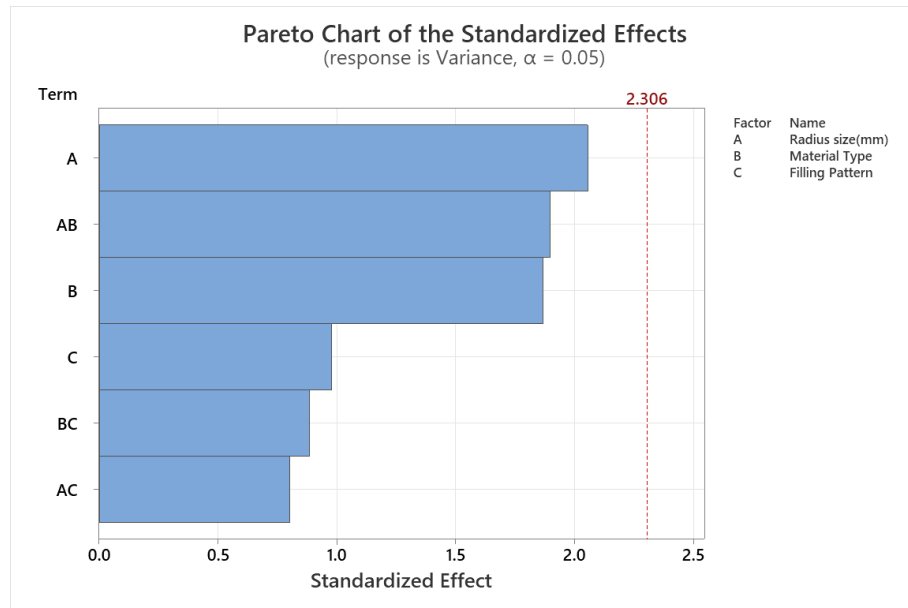


Figure. 41: Diagramme de Pareto des effets normalisés pour la variance

IV.2.2. Principaux effets sur la variance

La figure. 42 indique que:

- Les rayons de 5 mm et 10 mm génèrent un petit écart. La variance pour le rayon $r=15\text{mm}$ est nettement supérieure à celle des autres rayons. Plus, le rayon est grand, plus la dispersion est grande.
- La variance pour le matériau en nylon (PA6) est beaucoup plus élevée que celle du matériau renforcé de carbone.
- Le motif de remplissage triangulaire et hexagonal présentait approximativement la même variance ; le motif de remplissage rectangulaire présentait un petit écart.

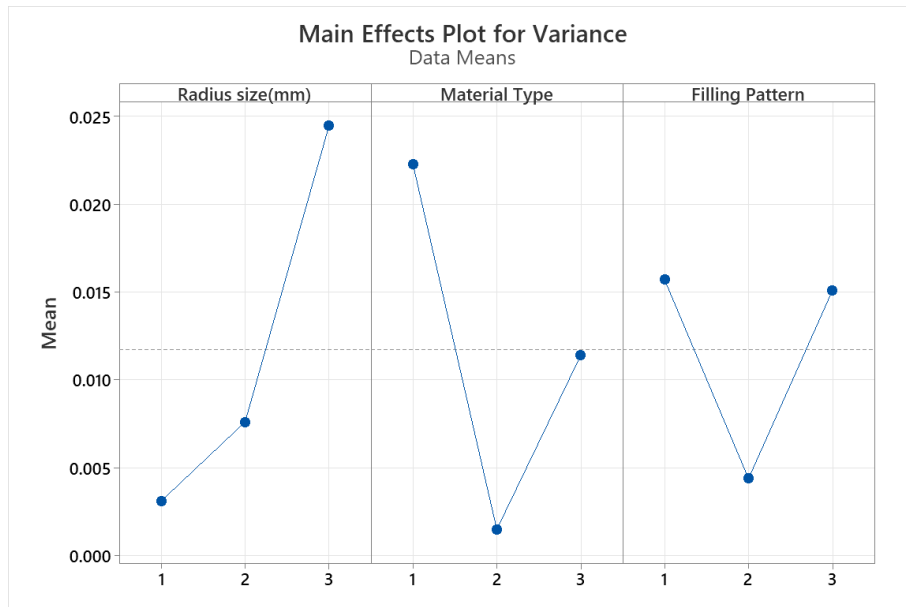


Figure. 42 : Graphique des effets principaux pour la variance

IV.2.3. Interactions pour la variance

Les courbes de la figure.43 montrent une interaction croisée entre les trois facteurs.

