



République Algérienne Démocratique Et Populaire

Ministère De L'enseignement Supérieur

Et De La Recherche Scientifique

Université Mohamed Boudiaf M'sila

Faculté De Technologie

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

BEKHTI ABDENASSER & AMROUNE ABDELMALIK

Thème

ANALYSE ET GENERATION D'UN G CODE DEDIE A

L'IMPRESSION 3D

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
SLAMANI . M	Prof	Président
AMROUNE SALAH	Prof	Encadreur
MEKIDECHE .S	Doctorant	Examineur

Année Universitaire : 2022/ 2023

Remerciements

D'abord nous remercier dieu d'avoir nous donner la force, la volonté et la patience pour terminer ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à toutes les personnes qui ont contribué à la réussite de notre Projet de Fin d'Études (PFE). Leur soutien, leurs conseils et leur expertise ont été inestimables tout au long de ce parcours.

Tout d'abord, nous souhaitons exprimer notre gratitude envers notre encadrant académique, [Pr : AMROUNE.SALAH], pour son accompagnement précieux. Sa disponibilité, son expertise et ses conseils éclairés ont joué un rôle essentiel dans la réalisation de ce projet. Nous le remercions sincèrement pour sa confiance et son dévouement.

Nous tenons également à remercier [AFKAR FURNITURE], notre partenaire dans ce projet, pour nous avoir offert l'opportunité de travailler sur des problématiques réelles et d'acquérir une expérience pratique. Leur soutien logistique, les ressources mises à notre disposition et leur engagement ont grandement contribué à la réussite de notre PFE.

Tous nos remerciements aux membres du jury d'avoir accepté d'évaluer ce modeste travail.

Nous exprimons également notre reconnaissance à [tous les enseignants de département de Génie Mécanique de l'université de M'sila], qui nous a prodigué un enseignement de qualité tout au long de notre formation. Leurs connaissances et leur expertise nous ont permis de développer les compétences nécessaires pour mener à bien ce projet.

Nos remerciements vont également à nos proches, nos familles et nos amis, qui nous ont soutenus tout au long de cette aventure. Leur soutien moral, leurs encouragements et leur compréhension ont été essentiels pour surmonter les moments de doute et de difficulté.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce projet, en nous apportant leur aide, leurs conseils ou en contribuant de quelque manière que ce soit.

Votre implication et votre soutien ont été d'une valeur inestimable. Votre aide précieuse et votre soutien indéfectible resteront à jamais gravés dans nos souvenirs. Merci du fond du cœur.

BEKHTI ABDENASSER

&

AMROUNE ABDELMALIKE

Dédicace

*Tout d'abord, je remercie Dieu de m'avoir donné la force, la volonté et la patience
d'accomplir cet humble travail.*

Je dédie ce mémoire

*A mes chers parents ma mère et mon père Pour leur patience, leur amour, leur soutien
et leurs encouragements.*

A mes frères. la source de mon bonheur

A mes amies et mes camarades.

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du primaire, du moyen, du secondaire
ou de l'enseignement supérieur*

BEKHTI ABDENASSER

Dédicace

*A ma famille, pour leur amour inconditionnel et leur soutien continu tout au long de ce parcours,
votre présence a été ma force motrice et ma source d'inspiration.*

Enfin, je me dédie cette thèse pour ma persévérance, ma détermination et mes efforts inlassables.

Ce travail est le résultat de ma passion et de mon engagement envers la discipline.

Cette dédicace vous est dédiée avec une profonde gratitude.

AMROUNE ABDELMALIKE

Résumé :

L'objectif de ce mémoire est d'analyser et de générer un G code dédié à l'impression 3D. L'impression 3D est une technique de fabrication additive qui permet de produire des objets solides en superposant des couches successives de matériau. Cependant, la qualité et la précision des pièces produites dépendent en grande partie de la programmation du G code nous avons utilisé des algorithmes avancés pour décomposer les modèles en couches, générer des trajectoires d'impression optimales et ajuster les paramètres en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque pièce

Mots-clés : impression 3D, G-code, modélisation, CNC, prototypage, Fabrication additive

ملخص :

الهدف من هذه أطروحة هو تحليل وإنشاء G-Code مخصص للطباعة ثلاثية الأبعاد. الطباعة ثلاثية الأبعاد هي تقنية تصنيع مضافة تنتج أجسامًا صلبة عن طريق تراكم طبقات متتالية من المواد. ومع ذلك ، فإن جودة ودقة الأجزاء المنتجة تعتمد إلى حد كبير على برمجة G-Code ، حيث استخدمنا خوارزميات متقدمة لتفكيك النماذج إلى طبقات ، وإنشاء مسارات طباعة مثالية ، وضبط المعلمات وفقًا للخصائص المحددة لكل قطعة.

الكلمات الرئيسية: الطباعة ثلاثية الأبعاد ، G-code ، النمذجة ، CNC ، النماذج الأولية ، التصنيع الإضافي

Abstract :

The objective of this thesis is to analyze and generate a G code dedicated to 3D printing. 3D printing is an additive manufacturing technique that produces solid objects by superimposing successive layers of material. However, the quality and accuracy of the produced parts largely depends on the G code programming we used advanced algorithms to decompose the models into layers, generate optimal print paths and adjust the parameters according to the specific characteristics of each part.

Keywords: 3D printing, G-code, modeling, CNC, prototyping, Additive manufacturing

SOMMAIRE

<i>Titre</i>	<i>Page</i>
Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Sommaire :.....	I
Liste des Figures : :.....	V
List des Tableaux : :.....	VII
Liste des abréviation :.....	VIII
Introduction Générale :.....	1

CHAPITRE I : Généralités Sur Les Procédés Et Techniques D'impression 3D

I. Introduction :.....	2
I.I Les procédés et techniques d'impression 3D.....	3
I.1.1. La stéréolithographie :.....	3
I.1.2. Modelage par Dépôt de Filament en Fusion (Fused Deposition Modeling):.....	4
I.1.3. Impression par jets multiples (Material Jetting) :.....	5
I.1.4. Frittage par laser (Selective Laser Sintering):.....	5
I.1.5. L'Agglomération De Poudre Par Collage (3DP) :.....	6
I.1.6. Prototypage rapide :.....	7
I.1.6.1. Le modèle 3D :.....	8
I.1.6.2. Exemples de plateformes de partage des modèles 3D :.....	8
I.1.6.3. Les trancheurs :.....	8
I.1.6.4. Extrait d'un fichier G-code :.....	10
I.1.7. Quelques trancheurs :.....	12
I.1.7.1. Slic3r :.....	12
I.1.7.2. Ultimaker Cura :.....	14
I.1.7.3. Le paramétrage des trancheurs :.....	15
I.1.7.3.1. Le Calcul des couches ou "discrétisation" :.....	15
I.1.7.3.2. L'épaisseur des couches :.....	16
I.1.7.3.3. Les couches de départ et de fin :.....	16
I.1.7.3.4. Les périmètres et les remplissages :.....	16
I.1.7.3.5. Les jupes et bordures :.....	18



I.1.7.3.6. Les supports :	19
I.1.7.3.7. Les vitesses :	19
I.1.8. Anatomie des imprimantes 3D « grand public » :	19
I.1.8.1. Les imprimantes cartésiennes :	20
I.1.8.2. Les imprimantes delta :	21
I.1.8.3. Les cartes contrôleurs :	22
I.1.8.4. Le plateau d'impression :	22
I.1.8.5. L'extrudeur :	23
I.1.8.6. La buse d'extrusion :	23
I.1.8.7. Les moteurs pas à pas :	25
I.1.9. Les filaments :	26
I.1.9.1. Types et propriétés des filaments :	27
I.1.9.2. Les matériaux utilisés dans l'impression 3D :	27
I.1.10. Quelques avantages et limites de l'impression 3D :	30
I.11 Conclusion :	35

CHAPITRE II : Généralité Sur Les Machine-outil à Commande Numérique

II.1 Introduction:	38
II.2 Historique :	38
Les différentes étapes de développement de la CN sont les suivantes :	39
II.3 Définition de La commande numérique:	39
II.4 Définition d'une machine CNC :	40
II.4.1 Partie opérative :	40
II.4.2 Partie commande :	41
II.5 Domaine d'utilisation :	42
II.6 Principe de fonctionnement :	42
II.7 Les différents types de Machines CNC : On distingue plusieurs types de machines	43
II.8 Classification des machines CNC :	43
II.8 .1 Classification des CNC selon le mode de fonctionnement :	43
II.8.2 Classification des CNC selon le mode d'usage :	45
II.9 La structure d'une machine CNC :	47
II.9 .1 Le système électronique :	47
II.9 .2 Le système mécanique :	48

II.9.3 Le système de programmation :	49
II.10 Conclusion :	49

CHAPITRE III : Génération D'un G Code

III. Introduction :	51
III. 1 Génération d'un G code avec MATLAB pour l'impression 3d :	52
III. 1 .1 MATLAB.....	52
III. 1 .2 Les étapes générales de génération d'un code G pour l'impression 3D avec Matlab :	53
III.1.3 Des exemples de code MATLAB qui importe un modèle 3D et génère du code G pour l'impression 3D :	55
III. 2. Conception et modélisation 3D :	58
III. 2 .1 Choix du logiciel de CAO	58
III. 2 .1.1 Des logiciels de CAO utilisé pour la modélisation 3D :	58
III. 2 .1.2 Les principales fonctionnalités de Mastercam :	59
III. 2 .2 La Conception d'un modèle 3D :	59
III. 2 .2.1 Piece I avec SolidWorks:	59
III. 2 .3 Exportation du modèle en fichier STL	60
III. 2 .2.2 Piece II avec Mastercam :	61
III.3 Conclusion :	64

CHAPITRE IV : Partie Expérimentale

IV.1Préparation du modèle pour l'impression	69
UltimakerCura	69
IV.1.1 Importation du fichier STL dans le logiciel de tranchage	69
IV.1.2 Réglage des paramètres d'impression.....	69
IV.1.3 Génération du G-code :	70
IV. 2 Analyse et optimisation du G-code.....	71
IV. 2.1 Visualisation du G-code généré.....	71
IV. 2.1 .1 Génération du fichier G-code.....	71
IV. 2.1.2 Analyse des instructions et des paramètres	73
IV. 2.2 Optimisation du G-code pour améliorer la qualité de l'impression	73
IV. 3 Impression 3D :	74



IV. 3.1 Imprimante 3D Anycubic Mega X3 :.....	74
IV. 3.2 Les étapes de base pour l'impression 3D avec Anycubic Mega X3 :	75
IV. 4 Usinage avec machine-outil à commande numérique :.....	76
IV. 4.1 CNC router 1325 :.....	76
IV. 4.1.1 Les Caractéristiques :	76
IV. 4.2 Les Étapes typiques :.....	77
IV.5 Conclusion :.....	81
CONCLUSION GENERALE :	83
BIBLIOGRAPHIE:.....	85

Liste des Figures

Chapitre I

Figure I.1: Processus d'impression par la Stéréolithographie	3
Figure I.2: Principe de fonctionnement de l'impression 3D	4
Figure I.3: Processus d'impression Polyjet	5
Figure I.4 : Processus d'impression par frittage laser	6
Figure I.5: Processus d'impression 3D	6
Figure I.6: Extrait d'un fichier G-code.....	10
Figure I.7 : Représentation du parcours de l'extrudeur	17
Figure I.8: Taux de remplissage de filament fondu	17
Figure I.9 : Types de remplissage de filament fondu	18
Figure I.10: Imprimante « cartésienne »	20
Figure I.11 : Imprimante « delta » Anet-a4	21
Figure I.12: Exemple de carte contrôleur	22
Figure I.13: Exemple de plateau d'impression	22
Figure I.14 : Exemple d'extrudeur	23
Figure I.15 : Coupe transversale de l'extrudeur « e3dv6 »	24
Figure I.16 : Exemple de moteur pas à pas	25
Figure I.17 : Conditionnement des filaments plastique (ABS, PLA)	28

Chapitre II

Figure II.1 : Structure d'une CN	40
Figure II.2 : Fonction originale d'une commande numérique.	41
Figure II.3 : Domaine d'utilisation des M.O.C.....	42
Figure II.4 : Asservissement de la machine.....	43
Figure II.5 : Fonctionnement en boucle ouvert	44
Figure II.6 : Commande adaptative.	45



Figure II.7 : Commande en boucle fermée	45
Figure II.8: Commande Numérique Point A Point.	46
Figure II.9: Commande Par axiale.	46
Figure II.10 : Commande numérique de contournage.	47
Figure II.11 : Structure mécanique d'une machine CNC	48

Chapitre III

Figure III.1 Schéma pour les étapes générales de génération d'un code G avec Matlab	54
Figure III. 2 Papillon (Butterfly).....	56
Figure III.3 Cercle.....	57
Figure III. 4 Vérification de la modélisation	60
Figure III. 5 Exportation du modèle en fichier STL	60
Figure III.6 Créer un contour d'engrenage	61
Figure III. 7 Ajouter des opérations de fraisage	62
Figure III.8 La partie de démarrage du fichier G-code	63
Figure III.9 La partie de fin du fichier G-code	63

Chapitre IV

Figure IV.1 Importation du fichier STL dans le logiciel de tranchage	69
Figure IV.2 Réglage des paramètres d'impression.....	69
Figure IV.3 Génération du G-code	70
Figure IV.4 La partie de démarrage du fichier G-code.....	71
Figure IV.5 La partie au milieu du fichier G-code	72
Figure IV.6 La partie de fin du fichier G-code.....	72
Figure IV.7 Imprimante 3D Anycubic Mega X3.....	74
Figure IV.8 Lancement de l'impression	75
Figure IV.9 Retrait de l'objet imprimé	76
Figure IV.10 toolpath avec artcam.....	77

Figure IV.11 Simulation avec artcam	77
Figure IV.12 conception dans le logiciel de commande NC Studio	78
Figure IV.13 Fixation de la matière première	78
Figure IV.14 Réglage de l'origine	79
Figure IV.15 Lancement de l'usinage	79
Figure IV.16 Fin de l'usinage	80

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Récapitulatif de quelques filaments les plus utilisés	27
Tableau I.2 : Avantages et inconvénients « PLA »	29
Tableau I.3 : Avantages et inconvénients « ABS »	30
Tableau I.4 : Avantages et inconvénients « PET »	30

Liste des abréviations

- 2D** : Deux dimensions ;
- 3D** : Trois dimensions ;
- 3DP** : Agglomération de poudre par collage ;
- ABS** : Acrylonitrile butadiène styrène ;
- CAD** : Computer-Aided Design ;
- CAO** : Conception assisté par ordinateur ;
- CFAO** : Conception et de fabrication assisté par ordinateur ;
- CN** : Commande Numérique
- CNC** : Computer Numerical Control
- DAO** : dessin assisté par ordinateur ;
- DLP**: Digital Light Processing;
- DMM**: Direct Metal Printing
- FA**: Fabrication additive;
- FDM**: Fused deposition modeling;
- FFF** : Fused filament fabrication ;
- G-code** : langage de programmation, utilisé principalement dans l'automatisation ;
- MOCN** : Machine Outils à Commande Numérique
- MPD** : Molten polymer deposition ;
- PET** : Polyéthylène téréphtalate ;
- PETG** : Polyéthylène téréphtalate glycolisé ;
- PLA** : Acide polyactique ;
- PTFE** : Polytétrafluoroéthylène ou Téflon ;
- PVA** : (Polyvinyl Alcohol) : type de plastique soluble dans l'eau ;
- SLA** : Photo polymérisation ;
- SLS**: Selective laser sintering;
- STL** : Standard Tessellation Language
- Stl** : Stéréolithographie ;

Introduction Générale



Introduction Générale :

L'impression 3D a révolutionné la conception et la fabrication d'objets en transformant des modèles numériques en objets physiques par ajout successif de couches de matériau. Le G-Code c'est un langage spécifique à chaque imprimante 3D, joue un rôle clé en contrôlant précisément les mouvements de l'extrudeur et d'autres paramètres lors de l'impression.

Dans ce contexte, notre projet de fin d'études se focalise d'une part sur l'analyse et la génération d'un G-Code dédié à l'impression 3D et d'autre part de comprendre en profondeur les paramètres influençant la qualité de l'impression et d'utiliser un outil logiciel pour générer automatiquement un G-Code optimisé pour des modèles spécifiques.

Notre mémoire est divisé en quatre chapitres. Le premier chapitre examine les procédés et techniques de l'impression 3D, ainsi que les types d'imprimantes, les composants nécessaires et les matériaux utilisés. Le deuxième chapitre présente une vue d'ensemble des machines-outils à commande numérique, abordant la classification, l'architecture et la programmation des machines CN pour différents types de commandes.

Le troisième chapitre vise à améliorer la compréhension et l'efficacité de la génération d'un G-Code pour l'impression 3D. Nous décrivons les étapes du processus de génération d'un G-Code, y compris la préparation du modèle 3D, la configuration des paramètres d'impression et la traduction de ces paramètres en instructions G-Code compréhensibles par l'imprimante 3D.

Dans le quatrième chapitre, nous présentons la partie expérimentale où nous concevons des modèles à l'aide de programmes de conception, puis les fabriquons à l'aide d'une imprimante 3D et d'une machine à commande numérique. Nous illustrons également des exemples de code G correspondant à chaque modèle.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES PROCEDES ET TECHNIQUES D'IMPRESSION 3D



I. Introduction :

Depuis ces dernières années, l'impression 3D a connu un essor fulgurant et s'est imposée comme une technologie révolutionnaire dans de nombreux domaines. Que ce soit dans l'industrie, la médecine, l'architecture ou même l'art, les possibilités offertes par l'impression 3D sont devenues infinies.

Ce premier chapitre a pour objectif de vous plonger dans l'univers fascinant des procédés et techniques d'impression 3D. Nous allons explorer les différentes méthodes utilisées pour créer des objets en trois dimensions, en partant des principes fondamentaux jusqu'aux avancées les plus récentes.

Au fil des pages, nous découvrirons les principaux procédés d'impression 3D tels que la stéréolithographie, la fusion sélective par laser, le dépôt de matière fondue ou encore la lixiviation. Chaque technique sera expliquée en détail, mettant en lumière ses principes de fonctionnement, ses avantages et ses limitations.

Nous aborderons également les matériaux utilisés en impression 3D, des plastiques traditionnels aux métaux avancés en passant par les matériaux composites. Nous examinerons les caractéristiques de chaque matériau et leur influence sur la qualité et les possibilités de l'impression 3D.

De plus, nous nous intéresserons aux défis et aux enjeux associés à l'impression 3D, tels que la précision, la résolution, la vitesse d'impression, ainsi que les contraintes liées à la taille des objets imprimables.

Enfin, nous évoquerons les dernières avancées technologiques dans le domaine de l'impression 3D, notamment l'émergence de l'impression 3D en nanotechnologie, l'utilisation de bio-impression pour la fabrication d'organes ou de tissus humains, ainsi que les perspectives futures de cette technologie en constante évolution.

I.1 Les procédés et techniques d'impression 3D

L'ensemble des technologies de fabrication additive connu est basé sur la découpe numérique d'un objet virtuel 3D en lamelles ou couches 2D de très fine épaisseur. Ces fines lamelles sont ensuite déposées physiquement une à une par l'imprimante, qui les superpose et les fixe couche après couche, reconstituant ainsi l'objet réel. Il existe différents types de technologies. Les plus connues sont la stéréolithographie, le frittage laser et la « Fused Deposition Modeling » (FDM).

I.1.1. La stéréolithographie :

La stéréolithographie a été mise au point par Charles Hull, le fondateur de 3D Systems Corp. dans les années 1980. Les deux formes les plus courantes de la stéréolithographie sont la photo polymérisation (SLA) et le Digital Light Processing (DLP). Le SLA concentre un rayon ultraviolet dans une cuve remplie de photopolymère (matériau synthétique dont les molécules se modifient sous l'effet de la lumière, la plupart du temps ultraviolette) [21].

Le laser ultraviolet reproduit le modèle 3D souhaité couche après couche. Lorsque le rayon frappe la matière, cette dernière se durcit sous son impact, tout en se liant aux couches antérieures (Figure I.1, ci-dessous). Au sortir de la cuve, on obtient une forme à la résolution remarquable (jusqu'à 30 microns). La matière non frappée peut être réutilisée. Le DLP utilise des faisceaux plus larges pour projeter les sections de l'objet directement dans la cuve de photopolymère.

