



Faculté : Technologie
Département : Génie
mécanique Domaine :
sciences et
technologie Filière :
Génie mécanique
Spécialité : Fabrication mécanique et
productique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du
Diplôme de Master

Thème :

**Étude de l'influence des paramètres d'impression 3d sur le
temps de fabrication des pièces**

Présenté par : BOULAHBEL Yasmine

Encadrant : M. BENAMIRA Mohamed

MC(B)

UBMA

Jury de Soutenance :

LAGRED	Profes	UB	Préside
AHMED	seur	MA	nt
BENAMIRA	MC(B	UB	Encadra
Mohamed)	MA	nt
CHELIA	MC(A	UB	Examina
AZZEDDINE)	MA	teur
BOURENANE	Profess	UB	Examina
RABAH	eur	MA	teur

Dédicace

Je dédie ce modeste travail aux êtres qui me sont les plus chers

À mes chers parents que dieu les garde et les protégés

À mes précieuses sœurs

À tous ceux qui m'ont soutenu et Encouragé

Remerciement

Je remercie tout d'abord, Allah, de m'avoir donné le courage d'entamer et de finir ce mémoire dans de bonnes conditions

A celle qui m'a donnée la vie et que ma vie n'est rien sans elle, à ma tendre *MERE*, qui m'a soutenu d'amour et de bonheur ; tout ce que je suis, je le dois à elle.

A mon *PERE*, l'homme le plus affectueux celui qui a tout donné pour que je puisse arriver à mon but qu'il ; trouve ici mes remerciements les plus sincères.

Que dieu me les protèges.

A mes chères sœurs que j'aime tellement

A ma chère tante Malika pour tous les conseils

Je tiens à remercier mon directeur de mémoire M. BENAMIRA Mohamed pour m'avoir proposé un sujet intéressant et pour la confiance qu'il m'a accordée. Il m'a dirigé tout au long de cette étude et m'a donné les grands axes de recherche. Je le remercie aussi pour sa disponibilité.

J'adresse mes remerciements les plus respectueux à mes examinateurs.

Je tiens à exprimer mes sincères remerciements ainsi que ma grande gratitude et reconnaissance envers tous mes enseignants « Département de Génie Mécanique ».

Il est également important pour moi d'adresser mes remerciements les plus sincères à

Mr BENHACINE Naamane et Mr AYAD Amar de l'école supérieure des technologies Industrielles d'ANNABA pour m'avoir donné l'opportunité de travailler sur l'impression 3D.

Et à la fin je veux dire merci pour ceux qui m'ont aidé de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.

Résumé

Notre travail présente une étude sur les paramètres de fabrication des pièces en PLA obtenues par le procédé d'impression 3D. La technique employée dans ce cas est celle du dépôt de filament fondu. Les paramètres étudiés sont l'orientation et le nombre de pièces imprimées. Les effets de chaque paramètre ainsi que leurs effets combinés ont été présentés. Nous nous sommes également intéressés à la possibilité d'imprimer des géométries particulières, à travers des mesures de la dispersion dimensionnelle et géométrique.

Sommaire

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale	1
Problématique	
Chapitre I : Généralités sur la fabrication additive	
Introduction.....	2
Concept général	2
Historique.....	3
Intérêt de l'impression 3D	3
Domaines d'utilisation	4
Revue bibliographique des travaux précédents	5
Chapitre II : Description générale de l'impression 3D et procédé de fabrication	
Introduction.....	9
Description structurelle de la machine.....	9
Caractéristiques	10
Eléments constitutifs de la machine	11
Principe de fonctionnement de l'imprimante 3D.....	12
Description du procédé FDM : (FusedDeposition Modeling)	13
Filaments utilisés	15
Les polymères.....	15
a) Les thermoplastiques : ABS et PLA.....	16
b) polyamides et résines.....	16
Les matériaux composites	17
a) l'alumide	17
Métaux	17
Autres matériaux.....	18
Application	18

Chapitre III : Mode d'obtention et analyse préliminaire des pièces obtenues

Introduction.....	19
Les étapes de la fabrication additive	19
Description de la pièce étudiée	19
Les trajectoires	21
Analyse qualitative et quantitative.....	22

Chapitre VI : Analyse du temps de fabrication

Introduction.....	29
Généralités sur le concept des temps de fabrication cas de l'usinage.....	29
Temps technologique de chariotage.....	29
Temps technologique de dressage.....	31
Temps technologique en filetage	31
Temps technologique pour le fraisage en roulant	31
Temps technologique pour le fraisage en bout	32
Temps technologique pour le rabotage	32
Temps technologique pour les opérations de perçage, lamage, alésage	32
Description des temps relatifs à l'impression 3D	33
Analyse du temps d'impression	33
Impression unitaire (unitaire).....	33
Impression d'un ensemble de trois éprouvettes	34
Impression d'un ensemble de cinq éprouvettes	36
Conclusion générale.....	40
Perspective	41
Références Bibliographiques	

Liste des figures

Figure 1 : Branches de fabrication additive	4
Figure 2 : valeurs des dispersions aléatoires dans le cas de l'angle A et des rayons B, C.....	5
Figure 3 : Coefficient de corrélation	6
Figure 4 : Droite de régression.....	7
Figure 5 : Artillery sidewinder X1 V1 3D	9
Figure 6 : Artillery sidewinder X1 3D printer	11
Figure 7 : Les principaux éléments de l'imprimante	12
Figure 8 : Le procédé d'impression 3D en quelques étapes simplifiées	13
Figure 9 : Principe de la méthode de dépôt de filament fondu	14
Figure 10 : Exemple de PLA	14
Figure 11 : Géométrie des pièces.....	19
Figure 12 : La pièce obtenue par impression 3D	20
Figure 13 : les parcours de la tête	21
Figure 14 : La balance utilisée	24
Figure 15 : Quantité en masse relative de la matière utilisée.....	24
Figure 16 : schéma de la structure de la pièce	24
Figure 17 : Dispositif optique de mesure	25
Figure 18 : Rayon de la pièce	26
Figure 19 : Angle de la pièce	26
Figure 20 : Mesure des angles.....	27
Figure 21 : Mesure des rayons	28
Figure 22 : Différents temps d'exécution	29
Figure 23 : Tournage.....	29
Figure 24 : Tournage-Dressage.....	31
Figure 25 : Filetage	31
Figure 26 : Fraisage (en roulant).....	31
Figure 27 : Fraisage en bout.....	32
Figure 28 : Rabotage	32
Figure 29 : Perçage, alésage, lamage	32
Figure 30 : Temps total d'une seule pièce orientation 0°	33
Figure 31 : Temps total d'une seule pièce orientation 45°	34
Figure 32 : Temps total d'une seule pièce orientation 90°	34
Figure 33 : Temps total de trois pièces orientation 0°	35
Figure 34 : Temps total de trois pièces orientation 45°	35

Figure 35 : Temps total de trois pièces orientation 90°	36
Figure 36 : Temps total de cinq pièces orientation 0°	36
Figure 37 : Temps total de cinq pièces orientation 45°	37
Figure 38 : Temps total de cinq pièces orientation 90°	37
Figure 39 : Point de départ orientation 0°, 45°, 90°	38
Figure 40 : Les effets de paramètres (nombres, orientations) sur le temps de fabrication	39

Liste des tableaux

Tableau 1 : Application de ANOVA sur L (cas d'épaisseur 70)	7
Tableau 2 : Analyse de la variance de la distance L.....	7
Tableau 3 : Application de ANOVA sur L (cas d'épaisseur 200)	8
Tableau 4 : Analyse de la variance de la distance L (cas d'épaisseur 200).....	8
Tableau 5 : Les paramètres d'impression	20
Tableau 6 : caractéristiques de la balance.....	23

Introduction générale

Introduction générale

Fabrication additive est un procédé d'obtention de pièces par ajout de matière. Elle regroupe un ensemble vaste de procédés qui permettent d'obtenir le volume par couches successives depuis un modèle numérique.

L'impression 3D permet de réaliser un objet réel en partant d'un modèle 3D obtenu grâce à un outil de conception assistée par ordinateur (CAO). Le fichier obtenu est traité par un logiciel de découpage en tranches des différentes couches nécessaires à la réalisation de la pièce. Une fois traduit en code G, il est envoyé à l'imprimante 3D qui dépose la matière sous forme de filament couche par couche jusqu'à obtenir du volume de la pièce.

Le procédé d'impression 3D par dépôt de filament est un procédé qui fait appel à un ensemble de paramètres dont les effets peuvent interagir et influencer la fabrication en termes de temps et de qualité. Dans cette optique, nous nous sommes intéressés à l'étude des paramètres de fabrication des pièces à base de PLA.

Cette étude comprend quatre chapitres ; le premier chapitre présente des généralités sur la fabrication additive. Le second chapitre est une description détaillée de l'imprimante 3D et du procédé de fabrication, notamment le Dépôt de filament fondu. Le troisième chapitre concerne le mode d'obtention et l'analyse des pièces obtenues et le dernier chapitre traite de l'analyse du temps de fabrication.

Problématique

Contrairement aux procédés de fabrication par enlèvement de matière, les procédés de fabrication additive présentent une complexité au niveau du choix et de la combinaison des paramètres de fabrication. Ceci, à cause des effets de chaque paramètre et de l'interaction qui peut intervenir entre les différents paramètres.

L'impression 3D comporte un lot important de paramètres qui peuvent agir sur la pièce en termes de précision, qualité de surface et propriétés spécifiques. Les paramètres en question sont principalement l'épaisseur des couches, le motif de remplissage, les températures d'impression, la vitesse d'impression, le matériau utilisé et l'orientation de la pièce à imprimer dans le repère de la machine. D'un point de vue fabrication, il est important de s'intéresser à l'effet de ces derniers sur le temps de fabrication des pièces.

Dans cette optique, la problématique de base de cette étude repose sur l'analyse des effets de l'orientation combinés au nombre de pièces imprimées. L'objectif est de déterminer l'influence que peut avoir ces derniers sur le temps de fabrication des pièces.

Chapitre I

Généralités sur la fabrication additive

Introduction

La technologie de l'impression 3D qui est un concept qui fait partie de la fabrication additive remonte à l'année 1988. Mais elle s'est imposée depuis l'année 2010 comme un outil de production avec d'énormes avantages dans le domaine de la fabrication de gammes très variées de pièces comme les prototypes pour des secteurs tels que l'automobile ou l'aéronautique. Elle est apparue. En effet, des avancées technologiques réalisées en 2010 ont permis de réduire les coûts et de la rendre plus accessible [1].

L'impression 3D est une forme de fabrication particulière qui se caractérise par [1]:

- Pièces fabriqués sans outillages
- moins chères.
- économe en énergie
- génère peu de résidus
- respectueuse de l'environnement.

Concept général

Il est probable que le terme « impression 3D » est le plus couramment utilisé aujourd'hui, on retrouve au sein de la communauté scientifique et technique les termes «additivemanufacturing» ou « Fabrication additive ». Cette technologie peut être considérée comme une méthode de conception et fabrication assistée par ordinateur (CFAO) définie par les organismes de mise en forme d'une pièce par ajout de matière par empilement de couches successives, contrairement par exemple au décolletage ou au fraisage, qui agissent par enlèvement de matière(fabrication soustractive) [1].

Afin d'imprimer un objet en 3D, il est nécessaire de recourir à des logiciels de conception assistée par ordinateur(CAO), qui permettent de définir les caractéristiques de cet objet (volumes, proportions, densité, etc...). Pour ce faire, il existe 3 catégories de modeleurs destinés aux particuliers et professionnels [1] :

- 1) Les modeleurs volumiques : permettent de travailler avec des objets aux formes simples par ajout, soustraction ou assemblage de formes. Modeleurs connus : Solid Edge ou SolidWorks
- 2) Les modeleurs surfaciques : permettent de définir mathématiquement l'enveloppe de l'objet. Modeleurs connus : SketchUp pro (contrôle de l'étanchéité difficile des formes au niveau des intersections), Rhinoceros et ZBrush.

- 3) Les modeleurs paramétriques : ont recours à des algorithmes spécifiques pour concevoir des objets en 3D. ces modeleurs permettent de créer des pièces complexes avec précision, qui sont paramétrables par la suite. Les modeleurs paramétriques les plus connus à l'heure actuelle étant Catia et Fusion 360, également modeleur volumique et surfacique.

Historique

L'histoire de l'impression 3D est marquée à partir des années 90, quand les recherches dans ce domaine se sont considérablement accélérées. On distingue les dates clés relatives au domaine de l'impression 3D [1]:

1981 : kodama publie trois méthodes de solidification holographique

1968 :swainson dépose un brevet aux Etats-Unis pour un système de durcissement de résine par double rayon lumineux.

1986 : C. Hull crée 3D Systems, aujourd'hui leader mondial de l'impression 3D.

1995 : Z corporations obtient l'exclusivité sur les recherches du MIT et lancer les premières imprimantes 3DP.

2000 : la fabrication additive est utilisée afin de développer des pièces de production.

2005 : lancement du projet Reprap.org : développement collaboratif d'une imprimante auto-replicante et open source.

2007 : création de shapeways le 1^{er} service d'impression 3D a la demande pour grand public.

2008 : création de la plateforme de partage de fichier 3D en libre accès thingiverse.com

2010 : Dr Gabor Forgacs et la société Organovo. Impriment le 1^{er} vaisseau sanguin. Naissance de la bio-impression.

2014: 1er pièce en 3D imprimée dans l'espace a bord de la station internationale.

Intérêt de l'impression 3D

Le principale avantage de cette technologie réside dans son utilisation dans le domaine de du prototypage 3D. Cependant, elle est de plus en plus utilisée pour créer des produits finis. Parmi les multiples raisons de son utilisation, nous avons [2] :

- **La rapidité** : éviter la création de moules d'injection de plastiques ou de moules pour pièces en métal, coûteuse et prennent beaucoup de temps.
- **La maîtrise des coûts** : perte de matière est beaucoup moins importante que dans les techniques traditionnelles dites soustractives.
- **La personnalisation** : Contrairement au moulage ou la modification nécessite la fabrication d'un nouveau moule, personnaliser le produit en impression 3D se fait au niveau du fichier 3D.
- **La précision avec la qualité de la haute résolution** : une impression 3D haute résolution est possible grâce aux techniques de laser. Dans ce cas elle est de l'ordre du micro.
- **La gestion de stock** : C'est la notion de «Spare part on demand», ou pièces détachées à la demande, ce qui permet de limiter les dépendances est d'éviter les rayonnages de pièces, encombrants et coûteux.
- L'impression 3D est aussi une réponse adaptée pour obtenir des pièces imprimées pas chères et rapidement.