- 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 $r=15\text{mm}$.
- Pour le matériau en carbone renforcé de nylon, la valeur de variance n'est pas affectée par la taille du rayon, pour $r=5\text{mm}$, 10mm et 15mm la variance est très faible.
- Pour la combinaison (rayon, motif de remplissage), les motifs de remplissage triangulaires et rectangulaires de rayon $r=5\text{mm}$ et $r=10\text{mm}$ présentent une variance très faible ; le rayon de $r = 15\text{ mm}$ avec un motif de remplissage triangulaire a atteint une valeur de variance maximale de 0,040. Pour le motif de remplissage hexagonal, la variance avec le plus petit rayon $r=5\text{mm}$ est presque nulle, et avec des valeurs légèrement différentes pour les rayons $r=10\text{mm}$ et $r=15\text{mm}$.
- Les résultats de corrélation entre le type de motif de remplissage et le matériau adopté diffèrent selon le type de remplissage utilisé. L'écart est presque nul pour le nylon renforcé de fibre de carbone avec les trois types de motif de remplissage. Avec le motif de remplissage hexagonal, le nylon et le nylon renforcé de fibre de verre ont tous deux donné la même valeur de variance, environ 0,024.

Chapitre IV : Résultats et discussions

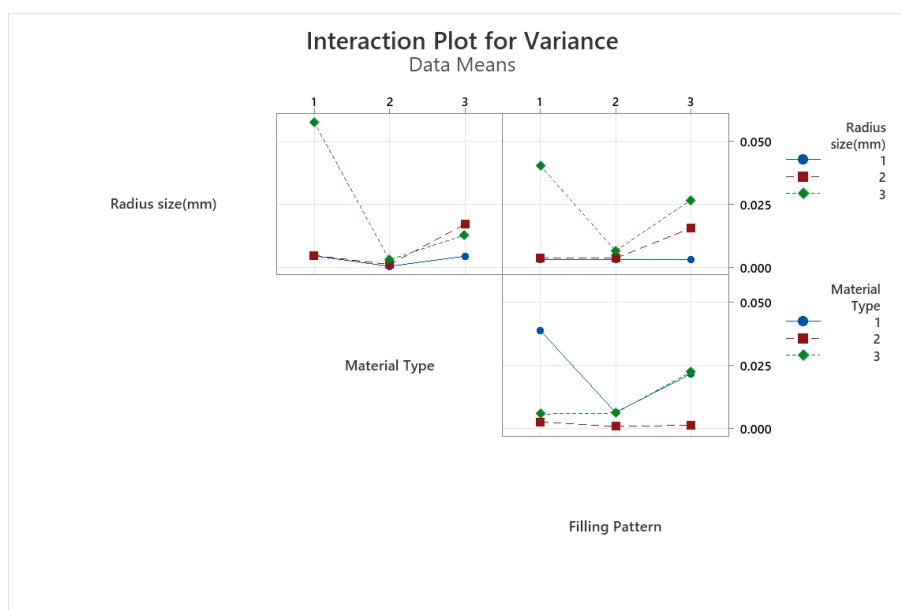


Figure. 43 : Interactions pour la variance

IV.2.4. Rapport ANOVA pour la variance

IV.2.4. 1. Analyse de variance pour variance

Tableau. 15 : 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	2	0.002279	0.001139	3.67	0.074
size(mm)					
Material Type	2	0.001944	0.000972	3.13	0.099
Filling Pattern	2	0.000728	0.000364	1.17	0.357
2-Way	12	0.006283	0.000524	1.69	0.233
Interactions					
Radius	4	0.003583	0.000896	2.89	0.094
size(mm)*Material					
Type					
Radius	4	0.001283	0.000321	1.03	0.446
size(mm)*Filling					

Chapitre IV : Résultats et discussions

Pattern	
Material	4 0.001417 0.000354 1.14 0.403
Type*Filling	
Pattern	
Error	8 0.002483 0.000310
Total	26 0.013717