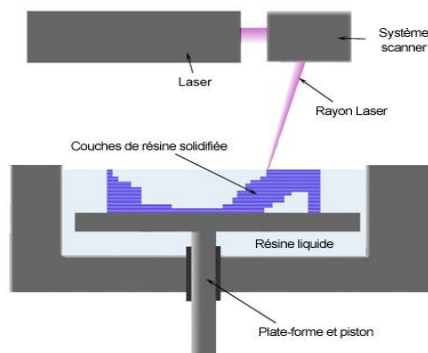


Figure I.1: Processus d'impression par la Stéréolithographie [21]

Tout comme la FDM, l'imprimante va dans un premier temps analyser le fichier CAO, puis en fonction de la forme de l'objet, le laser va progressivement balayer et durcir instantanément la première couche de l'objet à imprimer. Une fois la couche initiale durcie, la plate-forme s'abaisse et une nouvelle couche de surface de polymère liquide est exposée au laser qui successivement repassera en traçant des sections transversales de l'objet qui colle instantanément à la couche précédente déjà durcie.

Ce processus se répète encore et encore, jusqu'à ce que la totalité de l'objet soit formé et entièrement immergé dans le réservoir. Après rinçage, et à l'aide d'un solvant liquide, l'objet imprimé est débarrassé de son excès de résine. Puis, il est cuit dans un four à ultraviolet pour durcir la matière plastique supplémentaire

I.1.2. Modelage par Dépôt de Filament en Fusion (Fused Deposition Modeling):

FDM est l'acronyme anglais de Fused Deposition Modeling qui signifie : « Modelage par Dépôt de Filament en Fusion » est une marque déposée (Figure I.2, ci-dessous). Il a été inventé par Scott Crump, le fondateur de Stratasys, à la fin des années 1980. On parle aussi de FFF (Fused Filament Fabrication) et de MPD (Molten Polymer Deposition). [18]

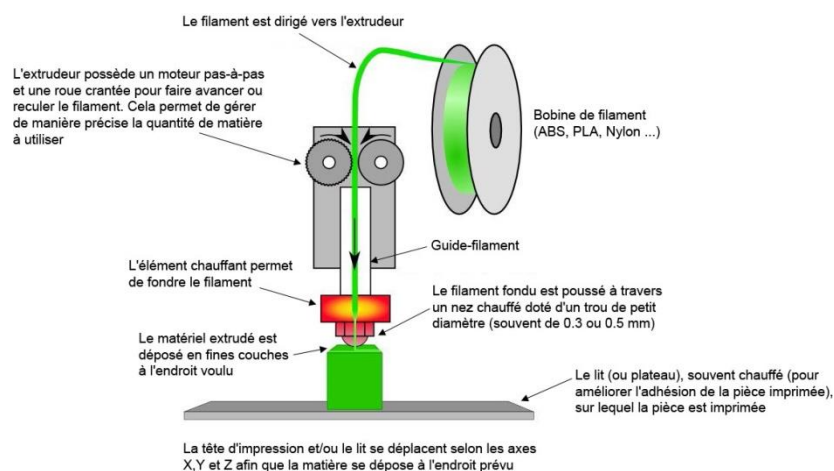


Figure I.2: Principe de fonctionnement de l'impression 3D[18]

« Il consiste à porter à fusion un filament thermoplastique fondu à 200 °C en moyenne, extrudé à travers une buse afin d'imprimer par coupe transversale un objet en 3D couche après couche. La tête d'impression se déplace selon les coordonnées X, Y et Z (longueur, largeur et hauteur) transmises à partir d'un fichier correspondant au modèle 3D de l'objet à imprimer. C'est le procédé de loin le moins coûteux, utilisé dans la majorité des imprimantes 3D vendues aux particuliers ») [10].

Limitée pendant longtemps à des matériaux de type plastique tels que les PLA et l'ABS, l'impression 3D voit arriver de nouveaux filaments composites à base de métal (cuivre, bronze...), voire à base de bois. Plus rarement [19].

Certaines machines utilisent des cires ou des polycarbonates. Aujourd'hui l'industrie agroalimentaire et la médecine s'emparent peu à peu de cette technique pour imprimer des aliments et des cellules en adaptant la tête d'extrusion. [20].

I.1.3. Impression par jets multiples (Material Jetting) :

« Le principe de ces imprimantes par jets multiples est assez proche de celui d'une imprimante 2D classique. Les buses utilisées sont d'ailleurs identiques aux imprimantes de bureau. C'est l'empilement de ces couches qui crée un volume. La pièce est réalisée généralement par dépose de gouttes de résine thermodurcissable (acrylique, polypropylène, cire, etc.) qui est réticulée couche par couche, grâce à une lampe Ultra-violet(UV) (Figure I.3, ci-dessous)) [1].

Afin de maintenir la pièce, un support en cire est créé en même temps que cette dernière. La cire est ensuite fondue à l'étuve pour obtenir une pièce finale, avec une précision allant jusqu'à 0,016 mm ».

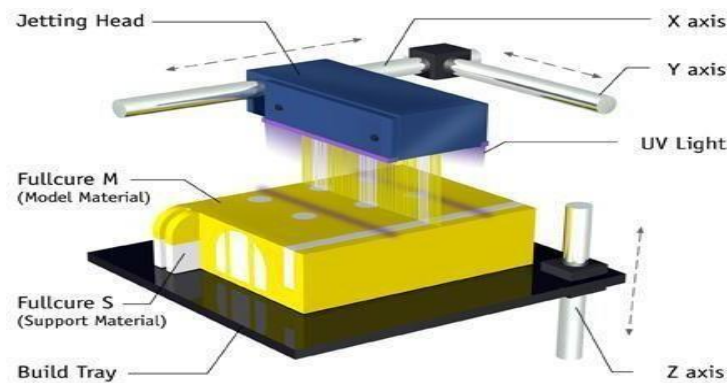


Figure I.3: Processus d'impression Polyjet [1]

I.1.4. Frittage par laser (Selective Laser Sintering):

« On attribue l'invention de ce procédé à Carl Deckard et Joe Beamanand, chercheurs à l'Université d'Austin, au milieu des années 1980. La technique de frittage la plus courante est appelée SLS, pour Selective Laser Sintering (Figure I.4, ci-dessous). Cette technologie est proche de la stéréolithographie, mais sans la cuve remplie de polymère. Des matières dures (sous forme de poudre) comme le polystyrène, le verre, le nylon, certains métaux (dont le titane, l'acier ou l'argent) ou de la céramique sont frappées par un laser. Là où le laser frappe, la poudre s'assemble pour créer la forme » [1].

Des variantes de cette technique existent et peuvent être classées dans la famille « fusion sur lit de poudre » : Electron Beam Melting, Selective Heat Sintering ou encore Selective Laser Melting. D'autres procédés continuent d'émerger, généralement des combinaisons ou des adaptations des techniques décrites ci-dessus et les innovations continuent de se multiplier.

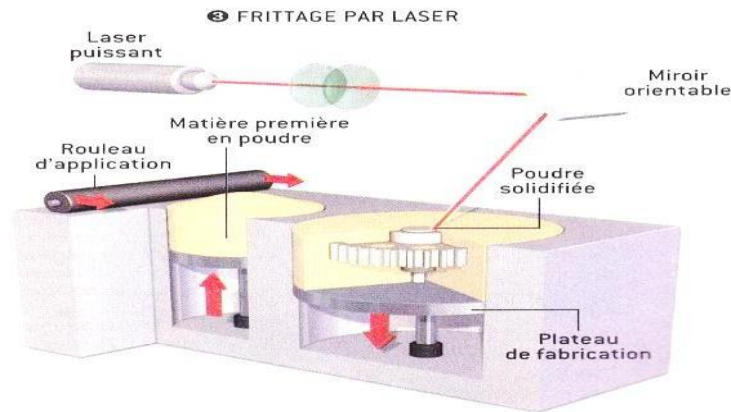


Figure I.4 : Processus d'impression par frittage laser [1]

I.1.5. L'Agglomération De Poudre Par Collage (3DP) :

Initialement développée en 1993 au Massachusetts à l'Institut of Technology (MIT) en 1993, la 3DP (Three-Dimensional Printing) constitue la base du processus d'impression 3D de Z Corporation. Le procédé consiste à l'étalement d'une fine couche de poudre de composite sur une plateforme. La tête d'impression dépose sur celle-ci de fines gouttes de glue colorées qui sont combinées entre elles, permettant ainsi d'obtenir un large panel de couleur (Figure I.5, ci-dessous). La plateforme s'abaisse au fur et à mesure que les couches de poudre sont collées jusqu'à l'obtention de l'objet final. Pour la finition, l'excédent de poudre est aspiré, l'objet est brossé et/ou poncé, puis il est chauffé pour sa solidification. La 3DP a l'avantage d'être rapide et de proposer une large gamme de couleurs et parmi les inconvénients, les pièces sont plus fragiles et leur surface est plus rugueuse) [21].

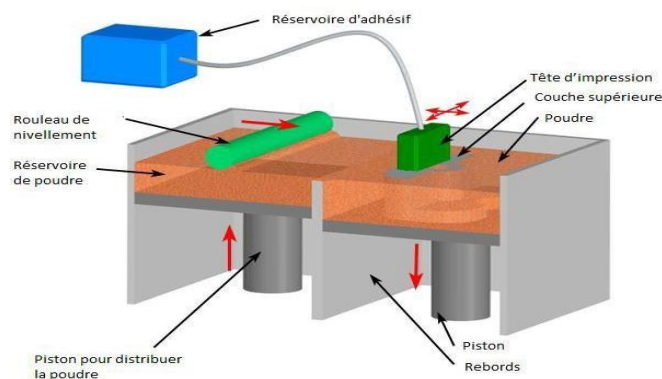


Figure I.5: Processus d'impression 3D [21].

I.1.6. Prototypage rapide :

L'impression 3D semble s'adapter au prototypage rapide. Imprimer un objet prend beaucoup moins de temps et coûte moins chers, le coût se limitant à la matière première et à la consommation électrique nécessaire à l'imprimante. A première vue, comparativement moins onéreuse que la fabrication, par moulage ou par usinage traditionnel avec machines- outils. Elle offre tout de même la perspective d'une expérimentation à réaliser dans le cadre d'une autre étude, afin de comparer les coûts, les types de matériaux à mettre en œuvre, les avantages et les inconvénients des différentes des techniques de fabrication dans le contexte gabonais. [13].

Avant la fabrication additive industrielle, pour ceux qui en avaient les capacités techniques, les industriels utilisaient, différentes techniques de moulage pour fabriquer des prototypes. A ce stade, finaliser un prototype consistait à réaliser plusieurs exemplaires de l'objet, puis à leur faire passer une batterie de tests de fonctionnalité, de résistance mécanique, d'ergonomie, etc. Ceci engendrait inévitablement d'autres coûts, car lorsqu'il était décelé des dysfonctionnements, ils étaient amenés parfois à créer un nouveau moule en tenant compte des corrections à apporter, aux fins de recommencer les tests. Ce cycle de moulage et de tests pouvait se répéter autant de fois que nécessaires, jusqu'à l'obtention d'un objet ayant les propriétés et les caractéristiques souhaitées. [14].

Cette technique de fabrication est certes peu efficace et onéreuse, mais si le moule est stabilisé, la fabrication en série est souvent rapide. C'est pourquoi avec l'arrivée progressive de la fabrication additive, les étapes de l'étude du moule, des outillages spéciaux et de la fabrication du moule lui-même ont commencé à laisser progressivement la place, dans certains secteurs industriels, à l'impression 3D, orientant ainsi le temps qui était consacré à l'étude du moule et de sa fabrication à d'autres activités de l'entreprise.

De plus, l'impression 3D est une technologie qui semble adaptée au processus itératif essentiel au prototypage entre les différents acteurs intervenant à ce stade de la fabrication d'un objet ou d'un produit, avec l'aide des outils de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Elle permet de modéliser, d'imprimer et de tester un prototype plus rapidement qu'il était question d'utiliser le procédé par moulage. [15].

Afin de pallier la lenteur d'une seule imprimante, la mise en parallèle de plusieurs d'entre-elles, « fermes d'imprimantes », produisant le même objet, ou des pièces différentes d'un ensemble, facilite aujourd'hui l'impression en série, tout en maintenant une certaine cadence de production.

I.1.6.1. Le modèle 3D :

Il est une étape incontournable dans l'impression 3D, celle de la modélisation. En effet le modèle 3D est un fichier représentant l'objet en trois dimensions. Il est créé à partir d'un logiciel de modélisation, de Conception et Fabrication Assistées par Ordinateur (CFAO). Il en existe plusieurs, dont certains sont libres d'utilisation, tel que Tinkercad, qui ne nécessite aucune installation sur l'ordinateur de l'utilisateur. Tinkercad est accessible à partir d'un navigateur web. En plus, il dispose d'un service d'impression 3D en ligne.

Hormis Tinkercad, plusieurs autres Outils de Modélisation et Simulation (OMS) sont disponibles. Notamment : SolidWorks, Autocad 3D, InKscape, Inventor, pour ne citer que ceux-là. Ils permettent d'exporter le fichier de l'objet modélisé en un fichier au format « Stéréolithographie » ou encore «. stl ». C'est l'un format standard de fichier qui est utilisé par les trancheurs des gestionnaires d'impression 3D.

I.1.6.2. Exemples de plateformes de partage des modèles 3D :

Il existe plusieurs plateformes de partage des modèles 3D à titre d'exemples :

- 1- Thingiverse est une plateforme de partage de fichiers, majoritairement des modèles fait pour l'impression 3D .
- 2- Opendesk est une plateforme facilitant le plus possible la fabrication distribuée, avec des fichiers d'objets prêts pour l'impression. Si le fichier est commercialisé, le contributeur est rétribué .
- 3- Cult3d propose également des catalogues d'objets en 3D.

I.1.6.3. Les trancheurs :

Le trancheur est une application logicielle qui permet de passer, du modèle 3D de l'objet à imprimer via sa conversion au format de fichier «. stl ». Toutes les imprimantes 3D ne sont pas toujours dotées d'outils capables de calculer le nombre de couches à imprimer à partir de l'objet en 3D importé en format «. stl ».

Il faut pour cela découper l'objet à imprimer en couches successives, à l'aide d'un « trancheur » ou « slicer » en anglais. Cette application déterminera ; le nombre de couches à imprimer, le temps d'impressions, et donne à l'utilisateur la possibilité de configurer d'autres facteurs nécessaires à l'impression de l'objet.

Toutes les imprimantes 3D à dépôt de filament n'ont pas la capacité d'imprimer directement un objet en 3D en interprétant un fichier « .stl ». Cependant, cela est possible grâce à l'interprétation d'une suite d'instructions en « G-code » est par ces imprimantes. Le trancheur détermine par calcul ; la trajectoire de la tête d'impression, la quantité de matière à déposer, le temps d'impression, etc.

Au terme de l'opération de tranchage, il est généré un fichier « G-code » qui pourra être réutilisé plus tard pour imprimer le même objet sans avoir à le modéliser de nouveau. Il reviendra à l'utilisateur qui souhaite imprimer le même objet de l'envoyer vers l'imprimante, via un « Port USB » ou un emplacement dédié sur l'imprimante à l'aide d'un support amovible.

Le G-code, est un standard de programmation issu de l'industrie destiné à piloter les machines à commandes numériques. Le fichier G-code généré par le trancheur contient donc un ensemble d'instructions qui va donner à l'imprimante 3D, un ensemble d'informations nécessaires à l'impression de l'objet souhaité.

Il est donc utile de bien connaître l'action du trancheur afin de cerner les différents paramètres à régler, afin d'obtenir un objet imprimé avec précision à partir d'une imprimante 3D de type « FDM ». Notons ici que le principe de fonctionnement des trancheurs est le même pour toutes les différentes technologies d'impression 3D. Ce qui change entre les différents types d'imprimantes, c'est la manière dont les couches sont constituées et déposées.

I.1.6.4. Extrait d'un fichier G-code :

```
; generated by PrusaSlicer 2.0.0+win64 on 2019-08-19 at 19:16:30
; external perimeters extrusion width = 0.45mm
; perimeters extrusion width = 0.45mm
; infill extrusion width = 0.45mm
; solid infill extrusion width = 0.45mm
; top infill extrusion width = 0.40mm
; first layer extrusion width = 0.70mmM107 ; extinction des ventilateurs
M104 S200 ; consigne de température de la tête d'extrusion (200°C)G28 ; mise à l'origine de
tous les axes
G1 Z5 F5000 ; la tête d'extrusion est écartée de 5mm du lit M190 S60 ; attendre que le lit
chauffant ait atteint 60°C M109 S200 ; attendre que la tête d'extrusion ait atteint 200°C
; Filament gcode
G21 ; set units to millimeters
G90 ; utilisation de coordonnées absolues
M82 ; utilisation de distances absolues pour l'extrudeurG92 E0
G1 Z0.350 F7800.000
G1 E-2.00000 F2400.00000G92 E0
G1 X71.629 Y69.986 F7800.000G1 E2.00000 F2400.00000
G1 F1800
G1 X72.334 Y69.334 E2.08733 G1 X75.695 Y66.603 E2.48109 G1 X79.096 Y64.367
E2.85124 G1 X83.300 Y62.222 E3.28037 G1 X87.091 Y60.757 E3.64995 G1 X91.271
Y59.620 E4.04380 G1 X95.674 Y58.916 E4.44931 G1 X100.006 Y58.688 E4.84372 G1
X104.326 Y58.916 E5.23707 G1 X108.706 Y59.616 E5.64038 G1 X112.907 Y60.756
E6.03624 G1 X116.687 Y62.217 E6.40466 G1 X121.366 Y64.654 E6.88437 G1 X124.736
Y66.913 E7.25338 G1 X128.247 Y69.862 E7.67030 G1 X131.064 Y72.766 E8.03818 G1
X133.820 Y76.276 E8.44393 G1 X136.124 Y79.957 E8.83881 G1 X138.081 Y83.983
E9.24586 G1 X139.549 Y88.058 E9.63971 G1 X140.578 Y92.250 E10.03218 G1 X141.179
Y96.684 E10.43905
G1 X141.299 Y100.731 E10.80724G1 X140.889 Y105.848 E11.27402
```

Figure I.6: Extrait d'un fichier G-code

Le fichier « G-code » est une suite d'instructions que l'imprimante doit exécuter progressivement et séquentiellement. Hormis les instructions de déplacement, il y a des instructions relatives ; à la régulation des températures de la buse, du plateau chauffant, la vitesse de déplacement des différents organes suivant les trois axes X, Y et Z (le plateau chauffant, la buse, etc.), le contrôle de l'extrudeur, la poussé de la quantité de filament nécessaire à la tête d'impression. [26].

Tous ces paramètres dépendent principalement des propriétés de la matière première utilisée (PLA, ABS, etc.), du diamètre du filament, la longueur à extruder et surtout de la qualité de l'impression souhaitée. Ces instructions permettent, entre autres, de réguler la température de la tête d'impression et celle du lit chauffant et de déplacer la tête d'impression. De même, lors de la configuration de ces paramètres, le trancheur prend en compte la gestion des couches successives qui vont s'empiler lors de l'impression et des déplacements nécessaires pour déposer les différentes couches.

Une idée répandue suggère qu'augmenter la vitesse d'impression pendant le paramétrage du trancheur diminue systématiquement le temps d'impression, ce qui n'est malheureusement pas vrai. Car, les éléments mécaniques, mis en mouvement (translation, rotation) dans une imprimante 3D, obéissent à des contraintes mécaniques dont il faut tenir compte (masse, frottement, etc.). Il est donc difficile d'envisager, sinon physiquement impossible d'obtenir un déplacement instantané de tous ces organes.

Même si cela peut être envisagé, il revient à soumettre les organes de l'imprimante à des contraintes mécaniques importantes susceptibles de l'endommager. En supposant qu'un organe mobile de l'imprimante passe d'une vitesse nulle à une certaine vitesse non nulle, cet organe est progressivement accéléré jusqu'à atteindre la vitesse souhaitée. Cette accélération dépendra de sa masse. Cette vitesse devra être paramétrée en fonction du type d'imprimante. Il est souhaitable, d'imprimer lentement pour obtenir une bonne qualité de finition des objets imprimés.

Les trancheurs calculent les formes des couches à déposer, les paramètres de chauffe, de vitesse et la manière dont celles-ci seront déposées à partir du filament fondu à la sortie de la buse. Par ailleurs, il définit le parcours que doit réaliser l'extrudeur pour constituer l'objet couche après couche.