Domaines d'utilisation

La fabrication additive est utilisée dans divers domaines de l'activité humaine. On distingue schématiquement les plus importants, figure 1 [10].

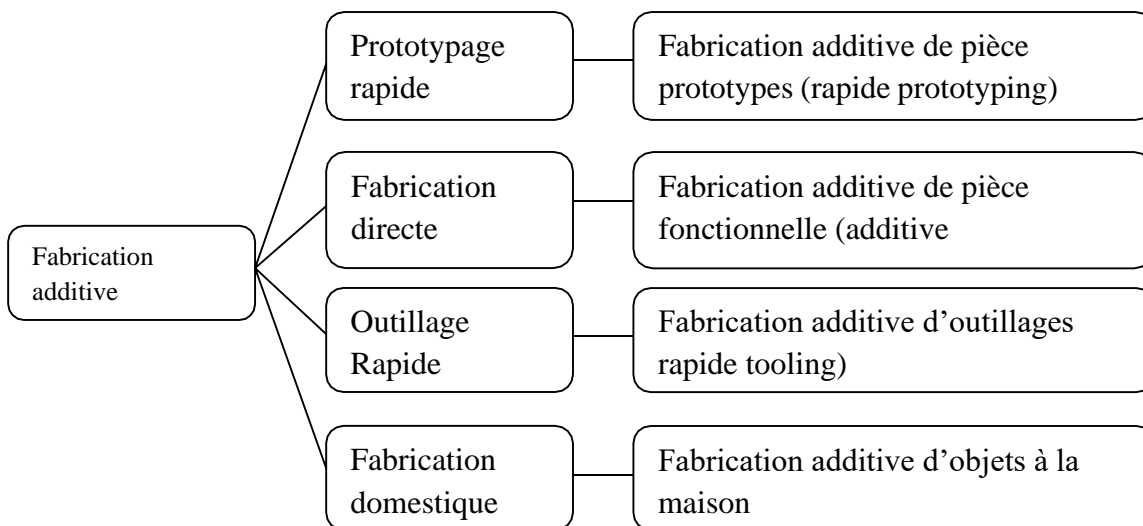


Figure 1: Branches de fabrication additive

Revue bibliographique des travaux précédents :

✓ **Attab Hind, "étude de l'influence de paramètres de fabrication sur les dimensions et le géométrique de pièces obtenues par impression 3D", Mémoire de master, université Badji Mokhtar Annaba, 2020 :**

➤ Ce mémoire présente une étude des caractéristiques de pièces obtenues par fabrication additive en fonction des paramètres de fabrication. L'étude concerne les effets de la fabrication sur les propriétés mécaniques et géométriques des pièces fabriquées par ce procédé. La réalisation des pièces par la technique du dépôt de filament fondu, a été exploitée pour analyser le processus de création du solide, en tenant compte des paramètres de fabrication. Les résultats ont mis en évidence l'influence de l'épaisseur des couches ainsi que l'effet d'écrasement de la première couche. L'analyse de la dispersion des mesures relatives aux dimensions et à la géométrie révèle le caractère aléatoire de ces mesures. Les causes dans le cadre de cette étude sont [13]:

- Le processus de mesure
- La présence de bavures
- L'opération d'ébavurage
- Des phénomènes physiques liés aux polymères

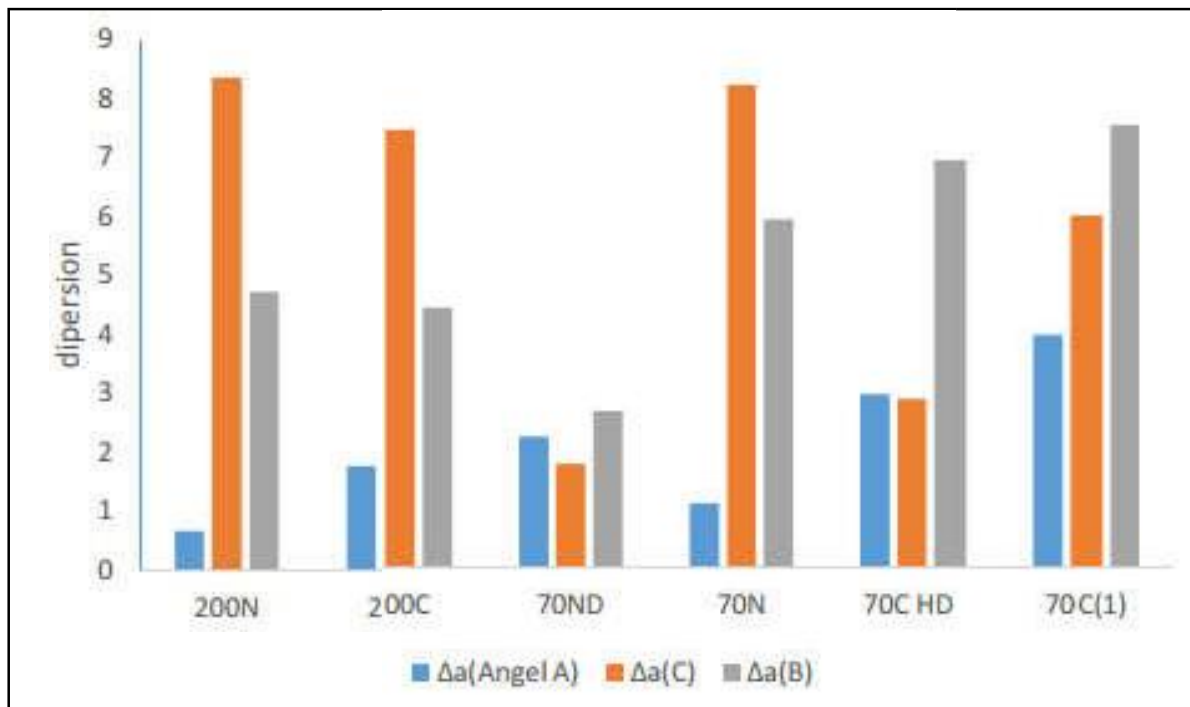


Figure 2 : valeurs des dispersions aléatoires dans le cas de l'angle A et des rayons B, C [13]

✓ **Messaada Mohamed Zakaria, Comportement mécanique des pièces fabriquées par impression 3D, Mémoire de master, université Badji Mokhtar Annaba, 2020 :**

Une étude sur le comportement mécanique en fonction des paramètres de fabrication des matériaux architecturés obtenus par impression 3D. Les éprouvettes sont obtenues par le procédé de fabrication FDM. Plusieurs paramètres ont été considérés pour établir les effets de la fabrication sur les éprouvettes. L'auteur présente une analyse de la masse et des dimensions qui a révélée les effets des paramètres étudiés. L'étude repose sur la réalisation des essais de traction monotones dans le but d'étudier les propriétés et le comportement mécaniques en fonction des paramètres de fabrication. Les résultats montrent l'influence du motif de remplissage et de la précision d'impression sur ces derniers. Le rapport entre les propriétés mécaniques et la masse a mis en évidence l'intérêt de réaliser des matériaux architecturés pour améliorer le rapport propriétés mécaniques/masse. L'analyse statistique réalisée dans le cadre de cette étude a montré la relation entre la masse et l'effort de rupture est linéaire. Par rapport aux autres paramètres, il est probable que la relation est non linéaire. Sinon il y absence de corrélation entre les paramètres choisis dans notre étude et les propriétés obtenues suite à l'essai de traction réalisé [14].

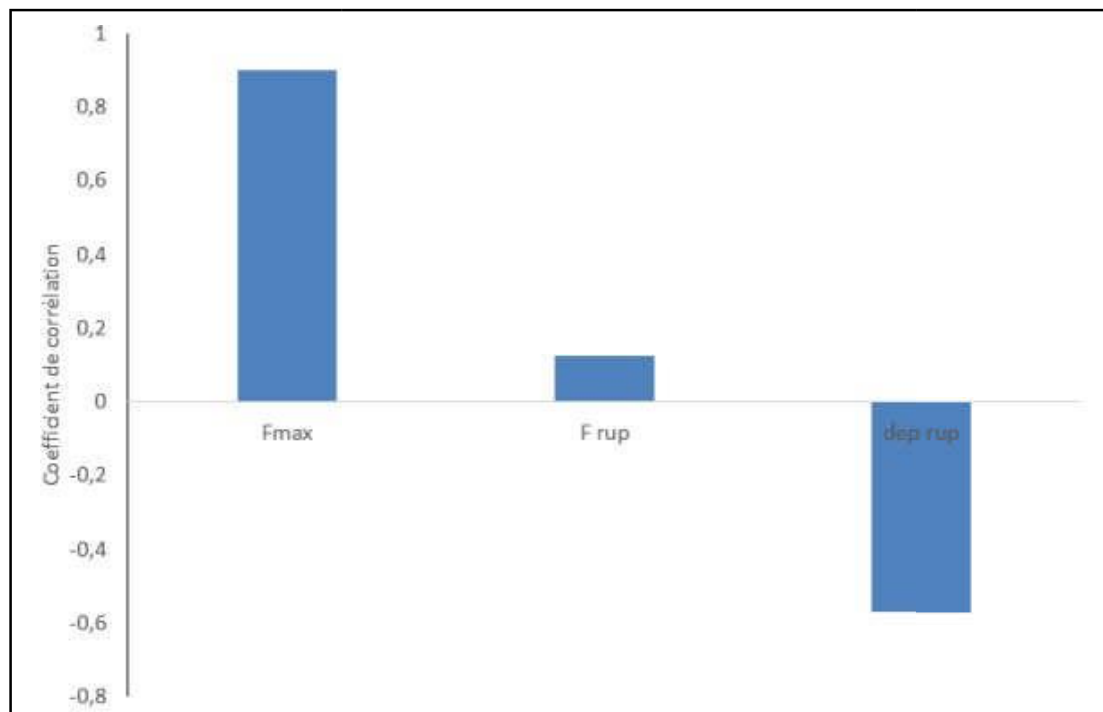


Figure 3 : Coefficient de corrélation [14]

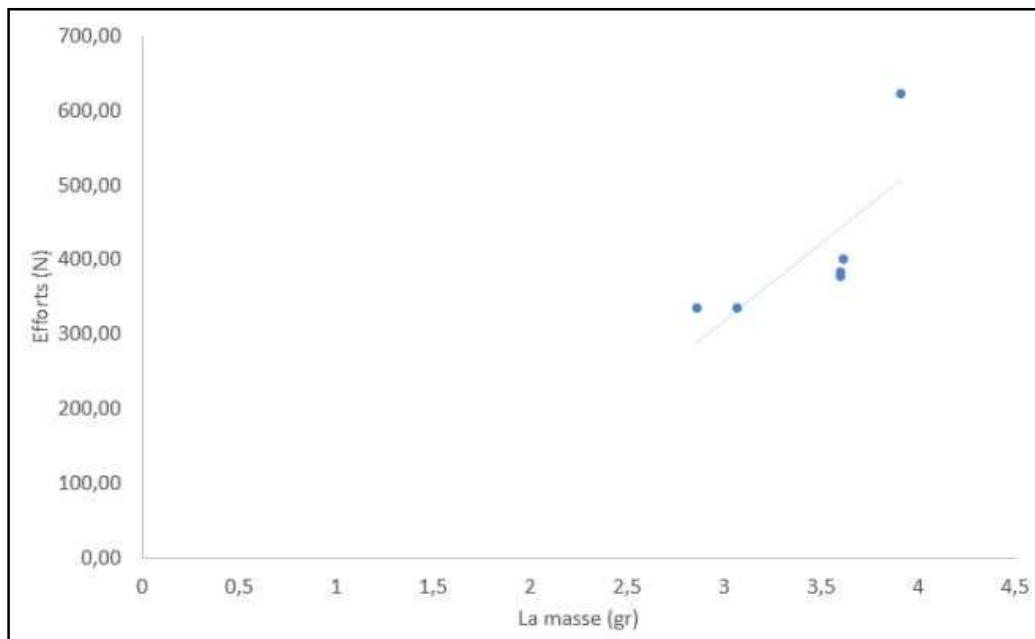


Figure 4 : Droite de régression [14]

✓ **AouadiNardjess, Analyse des propriétés des pièces obtenues par fabrication additive, Mémoire de master, université Badji Mokhtar Annaba, 2021 :**

Un travail précédent [11] a eu comme objectif d’analyser le procédé de fabrication par impression 3D dans le but de mettre en évidence du choix des paramètres de fabrication et leur combinaison sur les caractéristiques des pièces fabriquées notamment la matière utilisée et le temps relatif de fabrication. Le travail comporte une analyse statistique des mesures qui a permis de mettre en évidence l’absence de l’effet des paramètres choisis sur les mesures dimensionnelles effectuées

Tableau 1 : Application de ANOVA sur L (cas d’épaisseur 70)

Facteurs	Hollo	strong	Almoststrong
Moyenne	0,076667	0,021	0,014667
nombre d'observations	3	3	3

Tableau 2 : Analyse de la variance de la distance L

Variance	Somme des carrés	Degré de liberté	Quotient
Due au facteur	0.007	2	VA = 0.0035
Résiduelle	0.0073	6	VR = 0.024
Total	0.0143	8	

Tableau 3 : Application de ANOVA sur L (cas d'épaisseur 200)

Facteurs	Hollo	strong	Almoststrong
Moyenne	0,136	0,133667	0,118667
nombre d'observations	3	3	3

Tableau 4 : Analyse de la variance de la distance L (cas d'épaisseur 200)

Variance	Somme	Degré de liberté	Quotient
Due au facteur	0.0005	2	VA = 0.00025
Résiduelle	0.018	6	VR = 0.003
Totale	0.0185	8	

Chapitre II

Description générale de l'impression 3D

Et procédé de fabrication

Introduction

La fabrication additive ou impression 3D est un procédé de mise en forme de pièces par ajout de matière qui fait appel au principe d'empilement de couches successives [1].