IV.2.4. 2.Résumé du modèle

Tableau. 16 : Résumé du modèle de variance

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

IV.2.4. 3.Coefficients

Tableau. 17 : Coefficients pour la variance

Term	Coef	SE Coef	T- Value	P- Value	VIF
Constant	0.01173	0.00339	3.46	0.009	
Radius size(mm)					
1	-0.00479	0.00861	-1.80	0.110	1.33
2	-0.00479	0.00411	-0.86	0.416	1.33
Material Type					
1	0.01055	0.00479	2.20	0.059	1.33
2	-0.00479	0.01023	-2.13	0.066	1.33
Filling Pattern					
1	0.00397	0.00479	0.83	0.431	1.33
2	-0.00479		-1.53	0.164	1.33

Chapitre IV : Résultats et discussions

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

IV.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

Chapitre IV : Résultats et discussions

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 ' $\bar{\theta}$ ' 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 :

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

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

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

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

Chapitre IV : Résultats et discussions

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

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

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 $(\tau_{n-1}, \bar{\theta}_{n-1})$:

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

La mise à jour est écrite

Chapitre IV : Résultats et discussions

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

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 (a_n, τ_n, θ_n) est supérieure à la valeur précédente de P en $(a_{n-1}, \tau_{n-1}, \theta_{n-1})$. 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).
- 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 $c = |a - b|$.

IV.3.1. Composition de l'outil de calcul

Chapitre IV : Résultats et discussions

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

IV.3.1. 1. Evaldistance:

Function dist = evaldistance(x₀, aguess, coord)

```
N = size(coord,1);
```

```
dist = 0;
```

```
thetaguess = x0(2);
```

```
tauguess2 = (x0(1)) **2;
```

```
for i = 0:(N-1)
```

```
thetai = i*2*pi/N;
```

```
Ri = sqrt((coord(i+1,1)) **2+(coord(i+1,2)) **2);
```

```
Rthi = aguess/sqrt((cos(thetai - thetaguess))**2 + (sin(thetai - thetaguess))**2 *tauguess2);
```

```
dist = dist + (Ri - Rthi) **2;
```

```
endfor
```

```
endfunction
```

IV.3.1. 2. Initialguess

```
N = size(coord,1);
```

```
x0 = zeros (2,1);
```

```
dmax = 0;
```

```
for i = 1:N/2
```

```
i1 = i + N/2;
```

```
dm = sqrt(coord(i,1) **2+coord(i,2)**2) + sqrt(coord(i1,1)**2+coord(i1,2)**2);
```

```
if(dm > dmax)
```

```
    dmax = dm;
```

```
    i2 = i + floor(N/4);
```

```
    i3 = mod(i2 + N/2,N);
```

```
    if(i3 == 0)
```

```
        i3 = 1;
```

```
    endif
```



```
dmin = sqrt(coord(i2,1)**2+coord(i2,2)**2) + sqrt(coord(i3,1)**2+coord(i3,2)**2);
restheta = (i-1)*2*pi/N;
restau = dmax/dmin;
endif
endfor
x0 = [restau ; restheta];
aguess = dmax/2;
endfunction
```

IV.3.1. 3. Jacobsys

Function A = jacobsys (x,coord)

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

```
N = size(coord,1);
```

```
rsurg = 0;
sincsurg4 = 0;
sin2surg4 = 0;
unsurg2 = 0;
rsincsurg3 = 0;
rsin2surg3 = 0;
```

```
rsurgtau = 0;
rsurgthe = 0;
unsurg2tau = 0;
unsurg2the = 0;
sincsurg4tau = 0;
sincsurg4the = 0;
rsincsurg3tau = 0;
rsincsurg3the = 0;
```

Chapitre IV : Résultats et discussions

$\sin 2\text{surg}4\tau = 0;$

$\sin 2\text{surg}4\theta = 0;$

$\text{rsin} 2\text{surg}3\tau = 0;$

$\text{rsin} 2\text{surg}3\theta = 0;$

for $i = 0:N-1$

$\theta_i = i \cdot 2\pi/N;$

$R_i = \sqrt{(\text{coord}(i+1,1))^2 + (\text{coord}(i+1,2))^2};$

$g_i = \sqrt{(\cos(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^2 + (\sin(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^2 \cdot \tau_{\text{guess}}^2};$

$\text{rsurg} = \text{rsurg} + R_i/g_i;$

$\text{rsurg}\tau = \text{rsurg}\tau - R_i \cdot (\sin(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^2 \cdot \tau_{\text{guess}} / (g_i)^3;$