Il faut noter que pour un même objet à imprimer avec les paramètres de tranchage identiques, deux trancheurs différents, peuvent générer des programmes légèrement différents, les durées d'impressions différentes, de même que l'on peut obtenir des résultats

d'impression différents pour le même objet en changeant simplement de trancheur. En conséquence, il faut donc procéder à quelques essais avant de choisir un trancheur par rapport au rendu que l'on souhaite.

Il faut noter que pour un même objet à imprimer avec les paramètres de tranchage identiques, deux trancheurs différents, peuvent générer des programmes légèrement différents, les durées d'impressions différentes, de même que l'on peut obtenir des résultats d'impression différents pour le même objet en changeant simplement de trancheur. En conséquence, il faut donc procéder à quelques essais avant de choisir un trancheur par rapport au rendu que l'on souhaite.

I.1.7. Quelques trancheurs :

Il existe plusieurs types de trancheurs en libre téléchargement, une description de quelques-uns les plus couramment utilisés, est faites ci-dessous. Certaines imprimantes sont livrées avec un trancheur sur support amovible, à l'achat.

I.1.7.1. Slic3r :

Slic3r est un trancheur libre multi-plateforme. Facile d'utilisation, il bénéficie d'une interface ergonomique et permet aux utilisateurs avancés d'accéder à un ensemble de paramètres. A partir de son interface, il propose quatre vues différentes du modèle 3D à imprimer et du résultat de la procédure de tranchage en affichant l'encombrement de l'objet.

Propose la possibilité de changer la taille des objets en réduisant ou en augmentant l'échelle de ceux-ci. Entre autres possibilités, il est permis d'effectuer des rotations de l'objet sur les trois axes X, Y et Z. Pendant l'impression 3D, ce trancheur affiche la progression du dépôt de filament sur le plateau d'impression virtuel [2].

Parmi les nombreux paramètres auxquels l'utilisateur de Slic3r peut accéder, il y a la gestion de l'épaisseur des couches, via les onglets « Print Settings » puis « Layers and perimeters ». Le paramètre « Layer height » spécifie en millimètres (mm) l'épaisseur des couches définie par le trancheur, tandis que le paramètre « First layer height » qui détermine l'épaisseur de la première couche, soit en « mm », soit en pourcentage du paramètre précédent.

Il existe dans la version « Prusa research » de Slic3r un éditeur qui permet de varier directement la hauteur des couches. La configuration du nombre de périmètres, le nombre de couches des parois inférieures et supérieures sont aussi accessibles à travers l'onglet « Print Settings », puis via « Layers and perimeters », cela permet de spécifier l'épaisseur des couches inférieures et supérieures de l'objet à imprimer.

Aussi, pour définir les paramètres de remplissage, il suffit d'accéder à l'onglet « Print Settings » et retrouver d'autres onglets à paramétrer dans « Infill ».

Dans cette partie du paramétrage du trancheur, Slic3r offre la possibilité de spécifier le motif de remplissage à utiliser pour construire les parois inférieures et supérieures. Avec Slic3r, les paramètres concernant la jupe et la bordure sont spécifiés à partir de l'onglet « Print Settings » et la fonctionnalité « Skirt and brim ».

En principe, pour la jupe, une seule couche d'épaisseur est suffisante. Toutefois, on peut lui donner une hauteur aussi grande que l'objet, créant ainsi un « bouclier de protection » contre les courants d'air qui peuvent éventuellement précipiter le refroidissement « non-homogène » du filament fondu. Ce trancheur offre la possibilité de préciser la « longueur minimale » de la jupe à l'endroit de l'estimation du nombre de tours nécessaires à l'extrudeur pour initialiser le flux du filament fondu.

C'est toujours dans l'onglet « Print Settings » et la fonctionnalité « Support material » que sont précisés les paramètres concernant l'impression des supports. A ce stade, il revient à l'utilisateur de définir à quel moment et pour quelle partie de l'objet à imprimer seront générés les supports. Ceci est utile lorsque l'objet à imprimer à une faible surface de contact avec le plateau d'impression. Les paramètres de vitesse, quant à eux sont spécifiés toujours dans « Print Settings », mais dans la fonctionnalité « Speed ».

En outre, on renseigne les paramètres des filaments dans l'onglet « Filament Settings » sur la fonctionnalité « Filament ». A cette étape du paramétrage du trancheur, il est possible d'indiquer les différentes températures aussi bien de l'extrudeur que celle du plateau d'impression. Cette fonctionnalité permet d'imprimer la première couche avec des températures supérieures à celles qui seront nécessaires à la poursuite de l'impression, ceci pour faciliter l'adhérence des couches.

Enfin, la gestion des paramètres de refroidissement sont aussi spécifiés dans l'onglet « Filament Settings », par la fonctionnalité « Cooling ». Slic3r dispose d'un mode de refroidissement automatique (voir l'option « enable auto cooling »). Cette option permet à Slic3r de planifier quand il faudra activer ou non le ou les ventilateurs et indiquer à quelle vitesse ils doivent tourner

I.1.7.2. Ultimaker Cura :

Cura de « Ultimaker » est un trancheur libre, multi-plateforme, il offre un accès à des nombreuses options pour le paramétrer afin d'obtenir des objets à imprimer de bonne qualité, avec un excellent rendu, surtout pour les utilisateurs avertis. L'interface de Cura propose des vues de l'objet importé dans le trancheur qui s'affiche en 3D à travers l'aperçu « Solid view ». La deuxième que propose l'aperçu « X- Ray view » présente l'objet en transparence. Enfin, la troisième vue, « Layer view », affiche quant à elle le résultat du tranchage) [3].

Cura permet, grâce à un curseur vertical, de sélectionner le numéro d'une couche et de l'afficher. Il est donc possible de vérifier si certaines couches risquent de présenter d'éventuelles imperfections à l'impression. Cette action permet de simuler une impression en affichant une buse d'extrusion virtuelle déposant du filament fondu. Comparativement à Slic3r, les options de configuration des paramètres d'impression de Cura sont tous disposées dans un menu déroulant à droite de l'interface.

La fonctionnalité « Custom » permet d'accéder à l'ensemble des paramètres de configuration. Puis la fonctionnalité « Recommended » facilite un affichage simplifié. Toutefois, pour chaque catégorie à paramétrer, il est possible de choisir lesquels afficher.

Afin de déterminer l'épaisseur des couches, on accède tout d'abord à la fonctionnalité « Quality » ensuite, il est possible de paramétrer le « Layer height » ou l'épaisseur des couches en « mm ». Comme pour l'épaisseur de la première couche « Initial layer height », celle du « Layer height » est aussi calculée par le trancheur.

Pour déterminer le nombre de périmètres à construire, il faut accéder à la fonctionnalité « Shell ». C'est aussi lors de la configuration de cette fonctionnalité qu'il est possible de paramétrer le nombre de couches des parois inférieures et supérieures en millimètres. La nature des remplissages est spécifiée grâce à la configuration de la fonctionnalité « Infill ». Par défaut, seule l'option de densité est affichée.

A l'opposé de Slic3r, le choix des motifs de remplissage des parois inférieures et supérieures n'est pas accessible dans cette fonctionnalité, mais plutôt dans « Shell ». Il faudra pour cela, paramétrer l'option « Top/Bottom pattern ». Tandis que le paramétrage des jupes et bordures sont spécifiées dans la fonctionnalité « Build plate adhesion ». Cura offre un choix approprié pour le type d'aide à l'adhérence du filament en fusion.

Quant aux supports, ils sont paramétrés dans l'option « Support » du trancheur. Cura propose à l'utilisateur la possibilité de ne générer que des supports touchant le plateau d'impression via l'option « Support placement », positionné dans l'option

« Touching buildplate », ou partout comme dans Slic3r, avec « Support placement » positionné dans l'option « Everywhere ». Les deux autres options permettent de paramétrer la densité des supports et l'angle limite de leur génération.

Pour paramétrer la vitesse, il faut accéder à la fonctionnalité « Speed », afin d'obtenir des réglages affinés. Les informations concernant les filaments sont renseignées dans l'option « Material » et ceux relatives aux paramétrages du refroidissement sont configurées dans l'option « Cooling » du trancheur. Comme Slic3r, Cura propose comme une configuration du mode de refroidissement « intelligent », via l'option « Regular/Maximum Fan Speed Threshold ».

Il existe plusieurs autres trancheurs, comme « Kisslicer », qui disposent de fonctionnalités qui ne sont pas toutes accessibles dans leurs versions libres, à l'instar de celles relatives à la configuration et l'utilisation d'un deuxième ou plusieurs extrudeurs. Enfin, Skeinforge, un des plus anciens trancheurs libres multi-plateforme, est considéré comme étant celui qui produit un G-code de très bonne qualité.

I.1.7.3. Le paramétrage des trancheurs :

Nous allons examiner ici, quelques paramètres avec lesquels il est important d'interagir régulièrement dans le paramétrage du trancheur afin d'arriver à une qualité d'impression acceptable.

I.1.7.3.1. Le Calcul des couches ou "discrétisation" :

Discrétiser un objet à imprimer consiste à le faire passer d'une forme continue à une succession de couches. Le trancheur effectue le calcul des couches successives en coupant l'objet à imprimer par couches élémentaires et à intervalles de hauteur réguliers, aux fins de déterminer le chemin à parcourir de la tête d'impression de l'imprimante 3D. Les couches successives sont à la fois des périmètres (les limites physiques de l'objet, son contour, son Enveloppe) et du remplissage (la partie interne de l'objet dont le taux et la méthode de remplissage peuvent varier). Le remplissage influe davantage sur la solidité de l'objet et la qualité de l'impression.

I.1.7.3.2. L'épaisseur des couches :

Naturellement, il est possible de fixer deux paramètres spécifiques lorsqu'on détermine la hauteur de couches, notamment la hauteur des couches déterminées par le trancheur et l'épaisseur de la première couche qui sera déposée sur le plateau d'impression. Ce paramètre est distinct de l'épaisseur des autres couches, parce qu'il n'est pas toujours aisé d'obtenir une surface d'impression parfaitement plane et parallèle au plan de déplacement de la tête d'impression. C'est pour cette raison qu'il est nécessaire de spécifier une épaisseur de couche suffisamment dense afin de compenser les éventuels défauts.

Il existe une relation étroite entre la hauteur de couche maximale et le diamètre de la buse de l'extrudeur. Ainsi, il n'est pas possible d'obtenir une couche dont la hauteur sera supérieure au diamètre de l'extrudeur, de même que la hauteur des couches ne devrait pas dépasser environ 80 % du diamètre de l'extrudeur, ceci afin d'éviter que le filament fondu ne soit correctement pressé à sa sortie de la buse contre la surface d'impression ou la couche précédente.

Les trancheurs actuels permettent cependant à l'utilisateur de pouvoir spécifier une épaisseur de couche variable à faire évaluer en fonction de la hauteur des couches successives par rapport au lit d'impression. Ceci facilite un tranchage plus fin pour des zones présentant des arrondis ou des détails nécessitant une faible épaisseur de couche pour une impression plus précise. Pour des régions de l'objet à imprimer, nécessitant des détails significatifs, il peut être utilisé des épaisseurs de couche plus importante, afin de diminuer considérablement la durée du temps d'impression, comparativement à l'utilisation d'une faible épaisseur de couche pour tout objet à imprimer.

I.1.7.3.3. Les couches de départ et de fin :

Définir le nombre de couches de départ et de fin permet, tout comme le nombre de périmètres, de renforcer la solidité de l'objet à imprimer. Il peut arriver que ce paramètre influe sur l'aspect de certaines surfaces horizontales dont l'aspect final peut laisser à désirer au cas où l'épaisseur des couches terminales est trop faible. Selon le trancheur utilisé, ce facteur peut être exprimé soit en nombre de couches, soit en précisant directement l'épaisseur de couches désirée en millimètres.

I.1.7.3.4. Les périmètres et les remplissages :

Afin de définir le remplissage de l'objet à imprimer, il y a deux principaux paramètres dont il faut impérativement tenir compte lors du paramétrage des options de remplissage dans les trancheurs.

Il s'agit du pourcentage de remplissage et du motif de remplissage. De même, il existe un choix des motifs de remplissage à faire afin de garnir les parois inférieures et supérieures. On peut aussi opter pour ne pas avoir de remplissage. Enfin, nous pouvons agir sur le nombre de périmètres lorsqu'on désire avoir un objet imprimé plus solide. Dans ce cas de Figure I., on augmente le nombre de périmètres. Le plus souvent, les valeurs couramment utilisées varient entre deux ou trois périmètres.

A partir d'un modèle 3D d'un « lapin » dont le calcul de la première couche est réalisé par « Slic3r » (Figure I.7, ci-dessous), on observe que les lignes qui représentent le parcours de l'extrudeur pour réaliser une couche, se présente comme sur la Figure I.7, ci-dessous.



Figure I.7 : Représentation du parcours de l'extrudeur [1]

En rouge, le parcours de l'extrudeur permet de réaliser les périmètres externes de l'objet 3D. En bleu, sont représentés les parcours réalisés par l'extrudeur pour remplir l'intérieur de l'objet. Ici, la couche visualisée est entièrement remplie de filaments. Il faudra alors paramétrer le remplissage selon l'usage et la finalité de l'objet à imprimer (pièces mécaniques, contraintes géométriques, objets décoratifs, etc.). En faisant varier le taux de remplissage (Figure I.8, ci-dessous), on peut obtenir un objet entièrement creux, partiellement rempli ou totalement rempli.

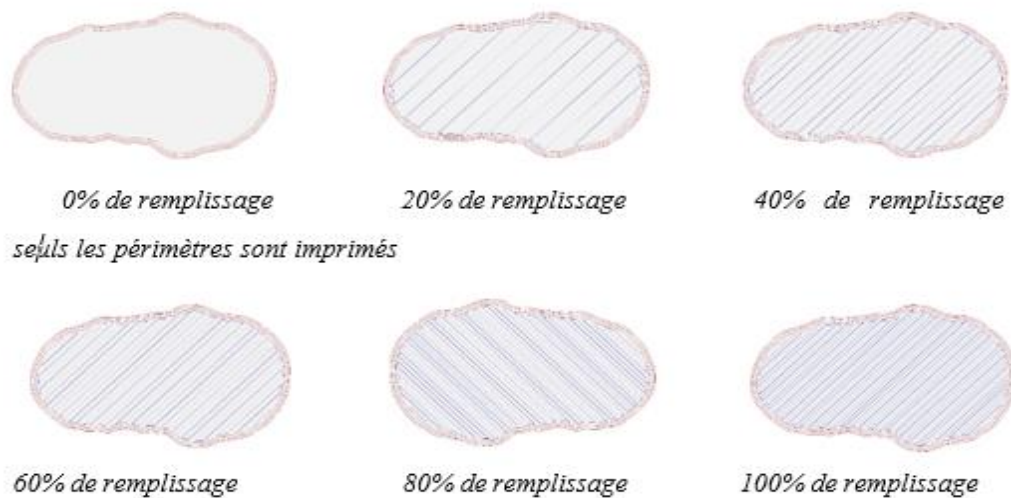


Figure I.8: Taux de remplissage de filament fondu [1]

Les trancheurs proposent plusieurs « motifs » de remplissage paramétrables selon l'usage et la finalité de l'objet. Voici quelques exemples des « motifs » de remplissage (Figure I.9, ci-dessous) proposé par Slic3r.



Figure I.9 : Types de remplissage de filament fondu [1]

I.1.7.3.5. Les jupes et bordures :

Ces paramètres permettent d'influencer principalement trois aspects de l'impression, notamment :

- Skirt (Jupe) : elle initialise convenablement le flux de matière fondue avant le début de l'impression. Elle sert aussi à la construction d'un « bouclier » autour de l'objet pour limiter l'effet de courants d'air, pour les imprimantes n'ayant pas de caisson de protection ce qui n'est pas le cas du modèle utilisé dans le cadre de nos expérimentations. Elle se matérialise par une ligne continue autour de l'objet. La jupe est paramétrée par le nombre de tours effectués par l'extrudeur, sa distance par rapport à l'objet, et sa hauteur par rapport au plateau.
- Brim (Bordure) : l'extrudeur construit une bordure autour de la première couche de l'objet à imprimer afin d'en améliorer l'adhérence. Elle n'est nécessaire que pour certains types de filament qui ont une tendance à se contracter en refroidissant. En principe, les premières couches déposées refroidissent pendant que les couches suivantes sont déposées, d'où l'apparition des contraintes mécaniques dans l'objet en impression. Ces contraintes peuvent déformer l'objet, et dans certains cas, provoquer son décollement. Ce phénomène est souvent constaté avec les filaments de type « ABS » et les polycarbonates.
- Raft (radeau) : il participe à la construction d'un support sous la pièce pour améliorer l'adhérence. Le radeau est très important pour les pièces ayant une petite base, et un diamètre important au-dessus.

I.1.7.3.6. Les supports :

Les supports sont nécessaires pour les parties d'un objet à imprimer en 3D dont certaines couches devraient être déposées dans le vide. Lors du paramétrage des supports, l'utilisateur a la latitude de spécifier un angle d'inclinaison caractéristique, en rapport avec les surfaces du modèle à partir duquel les supports seront générés, pour toutes ou seulement un certain nombre de couches de l'objet à imprimer. Les supports sont nécessaires lorsque l'objet à imprimer, a une faible surface de contact avec le plateau d'impression.

I.1.7.3.7. Les vitesses :

Il existe plusieurs facteurs paramétrables qui sont influencés par la vitesse des organes de l'imprimante, qui influence la qualité de l'impression, notamment la vitesse d'impression des périmètres internes et externes. Les périmètres externes doivent être imprimés à une vitesse inférieure à celle des périmètres internes. Ainsi, ils améliorent la qualité de la surface externe de l'objet.

Le remplissage est aussi assujéti à la notion de la vitesse lors de l'impression. Il en est de même pour la vitesse de remplissage des parties solides (les dessous, dessus et parties internes horizontales). Cette vitesse est généralement faible pour favoriser la solidité de ces parties de l'objet.

Le paramétrage des vitesses spécifie l'accélération optimale qui peut être atteinte en fonction des différents déplacements des organes de l'imprimante. Ces vitesses ne peuvent être maximales que dans certains cas, comme un « déplacement sans changement Brusque de direction ».

Cela peut être observable sur une distance suffisamment longue. Enfin, la vitesse d'impression n'a pas une incidence très forte sur la durée d'une impression, sauf peut-être pour des objets très simples. Généralement, cette incidence est beaucoup plus faible.

I.1.8. Anatomie des imprimantes 3D « grand public » :

Une imprimante 3D est un dispositif qui exécute un programme calculé par un trancheur (G-code) avec le plus de précision possible, pour réaliser l'objet modélisé en 3D. L'imprimante tridimensionnelle utilisée dans notre expérimentation est celle à « FDM ». Elle est constituée de différents organes, notamment : un châssis, un plateau chauffant, un extrudeur, des moteurs pas à pas. Ceux-ci, par un système de tringlerie, mettent en mouvement, d'une part, les axes et le plateau, et d'autre part, entraînent le filament vers l'extrudeur.

Les châssis des imprimantes « FDM » proposés dans le commerce offrent une grande variété de choix de matériaux (bois, aluminium, plexiglass, matériaux composites, etc.) et de solution pour la réalisation. Mais l'on trouve principalement dans la famille d'imprimantes à fusion de filament deux principaux types de châssis: les châssiscartésiens et les châssis deltas

I.1.8.1. Les imprimantes cartésiennes :

Les imprimantes cartésiennes (Figure I.10, ci-dessous) sont caractérisées par trois axes perpendiculaires représentatifs des axes « X », « Y » et « Z » d'un repère orthonormé. Une imprimante 3D cartésienne est comparable à une table traçante à laquelle on a ajouté un axe vertical « Z ». Il existe plusieurs configurations de déplacement des axes d'une imprimante 3D. Les deux configurations de déplacement les plus couramment rencontrées consistent, d'une part, à déplacer le plateau d'impression selon l'axe « Y », l'extrudeur selon l'axe « X », et d'autre part à déplacer le plateau d'impression selon l'axe « Z ».