A partir d'un fichier numérique, l'impression 3D est un processus de fabrication d'objets solides tridimensionnels.

L'objet imprimé en 3D est créé en superposant des couches de matériaux. Chacune de ces couches peut être considérée comme une coupe transversale horizontale mince de l'objet temporaire. Ce procédé s'appelle aussi processus additif.

L'impression 3D est l'opposé de la fabrication soustractive qui coupe ou creuse un morceau de métal ou de plastique avec des machines conventionnelles. Elle permet de créer des formes complexes (fonctionnelles) en utilisant moins de matériaux que les procédés de fabrication traditionnelles [3].

Description structurelle de la machine

Artillery Sidewinder X1 V1 (figure 5) est une imprimante 3D dont le fonctionnement est basé sur le principe FDM (fuseddepositionmolding). La machine offre un volume d'impression considérable couplé avec un système d'extrusion à entraînement direct. L'imprimante dispose d'une plaque d'impression à chauffage rapide [4].

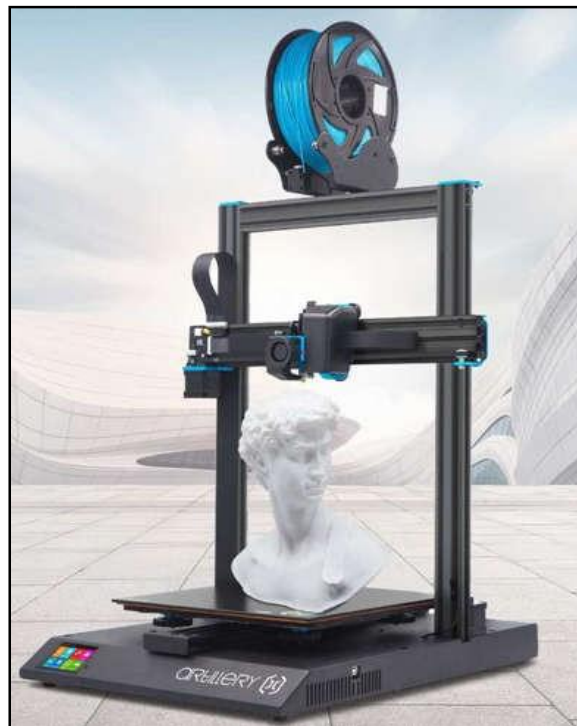


Figure 5: Artillery sidewinder X1 V1 3D [4]

Caractéristiques

Les principales caractéristiques de la machine sont [4] :

- Type de technologie : FDM/Filament
- Volume d'impression : 300 x 300 x 400mm (plateau de 310 x 310 mm)
- Encombrement de la machine :
 - 405 x 550 x 670 mm
 - 405 x 550 x 870 mm avec une bobine installée (non fournis)
- Type d'extruder : Direct Drive / extrusion direct de type titan.
- Taille de la buse : 0.4 mm
- Max. Température de l'extrudeuse : 240°c
- Max. Température du plateau : 130°c
- Hauteur de la couche : 0.1 mm → 0.28 mm
- Transfert de fichiers : clé USB et Micro SD
- Connexion ordinateur : USB
- Diamètre de filament : 1.75 mm
- Matériaux : PLA, ABS, PLA flexible, TPU, Bois, PVA, HIPS, etc.
- Trancheur recommandé : Cura
- Poids : 16.5 Kg

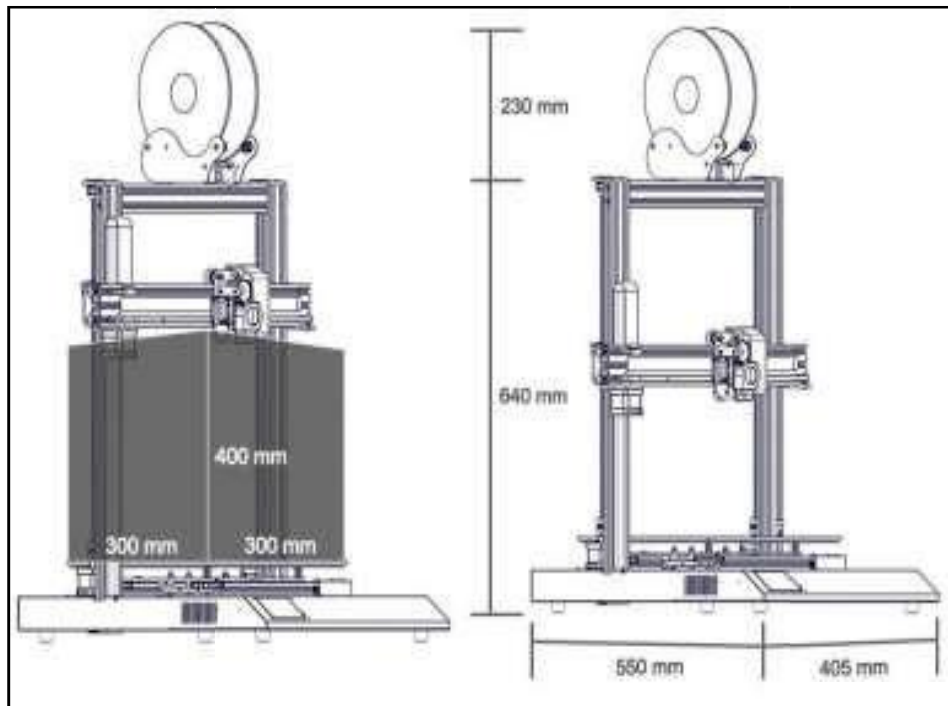


Figure 6 : Artillery sidewinder X1 3D printer [1]

Éléments constitutifs de la machine

Les principaux éléments de l'imprimante Artillery 3D printer sidewinder X1 sont [6] :

- Porte filament réglable
- Gestion propre des câbles
- Capteur de fin de filament
- Extrudeuse à entraînement direct
- Plaque de construction à chauffage rapide
- Large molette de mise à niveau
- Ecran couleur de contrôle tactile
- Impression via carte SD ou clé USB
- Capteur inductif de fin de course
- Alimentation avec fusible
- Coupleur flexible
- Coupleur Z breveté
- Poulie de courroie a haute précision
- Double axe Z synchronisé.

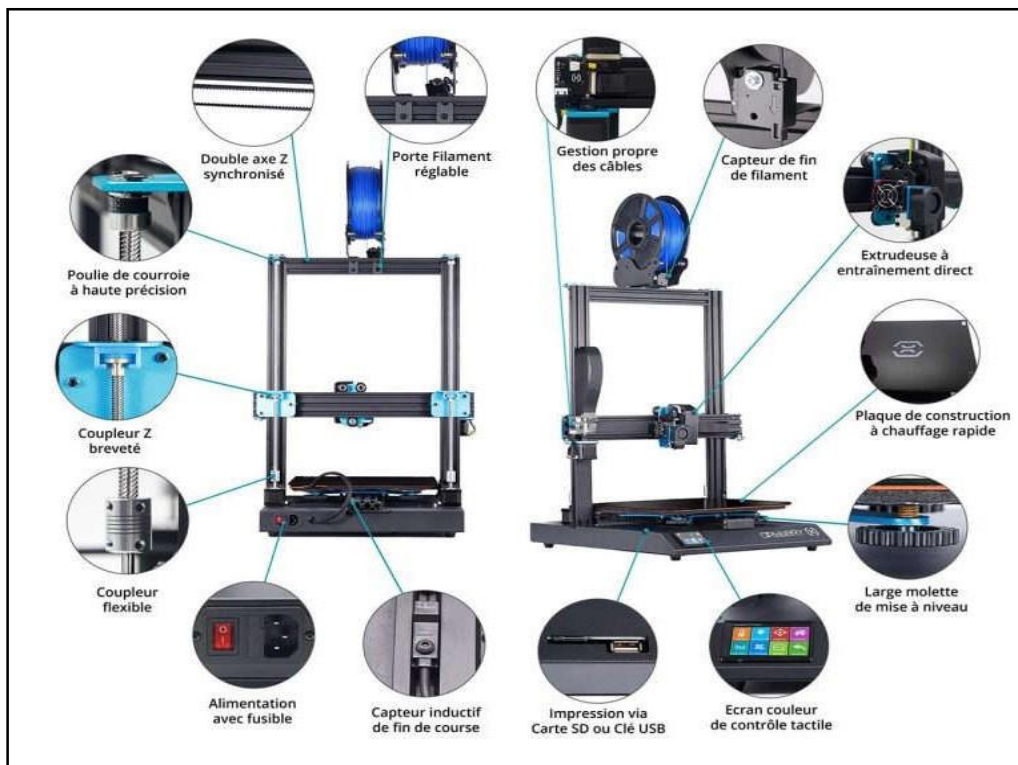


Figure 7 : Les principaux éléments de l'imprimante [6]

Principe de fonctionnement de l'imprimante 3D

L'opération d'impression 3D comporte plusieurs étapes (figure 8). On commence par un modèle 3D créé sur logiciels de CAO. Le modèle est ensuite exporté en format STL. Ce dernier est pris en charge par le logiciel spécialisé d'impression 3D Ultimaker CURA. On effectue ensuite des manipulations sur le modèle (orienter par exemple l'élément). Le logiciel d'impression 3D découpe en tranches le fichier du modèle 3D sous forme de centaines de coupes transverses numériques.

Une fois l'impression lancée, la machine imprime de manière séquentielle chaque couche, l'une au-dessus de l'autre, construisant ainsi un objet réel à l'intérieur de la chambre de construction de la machine [5].

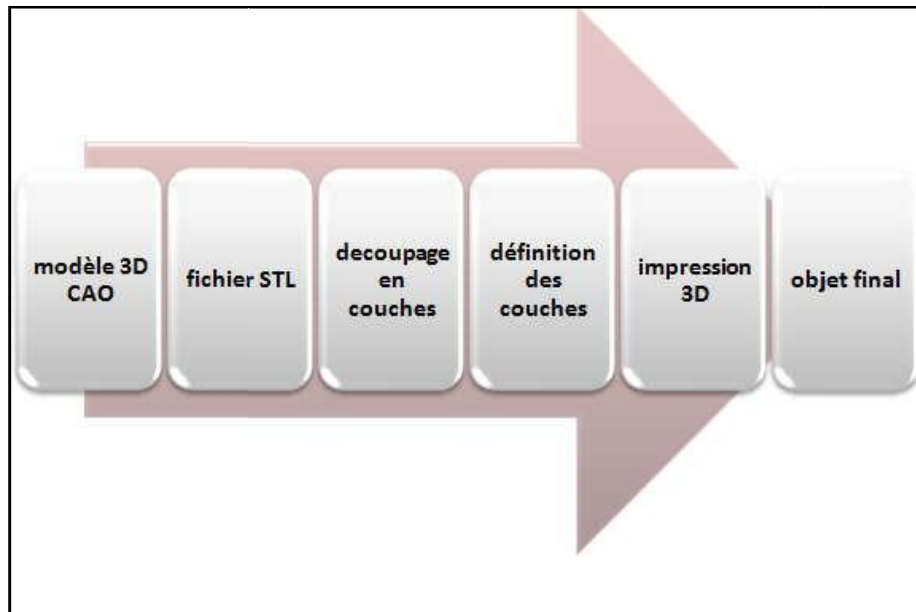


Figure 8 : Le procédé d'impression 3D en quelques étapes simplifiées

Description du procédé FDM : (FusedDeposition Modeling)

Dans cette méthode de fabrication (figure 9), on utilise un filament continu de polymère thermoplastique pour former des couches et obtenir le volume de la pièce à fabriquer. Le filament en question est chauffé au moyen d'un élément chauffant avant de parvenir à la buse. L'objectif est d'atteindre un état semi-liquide qui lui permet d'être extruder. Cet état est une propriété essentielle dans ce domaine, non seulement pour pouvoir le déposer, mais aussi, pour permettre au filament de fusionner pendant l'impression puis à se solidifier à température ambiante après le dépôt [8].

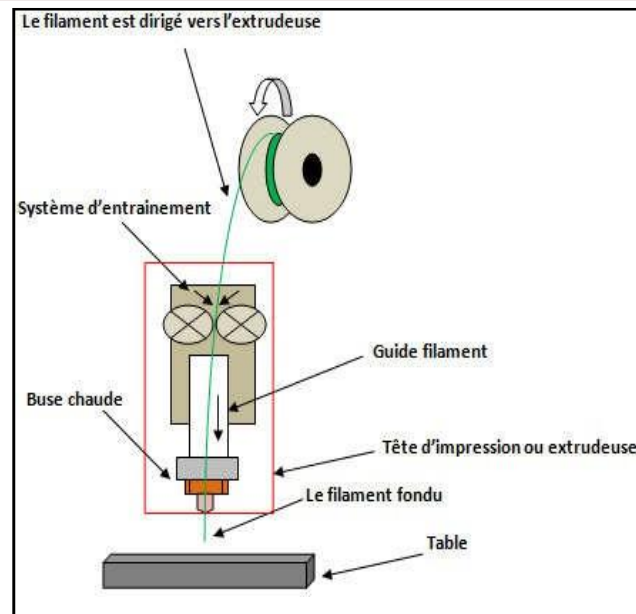


Figure 9 : Principe de la méthode de dépôt de filament fondu

Ce processus est paramétré de façon à obtenir une continuité dans la matière déposée à travers le filament. Les principales caractéristiques sont [8] :

- l'épaisseur de la couche
- la largeur du filament
- l'orientation des filaments
- le vide créé pendant l'opération

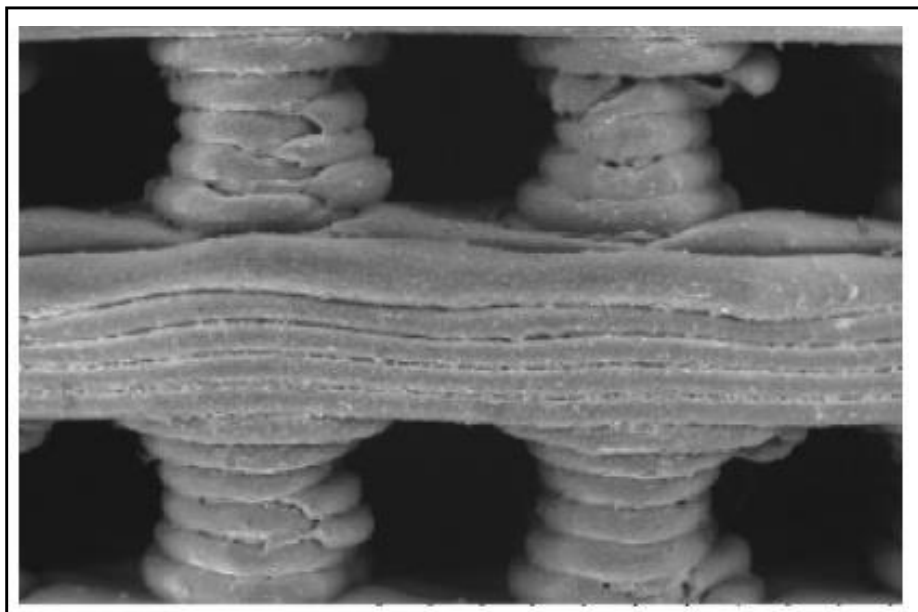


Figure 10 : Exemple de PLA [8]

Les avantages d'offre ces techniques sont [8] :

- un faible coût
- un temps d'exécution relativement court
- une simplicité de mise en œuvre

Les inconvénients de cette méthode sont [8] :

- la naissance de la distorsion inter-couches
- propriétés mécaniques faibles.
- aspect couche par couche.
- Mauvaise qualité de surface.
- un nombre limité de matériaux thermoplastiques.