$\text{rsurg}\theta = \text{rsurg}\theta - R_i \cdot (\sin(2(\theta_i - \theta_{\text{guess}})) \cdot (1 - \tau_{\text{guess}}^2)) / (2(g_i)^3);$

$\text{sincsur}4 = \text{sincsur}4 + (\sin(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^2 / (g_i)^4;$

$\text{sincsur}4\tau = \text{sincsur}4\tau - 4 \cdot (\sin(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^4 \cdot \tau_{\text{guess}} / (g_i)^6;$

$\text{sincsur}4\theta = \text{sincsur}4\theta - \sin(2(\theta_i - \theta_{\text{guess}})) / (g_i)^4 - 2 \cdot (\sin(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^2 \cdot \sin(2(\theta_i - \theta_{\text{guess}})) \cdot (1 - \tau_{\text{guess}}^2) / (g_i)^6;$

$\sin 2\text{surg}4 = \sin 2\text{surg}4 + \sin(2(\theta_i - \theta_{\text{guess}})) / (g_i)^4;$

$\sin 2\text{surg}4\tau = \sin 2\text{surg}4\tau - 4 \cdot (\sin(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^2 \cdot \sin(2(\theta_i - \theta_{\text{guess}})) \cdot \tau_{\text{guess}} / (g_i)^6;$

$\sin 2\text{surg}4\theta = \sin 2\text{surg}4\theta - 2 \cdot \cos(2(\theta_i - \theta_{\text{guess}})) / (g_i)^4 - 2 \cdot (\sin(2(\theta_i - \theta_{\text{guess}})))^2 \cdot (1 - \tau_{\text{guess}}^2) / (g_i)^6;$

$\text{unsurg}2 = \text{unsurg}2 + 1.0 / (g_i)^2;$

$\text{unsurg}2\tau = \text{unsurg}2\tau - 2 \cdot (\sin(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^2 \cdot \tau_{\text{guess}} / (g_i)^4;$

$\text{unsurg}2\theta = \text{unsurg}2\theta - (\sin(2(\theta_i - \theta_{\text{guess}})) \cdot (1 - \tau_{\text{guess}}^2)) / (g_i)^4;$

$\text{rsincsur}3 = \text{rsincsur}3 + R_i \cdot (\sin(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^2 / (g_i)^3;$

$\text{rsincsur}3\tau = \text{rsincsur}3\tau - 3 \cdot R_i \cdot (\sin(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^4 \cdot \tau_{\text{guess}} / (g_i)^5;$

$\text{rsincsur}3\theta = \text{rsincsur}3\theta - R_i \cdot \sin(2(\theta_i - \theta_{\text{guess}})) / (g_i)^3 - 3 \cdot R_i \cdot (\sin(\theta_i - \theta_{\text{guess}}))^2 \cdot \sin(2(\theta_i - \theta_{\text{guess}})) \cdot (1 - \tau_{\text{guess}}^2) / (2(g_i)^5);$

Chapitre IV : Résultats et discussions

```
rsin2surg3 = rsin2surg3 + Ri * sin(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**3;  
rsin2surg3tau = rsin2surg3tau - 3 * Ri * sin(2*(thetai - thetaguess)) * (sin(thetai -  
thetaguess))**2 * tauguess /(gi)**5;  
rsin2surg3the = rsin2surg3the - 2 * Ri * cos(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**3 - 3 * Ri *  
(sin(2*(thetai - thetaguess))**2 * (1 - tauguess2) / (2*(gi)**5);  
  
endfor
```

IV.3.1. 4. Solvebynewton

```
function [ares , bres , thetares] = solvebynewton (x0,toler,maxiter,coord)  
A = zeros (2,2);  
N = size(coord,1);  
x = x0;  
iter = 0;  
fx = syseval (x,coord)  
while ( norm(fx) > toler && iter < maxiter)  
rsurg = 0;  
unsurg2 = 0;  
thetares = x(2);  
taures = x(1);  
taures2 = taures**2;  
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 - thetares))**2 + (sin(thetai - thetares))**2 * taures2);  
rsurg = rsurg + Ri/gi;  
unsurg2 = unsurg2 + 1.0/(gi)**2;  
endfor  
ares = rsurg / unsurg2;  
bres = ares / taures;  
  
dist = evaldistance(x,ares,coord)  
if(iter == 0)
```