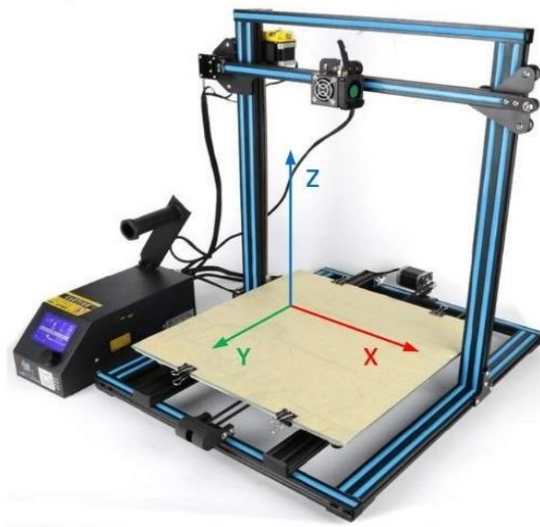


Figure I.10: Imprimante « cartésienne » [1]

Ces ensembles sont mis en mouvement à l'aide des courroies pour les axes « X » et « Y » et des vis sans fin pour l'axe « Z ». C'est ensemble est mis en mouvement grâce à des moteurs pas à pas, et des guides linéaires se déplacent dans des rails. Le plateau d'impression et l'extrudeur sont reliés à des roulements ou des guides linéaires pour se mouvoir le long du châssis.

I.1.8.2. Les imprimantes delta :

Le principe adopté pour les imprimantes « Delta » (Figure I.11, ci-dessous) est celui des bras robotisés servant au déplacement d'objets sur les chaînes de productions industrielles. Ce principe met en œuvre le plateau d'impression maintenu aux extrémités par trois bras qui le gardent toujours parallèle à l'horizontale, n'effectuant ainsi que des translations.

Le principal avantage de ce type d'imprimante se résume dans « la légèreté des masses en mouvement », favorisant ainsi la capacité de l'imprimante à réaliser des accélérations intéressantes. Il est important de « calibrer la géométrie » de l'imprimante afin d'obtenir des objets imprimés avec les dimensions les plus précises possibles.



Figure I.11 : Imprimante « delta » Anet-a4 [1]

I.1.8.3. Les cartes contrôleurs :

Il existe principalement deux types de cartes : les cartes 8 bits basées sur la technologie Arduino (Figure I.12, ci-dessous), et les cartes 32 bits à base de processeur « Advanced Risk Machine » (ARM). C'est la carte contrôleur qui exécute le programme en G-code et génère les signaux contrôlant les moteurs ainsi que les tensions permettant de chauffer la tête d'extrusion et éventuellement le plateau d'impression. Ces plateaux sont équipés d'éléments chauffants dotés des thermistances permettant à la carte contrôleur de réguler les variations de température.

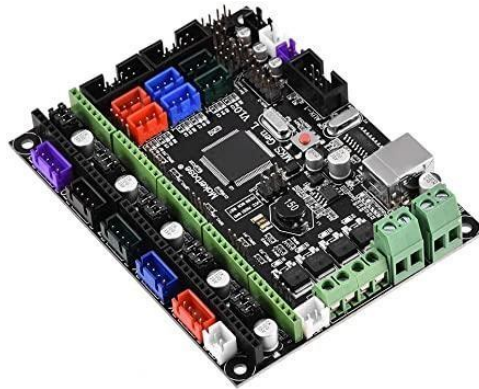


Figure I.12: Exemple de carte contrôleur [1]

I.1.8.4. Le plateau d'impression :

Le plateau d'impression (Figure I.13, ci-dessous) est une surface qui peut être chauffante ou non, sur laquelle est déposé le filament fondu à la sortie de la buse de l'extrudeur. Le plateau d'impression est principalement constitué d'une plaque chauffante en aluminium ou d'une plaque de verre qui reçoit la matière fondue. Pour ce faire, les éléments constituant le plateau d'impression doivent avoir la surface la plus plane possible, afin de recevoir les fines couches de filament fondu.

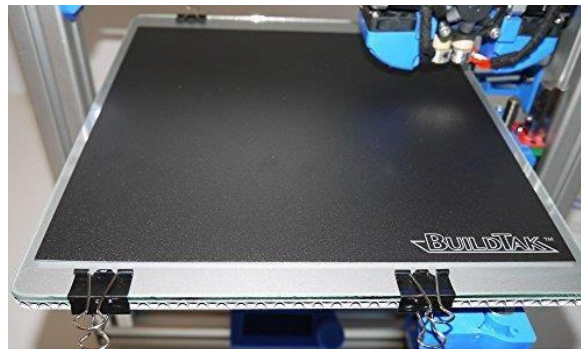


Figure I.13: Exemple de plateau d'impression

Le verre par sa constitution, présente généralement une surface plane, il facilite l'enlèvement de l'objet imprimé après refroidissement, contrairement à l'aluminium qui présente la particularité de répartir la chaleur sur toute la surface de la plaque. Notons que selon le type de châssis, la forme du plateau d'impression peut varier. Les plateaux d'impression carrés ou rectangulaires sont utilisés pour les imprimantes de type cartésien, tandis que les imprimantes de type delta utilisent des plateaux d'impression circulaires.

I.1.8.5. L'extrudeur :

L'extrudeur (Figure I.14, ci-dessous) est un dispositif intégrant une roue crantée qui entraîne et presse le filament dans la gorge d'une autre roue, laquelle guide la descente du filament vers la buse. Les roues sont entraînées par un moteur pas à pas. Selon le type de montage sur la tête d'extrusion, on rencontre fréquemment deux dispositifs d'extrudeurs. Il existe des « extrudeurs directs » montés directement sur le mécanisme de la tête d'extrusion et les « extrudeurs déportés (bowden extruder en anglais) » qui sont montés sur le châssis de l'imprimante. La principale différence entre ces deux types de montage vient du fait que les « Extrudeurs déportés » diminuent considérablement « les masses en mouvement » par rapport aux « extrudeurs directs ».



Figure I.14 : Exemple d'extrudeur [1]

I.1.8.6. La buse d'extrusion :

La tête d'extrusion (Figure I.15, ci-dessous) est assimilable à un tube chauffant dans lequel est poussé le filament de plastique. L'orifice d'entrée est calibré pour recevoir le diamètre commercial du filament. La buse de sortie a généralement un diamètre de 0,35 à 0,4 mm, selon le type d'imprimante et de filament. L'ensemble peut être monté sur un chariot qui se déplace suivant les axes « X » et « Y ».

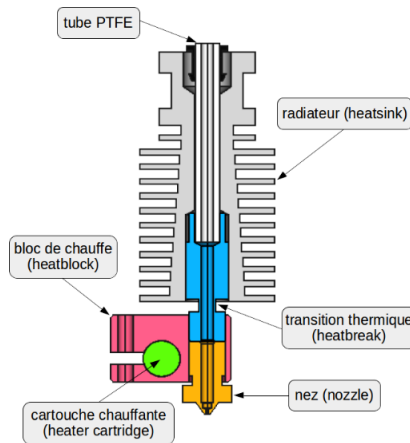


Figure I.15 : Coupe transversale de l'extrudeur « e3dv6 » [1]

Ce dispositif a pour principale fonction de chauffer le filament et de l'extruder à travers une buse calibrée selon le fabricant et le type d'imprimante. La buse de l'extrudeur supporte des températures pouvant dépasser les 250 °C. Elles peuvent être en matériaux métalliques ou plastiques supportant des fortes températures. Certaines d'entre-elles sont équipées d'un guide en téflon (PTFE) pour minimiser les risques de bourrage de filament.

En générale, ce dispositif est équipé, d'une part, d'un radiateur facilitant le refroidissement à l'air libre, et d'autre part, d'un ventilateur qui assure le refroidissement programmé depuis le trancheur. Puis, il y a un bloc de chauffe « heat block » qui est couplé à une transition thermique « heatbreak » reliant le bloc de chauffe au radiateur.

En plus, l'extrudeur est muni d'une cartouche de chauffage « heat cartridge », installée dans le bloc de chauffe. Ce bloc de chauffe porte à température le filament qui passe dans l'extrudeur. La chaleur produite pour fondre le filament est mesurée à partir d'une sonde de température, communément appelée thermistance ou « thermistor ». Ce type de sonde mesure généralement les températures du bloc de chauffe inférieures à 300 °C. Ce qui est suffisant pour les imprimantes à filament de fil fondu. Au-delà, il est conseillé d'utiliser un autre type de sonde : le « thermocouple ».

La buse ou nez d'extrusion, en anglais « nozzle », dont le diamètre est calibré, peut être changée en fonction des attentes de l'utilisateur sur la qualité de l'objet à imprimer, la nature et le diamètre du filament. Toutefois, une buse d'extrusion avec un petit diamètre donnera une excellente qualité d'impression avec une finition avec des détails assez précis et un faible débit de filament. En revanche, une buse d'impression avec un diamètre d'extrusion important, permet certes d'imprimer vite, mais sans grande précision sur les détails de l'objet imprimé.

I.1.8.7. Les moteurs pas à pas :

Un moteur pas à pas (Figure I.16, ci-dessous) est un moteur dont la partie mobile exécute un déplacement élémentaire appelée « Pas ». Ce déplacement se fait en fonction de la fréquence des impulsions électriques qu'il reçoit. Dans la plupart de cas, il est circulaire ou linéaire selon le type de moteur. Chaque « Pas » correspondant à un déplacement angulaire.



Figure I.16 : Exemple de moteur pas à pas [1]

Le nombre de « Pas » d'un moteur est fonction de deux principales caractéristiques que sont le nombre de phases (partie commande) et le nombre de paires de pôles (partie rotor). Les valeurs des déplacements angulaires par rapport aux nombres de tours les plus couramment rencontrées sont :

- $0,9^\circ$: soit 400 pas par tour.
- $1,8^\circ$: soit 200 pas par tour.
- $3,6^\circ$: soit 100 pas par tour.
- $7,5^\circ$: soit 48 pas par tour.
- 15° : soit 24 pas par tour.

On distingue trois groupes de moteur pas à pas :

- Les moteurs à aimant permanent.
- Les moteurs à reluctance variable.
- Les moteurs hybrides.

I.1.9. Les filaments :

Les filaments font l'objet d'un paramétrage dans les trancheurs, notamment « le diamètre ». Les plus courants sur le marché vont de 1,75 mm à 2,85 mm. Il existe tout de même des légères variations de l'ordre de quelques centièmes de millimètres suivant les fabricants. Il est donc important de mesurer avec précision le diamètre du filament à utiliser, afin que le calcul du débit du filament fondu exécuté par le trancheur, soit le plus précis possible.

Selon le type de plastique et les pigments utilisés pour les colorer, ceux-ci peuvent avoir une tendance à être « sur-extrudé » (trop de plastique sorti de l'extrudeur) ou « sous-extrudé » (pas assez de plastique sorti de l'extrudeur). Pour pallier cela, il est nécessaire d'appliquer un « multiplicateur d'extrusion ». Le multiplicateur d'extrusion est un coefficient susceptible de corriger les variations d'extrusion du filament. Il est à noter que, l'ABS ayant une tendance à se gonfler lors de l'extrusion, il est recommandé de régler ce paramètre à « 0,95 » et de conserver à « 1 » pour les autres types de filament [4].

Les températures d'extrusion des filaments sont principalement indiquées par les fabricants. Toutefois, une température plus basse peut permettre d'avoir de meilleurs détails. Elle entraînera cependant une moins bonne adhérence des couches. Une température élevée permet d'augmenter la solidité de l'objet, mais au détriment de la qualité de finition et de l'aspect visuel.

Aussi, les températures du plateau d'impression sont elles aussi, spécifiées par les fabricants sous forme d'abaque de température. Elles facilitent d'une part l'adhérence du filament fondu sur la surface d'impression du plateau, et limitent les risques de déformations liés à la contraction du plastique lors du refroidissement d'une part. De même, le réglage des bonnes températures pour le plateau concourt à éviter le décrochage des premières couches imprimées. Enfin, le refroidissement des objets en cours d'impression n'est pas nécessaire pour tous les types de filaments, mais il est assuré par un ou plusieurs ventilateurs fixés près de l'extrudeur.

I.1.9.1. Types et propriétés des filaments :

Filament	Propriétés	Ø d'impression
ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrene	- Plastique dure ; - Facile à imprimer ; - Il résiste la température.	210-250
PLA : Polylactique	- Facile à imprimer ; - Faible déformation ; - Biodégradable.	190-230
Nylon	- Plastique dure et durable ; - Résistant ; - Flexible.	210-250
PVA : Polyvinyle alcool	- Non toxique ; - Facile à utiliser.	180-230
CARBON FIBER	- Durable ; - Faible déformation ; - Soluble.	195-200
WOOD	- Souple et flexible ; - Durable ; - Contient de vraies fibres de bois.	200-260
HIPS	- Biodégradable ; - Faible coût.	220-230

Tableau I.1 : Récapitulatif de quelques filaments les plus utilisés

I.1.9.2. Les matériaux utilisés dans l'impression 3D :

La fabrication additive utilise plusieurs technologies pour obtenir les objets à imprimer par dépôt de filament fondu, par dépôt de résine dans un bac remplie de poudre, par balayage de poudre métallique ou encore par solidification de résine « photosensible ».

Afin d'avoir un objet de qualité et de structure souhaitée remplissant les conditions et caractéristiques mécaniques voulues, le choix du filament s'avère important, notamment les « propriétés mécaniques » dont dépendent sa dureté et sa rigidité. Chacun d'eux étant caractérisé par sa température de « transition vitreuse ». La température à partir de laquelle le filament passe de l'état solide à l'état pâteux avant de couler par gravité. L'aspect de l'objet fini peut varier avec la nature du filament. Enfin, il y a des filaments qui sont utilisés pour résister dans les environnements chimiques agressifs (acides, solvants, etc.)

Sans vouloir expressément dresser ici une liste exhaustive des matériaux plastiques utilisés dans l'impression 3D, « il existe actuellement une offre diversifiée de matériaux conditionnés sous forme de filament pour l'impression 3D. Nous citerons ici quelques-uns couramment rencontrés dans les usages » de l'impression 3D avec filament fondu, notamment des « Thermo Plastic Elastomer » qui sont un mélange de plastique et de caoutchouc. Ceux-ci sont difficiles à imprimer avec une imprimante 3D à extrudeur déporté (bowden).

Les objets imprimés avec ce type de filament sont très résistants au déchirement. De même, il y a le « Nylon (polyamide) » qui nécessite des températures d'impression assez élevées et confère aux objets imprimés une solidité certaine.

Appartenant à la famille des filaments soluble, ils sont couramment employés avec des imprimantes 3D à deux extrudeurs, de même que pour l'impression des structures de soutien communément appelées supports. Les supports évitent l'effondrement de l'objet imprimé et la chute de filament fondue de tomber dans le vide par gravité durant l'impression [5].

Enfin, il y a la famille des « polycarbonates ». Ce sont de types de plastique disposant d'excellentes propriétés mécaniques et d'une résistance thermique remarquable pour sa catégorie. Ils permettent une utilisation avec des intervalles de températures pouvant varier de 100 °C et 120 °C [5].

Actuellement, la gamme des produits utilisés en impression 3D, s'est considérablement élargie. Ici, nous nous appesantissons sur les filaments utilisés dans l'impression 3D par dépôt de filament, à savoir les thermoplastiques conditionnés en bobine (Figure I.17, ci-dessous), sachant qu'il existe plusieurs autres « matériaux utilisables avec d'autres technologies d'impression 3D ».

Les filaments sont caractérisés par la nature de leur texture, leur température de fusion et leur diamètre, qui lui peut varier de 1,75 mm à 2,85mm. Ce diamètre doit être le plus constant possible sur toute la longueur bobine, « sous peine d'influencer la qualité de l'impression ». La deuxième caractéristique est liée à la température de fusion et la température d'impression, tandis que la troisième est en rapport avec la nature et la texture du filament.



Figure I.17 : Conditionnement des filaments plastique (ABS, PLA)

Pour les imprimantes 3D à fusion de filament, il existe plusieurs types de filament que nous ne saurons tous énumérer ici, au vu l'éventail de l'offre sur le marché. Nous évoquerons uniquement ceux des filaments couramment rencontrés.

Premièrement, nous avons le « PLA » de l'acide Polylactique, qui est un plastique biodégradable, produit à partir de l'amidon de maïs, mais pas seulement. Les objets à imprimer à partir des filaments en « PLA » peuvent l'être sans plateau chauffant. Avec une température de transition vitreuse aux environs de 60 °C, le « PLA » est assez sensible aux montées en températures. Il est donc déconseillé de l'utiliser pour des pièces mécaniques devant résister en service à des températures élevées. Même s'il est résistant et rigide, il s'avère être finalement très cassant.

Les objets imprimés en « PLA » montrent généralement bien les détails du modèle 3D et ils ont un aspect de surface brillante. Son usage est conseillé pour l'initiation à l'impression 3D.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Facile à imprimer . • Peu/pas de déformation pendant l'impression • Très rigide . • Grand choix de PLA modifiés (bois, métal, etc.). 	<ul style="list-style-type: none"> • Risque de bouchage pour les têtes d'extrusion tout métal . • Se déforme à partir de 60 °C . • Cassant . • Difficile à poncer.

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients « PLA »

Le deuxième type de filament le plus répandu est l'« ABS », pour « Acrylonitrile butadiène styrène ». Il est très utilisé dans l'industrie pour « ses propriétés mécaniques intéressantes ». Il est tout de même difficile à imprimer comparativement au « PLA », à cause de la tendance des objets à se déformer pendant l'impression, causant la séparation des couches imprimées. L'« ABS » est moins dur et moins cassant que le « PLA ».

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Solide et léger . • Légèrement flexible . • Facile à poncer . • Filament peu couteux . • Résistant à des températures élevées. 	<ul style="list-style-type: none"> • Lit chauffant indispensable . • Se déforme pendant l'impression si la première couche n'a pas suffisamment adhéré . • Risque de délamination.

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients « ABS »

Le troisième type de filament couramment utilisé est sans doute le « Polyéthylène téréphtalate glycolisé » (PET), ou sa variante. Le « Polyéthylène téréphtalate glycolisé » (PETG). Il est utilisé aussi bien dans la fabrication des bouteilles d'eau minérales que pour la réalisation d'objets solides en impression 3D, grâce à sa capacité à offrir, d'une part, une « Excellente adhérence entre les couches », et d'autre part une faible déformation.

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Solide ; • Plus flexible que l'ABS et le PLA . • Très bonne adhésion entre les couches . • Meilleure résistance à la température que le PLA . • Peu/pas de déformation pendant l'impression. 	<ul style="list-style-type: none"> • Absorbe l'humidit

Tableau I.4 : Avantages et inconvénients « PET »

Le quatrième type de filament est issu des polycarbonates, matériaux plastiques extrêmement résistant utilisés dans la fabrication des casques pour motards et les globes des phares pour véhicules automobiles. L'un de ces principaux inconvénients dans l'impression 3D, c'est sa tendance à se déformer dans la phase de refroidissement de l'objet imprimé.

I.1.10. Quelques avantages et limites de l'impression 3D :

Pour des faibles volumes de production (petite série), l'impression 3D fournit une valeur ajoutée significative. Les temps et coûts de développement sont fortement réduits en supprimant complètement ou en minimisant le nombre d'outils qui ne sont pas nécessaires, sur une ligne de production classique avec des outillages et machines- outils traditionnelles. De plus, l'impression tridimensionnelle permet un contrôle très précis du matériau travaillé : les designers, scientifiques et ingénieurs ont ainsi l'opportunité d'optimiser la structure intérieure des objets imprimés pour obtenir l'effet escompté) [1].

Pour illustration, lors de nos expérimentations, à la suite de l'opération de tranchage de l'objet modélisé est présent sur le plateau virtuel, le gestionnaire d'impression affiche les informations nécessaires à l'impression, notamment :

- La longueur de filament à utiliser .
- Le nombre de couches à déposer .
- La durée estimée du temps d'impression .
- Le nombre de lignes de programme G-code à exécuter durant l'impression ; etc.

Ces différents facteurs sont influencés par la taille de l'objet à imprimer, le type de remplissage paramétré, la hauteur des couches à déposer, la vitesse de l'imprimante, l'utilisation ou non des supports et le type de trancheur utilisé.

À l'opposé de la fabrication soustractive, « cette technologie permet également de réduire considérablement les pertes de matière première par la diminution ou voir la disparition des chutes dues à la découpe, au perçage et autres types d'usinage par enlèvement de matière, parce qu'ici, toute la matière est déposée intégralement sous forme de couche afin de constituer progressivement l'objet technique voulu) » [22].

De même, les objets peuvent être imprimés avec un plus grand degré de contrôle spatial. Ce qui donne la facilité de créer des composants mobiles avec des structures internes et des formes extrêmement complexes en une seule impression.

« D'un autre point de vue, cette quasi- absence de limites spatiales libère les designers et les artistes des contraintes traditionnelles de la production moderne, stimulant la créativité et l'innovation ».