Filaments utilisés

Une gamme diversifiée de matériaux et de propriétés de matériaux est disponible dans l'industrie des polymères commerciaux, et cette diversité commence maintenant à s'entendre à l'impression 3D. On distingue parmi les matériaux utiles à l'impression 3D quatre grandes familles : les polymères et les métaux qui sont les deux types de matériaux les plus utilisés, ainsi que les matériaux composites et les biomatériaux [1].

Les polymères

Contrairement aux autres types de matériaux, les polymères possèdent une palette très diversifiée, qui permet de les classer en fonction de caractéristiques telles que : la transparence, la couleur, la résistance à la traction, la rigidité, la biocompatibilité, la résistance à l'humidité, la stérilisation et les émissions de fumée.

On peut classer les polymères en deux groupes :

- Les thermoplastiques qui peuvent être ramenés à un état malléable a plusieurs reprises en les réchauffant. Refroidis, ils durcissent. Ils sont donc mis en forme sous l'effet de la chaleur. Les plus répandus pour la fabrication additive sont l'ABS et le PLA au niveau des imprimantes à usage domestique
- Thermodurcissables qui sont mis en forme sous l'effet d'un catalyseur (chaleur, rayon UV, agent durcisseur). Ils sont fixés en permanence une fois formés. Ils ne peuvent pas être retravaillés, le durcissement par catalysations étant irréversible.

a) Les thermoplastiques : ABS et PLA

L'acrylonitrile butadiène styrène ou ABS est un polymère thermoplastique, utilisé par l'ensemble des imprimantes à usage personnel. Fondant entre 200 et 250°C, une fois durci, l'ABS est capable de résister à d'importantes variations de température, allant de -20°C à +80°C.

C'est un matériau qui n'est pas biodégradable, et contrairement au PLA il émet 10 fois plus de particules lorsqu'il est chauffé. Ces émissions constituent un risque pour la santé (cf. la section 2.5), qui mériterait d'être considéré par les utilisateurs.

L'ABS est utilisé dans de nombreux objets composés de plastiques qui nous entourent : ordinateurs, téléphones, lego, etc.

L'acide polylactique ou PLA est un polymère thermoplastique utilisé par les imprimantes 3D fonctionnant avec le procédé FDM. Sa température de fusion est entre 160 et 220°C, le PLA durcit moins rapidement que l'ABS. En pratique le PLA est plus facile à mettre en œuvre que l'ABS, car moins sensible aux variations de températures qui amplifient le phénomène de warping (déformation et impression adhérence des pièces imprimées au plateau) et permet une impression « théorique » sans plateau chauffant.

Fabriqué à partir d'amidon, le PLA est biodégradable et compostable, sous certaines conditions. Il est de plus en plus répandu au sein du grand public. A noter que le PLA est hydrophobe et est moins résistant que l'ABS [1].

Le PLA (non-chargé) s'imprime avec une buse classique en laiton classique. Sous forme de filament, le PLA assure une impression 3D sans problèmes grâce à sa fiabilité et à sa bonne qualité de surface. Ses principales vertus sont [7] :

- sa résistance à la traction,
- sa qualité (par rapport à l'aspect),
- sa facilité de mise en œuvre (même à une vitesse élevée)
- sa commodité pour l'impression (à domicile ou au bureau)

b) polyamides et résines

Le polyamide (PA) est le polymère le plus couramment utilisé dans les procédés de fusion par lit de poudre (c'est-à-dire par frittage au laser). Le nylon est un polyamide synthétique, et les deux termes sont souvent utilisés de façon interchangeable. Les poudres PA ne peuvent pas être réutilisées à

perpétuité. La poudre non frittée dans la chambre de construction est chauffée à une température juste au-dessous de son point de fusion, ce qui modifie légèrement ses propriétés thermiques et mécaniques.

Les matériaux utilisés dans les procédés de photopolymères (projection de matière et photo polymérisation en cuve) sont des polymères thermo durcis. La composition des matériaux est généralement développée par les entreprises et gardée secrète. La plupart de ces résines liquides sont mises au point pour se solidifier lorsqu'elles sont exposées a des rayons UV servant d'agent thermo durcisseur. La plupart des fabricants de systèmes de photo polymérisation développent et vendent leurs propres résines, spécifiques à un seul type de machine (Wöhler, 2016) [1].

Les matériaux composites

Les composites sont par l'association d'un renfort (le plus souvent solide) et d'une matrice (plus ou moins liquide). L'un des matériaux de base les plus communs est le polyamide (nylon) utilisé dans les systèmes de fusion sur lit de poudre, mais aussi grandement utilisé dans les systèmes d'extrusion de matière (FDM/FFF). Les matériaux ajoutés pour former un composite comprennent le verre, l'aluminium et les fibres de carbone.

Les matériaux composites sont souvent utilisés afin d'améliorer les propriétés du produit fini, telles que sa résistance a la traction, sa densité ou encore sa rigidité.

a) l'alumide

L'alumide est un mélange de poudre de polyamide et de fines particules d'aluminium. Il possède l'aspect du métal, et présente une meilleure résistance à la chaleur que la plupart des thermoplastiques.

Principalement employé dans les procédés de frittage laser, il permet de fabriquer des pièces d'apparence métallique, qui ne sont pas exposées à des contraintes physiques trop importante. L'alumide nécessite un traitement post-impression important (meulage, polissage, traitement de revêtement externe). Il permet d'obtenir des objets domestiques et éducatifs, ainsi que des moules de petite série [1].

Métaux

Principalement répandus dans les industries de pointe telles que l'aérospatial, le domaine chirurgical et dentaire, les métaux utilisés par la DMLS tels que l'acier inoxydable, le titane, le

cobalt ou encore l'or et l'argent permettent de créer des structures complexes, jusque-là impossibles à fabriquer par les procédés industriels traditionnels [1]:

- L'aluminium et ses alliages : c'est un alliage classique capable de résister à de fortes charges, utilisé dans les pièces qui composent les moteurs.
- Le cobalt et ses alliages : Il est répandu dans le domaine biomédical et dans l'ingénierie à haute température.
- Le titane et ses alliages : C'est un matériau biocompatible, qui offre une excellente adhérence au tissu osseux par exemple. Il est cependant 50 fois plus cher que l'acier

Autres matériaux

Les nouveaux matériaux sont porteurs de changements potentiellement importants. On peut donner en exemple dans le secteur de la construction l'utilisation du béton et de sable pour la fabrication de maisons grandeur nature imprimées en 3D. Aussi, le bois pour la fabrication de pièces artistiques, la céramique pour des pièces plus techniques [1].

Application

Le PLA est utilisé dans la fabrication outils ménagers, jouets, projets éducatifs, objets de présentation, prototypage, modèles architecturaux ou moulage à la cire perdue pour la fabrication de pièces métalliques [7].

Chapitre III

Mode d'obtention et analyse préliminaire des pièces obtenues

Introduction

Le travail réalisé repose sur fabrication par impression 3D des pièces imprimées dans différentes orientations (0° , 45° , 90°). L'objectif est d'étudier des paramètres d'impression sur les propriétés des pièces fabriquées tel que les temps technologiques. Le choix de cette géométrie rentre dans le cadre d'une étude qui vise l'influence des paramètres structurels et de fabrication sur les propriétés mécaniques des pièces obtenues par impression 3D.

Les étapes de la fabrication additive

- ❖ **Etape 1** : Réalisation du modèle 3D
- ❖ **Etape 2** : exportation du fichier en format STL
- ❖ **Etape 3** : choix en introduction des paramètres d'impression
- ❖ **Etape 4** : conversion du fichier en G-code
- ❖ **Etape 5** : Le Lancement de produit (le prototypage rapide)

Description de la pièce étudiée

La figure (11) Montre le dessin de la pièce à fabriquer. Par rapport à la problématique de base de ce travail. Nous avons choisi une géométrie comportant une forme de petites dimensions qu'on rencontre dans les systèmes mécaniques telles fin de courses, les encoches et les gorges.

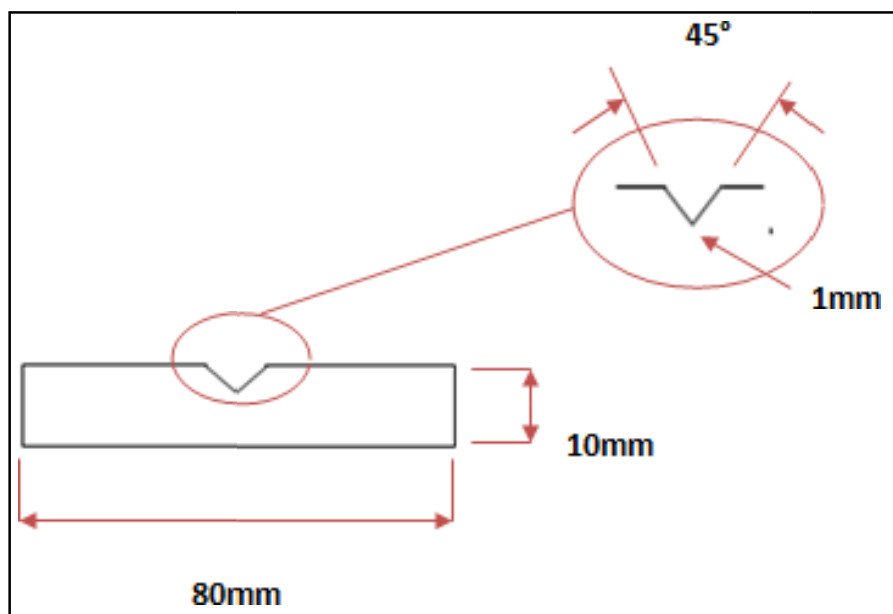


Figure 11 : Géométrie des pièces

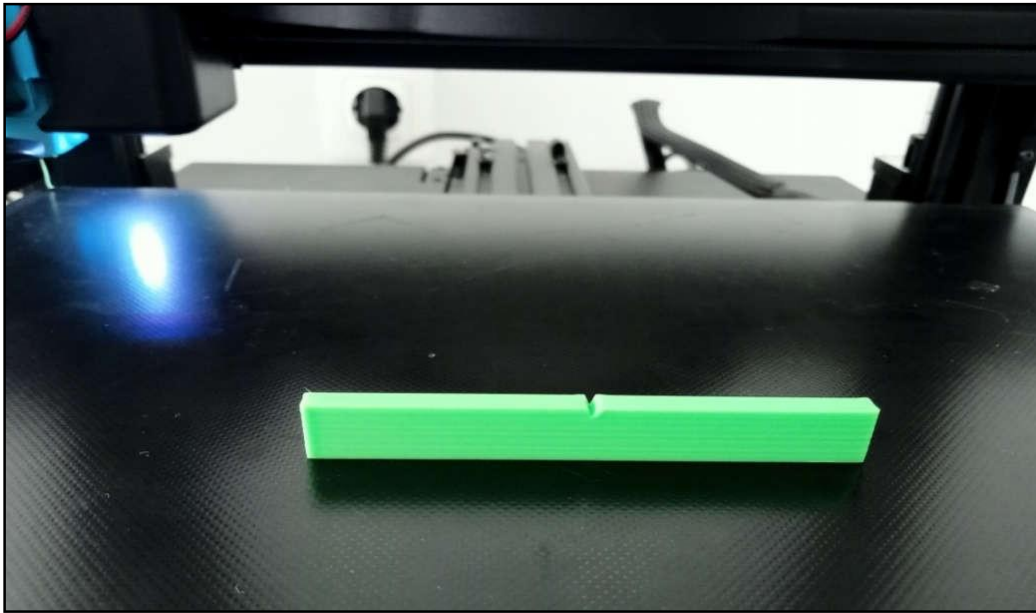


Figure 12 : La pièce obtenue par impression 3D

Les paramètres d'impression dépendent directement de la machine et de son logiciel de gestion. En effet nous disposons des paramètres suivants :

Tableau 5: Les paramètres d'impression

Vitesse d'impression	60 mm/s
Densité de remplissage	100%
Température de la buse	200°
Température du plateau	60°
Epaisseur de dessous/dessus	1.2 mm
Epaisseur de la paroi	1.2 mm
Hauteur de la couche	0.3 mm
Nombre de ligne de la paroi	3

L'intérêt de cette étude porte sur les paramètres :

- L'orientation dans le plan.
- Le positionnement.
- Le nombre de pièces.