Chapitre IV : Résultats et discussions

```
    distanc = dist +1;
endif

A = jacobsys(x,coord);
b = -fx;
dx = A\b;
x=x+dx;
if(x(1) < 0)
    x(1) = x(1) - dx(1);
endif
if(x(1) > 20 && dist > distanc)
    x(1) = 1.0;
endif
fx = syseval(x,coord)
iter = iter+1;
distanc =dist;
endwhile
rsurg = 0;
unsurg2 = 0;
thetares = mod(x(2),2*pi);
taures = x(1);
taures2 = taures**2;
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 - thetares))**2 + (sin(thetai - thetares))**2 * taures2);

    rsurg = rsurg + Ri/gi;
    unsurg2 = unsurg2 + 1.0/(gi)**2;
endfor
ares = rsurg / unsurg2;
bres = ares / taures;
```

```
dist = evaldistance(x,ares,coord)
```

```
endfunction
```

IV.3.1. 5. Syseval

Function z = syseval (x,coord)

```
z = [0 ; 0];
```

```
thetaguess = x(2)
```

```
tauguess2 = (x(1))**2
```

```
N = size(coord,1);
```

```
rsurg = 0;
```

```
sincsurg4 = 0;
```

```
sin2surg4 = 0;
```

```
unsurg2 = 0;
```

```
rsincsurg3 = 0;
```

```
rsin2surg3 = 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;
```

```
sincsurg4 = sincsurg4 + (sin(thetai - thetaguess))**2/(gi)**4;
```

```
sin2surg4 = sin2surg4 + sin(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**4;
```

```
unsurg2 = unsurg2 + 1.0/(gi)**2;
```

```
rsincsurg3 = rsincsurg3 + Ri*(sin(thetai - thetaguess))**2/(gi)**3;
```

```
rsin2surg3 = rsin2surg3 + Ri*sin(2*(thetai - thetaguess))/(gi)**3;
```

```
endfor
```

```
z(1) = rsurg * sincsurg4 - unsurg2 * rsincsurg3;
```

```
z(2) = rsurg * sin2surg4 - unsurg2 * rsin2surg3;
```

```
endfunction
```

IV.3.1. 6. Trouve-ellipse

```
N=10;
coord = zeros(N,2);
#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
#et on ajoute une perturbation aléatoire de 5%
a = 1.55;
b=1.5;
tau = a/b;
tau2=tau**2;
ht = 0.356;
Pert = rand (N,1);
for i = 0:(N-1)
    thetai = i*2*pi/N;
    Ri = a/sqrt((cos(thetai - ht))**2 + (sin(thetai - ht))**2 * tau2) * (1.0 + 0.05*Pert(i+1,1));
    coord(i+1,1) = Ri * cos(thetai);
    coord(i+1,2) = Ri * sin(thetai);
endfor

#debut du programme ; on doit fournir le tableau coord à N points (N=10 ci-dessus) et deux
coordonnées ;
#par convention le premier point est celui d'angle 0, le second d'angle 2pi/N, comme dans
l'exemple ci-dessus

#il faut un itéré initial pour la méthode de Newton
[x0 , aguess] = initialguess(coord)

#avec cet itéré initial, la somme des carrés des distances vaut
dinit = evaldistance(x0, aguess,coord)

#On résout par Newton
toler = 1.e-12;
```

Chapitre IV : Résultats et discussions

```
maxiter = 20;
```

```
[ares , bres , thetares] = solvebynewton(x0,toler,maxiter,coord)
```

```
#Résultat et somme des carrés des distances
```

```
xres = [ares/bres ; thetares];
```

```
dfinal = evaldistance(xres,ares,coord)
```

```
if (dfinal > dinit)
```

```
# Au cas où le processus ne fonctionne pas (parfois Newton ne converge pas)
```

```
printf("le processus n'a pas convergé\n")
```

```
endif
```

L'exécution des 6 algorithmes a été faite sur Octave Gnu

Résultats des calculs :

Tableau.18 : Les résultats de l'écart par rapport au calcul de la cylindricité

	r=5mm	r=10mm	r=15mm	r=5mm	r=10mm	r=15mm	r=5mm	r=10mm	r=15mm
						m			mm
	Triangular			Rectangular			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.

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 increase 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. Esmaeilian, 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/10.1108/13552540610652401>

[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), 194–204. doi:10.1007/s00056-019-00180-y
- [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):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, Wen Yao 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] Afroze 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, Tavera 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/10.1177/08927057211062561>