La société Thogus Products, basée près de Cleveland et spécialisée dans les moules à injection de matière plastique, affirment notamment que pour l'une de ses gammes de produits phares (bras de robots automatisés), l'impression 3D a permis de diminuer le coût de production par unité de 10.000 à 600 dollars, le temps de fabrication de quatre semaines à une journée, et le poids du produit de 70 à 90 %. Les technologies modernes d'impression 3D permettent également de réduire drastiquement la quantité de déchets produits par les procédés manufacturiers traditionnels, qui peuvent aller jusqu'à 90 % du volume total du matériau de découpe [23].

Comparativement, la production par injection plastique où il est nécessaire de fabriquer au préalable un moule et de le modifier autant de fois que nécessaire, implique une augmentation des coûts de conception, tandis que l'impression 3D est réalisée directement à partir du modèle 3D. Ce qui est un avantage non-négligeable sur le temps de conception et de modification du moule. L'impression 3D facilite ainsi la mise en place des cycles de développement des produits et de tests avec des délais très courts.

Cependant, une fois que le moule correspondant à l'objet à réaliser est stabilisé, la production par injection plastique est bien plus rapide. Mais elle reste peu adaptée lorsqu'on désire tester rapidement une pièce ou un objet dont on modifie souvent le modèle. Un autre avantage de l'impression 3D est la capacité qu'elle offre de matérialiser des formes complexes avec des imbrications difficiles à obtenir par moulage.

Il est possible avec l'impression 3D, de réaliser « un objet comportant des éléments indépendants et mobiles les uns par rapport aux autres, cependant liés les uns aux autres ; comme les maillons d'une chaîne, un roulement à billes, etc. ». Avec certains types d'imprimantes, il est possible d'employer plusieurs matériaux différents en simultanés pendant l'impression, imprimant ainsi des objets avec des parties présentant, d'une-part, des caractéristiques souples et d'autre-part, des parties présentant des caractéristiques rigides. Ce résultat est impossible à obtenir par injection plastique, ou l'alliage à utiliser doit être homogène avant d'être injecté dans le moule [23].

L'intérêt des imprimantes grand public à fusion de filament consiste en leur facilité d'appropriation et d'utilisation, donnant à tout un chacun le moyen de créer et de fabriquer soi-même ses propres objets sans faire appel nécessairement à un professionnel. Tout au plus se faire accompagner.

En dépit de tous les avantages que l'on peut attribuer à l'impression 3D, il n'en reste pas moins que cette technologie présente quelques limites pour un utilisateur non expérimenté. Il y a principalement la gestion des « surplombs ». C'est le cas lors de l'impression des objets dont certaines parties ne reposent pas directement sur le lit d'impression. Dans ce cas, l'on utilise la fonction « supports » depuis l'interface du trancheur. Ces supports vont combler les vides par des couches de matière moins denses.

Ainsi, les couches qui naturellement devraient être dans le vide s'appuient sur les supports déposés préalablement par l'extrudeur. Toutefois, dans certains cas, les supports sont difficiles à enlever sans abîmer l'objet à imprimer. Pour des imprimantes utilisant plusieurs types de matériaux en simultanés, les supports peuvent être réalisés avec des filaments.

Ceux-ci disparaissent lorsque l'objet imprimé est immergé dans un solvant approprié.

Un des facteurs qui peut se révéler être un handicap dans l'impression 3D avec filament fondu est sa capacité à assurer la même résistance à tous les niveaux et toutes les directions de l'objet imprimé. Ceci est dû au fait que la matière fondue se déposant couche par couche, la résistance offerte dans une telle liaison est moins consistante que celle qui existerait dans une relation intramoléculaire dans le même filament et dans la même couche.

Il faudra dans ce cas, selon la typologie et les formes des pièces à imprimer, choisir minutieusement l'orientation de l'objet à imprimer sur le plateau. De même, qu'il faudra choisir, selon sa destination et son usage, le matériau approprié offrant les caractéristiques mécaniques et esthétiques souhaitées.

Le problème d'adhérence de la première couche est une difficulté couramment rencontrée en impression 3D avec filament de fil fondu. L'adhérence de ladite couche est essentielle pour la réussite de l'impression. Les causes d'une mauvaise adhérence sont multiples et peuvent dépendre de plusieurs facteurs, notamment le niveau du lit d'impression, qu'il est impératif de positionner et mettre à niveau par rapport à la tête d'impression.

La nature de la surface du lit d'impression, sur laquelle se déposera le filament, a un rôle essentiel sur l'adhérence de la matière fondue sur le plateau. La plaque de verre est l'une des surfaces d'impression la plus utilisée pour les filaments du type PLA, ABS, PETG, etc. Hormis la plaque de verre, on utilise de plus en plus des lits d'impression en « aluminium ». Cette surface peut être recouverte pour faciliter l'adhérence du filament fondu.

Il existe plusieurs types de revêtement pour les lits d'impression des imprimantes 3D à filament de fil fondu, notamment les rubans adhésifs en « kapton » ou du « blue painter tape ». Ce type de ruban adhésif assure une bonne adhérence, mais il est parfois endommagé au moment de retirer l'objet imprimé du plateau. Une autre méthode consiste à recouvrir la plaque de verre d'une couche de colle de type « PVA » solubles dans l'eau, ou encore à appliquer une couche de « laque à cheveux » sur la plaque de verre.

Il faut tout de même garder à l'idée que toutes les « laques » et colles n'ont pas les mêmes compositions et les résultats attendus peuvent varier d'une laque ou colle à une autre. De même que l'utilisation de certains produits dissouts tel que « l'ABS », dissolvent dans de l'acétone.

Enfin, certaines plaques de verre sont commercialisées recouvertes d'une surface de type « Buildtak ». De nos jours, les fabricants proposent des surfaces d'impression spécifiques pour certains usages et natures de filament.

La température du lit d'impression est un facteur essentiel pour l'adhérence de la première couche d'impression.

Cette température varie entre 50 à 80 °C, selon les fabricants. Elle facilite la transition du changement de température de la matière fondue, jusqu'à son refroidissement. Ceci pour éviter un refroidissement brusque et une rétractation de la matière fondue. Deux autres phénomènes que l'on peut classer dans les inconvénients de l'impression 3D avec filament de fil fondu, sont la sous-extrusion et la sur-extrusion.

La sous-extrusion se caractérise par le fait que les couches déposées sur le plateau d'impression n'adhèrent pas correctement entre elles, parce que la quantité de filaments fondus à la sortie de l'extrudeur ne correspond pas à celle attendue sur le plateau. Ainsi, les couches précédentes et les suivantes ne fusionnent pas correctement.

La sous-extrusion peut être occasionnée par des informations incorrectement renseignées lors du paramétrage du trancheur, par exemple un diamètre du filament incorrect, afin que le trancheur puisse définir avec précision la bonne vitesse d'extrusion. Une autre cause de sous-extrusion peut provenir d'un mauvais calibrage de la buse de l'extrudeur ou encore si celle-ci est partiellement bouchée.

Dans le cas d'une sur-extrusion, il y a un excédent de filament fondu qui s'accumule plus ou moins rapidement sur les couches déposées précédemment. La première incidence, dans ce cas, est la détérioration de l'aspect visuel de l'objet imprimé. Dans un cas sévère, la buse de l'extrudeur peut buter sur l'excédent de matière qui s'accumule et détacher la pièce du lit d'impression.

Pour clore avec les inconvénients que l'on peut rencontrer dans l'impression 3D avec filament de fil fondu, il y a le décalage observé entre deux couches successives qui ne se superposent pas correctement. Les courroies mal tendues sont le plus souvent à l'origine de cette déficience remarquée dans l'utilisation des imprimantes à courroies. Lorsqu'une des courroies n'est pas suffisamment tendue, elle peut glisser sur la poulie crantée censée l'entraîner, provoquant ainsi une perte de position des moteurs « pas à pas », « missed steps » ou « skipped steps ».

Les moteurs, pas à pas, fonctionnent en « boucle ouverte ». Donc, il n'y a pas moyen de connaître avec exactitude la position du moteur, ni s'il a correctement effectué le nombre de tours que lui a demandé de réaliser la carte contrôleur. Ces moteurs sont caractérisés par un couple maximal et un couple minimal. Ils exercent une force de rotation sur une courroie jusqu'à une certaine plage de valeurs.

Ils peuvent être bloqués dans leur rotation si les résistances mécaniques rencontrées sont au-delà de leurs capacités.

Ces résistances mécaniques sont dues à plusieurs facteurs, notamment une imprimante mal montée, un roulement linéaire endommagé, une courroie qui frotte contre un élément mécanique, etc. Le couple maximal des moteurs peut aussi être insuffisant pour déplacer les parties mobiles de l'imprimante et causer une perte de position ou encore, si les valeurs d'accélération maximales réglées dans le « firmware » de la carte contrôleur sont trop élevées.

I.11 Conclusion :

En conclusion, nous avons exploré les procédés et techniques d'impression 3D, et nous avons pu constater à quel point cette technologie révolutionnaire a transformé de nombreux domaines. De la fabrication industrielle à la médecine personnalisée, l'impression 3D a ouvert de nouvelles perspectives et a repoussé les limites de la créativité et de la fabrication.

Nous avons découvert les différents procédés d'impression 3D, tels que la stéréolithographie, la fusion sélective par laser et le dépôt de matière fondue, chacun offrant des avantages spécifiques selon les besoins et les matériaux utilisés. Nous avons également examiné les matériaux compatibles avec l'impression 3D, des plastiques aux métaux en passant par les matériaux composites, en comprenant leurs propriétés et leurs applications.

Tout au long de ce chapitre, nous avons pris conscience des défis et des enjeux associés à l'impression 3D, tels que la précision, la résolution et la taille des objets imprimables. Cependant, nous avons également été témoins des progrès constants dans le domaine, avec l'émergence de nouvelles techniques et l'exploration de domaines tels que la bio-impression et l'impression 3D à l'échelle nanométrique.

L'impression 3D a un potentiel énorme pour révolutionner notre manière de concevoir, de fabriquer et d'innover. Elle offre des opportunités inédites en termes de personnalisation, de rapidité de production et de réduction des coûts. Cependant, elle soulève également des questions éthiques et légales, nécessitant une réflexion continue sur son utilisation responsable et ses implications sociales.

Au-delà des procédés et techniques spécifiques, l'impression 3D est avant tout une véritable révolution culturelle, qui encourage la créativité, la collaboration et l'innovation. Les possibilités offertes par cette technologie sont encore en expansion, et il est passionnant d'imaginer les avancées futures et les applications encore inexplorées.

En poursuivant notre exploration de l'impression 3D dans les prochains chapitres, nous découvrirons comment cette technologie est appliquée dans différents domaines, et comment elle transforme nos industries, notre société et notre perception même de la fabrication.

CHAPITRE II

GENERALITE SUR LES MACHINE-OUTIL À COMMANDE NUMERIQUE

II.1 Introduction:

Ce chapitre offre une vue d'ensemble générale de la technologie des commandes numériques (CN), en abordant des sujets tels que la classification, l'architecture et la programmation des machines CN pour différents types de commandes.

Dans ce chapitre on présente un aperçu général sur la technologie des CN, citant la Classification, l'architecture, la programmation des Machines CN pour différentes commandes.

II.2 Historique :

Les travaux réalisés par Falcon et Jacquard à la fin du XVIIIe siècle ont démontré la possibilité de contrôler les mouvements d'une machine à l'aide d'informations transmises par un carton perforé. Leur métier à tisser de 1805 a été le premier équipement à utiliser cette technique, ce qui en fait l'ancêtre de la commande numérique. Cependant, il est nécessaire de relier l'exploitation industrielle de la CN au développement de l'électronique.

En 1947, à Traverse City dans l'État du Michigan, John Parsons fabriquait des pales d'hélicoptère par reproduction pour le compte de l'US Air Force. Pour façonner ses gabarits, il utilisait une méthode consistant à percer de nombreux trous à faible espacement afin d'approcher le profil théorique. L'emplacement et la profondeur de chaque trou étaient calculés avec précision par un ordinateur IBM utilisant des cartes perforées. La finition de la surface était ensuite réalisée par des opérations manuelles de polissage.

Cependant, lorsque l'US Air Force a confié à John Parsons la réalisation de pièces aux formes encore plus complexes pour ses futurs avions supersoniques, il a réalisé que sa méthode était trop approximative et qu'un usinage continu en 3 dimensions était nécessaire pour obtenir satisfaction.

Au printemps 1949, il a donc confié au Massachusetts Institute of Technology (MIT) le développement de systèmes de contrôle capables de piloter une machine qui recevrait des instructions intermittentes à partir d'un lecteur de cartes. [6]

Les différentes étapes de développement de la CN sont les suivantes :

1954 Bendix acquiert le brevet de Parsons et fabrique la première CN industrielle.

1955 à Font du Lac (Wisconsin), le constructeur américain Giddins & Lewis commercialise la première MOCN.

1959 apparitions de la CN en Europe (foire de Hanovre).

1964 en France, la télémécanique électrique lance la CN NUM 100 conçue à base de relais téléstatic.

1968 la CN adopte les circuits intégrés ; elle devient plus compacte et plus puissante. 1972 les minis calculateurs remplacent les logiques câblées ; la CN devient CNC.

1976 développements des CN à microprocesseurs.

1984 apparitions de fonctions graphiques évoluées et du mode de programmation conversationnel. 1986 les CN s'intègrent dans les réseaux de communication, début de l'ère de la fabrication flexible (CIM).

1990 développements des CN à microprocesseurs 32 bits.[7]

II.3 Définition de La commande numérique:

La commande numérique (CN) est une méthode qui utilise des codes alphanumériques pour représenter les instructions géométriques et technologiques nécessaires à la conduite d'une machine ou d'un processus. Elle permet l'automatisation des fonctions des machines avec une grande adaptabilité à différents travaux, ce qui en fait un exemple remarquable de l'intégration du traitement de l'information dans les activités de production.

En exploitant au maximum les possibilités offertes par la micro-informatique, toutes les données sont traitées en temps réel, c'est-à-dire au moment de leur génération, de manière à ce que les résultats du traitement contribuent également à piloter le processus.

Après l'apparition des premières générations de CN à logique câblée, les commandes numériques par ordinateur (CNC) ou par ordinateur ont fait leur entrée. Elles intègrent un ou plusieurs ordinateurs spécifiques pour réaliser tout ou partie des fonctions de commande.

Étant donné que tous les systèmes de CN actuellement commercialisés contiennent au moins un microprocesseur, les termes CN et CNC peuvent être considérés comme des synonymes. Pour des raisons de simplicité, le terme CN sera utilisé exclusivement tout au long de cet article.

- Une table support pièce, mobile selon 2 ou 3 axes, équipée de système de commande à vis

etécrou à bille.

- Des moteurs chargés de l'entraînement de la table.
- Un élément de mesure ou capteur de position renseignant à tout moment sur la position du mobile sur chaque axe.
- Une dynamo tachymétrique assurant la mesure de la vitesse de rotation.

II.4.2 Partie commande :

Différente d'une machine conventionnelle et constituée d'une armoire dans laquelle on trouve :

- Le pupitre permettant de rentrer les commandes à l'aide d'un clavier.
- Le lecteur de données (ce lecteur peut être une option lors de l'achat de la machine)
- La sortie RS 232 pour les liaisons avec les Périphériques externes.
- L'écran de visualisation de toutes les données enregistrées.
- Le calculateur.
- Les cartes électroniques (commandes d'axes, mémoire ...).

La partie commande est alimentée par un courant faible et ne peut donc pas alimenter directement les moteurs de la machine (voir schémas ci-dessous).

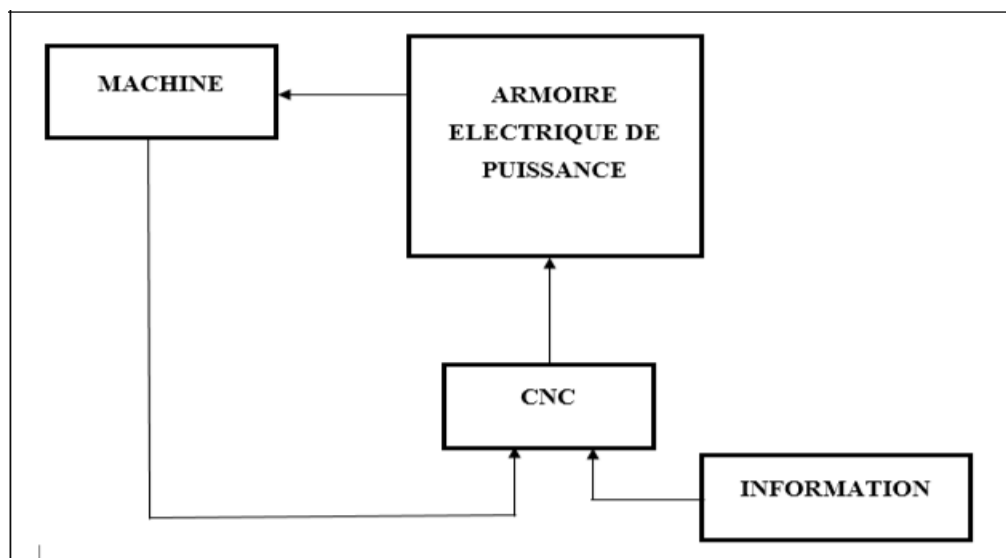


Figure II.2 : Fonction originale d'une commande numérique. [7]

II.5 Domaine d'utilisation :

Les Machines CNC conviennent à la fabrication en petites et moyennes séries renouvelables.

Elles permettent la réalisation, sans démontage, de pièces complexes comportant beaucoup d'opérations d'usinage

Elles se situent entre les machines conventionnelles très "flexibles" réservées aux travaux unitaires (prototypes, maintenance) et les machines transferts, très productives, réservées aux grandes séries.

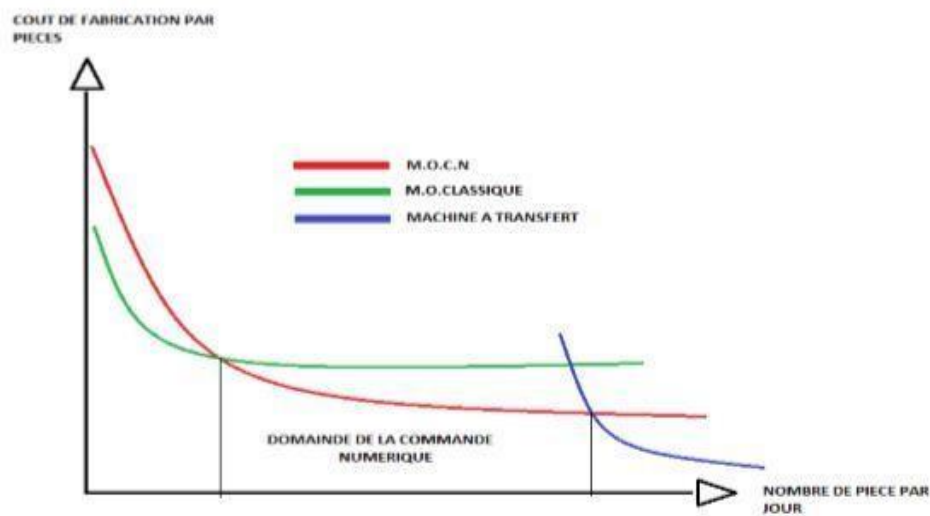


Figure II.3 : Domaine d'utilisation des M.O.C

II.6 Principe de fonctionnement :

La machine CNC travaille avec des systèmes de contrôles en boucle fermée. Des ordres vont être générés vers la commande par le biais d'un programme pièce ou par action manuelle de l'opérateur.

La commande va traiter ces informations et générer des consignes afin d'obtenir les déplacements voulus par le biais des moteurs d'axes. Des contrôles de vitesse et de position seront alors effectués de manière continue par la machine.

La position sera réglée par la commande numérique alors que la vitesse sera le plus souvent réglée par le système d'asservissement moteur. On se trouve donc en face d'un système à deux boucles et l'on parle de système asservi.