Les trajectoires de la tête d'impression : (Cas de trois pièces orientées à 90°)

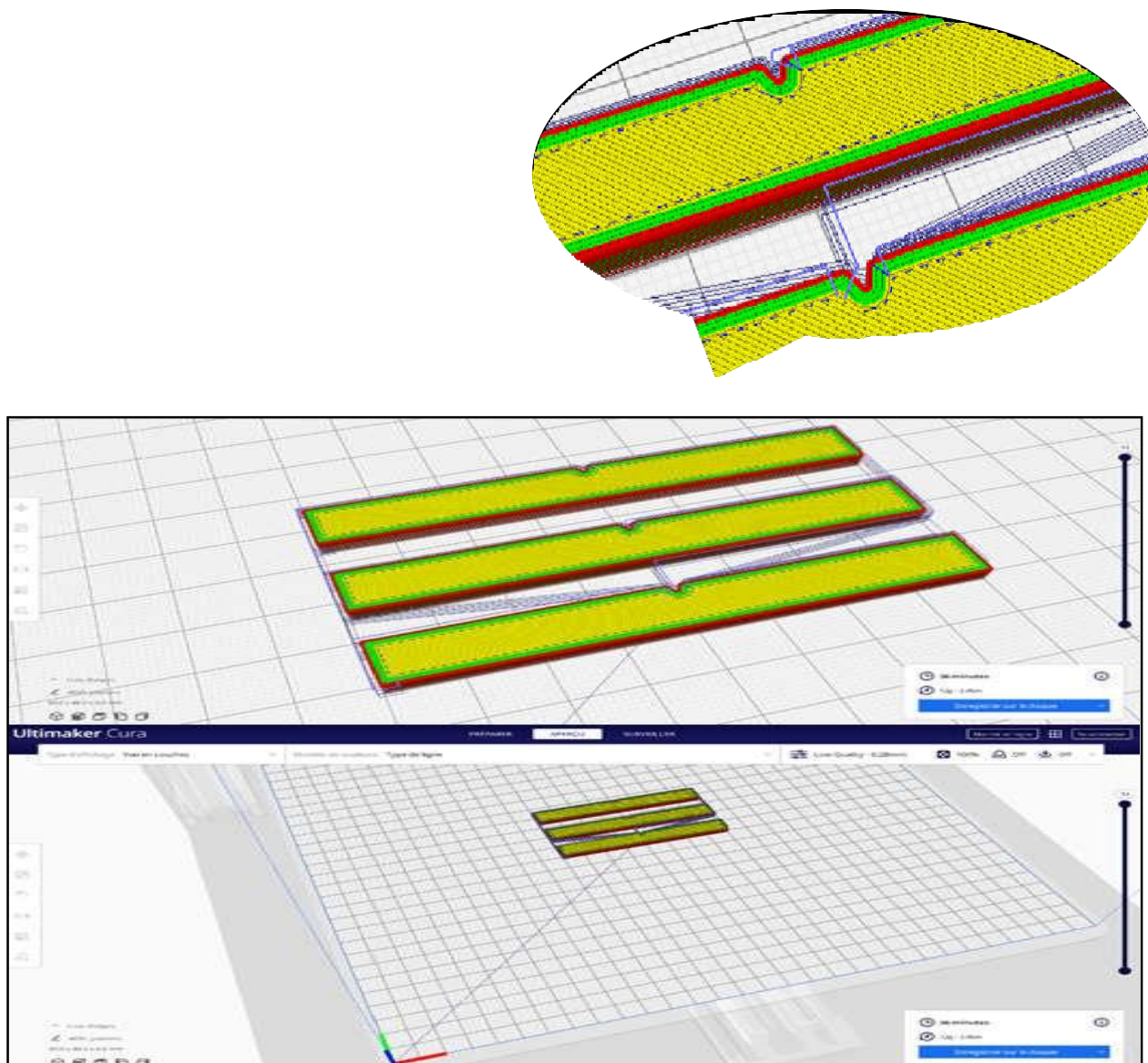


Figure 13 : les parcours de la tête

La figure 13 montre les trajectoires effectuées (ligne au bleu) par la tête d'impression pour passer du point initial au premier point d'impression des pièces. Aussi, le passage d'une pièce à une autre sachant que la progression de la tête en hauteur est commune pour l'ensemble des pièces.

Analyse qualitative et quantitative

- L'état de surface de la couche inférieure est différent de l'état de surface de la couche supérieure libre parce que la couche inférieure est écrasée, par contre la couche supérieure présente une plus grande rugosité.
- La pièce résultante ne présente pas de défauts apparents tel que : les bavures qui nécessitant des opérations post-impression.
- L'état de surface apparent de la couche inférieure ou supérieure dépend de l'orientation des pièces.
- Bonne répétabilité des pièces par rapport à la forme et aux dimensions.

L'analyse de la quantité de matière utilisée dans la fabrication des pièces est effectuée par la mesure de la masse des éprouvettes. Cette opération a été effectuée sur une balance de précision, figure (14). La procédure de mesure comporte les étapes suivantes :

- Mise en marche de la balance
- Positionnement de la balance
- Calibrage de la blanche
- Mettre la pièce à mesurer dans la balance
- Lecture de la mesure



Figure 14 : La balance utilisée

Les principales caractéristiques de ce dispositif sont regroupées dans le tableau (6) :

Tableau 6:caractéristiques de la balance [12] :

Modèle	Ohaus AR124CN
Capacité (g)	120
Lisibilité (g)	0.0001
Répétabilité (g)	0.0001
Erreur de linéarité (g)	± 0.0002
Temps stable (s)	4s
Type précis	L
étalonnage	Calibrage extérieur automatique, poids compris

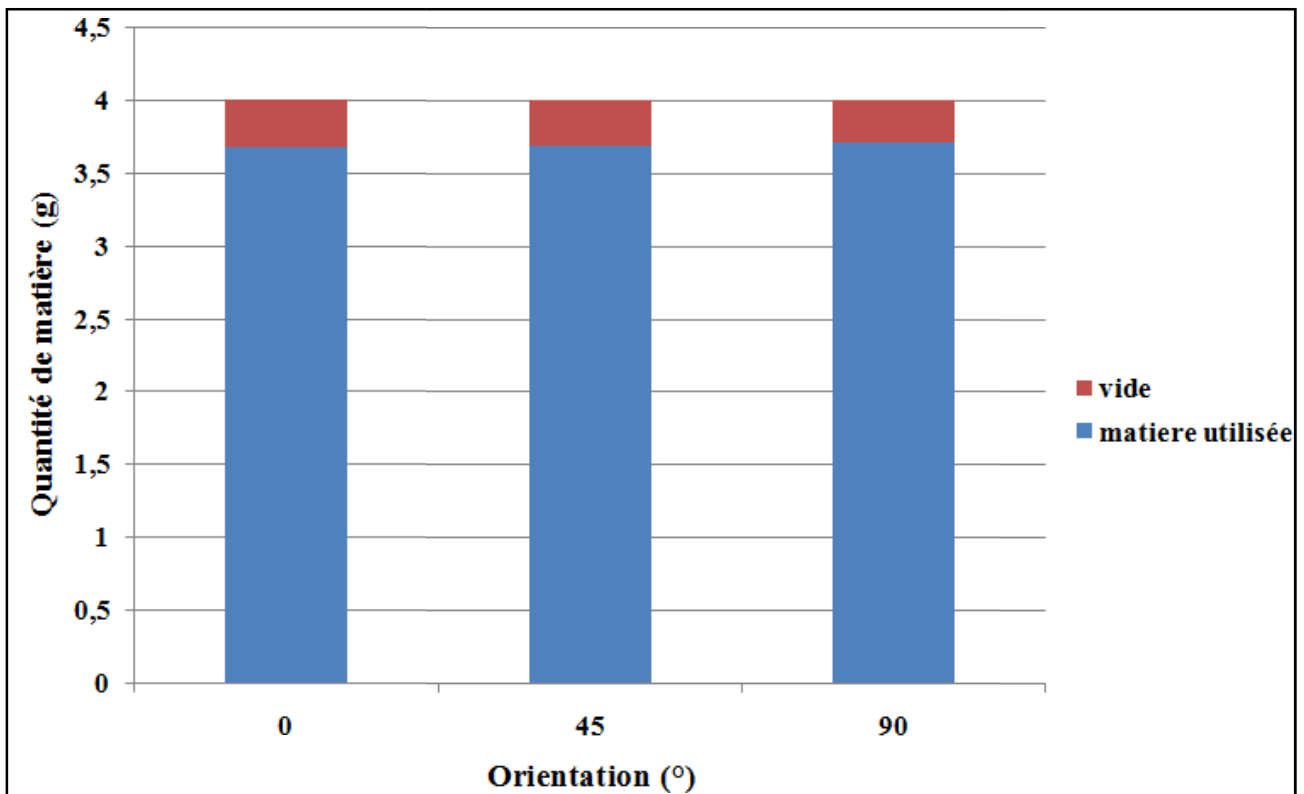


Figure 15 : Quantité en masse relative de la matière utilisée

- On remarque que l'orientation n'a pas d'effet notable sur la quantité de matière utilisée.
- Par rapport à une pièce injectée, Le volume des pièces obtenues par impression 3D, est une association structurée matière et vide. Cette structure (figure 16), est régie par la stratégie de dépôt de filament.
- L'orientation n'a pas d'effet sur la création du vide (le même taux de vide)

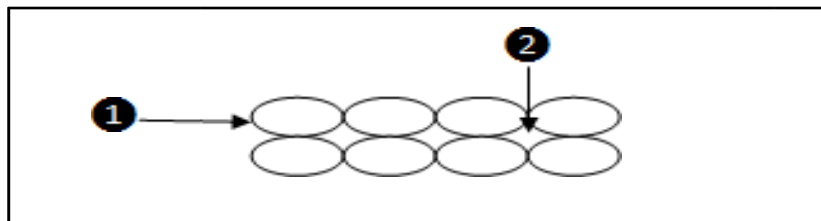


Figure 16 : schéma de la structure de la pièce

- ① : la matière.
- ② : le vide.

En métrologie ou l'élément de base est la mesure, on utilise des appareillages de mesure pour déterminer des grandeurs quantitatives relatives aux dimensions. Chaque procédé de mesure suppose une erreur qui peut provenir [11]:

- de l'appareil de mesure ;
- de la méthode ;
- des pressions de contact ;
- des variations de température ;
- de l'opérateur, etc.

Dans notre cas, les mesures ont été effectuées au moyen d'un microscope optique de métrologie situé au niveau du laboratoire de mécanique industrielle (LMI) de l'université BADJI Mokhtar Annaba.



Figure 17 : Dispositif optique de mesure

Les grandeurs mesurées concernent l'entaille. Deux types de mesures ont été effectuées, la mesure des angles et rayons des pièces (figure 18,19).

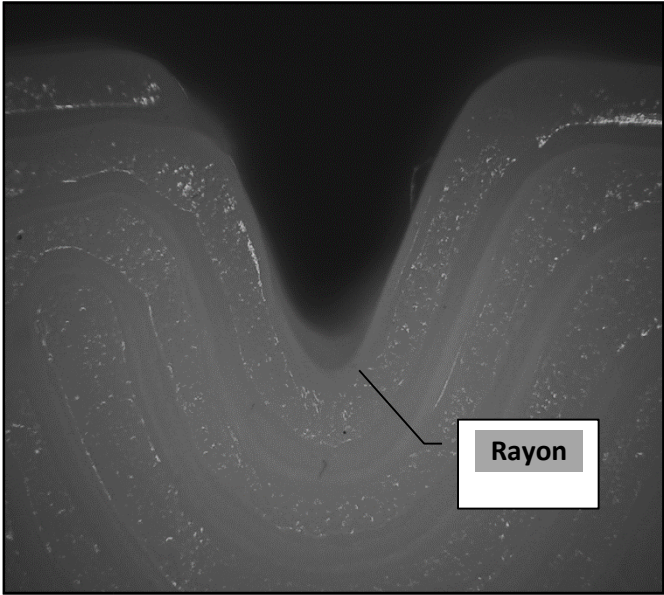


Figure 18 : Rayon de la pièce

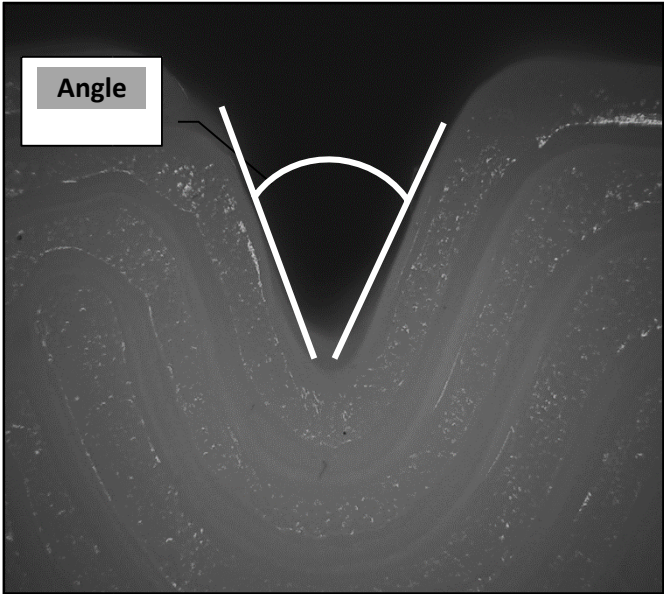


Figure 19 : Angle de la pièce

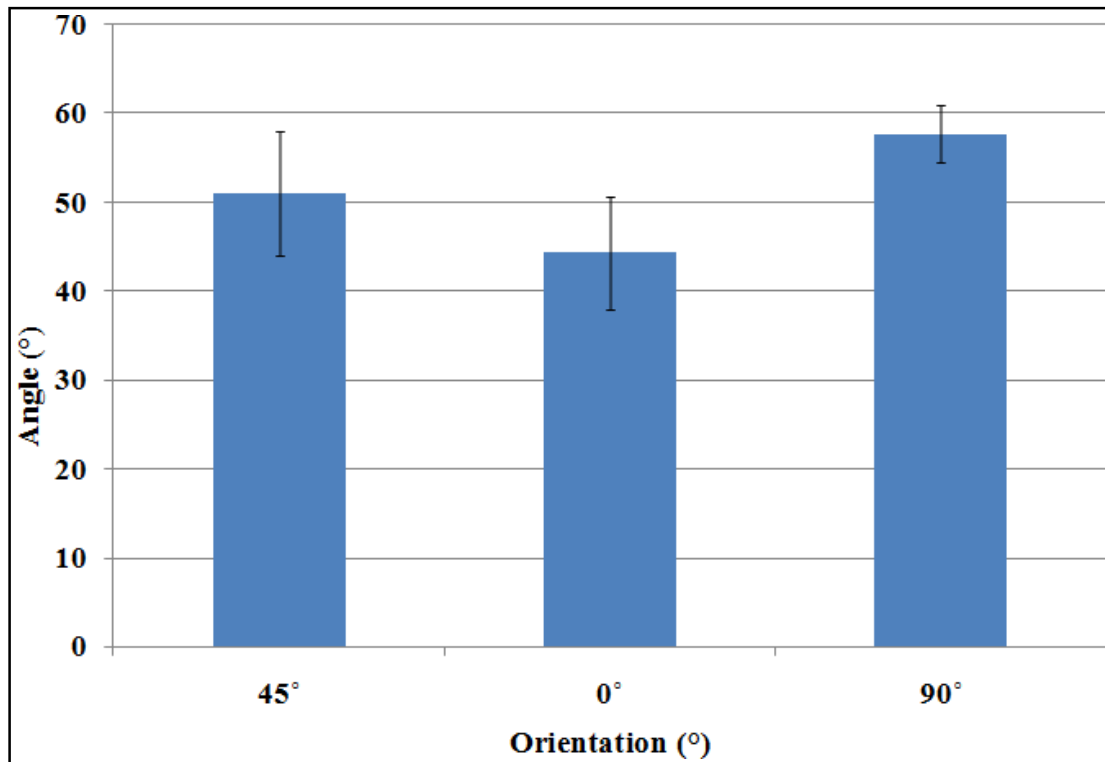


Figure 20 : Mesure des angles

La figure 20 montre la dispersion des moyennes des mesures de l'angle de l'éprouvette correspondantes aux trois orientations. Il est à noter que les valeurs mesurées présentent des dispersions différentes dans chaque orientation.

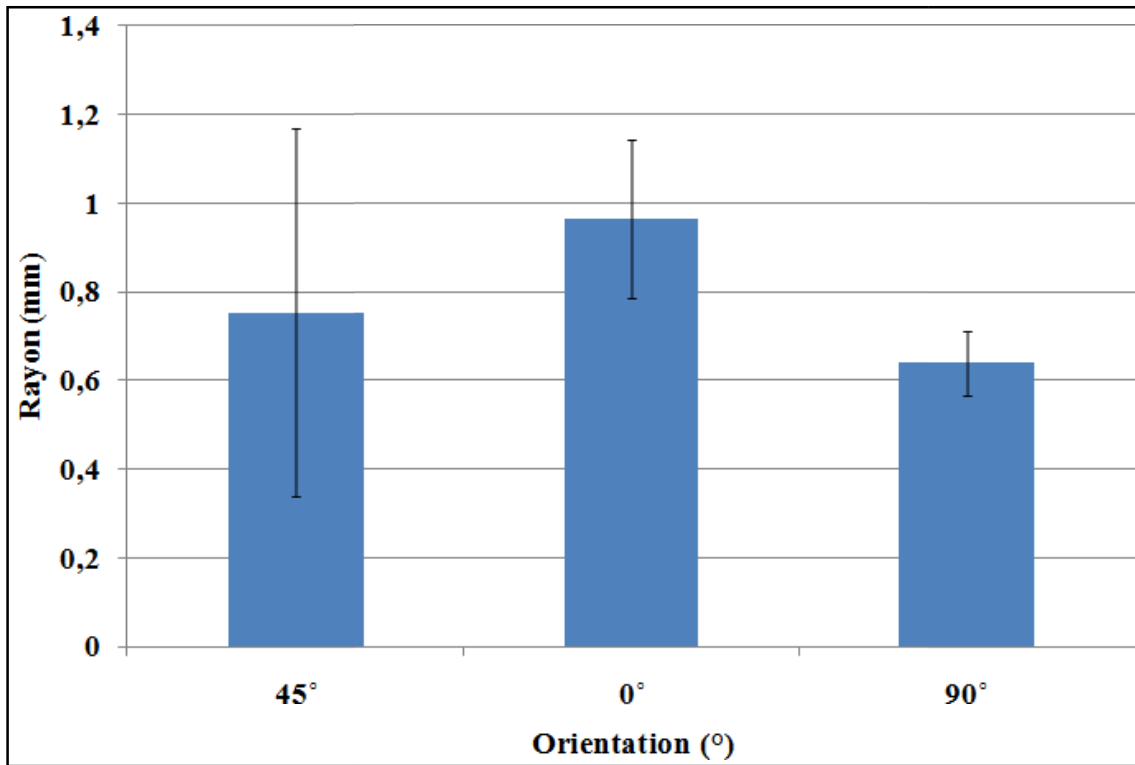


Figure 21 : Mesure des rayons

La figure 21 montre la dispersion des moyennes des mesures des rayons de l'éprouvette dans les trois orientations. Il est à noter que les valeurs mesurées présentent des dispersions différentes dans chaque orientation.

Chapitre VI

Analyse du temps de fabrication

Introduction

Le temps nécessaire à la fabrication d'une pièce est un facteur important dans toute démarche d'optimisation de la production. Traditionnellement, le temps de fabrication dans le cas de l'usinage représente la somme du temps d'usinage et des temps auxiliaires ou le temps pour la substitution des outils. Dans ce cas, le temps total de production d'une pièce **Tt** ou temps de fabrication d'une pièce est constitué des composantes suivantes [9]:

- ❖ *Le temps de coupe;*
- ❖ *Les temps auxiliaires (changement de pièce, prises de passes,...);*
- ❖ *Les temps de changement d'outils.*

Généralités sur le concept des temps de fabrication cas de l'usinage

La détermination des temps de préparation et de réalisation des usinages peut provenir d'une estimation, d'une mesure (chronométrage) ou d'un calcul. On distingue plusieurs types de temps, respectivement [9]:

- **Temps technologique (Tt)** : temps pendant lequel la machine travaille, celui-ci dépend des conditions de coupe employées.
- **Temps manuel** : (ou temps humain Tm) : temps correspondant à un travail humain.
- **Temps technico-manuel (technico-humain Ttm)** : temps pendant lequel l'opérateur et la machine travaillent conjointement sur la même opération.
- **Temps masqué (Tz)** : temps qui correspond à un travail réalisé simultanément avec une autre activité.
- **Temps de série (Ts)** : temps nécessaire à la préparation pour la série de pièces à réaliser.

Les différents temps peuvent être représentés graphiquement de manière chronologique. Les différents temps peuvent être d'exécution, simultanée ou successive, intervenant dans une phase. Elles sont représentées à partir d'une échelle de temps. Par convention la représentation est la suivante [9] :

- ✓ les temps manuels sont représentés par un double trait continu;
- ✓ les temps technologiques par un trait fort continu ;

- ✓ les temps technico-manuels par deux segments parallèles reliés par un trait continu en diagonale.
- ✓ L'identification des différents temps est assurée par un numéro correspondant à leur rang d'intervention dans la phase. La figure suivante donne un exemple de simogramme.

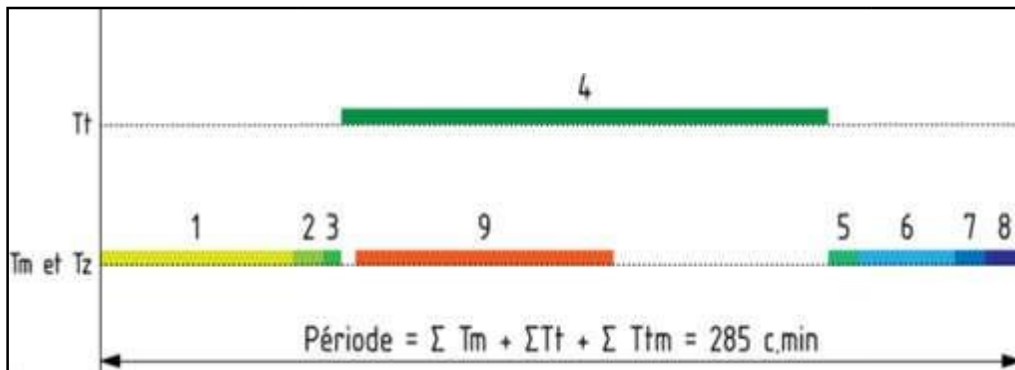


Figure 22 : Différents temps d'exécution [9]

Le temps technologique représente la durée du travail effectué par un (plusieurs) outil(s). Il est fonction uniquement des moyens matériels et tient compte de l'engagement et du dégagement de l'outil.

Dans le cas du tournage nous avons [9]:

Temps technologique de chariotage

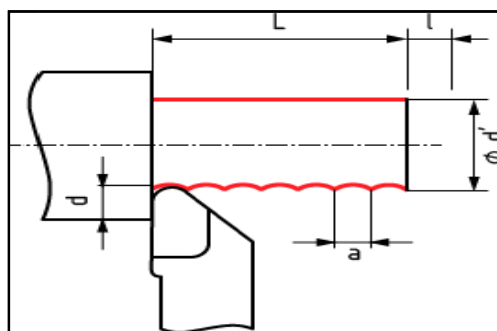


Figure 23 : Tournage [9]

Temps technologique de dressage

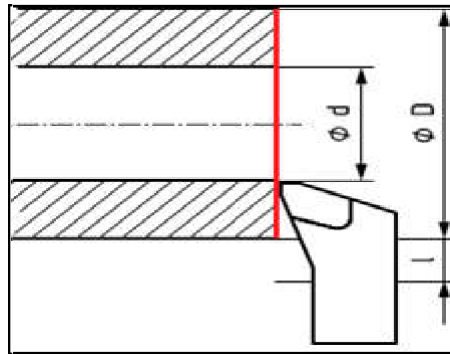


Figure 24 : Tournage-Dressage [9]

Temps technologique en filetage

En filetage il faut prendre en compte, pour le calcul du temps d'usinage, le **pas du filetage**

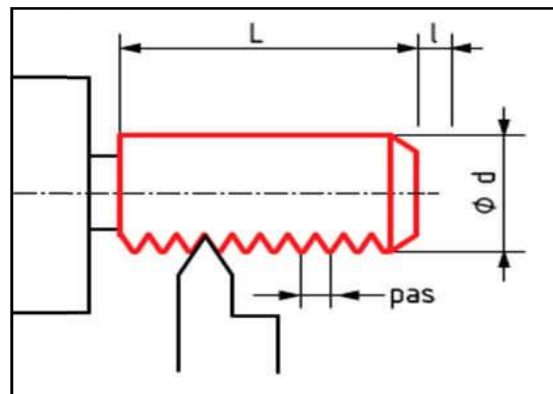


Figure 25 : Filetage [9]

Temps technologique pour le fraisage en roulant

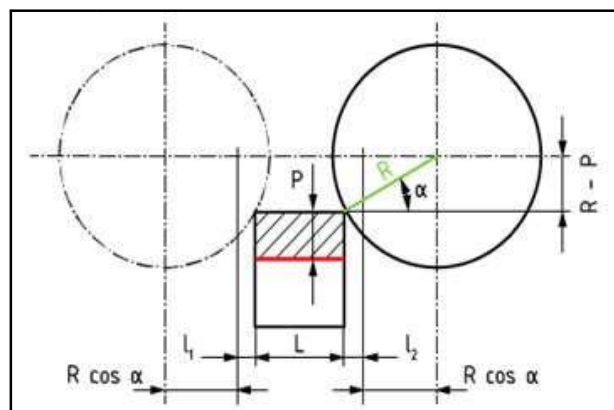


Figure 26 : Fraisage (en roulant) [9]

Temps technologique pour le fraisage en bout

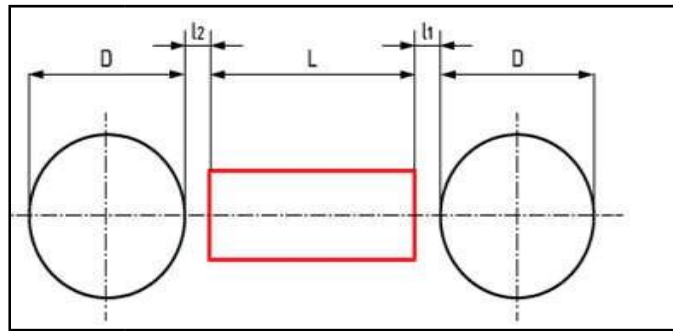


Figure 27 : Fraisage en bout [9]

Temps technologique pour le rabotage

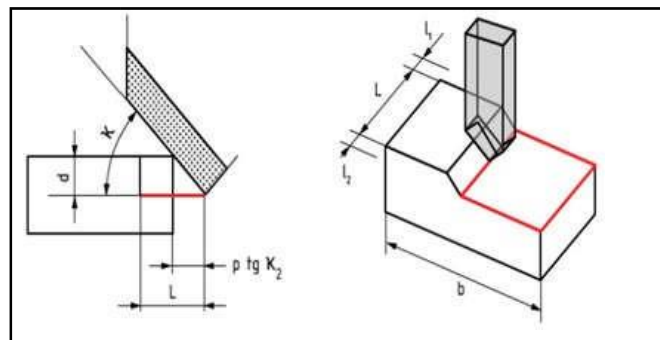


Figure 28 : Rabotage [9]

Temps technologique pour les opérations de perçage, lamage, alésage

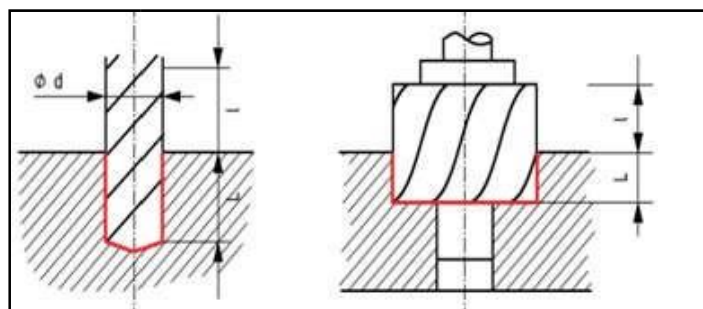


Figure 29 : Perçage, alésage, lamage [9]

Description des temps relatifs à l'impression 3D

Le temps d'impression 3D dépend principalement du matériau, du volume de la pièce de la précision souhaitée. On distingue plusieurs types de temps:

- **Temps de chauffage** : le temps nécessaire à la tête et le plateau pour parvenir à la température l'impression.
- **Temps de pré-impression** : le temps nécessaire pour dégager (éliminer) une partie de filament restant de la dernière impression.
- **Temps d'approche** : le temps nécessaire pour le déplacement de la tête de l'origine jusqu'au premier point d'impression de la pièce.
- **Temps d'impression** : le temps nécessaire de la machine pour déposer le filament nécessaire à la création du volume de la pièce.
- **Temps de dégagement** : le temps nécessaire au dégagement de la tête jusqu'à un endroit qui permet la récupération de la pièce.