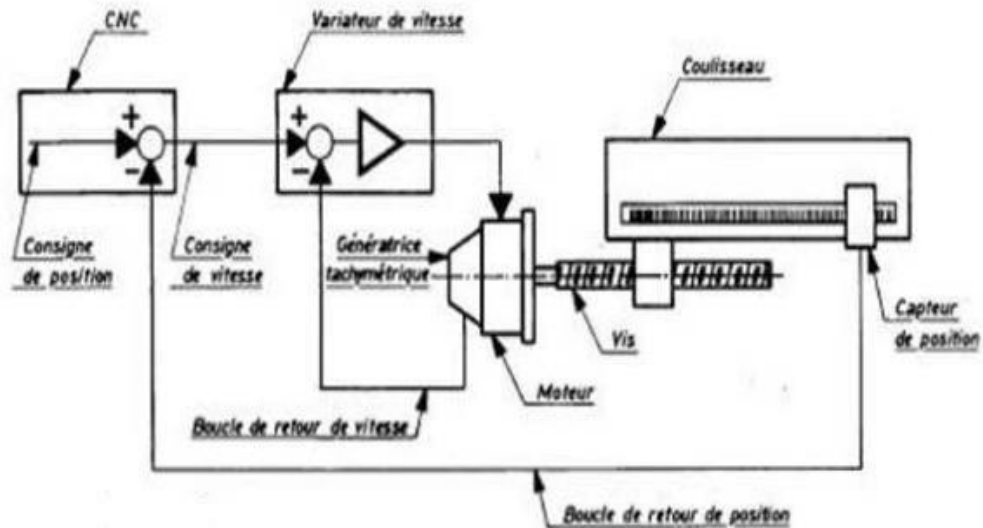


Figure II.4 : Asservissement de la machine

Le schéma ci-dessous, nous montre le flux d'informations avec ses directions, ainsi que les deux boucles de contrôles (position et vitesse).

II.7 Les différents types de Machines CNC : On distingue plusieurs types de machines

- Les machines à enlèvement de copeaux : les perceuses, les tours, les centres de tournages,
- Les fraiseuses, les centres d'usinage, les rectifieusesetc.
- Les électroérosions : les machines à enfonçages, les machines à fil.
- Les machines de découpes : oxycoupage, laser, jet d'eau...
- Les presses : métal, injection plastique.
- Les machines spéciales: à panneaux, à têtes multiples, de conditionnement (pour l'agroalimentaire)... [9]

II.8 Classification des machines CNC :

Les machines-outils à commande numérique par calculateurs (CNC) sont classées suivant :

- Le mode de fonctionnement de la machine.
- Le mode d'usage.

II.8 .1 Classification des CNC selon le mode de fonctionnement :

a. Fonctionnement en boucle ouvert :

En boucle ouverte, comme l'illustre la figure., le système assure le déplacement du chariot mais ne le contrôle pas.

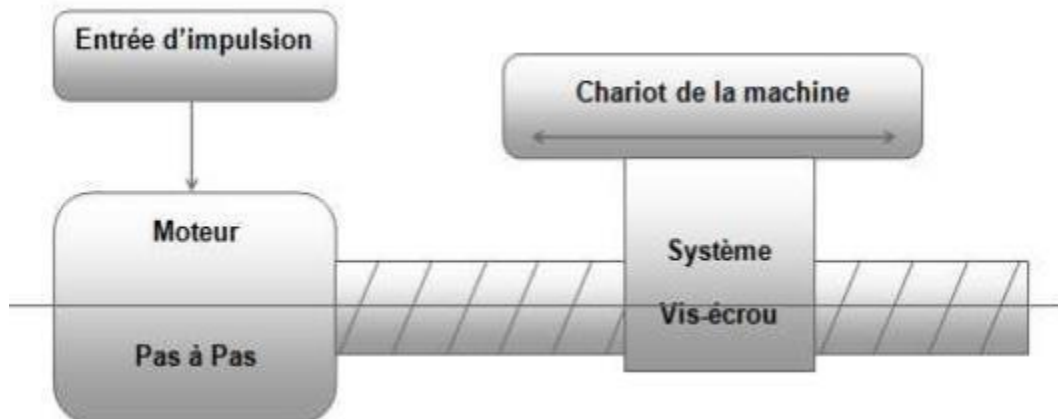


Figure II.5 : Fonctionnement en boucle ouvert [11]

b. fonctionnement avec commande adaptative:

La commande adaptative réalise d'une façon continue et automatique l'adaptation des conditions de coupe.

Des capteurs relèvent les valeurs de couple de la broche, l'amplitude de vibration de la broche, la température au point de coupe.

Ces informations sont transmises à une unité spéciale qui les envoie vers le directeur de commande numérique qui agit selon l'analyse des informations sur les conditions de coupe pour permettre une meilleure qualité de travail, une meilleure productivité et une plus grande sécurité.

La figure, illustre le fonctionnement de la commande adaptative.

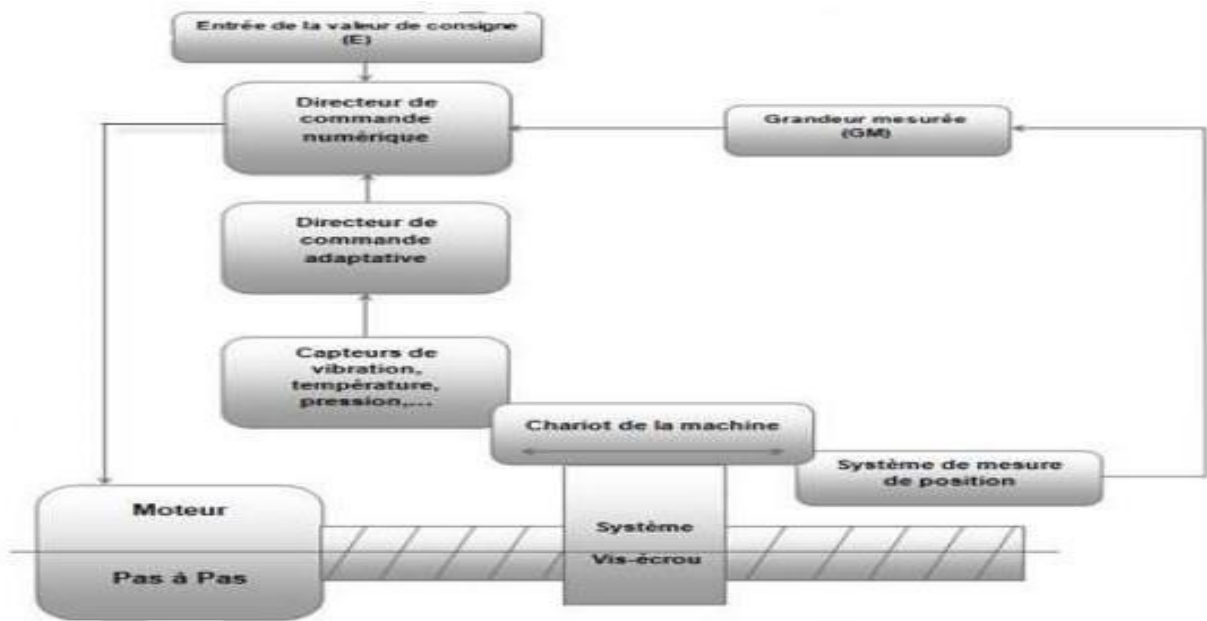


Figure II.6 : Commande adaptative. [11]

c. Fonctionnement en boucle fermé :

En boucle fermée le système contrôle le déplacement ou la position jusqu'à égalité des grandeurs entrée (E) dans le programme et celui mesuré (Gm).comme illustre la figure

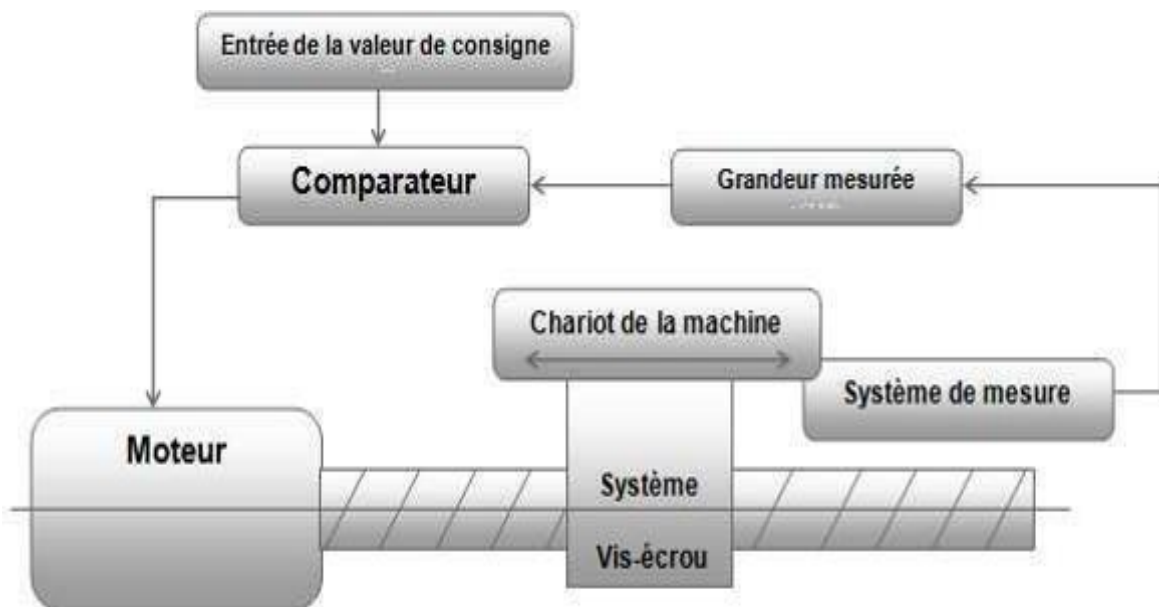


Figure II.7 : Commande en boucle fermée[11]

II.8.2 Classification des CNC selon le mode d'usage :

Selon le mode d'usinage on peut classer les CNC en trois catégories :

- Commande numérique point à point.
- Commande numérique par axiale.
- Commande numérique de contournage.

a) Commande numérique point à point : c'est la mise en position de l'outil ou de la pièce Par déplacements non synchronisés. Le mouvement de coupe (usinage) n'est possible que lorsque le mouvement de positionnement est effectué.

Exemples d'opération d'usinage : perçage, alésage, lamage taraudage, petit fraisage.

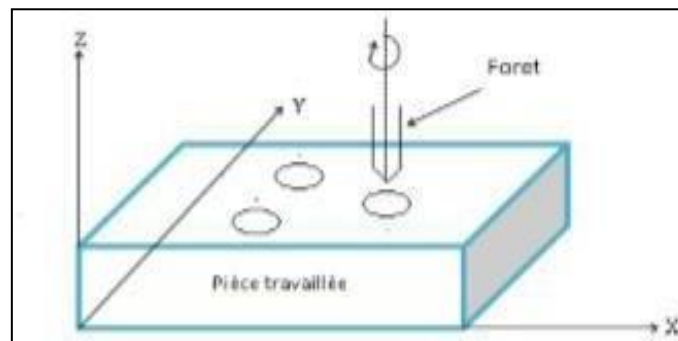


Figure II.8: Commande Numérique Point A Point. [12]

b) Commande numérique par axiale : ce sont des déplacements parallèles aux axes avec les vitesses d'avance programmée. Le mouvement de coupe et de positionnement sont synchronisés de façon à avoir un usinage selon des trajectoires parallèles aux axes de déplacement.

Exemples d'opération d'usinage : tournage, fraisage, alésage.

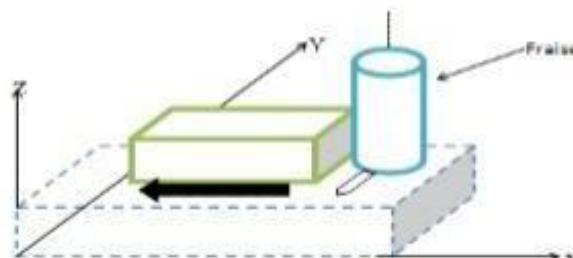


Figure II.9: Commande Par axiale. [12]

a) **Commande numérique de contournage** : ce sont des déplacements qui synchronise des divers axes avec la vitesse d'avancement programmée. Les trajectoires sont décomposées en éléments de droites ou de cercles dans un ou plusieurs plans.

- Exemples d'opération d'usinage : toute opération possible sur un centre de tournage ou centre d'usinage Fraiseuse. [4]

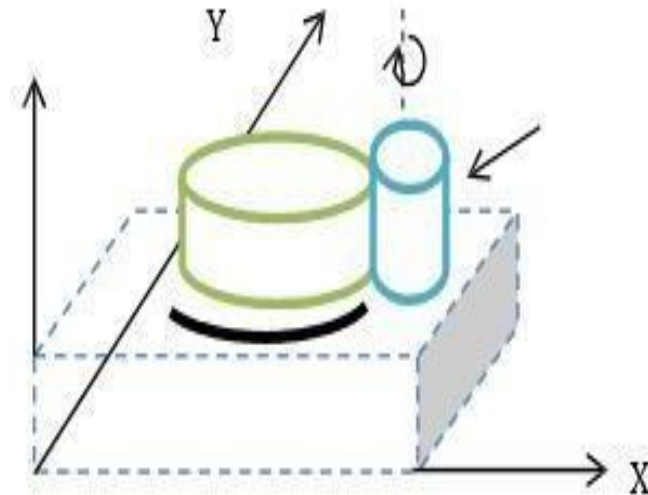


Figure II.10 : Commande numérique de contournage. [12]

II.9 La structure d'une machine CNC :

Ce système peut être divisé en trois parties. Le système mécanique qui reçoit des signaux de commande nécessaires du système électronique qui aboutit finalement à l'actionnement souhaité des moteurs. Le système électronique obtient une commande ou un ensemble de commandes système logiciel et génère des commandes pour le système mécanique.

II.9.1 Le système électronique :

Le système électronique est responsable de la génération du signal de commande pour les moteurs qui guide le mouvement de la trajectoire de l'outil dans chaque direction ou axe.

Le système électronique est composé :

- L'alimentation
- La carte microcontrôleur
- La carte de commande des moteurs pas à pas

II.9 .2 Le système mécanique :

Le système mécanique est assemblé de telle manière que le mouvement des 3 axes soit réalisé en utilisant des rails linéaires assemblés avec des roulements linéaires, les moteurs sont montés chacun à l'axe qui est source de mouvement agi en fonction du signal de commande généré à partir du circuit électronique.

Chaque moteur est relié à une vis sans fin de chaque axe qui est chargé de transformer le mouvement du moteur de rotation en mouvement linéaire.

Le mouvement contrôlé de chaque axe est obtenu directement par la commande de la rotation du moteur. La vitesse du mouvement de chaque axe peut également être contrôlée par le contrôle direct de la vitesse du moteur, en donnant des signaux de commande nécessaires. Ainsi, la trajectoire de l'outil fixée à l'organe terminal est contrôlée dans chaque axe pour une action sur la pièce à usiner.

Pour éviter que les axes sortent de la plage de fonctionnement, on utilise des fins de course pour chaque axe. Une commande manuelle de bouton d'arrêt d'urgence peut également être utilisée pour la machine.

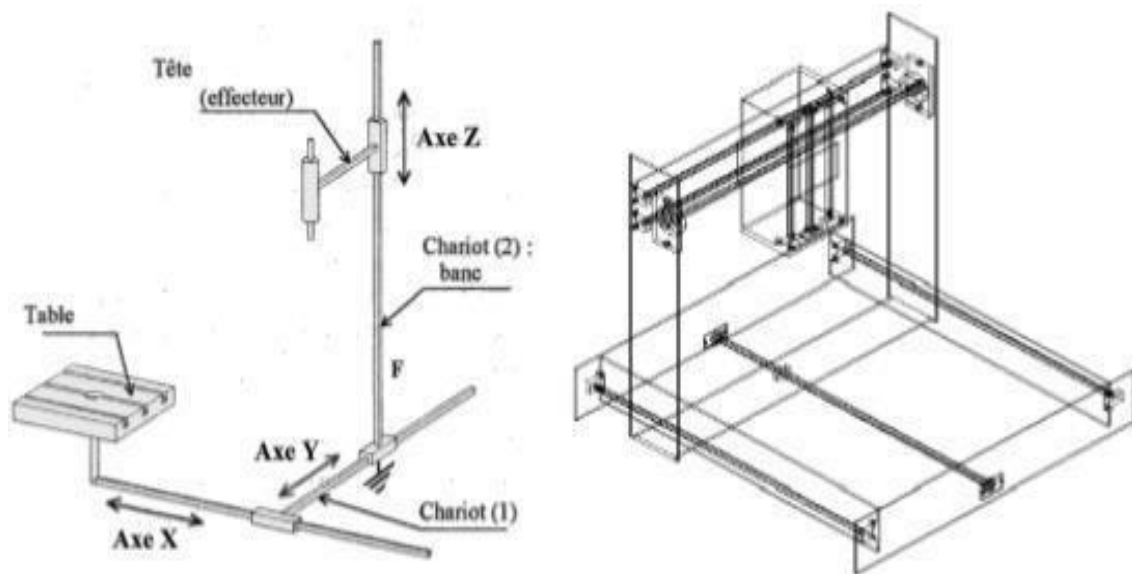


Figure II.11 : Structure mécanique d'une machine CNC. [12]

II.9.3 Le système de programmation :

La pièce à usiner sera conçu dans une conception assistée par ordinateur (CAO), dont la sortie est un dessin dans un des nombreux formats acceptables, le format le plus préférable est le format .stl.

Ce dessin est ensuite introduit dans le logiciel de fabrication assistée par ordinateur (FAO), dont la sortie est le code lisible par une machine utilisée pour la commande numérique de la machine.

Depuis la mise en œuvre du G code, il est nécessaire de tester de différents choix pour un interprète open source G code pour l'Arduino, de sorte que les mouvements corrects seront obtenus par les axes de la machine par l'intermédiaire du pilote de moteur. [10]

II.10 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons examiné de manière générale une machine à commande numérique par ordinateur et souligné l'importance de chaque composant qui la constitue. Nous avons mentionné les commandes les plus couramment utilisées et abordé la classification des machines CNC.

Maintenant, nous sommes prêts à passer à la prochaine étape

CHAPITRE III

GÉNÉRATION

D'UN

G-CODE

III. Introduction :

Dans ce chapitre, nous aborderons en détail le processus de génération d'un G-Code, qui est essentiel pour contrôler les mouvements de l'extrudeur et autres paramètres lors de l'impression 3D. La qualité et la précision du G-Code généré ont un impact direct sur la qualité de l'objet imprimé. Notre objectif est d'explorer les différentes étapes de ce processus, en mettant l'accent sur les aspects clés et les bonnes pratiques pour obtenir des résultats optimaux.

Nous commencerons par examiner la préparation du modèle 3D, qui constitue la première étape avant la génération du G-Code. Cette étape comprend la modélisation ou l'importation d'un modèle 3D dans un logiciel de découpage (slicing software). Nous aborderons les considérations importantes telles que la réparation du modèle, l'optimisation de la géométrie et la découpe en tranches (slicing) pour obtenir une représentation précise du modèle.

Ensuite, nous nous pencherons sur la configuration des paramètres d'impression dans le logiciel de découpage. Ces paramètres comprennent des aspects tels que la vitesse d'extrusion, la température de la buse, la densité de remplissage, la hauteur de couche, etc. Nous discuterons des principaux paramètres et de leur impact sur la qualité, la résolution et les détails de l'objet imprimé.

Une fois les paramètres configurés, nous entrerons dans la partie centrale de ce chapitre : la traduction des paramètres en instructions G-Code. Nous explorerons la structure et la syntaxe du G-Code, en soulignant les principales commandes utilisées pour contrôler le mouvement de l'extrudeur, la rétraction du filament, la position du plateau chauffant, etc. Nous aborderons également les considérations spécifiques à chaque type d'imprimante 3D, car les commandes G-Code peuvent varier d'un modèle à l'autre.

Outre la génération basique du G-Code, nous discuterons également des méthodes d'optimisation avancées. Cela inclut l'optimisation de la trajectoire d'impression pour réduire le temps d'impression, l'ajustement des paramètres pour améliorer la résistance et la solidité de l'objet, ainsi que l'utilisation de supports pour les parties en porte-à-faux ou complexes.

III. 1 Génération d'un G code avec MATLAB pour l'impression 3d :

III. 1 .1 MATLAB : est un environnement de développement de logiciels scientifiques qui permet de manipuler des données, de résoudre des problèmes mathématiques et de générer du code pour diverses applications, y compris l'impression 3D. Dans cette partie, nous allons expliquer comment générer du code G pour l'impression 3D à l'aide de MATLAB.

1. Importation du modèle 3D :

La première étape consiste à importer le modèle 3D dans MATLAB. Il existe plusieurs formats de fichiers 3D couramment utilisés tels que STL, OBJ ou AMF. MATLAB prend en charge plusieurs de ces formats et permet d'importer des fichiers 3D à l'aide de la fonction "stlread" pour les fichiers STL ou "importGeometry" pour les fichiers OBJ.