Analyse du temps d'impression

Impression unitaire (unitaire)

Le temps total est donc décomposé en différents temps. Dans le cas d'une impression à 0°, la plus grande partie du temps total est le temps de fabrication 84,66%. Le temps de chauffage représente 11,98 % et les autres temps 3,28%.

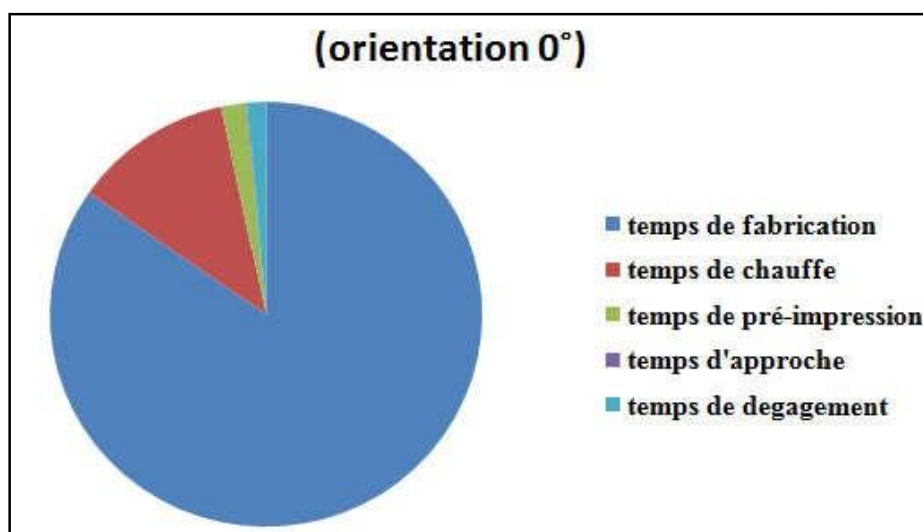


Figure 30 : Temps total d'une seule pièce orientation 0°

Dans le cas d'une impression à 45°, la plus grande partie du temps total est le temps de fabrication 84,65 %. Le temps de chauffage représente 11,99 % et les autres temps 3,34 %.

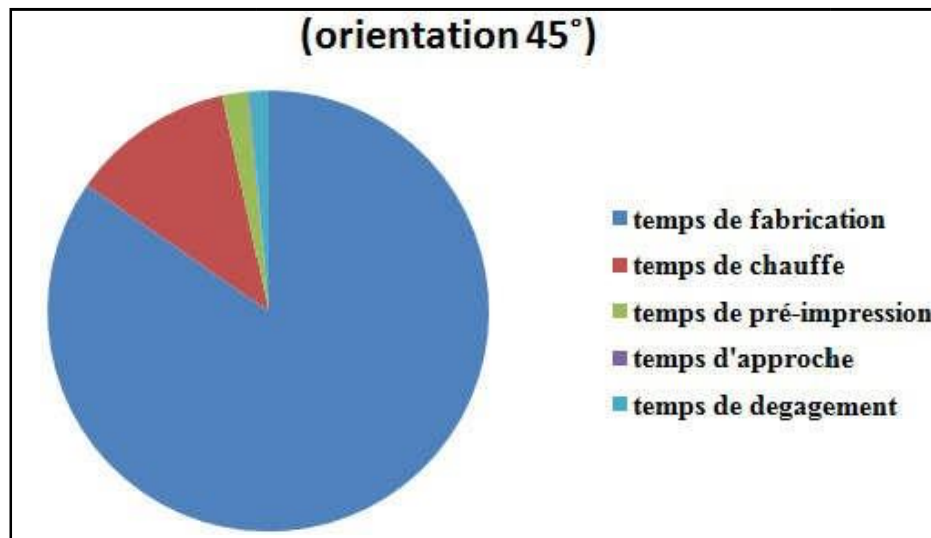


Figure 31 : Temps total d'une seule pièce orientation 45°

Dans le cas d'une impression à 90°, la plus grande partie du temps total est le temps de fabrication 85,66 %. Le temps de chauffage représente 11,2 % et les autres temps 3,31%.

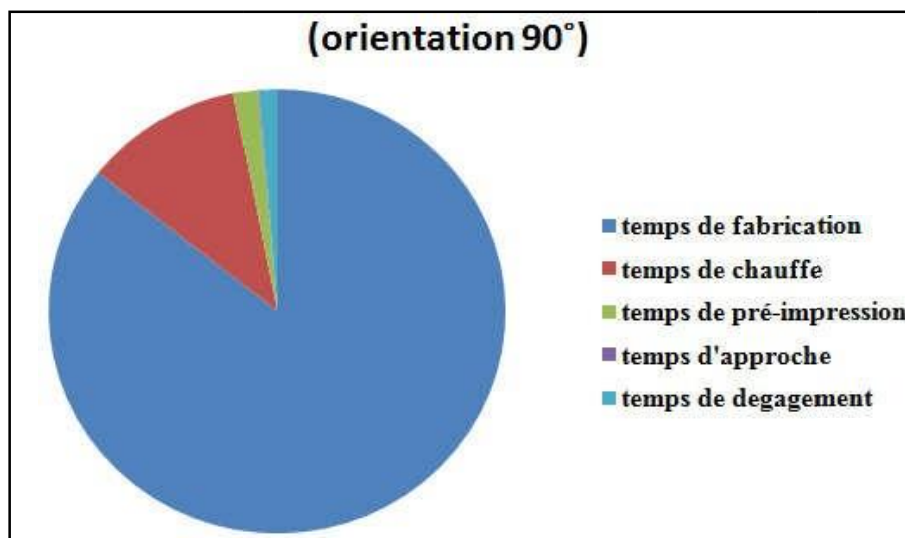


Figure 32 : Temps total d'une seule pièce orientation 90°

Impression d'un ensemble de trois éprouvettes

Dans le cas de l'impression de trois pièces (figure 33, 34, 35), le temps d'impression a augmenté de 10 % par rapport à une impression unitaire pour les 3 directions. Dans le cas d'une impression à 0°,

la plus grande partie du temps total est le temps de fabrication 94,99%. Le temps de chauffage représente 4,3% et les autres temps 1,19%.

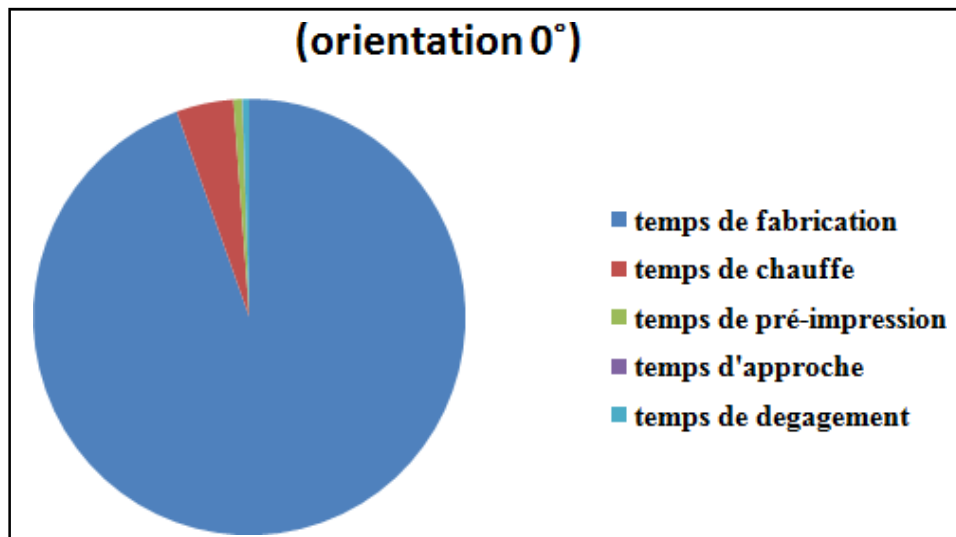


Figure 33 : Temps total de trois pièces orientation 0°

Dans le cas d'une impression à 45°, la plus grande partie du temps total est le temps de fabrication 96,54%. Le temps de chauffage représente 2,7% et les autres temps 0,73%.

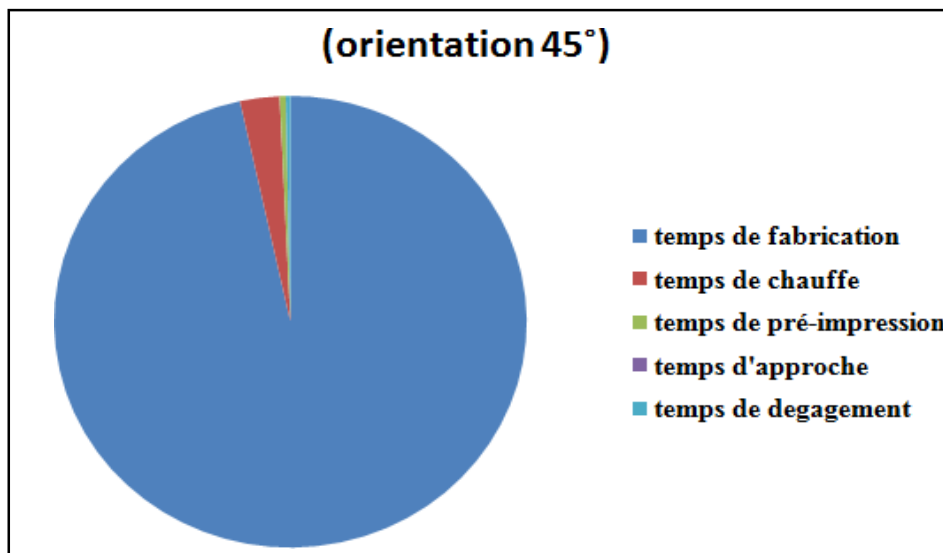


Figure 34 : Temps total de trois pièces orientation 45°

Dans le cas d'une impression à 90°, la plus grande partie du temps total est le temps de fabrication 94,71%. Le temps de chauffage représente 4,12 % et les autres temps 0,87%.

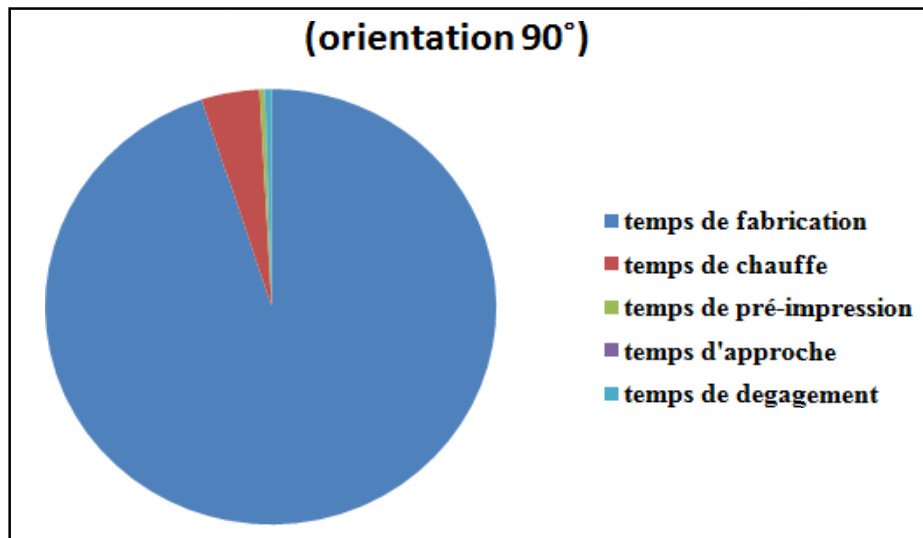


Figure 35 : Temps total de trois pièces orientation 90°

Impression d'un ensemble de cinq éprouvettes

Dans le cas de l'impression de cinq pièces (figure 36, 37, 38), le temps d'impression a augmenté de 10 % par rapport à une impression unitaire pour les 3 directions. Dans le cas d'une impression à 0°, la plus grande partie du temps total est le temps de fabrication 96,66%. Le temps de chauffage représente 2,6% et les autres temps 0,71%.

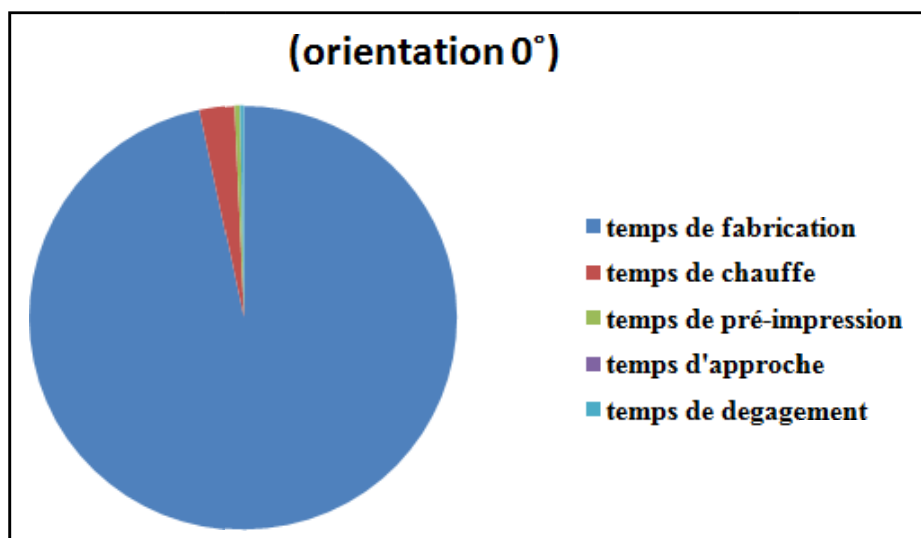


Figure 36 : Temps total de cinq pièces orientation 0°

Dans le cas d'une impression à 45°, la plus grande partie du temps total est le temps de fabrication 96,54%. Le temps de chauffage représente 2,7% et les autres temps 0,73%.