2. Configuration des paramètres d'impression :

La deuxième étape consiste à configurer les paramètres d'impression pour le modèle 3D. Ces paramètres comprennent des informations sur le matériau utilisé, la vitesse d'impression, la température de la buse, la hauteur de la couche et la densité de remplissage. Les paramètres peuvent être configurés à l'aide de MATLAB en définissant les variables correspondantes.

3. Génération du code G :

La troisième étape consiste à générer le code G à partir du modèle 3D et des paramètres d'impression configurés. Cette étape peut être réalisée en utilisant une fonction MATLAB personnalisée qui lit le modèle 3D et les paramètres d'impression et génère automatiquement le code G correspondant. Le code G généré peut être sauvegardé dans un fichier texte ou envoyé directement à l'imprimante 3D.

La génération de code G pour l'impression 3D avec MATLAB est un processus relativement simple qui peut être réalisé en quelques étapes. MATLAB offre une grande flexibilité pour la manipulation de données et la génération de code, ce qui permet de personnaliser les paramètres d'impression et d'obtenir un code G précis pour l'impression 3D.

III. 1 .2 Les étapes générales de génération d'un code G pour l'impression 3D avec Matlab :

- 1. Création d'un modèle 3D :** Utilisez Matlab pour créer un modèle 3D de l'objet que vous souhaitez imprimer.
- 2. Génération d'une trajectoire d'impression :** Utilisez un algorithme de trajectoire approprié, tel que l'algorithme de remplissage en nid d'abeille, pour générer une trajectoire d'impression pour l'objet.
- 3. Conversion de la trajectoire en coordonnées XYZ :** Convertissez la trajectoire d'impression en une série de coordonnées XYZ qui définissent le chemin que la buse doit suivre pour imprimer l'objet.
- 4. Application des paramètres d'impression :** Appliquez les paramètres d'impression appropriés, tels que la température de la buse, la vitesse d'impression et la hauteur de couche, aux coordonnées XYZ.
- 5. Génération du code G :** Générez un code G en utilisant les commandes appropriées pour déplacer la buse, extruder le filament, etc.
- 6. Enregistrement du code G :** Enregistrez le code G dans un fichier texte qui peut être téléchargé sur l'imprimante 3D.

Il est important de noter que les étapes spécifiques peuvent varier en fonction de la configuration de l'imprimante 3D et de préférences d'impression.

Il peut également être nécessaire de tester et d'ajuster le code G généré pour obtenir les meilleurs résultats d'impression.

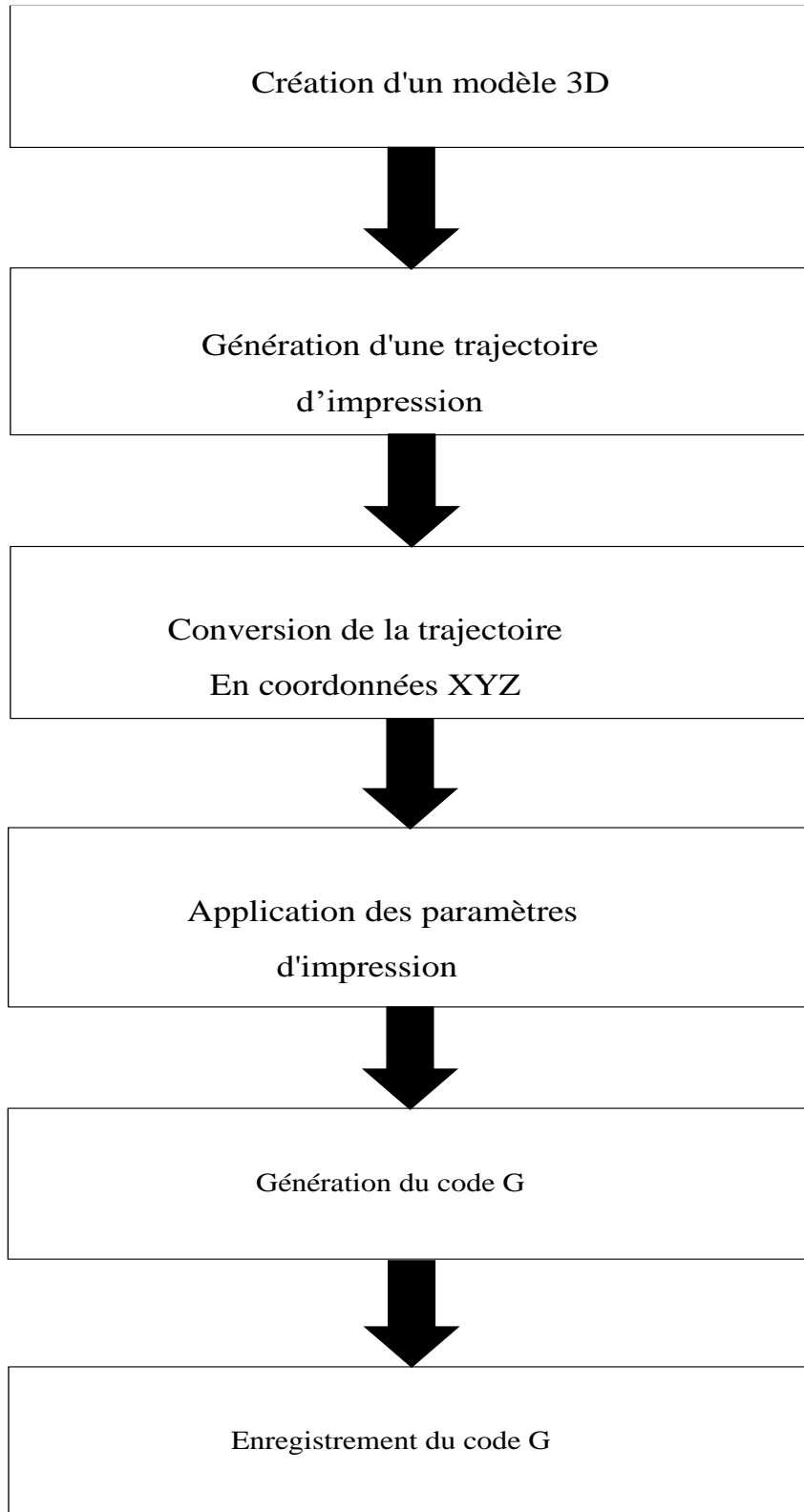


Figure III.1 : Schéma pour les étapes générales de génération d'un code G avec Matlab

III.1.3 Des exemples de code MATLAB qui importe un modèle 3D et génère du code G pour l'impression 3D :

❖ Programme Matlab pour créer et générés le code G d'une forme géométrique 2D d'un papillon (Butterfly)

```
% Définir les paramètres de la machine CNC
cutting_speed = 200; % vitesse de coupe en mm/min
feed_rate = 100; % vitesse d'avance en mm/min
tool_diameter = 6; % diamètre de l'outil en mm
depth_of_cut = 1; % profondeur de coupe en mm
% Créer un fichier G-code vide
fileID = fopen('programme_cnc.gcode','w');
% Importer les coordonnées de trajectoire 2D
data = xlsread('trajectoire.xlsx');
x = data(:,1); % coordonnées x de la trajectoire
y = data(:,2); % coordonnées y de la trajectoire
% Générer le code G correspondant
fprintf(fileID,'G21\n'); % unités métriques
fprintf(fileID,'G90\n'); % mode de positionnement absolu
fprintf(fileID,'S%d\n', cutting_speed); % vitesse de coupe
fprintf(fileID,'T1 M6\n'); % sélection de l'outil
fprintf(fileID,'G1 F%d\n', feed_rate); % vitesse d'avance
fprintf(fileID,'G1 Z%.2f\n', -depth_of_cut); % positionnement de l'outil
for i = 1:length(x)
    fprintf(fileID,'G1 X%.2f Y%.2f\n', x(i), y(i)); % déplacer l'outil
end
fprintf(fileID,'G1 Z0\n'); % remonter l'outil
fprintf(fileID,'M30\n'); % fin du programme
% Fermer le fichier G-code
fclose(fileID);
```

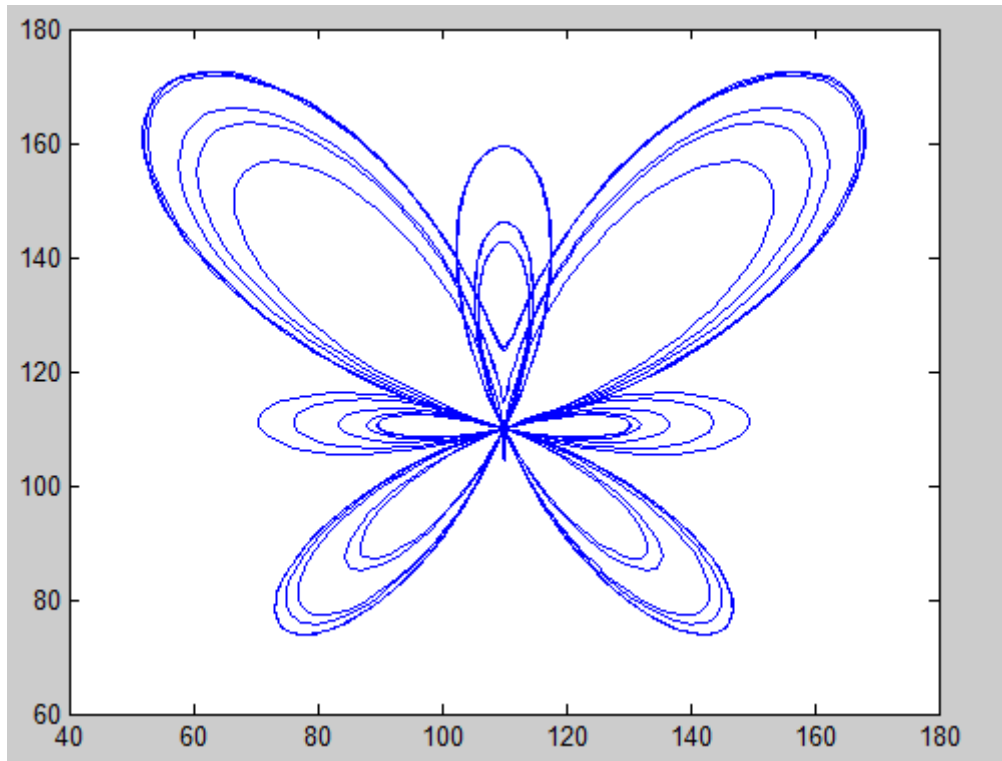


Figure III. : 2 Papillon (Butterfly)

❖ **Programme Matlab pour créer et générés le code G d'une forme géométrique 2D d'un cercle**

```
clear all
% Definition of the mathematical equation
r = 10; % Radius of the circle in mm
theta = linspace(0, 2*pi, 1000); % Angle from 0 to 2*pi
x = r*cos(theta); % x-coordinates of the circle
y = r*sin(theta); % y-coordinates of the circle
% Definition of the CNC machine parameters
feedrate = 100; % Feed rate in mm/min
spindle_speed = 500; % Spindle speed in RPM
z_height = 5; % Height of the workpiece in mm
% Display the curve
figure
plot(x,y)
% Generate the G-code commands
gcode = zeros(length(x), 2); % Initialize a matrix to store the G-code commands
gcode(1,:) = [x(1), y(1)]; % Set the starting point
for i = 2:length(x)
```

```

gcode(i,:) = [x(i), y(i)]; % Move the tool to the next point on the circle
end
% Save the G-code commands to a file
fid = fopen('circle.nc', 'wt'); % Open the file for writing in text mode
fprintf(fid, 'G90\n'); % Absolute positioning
fprintf(fid, 'G21\n'); % Metric units
fprintf(fid, 'G1 F%d\n', feedrate); % Feed rate
fprintf(fid, 'S%M3\n', spindle_speed); % Spindle speed
fprintf(fid, 'G0 Z%d\n', z_height); % Move to the workpiece height
fprintf(fid, 'G0 X%.6f Y%.6f\n', gcode(1,:)); % Move to the starting point
for i = 2:length(x)
fprintf(fid, 'G1 X%.6f Y%.6f\n', gcode(i,:)); % Move tool to the next point on circle
end
fprintf(fid, 'G0 Z%d\n', z_height); % Move back to the workpiece height
fprintf(fid, 'M2\n'); % End of program
fclose(fid); % Close the file
% Convert the circle.nc file to the required format
orig_file = fileread('circle.nc');
new_file = regexprep(orig_file, '(\\S)\\n', '$1\\r\\n');
fid = fopen('circle_modified.nc', 'wt');
fprintf(fid, '%s', new_file);
fclose(fid);

```

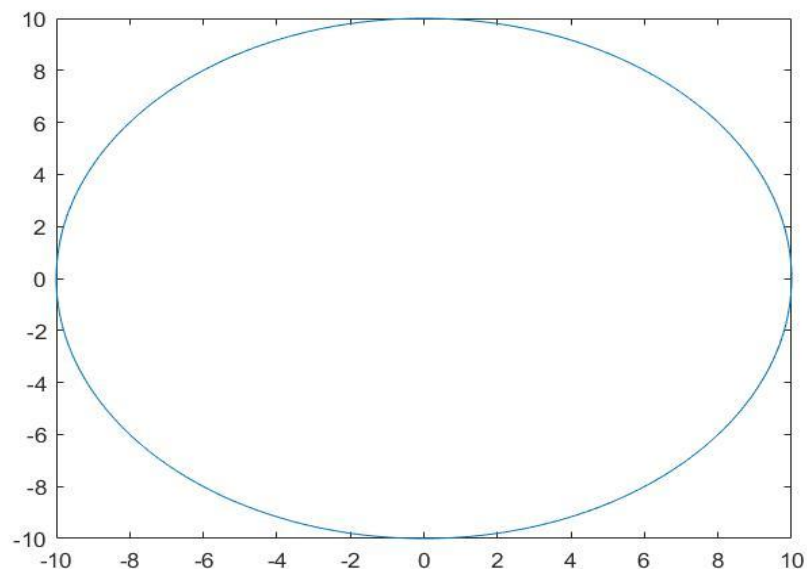


Figure III.3 : Cercle

III. 2. Conception et modélisation 3D :

III. 2 .1 Choix du logiciel de CAO

Le choix du logiciel de CAO pour la modélisation 3D dépend de plusieurs critères, tels que le niveau de compétence de l'utilisateur, la complexité du modèle, le domaine d'application, le coût et la compatibilité avec d'autres logiciels.

III. 2 .1.1 Des logiciels de CAO utilisé pour la modélisation 3D :

A. SolidWorks : est un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) utilisé principalement pour la conception de produits mécaniques. Il est développé par la société américaine Dassault Systèmes et est largement utilisé dans l'industrie pour la modélisation 3D, l'analyse de mouvement et la simulation de produits.

Les principales fonctionnalités de SolidWorks :

- 1. Modélisation 3D :** SolidWorks permet la création de modèles 3D détaillés, avec une modélisation paramétrique qui permet aux utilisateurs de modifier facilement les dimensions et les formes de leurs modèles.
 - 2. Conception de produits mécaniques :** SolidWorks est particulièrement adapté à la conception de produits mécaniques, avec des fonctionnalités pour la modélisation de pièces, l'assemblage de composants, la simulation de produits et l'analyse de mouvement.
 - 3. Collaboration et gestion de projet :** SolidWorks offre des fonctionnalités pour la collaboration, la gestion de projet et le partage de fichiers de conception, permettant aux équipes de travailler ensemble sur des projets de manière efficace.
 - 4. Fabrication assistée par ordinateur (FAO) :** Le logiciel offre des outils pour la fabrication assistée par ordinateur, tels que la programmation de machines CNC.
 - 5. Bibliothèques de composants :** SolidWorks comprend une bibliothèque de composants standard, permettant aux utilisateurs de sélectionner et de placer facilement des composants standard dans leurs modèles.
- B. Mastercam :** est un logiciel de FAO (Fabrication Assistée par Ordinateur) qui permet la programmation de machines CNC (Commande Numérique par Ordinateur) pour l'usinage de pièces et de composants. Il est largement utilisé dans l'industrie manufacturière pour la production de pièces de haute qualité.

III. 2 .1.2 Les principales fonctionnalités de Mastercam :

- 1. Programmation CNC :** Mastercam permet aux utilisateurs de programmer des machines CNC pour l'usinage de pièces complexes avec une grande précision.
- 2. Modélisation 3D :** Le logiciel offre des fonctionnalités de modélisation 3D avancées, permettant aux utilisateurs de créer des modèles 3D détaillés de leurs pièces et composants.
- 3. Simulation d'usinage :** Mastercam propose des outils pour la simulation d'usinage, permettant aux utilisateurs de vérifier et de valider leurs programmes de FAO avant l'usinage réel.
- 4. Bibliothèques d'outils :** Le logiciel comprend des bibliothèques d'outils standard, permettant aux utilisateurs de sélectionner facilement les outils appropriés pour chaque tâche.
- 5. Optimisation des processus d'usinage :** Mastercam offre des outils d'optimisation des processus d'usinage pour maximiser l'efficacité et la qualité de la production.

En résumé, Mastercam est un logiciel de FAO avancé utilisé dans l'industrie manufacturière pour la programmation de machines CNC et l'usinage de pièces complexes. Le logiciel offre des fonctionnalités avancées pour la modélisation 3D, la simulation d'usinage, l'optimisation des processus et la sélection d'outils.

III. 2 .2 La Conception d'un modèle 3D :

III. 2 .2.1 Piece I avec SolidWorks:

La modélisation d'un engrenage avec SolidWorks se fait généralement en plusieurs étapes :

- 1. Création d'un nouveau document :** Ouvrir SolidWorks et créer un nouveau document. Il est recommandé de choisir le système de mesure que vous souhaitez utiliser.
- 2. Création de l'esquisse :** Créer une nouvelle esquisse en cliquant sur le bouton "Esquisse" dans la barre d'outils. Choisir le plan de travail approprié pour la modélisation de l'engrenage.
- 3. Ajout du cercle de base :** Ajouter un cercle de base à l'esquisse. La taille de ce cercle doit correspondre au diamètre primitif de l'engrenage.
- 4. Création de l'extrusion :** Extruder la denture le long de l'axe de l'engrenage. Utiliser l'outil "Extrusion" pour cela. Assurez-vous que la hauteur de l'extrusion correspond à la hauteur de l'engrenage.

5. Ajout de dents : Utiliser l'outil "Ébauche de denture" pour dessiner les dents de l'engrenage. L'outil est accessible dans l'onglet "Fonctionnalités" de la barre d'outils.

6. Ajout des autres caractéristiques : Ajouter d'autres caractéristiques à l'engrenage, telles que les rayons de raccordement, les chanfreins et les trous de fixation.

7. Vérification de la modélisation : Vérifier la modélisation pour s'assurer que l'engrenage a été correctement créé. Utiliser les outils de mesure pour mesurer les dimensions et vérifier qu'elles sont conformes aux spécifications.

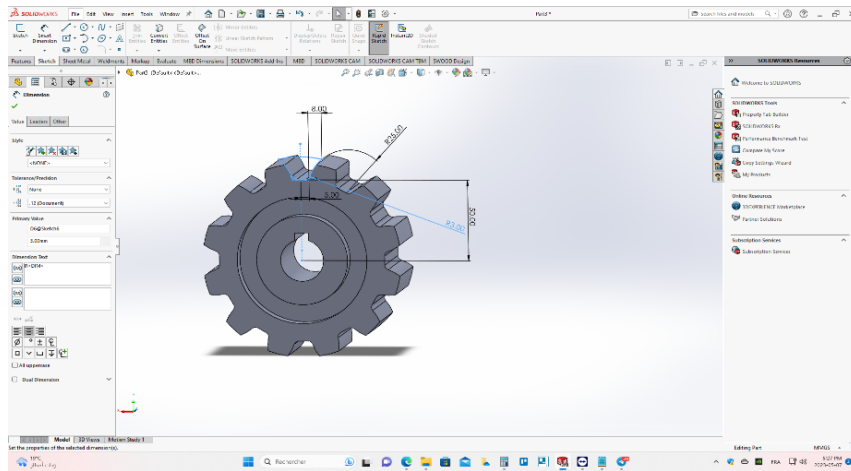


Figure III. 4 : Vérification de la modélisation

III. 2 .3 Exportation du modèle en fichier STL

Une fois que la modélisation de l'engrenage est terminée, il est possible de l'exporter sous différents formats de fichiers, tels que STL ou IGES, pour une utilisation ultérieure. Il est également possible de générer le G-Code nécessaire à l'impression 3D de l'engrenage en utilisant un logiciel de découpe 3D comme Cura ou Simplify3D.