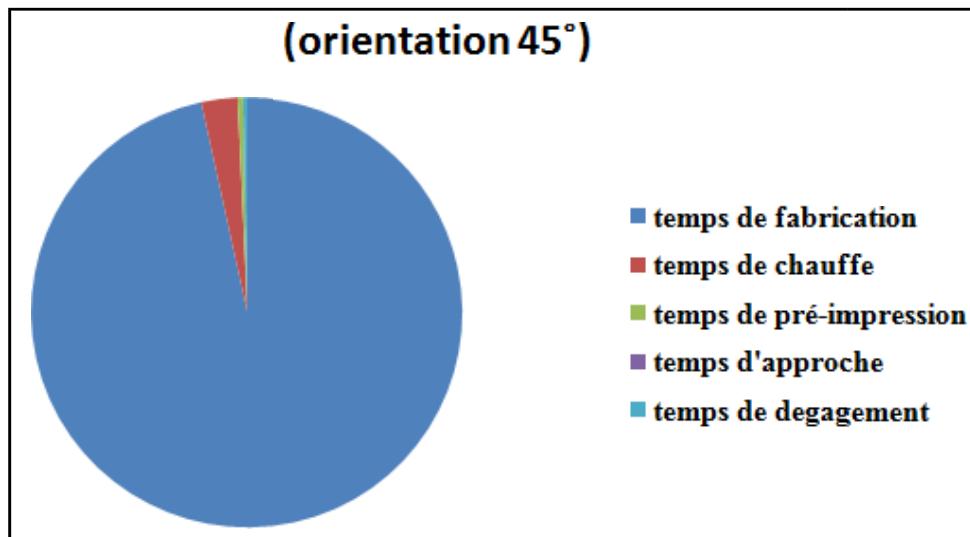


Figure 37 : Temps total de cinq pièces orientation 45°

Dans le cas d'une impression à 90°, la plus grande partie du temps total est le temps de fabrication 96,62%. Le temps de chauffage représente 2,63% et les autres temps 0,72%.

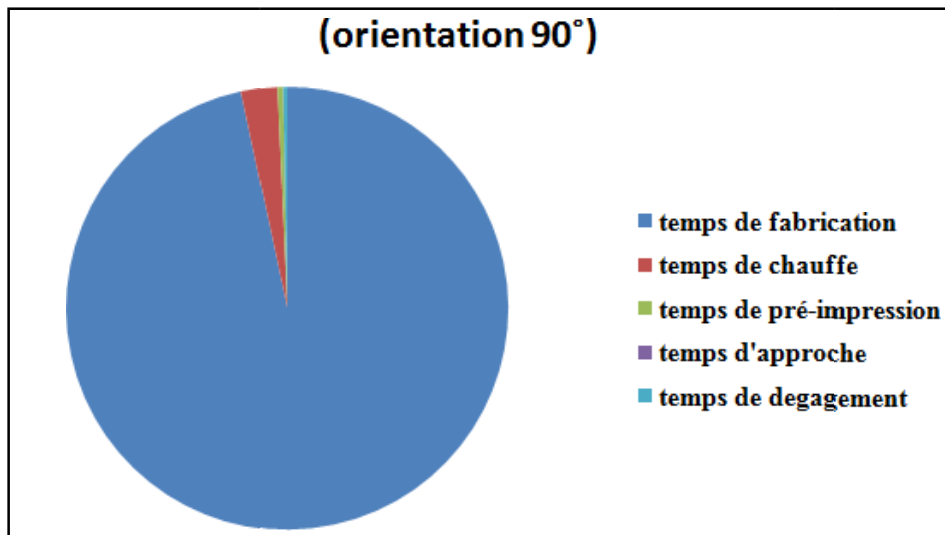


Figure 38 : Temps total de cinq pièces orientation 90°

Le temps d'approche est considéré comme constant. Alors qu'en réalité il varie légèrement et cette variation dépend de la position relative du point d'origine et du premier point de dépôt du filament d'impression, (figure 39).

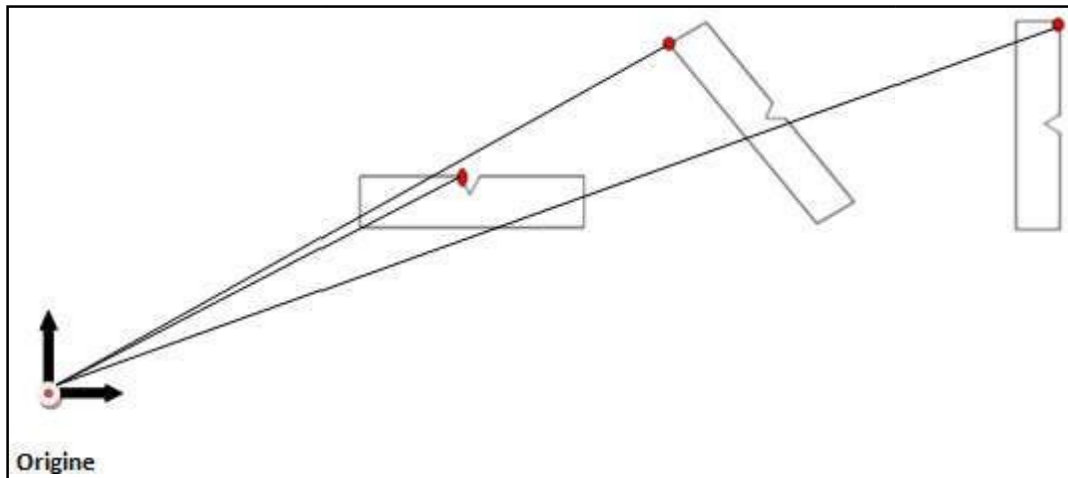


Figure 39 : Point de départ orientation 0°, 45°, 90°

La position de ce dernier par rapport à la pièce imprimée change par rapport à l'orientation, le choix dépend de la stratégie d'impression de la machine.

→ T0° → L 0°

→ T 45° → L 45°

→ T 90° → L 90°

On suppose donc :

$$T0^\circ \approx T45^\circ \approx T90^\circ$$

Cela reste admissible étant donné le rapport entre les dimensions du volume d'impression de la machine et les dimensions de pièces imprimées.

- Le temps de dégagement le même résonnement reste valable.
- Le temps de pré-impression est tout à fait constant, mais il dépend de la machine.
- Le temps de chauffage il considéré comme constant sauf qu'il dépend du matériau c.-à-d. le temps de chauffage de la table est la tête change en fonction des matériaux utilisés. Aussi, probablement le temps de chauffage de la température ambiante. Un autre point est à soulever,

la température de chauffage entre la première impression et l'impression qui suit, variée par que la tête et la table garde un certain niveau de la température de l'impression précédente.

La représentation graphique des effets combinés des paramètres (orientation et nombres) de pièces imprimées sur le temps de fabrication unitaire montre que le temps maximal est observé dans le cas des pièces orientées à 45° au nombre de 3. Le temps minimal dans le cas d'une pièce orientée à 45°. Par rapport aux autres paramètres, la variation de la combinaison restent relativement négligeables, (figure 40).

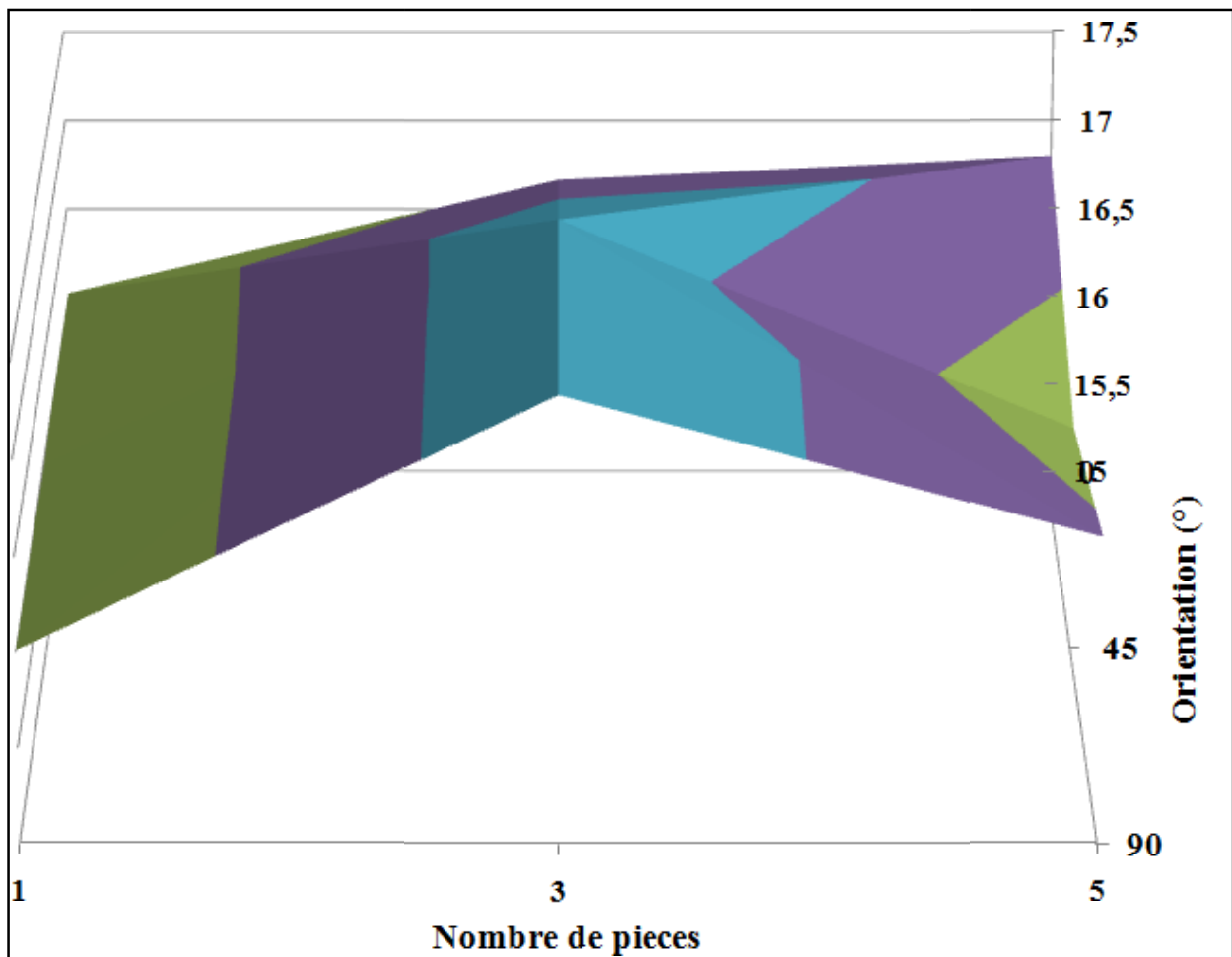


Figure 40 : Les effets de paramètres (nombres, orientations) sur le temps de fabrication

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail de ce mémoire concerne l'étude de l'influence des paramètres de fabrication des pièces fabriquées par impression 3D selon le procédé FDM (dépôt de filament fondu). Les paramètres en question sont l'orientation et le nombre de pièces fabriquées.

Pour se faire, une recherche bibliographique a été menée dans le but de situer le contexte de cette étude par rapport aux études précédentes. De plus, le développement de la recherche sur la technique du dépôt de filament, a guidé le choix des paramètres à étudier et a fourni les arguments nécessaires pour justifier ce choix.

Le travail comporte la réalisation des pièces selon les orientations 0° , 45° et 90° . Pour chacune de ces orientations, nous avons réalisé des impressions au nombre de 1, 3 et 5 pièces. Le nombre de pièces procède une influence sur le temps de fabrication. Cela peut s'expliquer par les trajectoires supplémentaires effectuées par la tête d'impression lors des déplacements d'une pièce à une autre. L'orientation, combinée au nombre de pièce influe également sur le temps de fabrication.

Perspectives

Le présent travail ouvre des perspectives diverses d'études complémentaires. Il serait intéressant dans le même contexte de considérer des pièces avec un motif de remplissage. Ce dernier peut jouer un rôle important dans le paramétrage du temps de fabrication, sachons que la stratégie d'impression diffère au même titre que l'orientation. D'un autre côté, il serait également intéressant d'étudier d'autres orientations et de les combiner avec l'épaisseur des couches.

Références bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] Blum, G., M.d. Blois, and N. Tadjine L'impression 3D: de l'émerveillement technique aux enjeux organisationnels, économiques et sociétaux. 2017.
- [2] Direccte center, l'impression 3D : état de lieux et perspective, décembre 2014.
- [3] : note sur l'impression 3d, rapport « centre d'études et de prospective industrielles", janvier 2018
- [4] : <https://artillery3d.com/products/artillery-sidewinder-x1-sw-x1-3d-print>
- [5] : P. Bouffaron. « Impression 3D Les prémisses d'une nouvelle (r)évolution industrielle », rapport : Ambassade de France aux Etats-Unis – Note de synthèse Innovation. Août 2014.
- [6] : ENTREPRISE DE SAVOIR-FAIRE ET DE SERVICES EN CONCEPTION ET IMPRESSION 3d, France
- [7]: Fiche technique PLA, ultimaker
- [8]: Tuan D, Alirez a, Gabriele « additive manufacturing (3D printing): Areview of Materials, methods, application and challenge » le 2018.
- [9]:université Lille, Analyse-fabrication 2014.
- [10] : Michel Berçot " fabrication additive ", <https://eduscol.education.fr>, décembre 2018
- [11] : AouadiNardjess, ' ' Analyse des propriétés des pièces obtenues par fabrication additive ' ', Mémoire de master, université Badji Mokhtar Annaba, 2021.
- [12] : <https://khiatlabo.com> produit balance ANALATYQUE OHAUS ADVERTURER AR124CN
- [13] : AttabHind, ' 'Etude de l'influence des paramètres de fabrication sur les dimensions et la géométrie de pièces obtenues par impression 3D ' ', Mémoire de master, université Badji Mokhtar Annaba, 2020.
- [14] : Messaada Mohamed Zakaria, ' ' Comportement mécanique des pièces fabriquées par impression 3D ' ', Mémoire de master, université Badji Mokhtar Annaba, 2020.