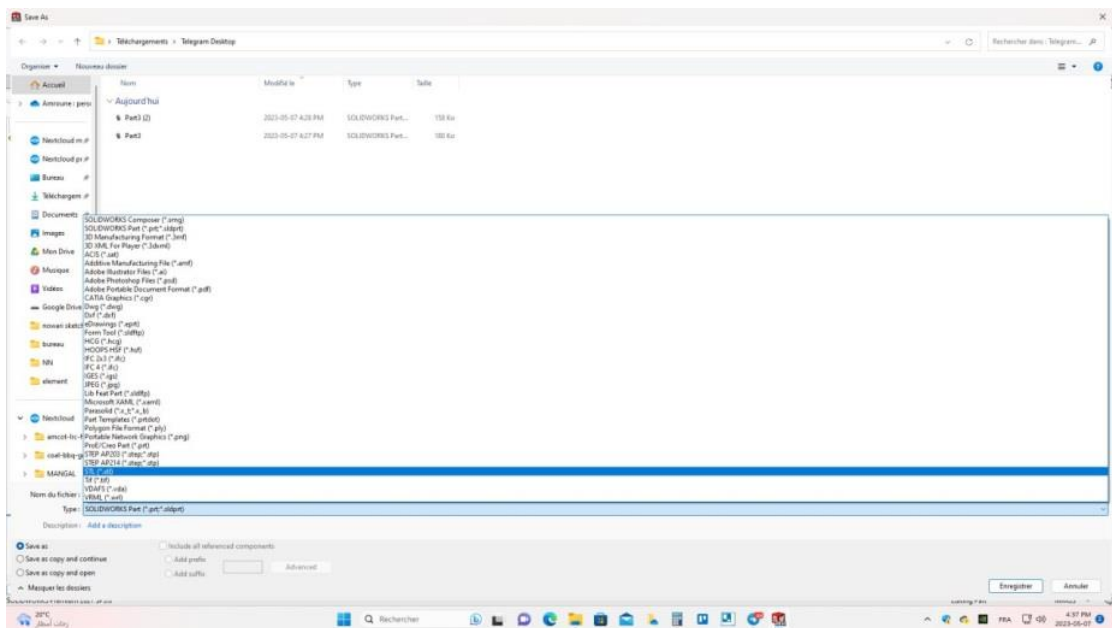


Figure III. 5 :Exportation du modèle en fichier STL

III. 2 .2.2 Piece II avec Mastercam :**Les étapes générales pour modéliser un engrenage avec Mastercam :**

- 1. Créer un nouveau fichier de projet :** Ouvrez Mastercam et créez un nouveau fichier de projet.
- 2. Ajouter un plan de travail :** Dans le menu principal, allez dans "Plan de travail" et sélectionnez "Plan de travail 2D". Ajoutez ensuite un plan de travail.
- 3. Dessiner le profil de l'engrenage :** Utilisez les outils de dessin de Mastercam pour dessiner le profil de l'engrenage sur le plan de travail.
- 4. Créer un contour d'engrenage :** Sélectionnez l'outil "Contour" dans la barre d'outils et choisissez "Contour d'engrenage" dans le menu déroulant. Entrez les paramètres nécessaires pour définir l'engrenage, comme le nombre de dents, le diamètre, etc.

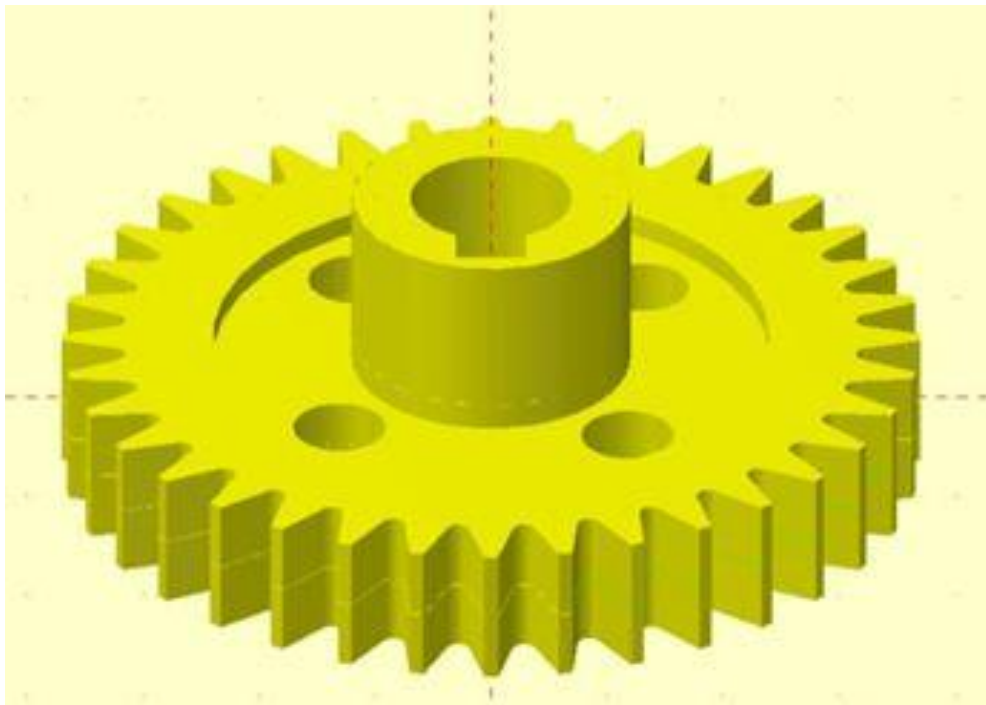


Figure III.6 : Créer un contour d'engrenage

- 5. Ajouter des opérations de fraisage :** Ajoutez des opérations de fraisage pour tailler l'engrenage. Utilisez les outils de Mastercam pour créer les trajectoires de fraisage nécessaires pour tailler les dents de l'engrenage.

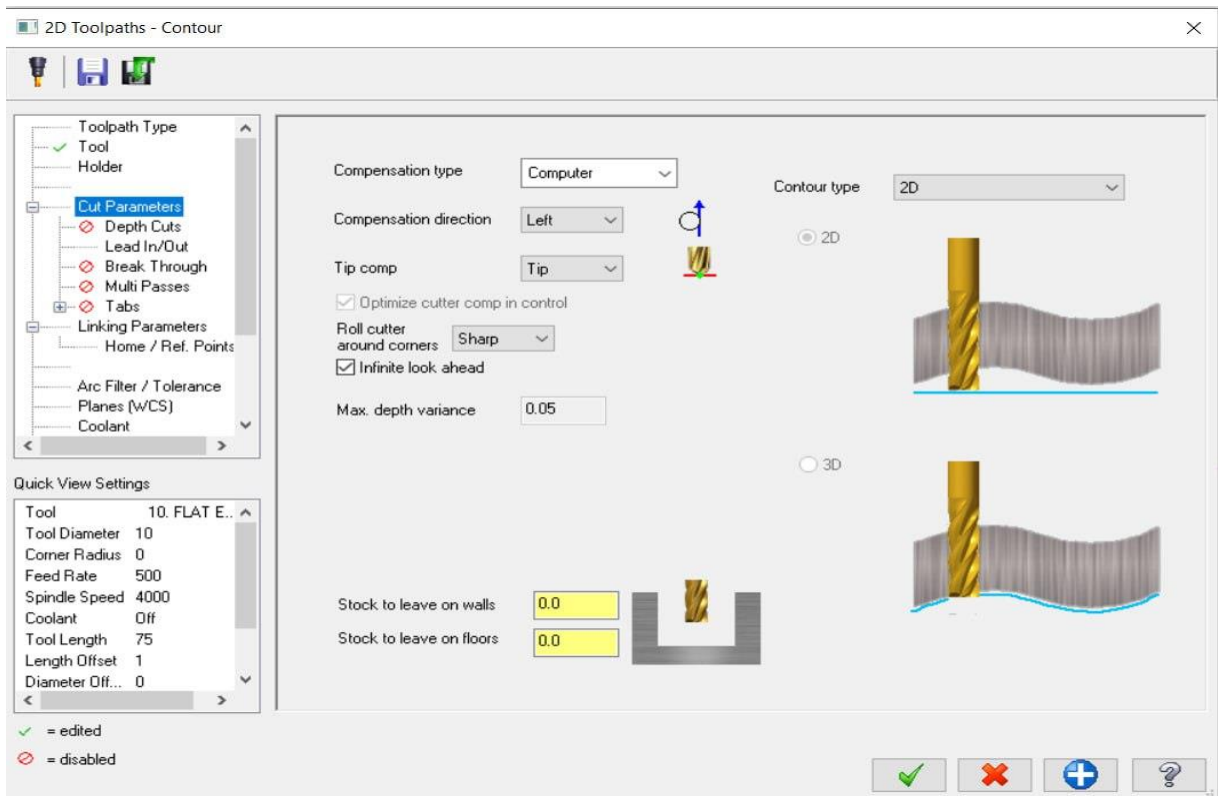
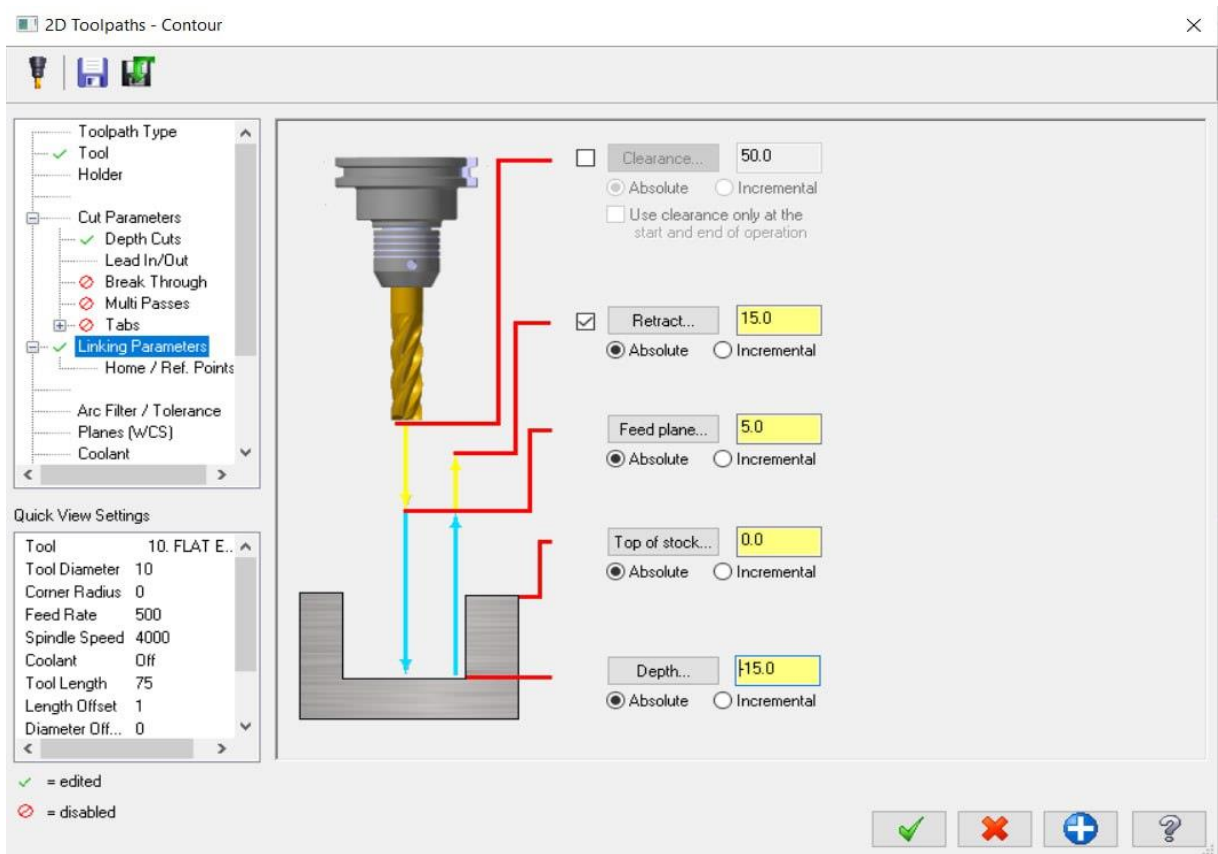


Figure III. 7 :Ajouter des opérations de fraisage

6. Générer le G-code : Une fois que toutes les opérations de fraisage sont définies, générez le G-code en sélectionnant "Post-processus" dans le menu principal. Choisissez-le post-processeur approprié pour votre machine CNC et enregistrez le fichier G-code.

```

O0000 (ENGRENAGE311)
( DATE=00-00-YY - 18-04-23 TIME=HH:MM - 20:28)
(MCX FILE - C:\USERS\NASSER\DESKTOP\MASTERCAM\ENGRENAGE311.MCX-S)
( NC FILE - C:\USERS\NASSER\DOCUMENTS\MY MCAMXS\MILL\NC\ENGRENAGE311.NC)
( MATERIAL - ALUMINIUM M6 - 2024)
( T217 | 8.0 FLAT ENDMILL | H217 )
( T1 | 8.0 CENTER DRILL | H1 )
( T110 | 10. DRILL | H110 )
N100 G21
N102 GO G17 G40 G49 G80 G90
N104 T217 M6
N106 GO G90 G54 X-16.245 Y-1.421 A0. S2387 M3
N108 G43 H217 Z28.
N110 Z13.
N112 G1 Z.1 F238.7
N114 X-18.48 Y-2.463 F477.4
N116 G3 X-18.77 Y-2.917 I.211 J-.454
N118 G1 X-18.768 Y-2.995
N120 G3 X-18.658 Y-3.602 I18.762 J2.995
N122 X-18.208 Y-4.006 I.491 J.054
N124 G1 X-15.751 Y-4.221
N126 X-17.771 Y-5.635
N128 G3 X-17.985 Y-6.045 I.286 J-.41
N130 X-17.957 Y-6.208 I.5 J0.
N132 X-17.746 Y-6.787 I17.957 J6.208
N134 X-17.279 Y-7.108 I.467 J.179
N136 X-17.236 Y-7.107 I0. J.5
N138 G1 X-14.779 Y-6.892
N140 X-16.523 Y-5.635
N142 G3 X-16.47 Y-8.989 I.354 J-.354
N144 X-16.406 Y-9.232 I.501 J0.
N146 X-16.298 Y-9.766 I16.406 J9.232
N148 X-15.869 Y-10.009 I.429 J.257
N150 X-15.74 Y-9.992 I0. J.5
N152 G1 X-13.358 Y-9.353
N154 X-14.772 Y-11.373
N156 G3 X-14.863 Y-11.66 I.409 J-.287
N158 X-14.751 Y-11.675 I.5 J0.
    
```

Figure III.8 :La partie de démarrage du fichier G-code

```

N4914 X-18.768 Y2.917 I.493 J-.078
N4916 X-18.48 Y2.463 I.499 J0.
N4918 G1 X-16.245 Y1.421
N4920 X-18.627 Y.783
N4922 G3 X-18.998 Y.308 I.125 J-.483
N4924 X-19. Y0. I18.998 J-.308
N4926 X-18.998 Y-.308 I19. J0.
N4928 X-18.627 Y-.783 I.5 J.008
N4930 G1 X-16.245 Y-1.421
N4932 GO Z28.
N4934 M5
N4936 G91 G28 Z0.
N4938 A0.
N4940 M01
N4942 T1 M6
N4944 GO G90 G54 X-5.888 Y6.54 A0. S1145 M3
N4946 G43 H1 Z28.
N4948 G59 G81 Z-3. R28. F57.3
N4950 X0. Y0.
N4952 X5.888 Y-6.54
N4954 G80
N4956 M5
N4958 G91 G28 Z0.
N4960 A0.
N4962 M01
N4964 T110 M6
N4966 GO G90 G54 X-5.888 Y6.54 A0. S1145 M3
N4968 G43 H110 Z28.
N4970 G59 G83 Z-29.004 R28. Q5. F137.4
N4972 X0. Y0.
N4974 X5.888 Y-6.54
N4976 G80
N4978 M5
N4980 G91 G28 Z0.
N4982 G28 X0. Y0. A0.
N4984 M30
    
```

Figure III.9 : La partie de fin du fichier G-code

Il est important de noter que les étapes précises pour modéliser un engrenage avec Mastercam peuvent varier en fonction de la version de Mastercam utilisée et des préférences personnelles de l'utilisateur. Ces étapes générales doivent cependant vous donner une idée de la procédure générale

III.3 Conclusion :

En conclusion de ce chapitre, nous soulignerons l'importance de la génération précise d'un G-Code pour obtenir des impressions 3D de haute qualité. Nous mettrons en évidence les bonnes pratiques et les considérations clés à prendre en compte lors de la préparation du modèle 3D, de la configuration des paramètres d'impression et de la traduction des paramètres en instructions G-Code. La maîtrise de ce processus contribuera à maximiser la précision, la solidité et la qualité globale des objets imprimés en 3D.

CHAPITRE IV

**LA
PARTIE
EXPERIMENTALE**

IV.1 Préparation du modèle pour l'impression

Le logiciel de tranchage UltimakerCura

UltimakerCura est un logiciel de découpe 3D open source développé par Ultimaker. Il permet de transformer des fichiers de modèles 3D en instructions que l'imprimante 3D peut comprendre pour créer un objet physique.

IV.1.1 Importation du fichier STL dans le logiciel de tranchage

Importer le fichier de modèle 3D dans Ultimaker Cura en utilisant l'option "Importer" ou en faisant simplement glisser et déposer le fichier dans l'interface du logiciel.

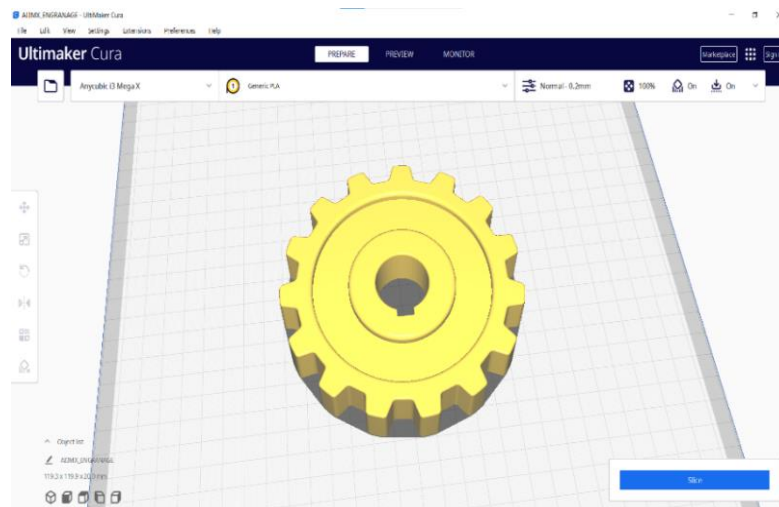


Figure IV.1 : Importation du fichier STL dans le logiciel de tranchage

IV.1.2 Réglage des paramètres d'impression

Configurer les paramètres de découpe en fonction de vos besoins, tels que la qualité d'impression, la densité de remplissage, la vitesse d'impression, etc.

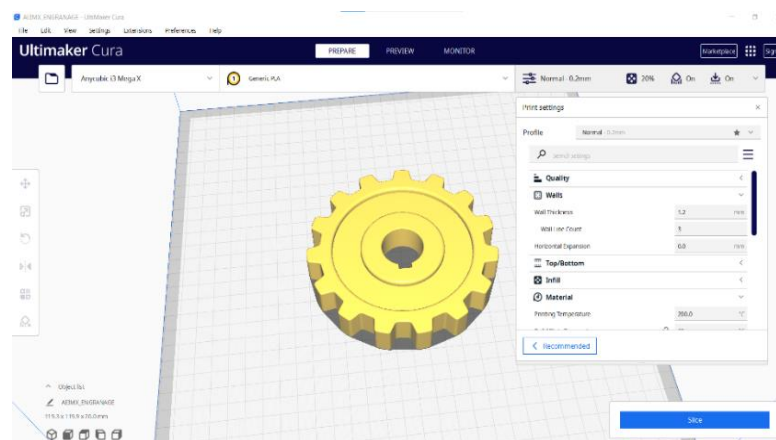


Figure IV.2 : Réglage des paramètres d'impression

IV.1.3 Génération du G-code :

Générer le code G-Code en appuyant sur le bouton "Découper" et en sélectionnant l'emplacement de sauvegarde du fichier G-Code

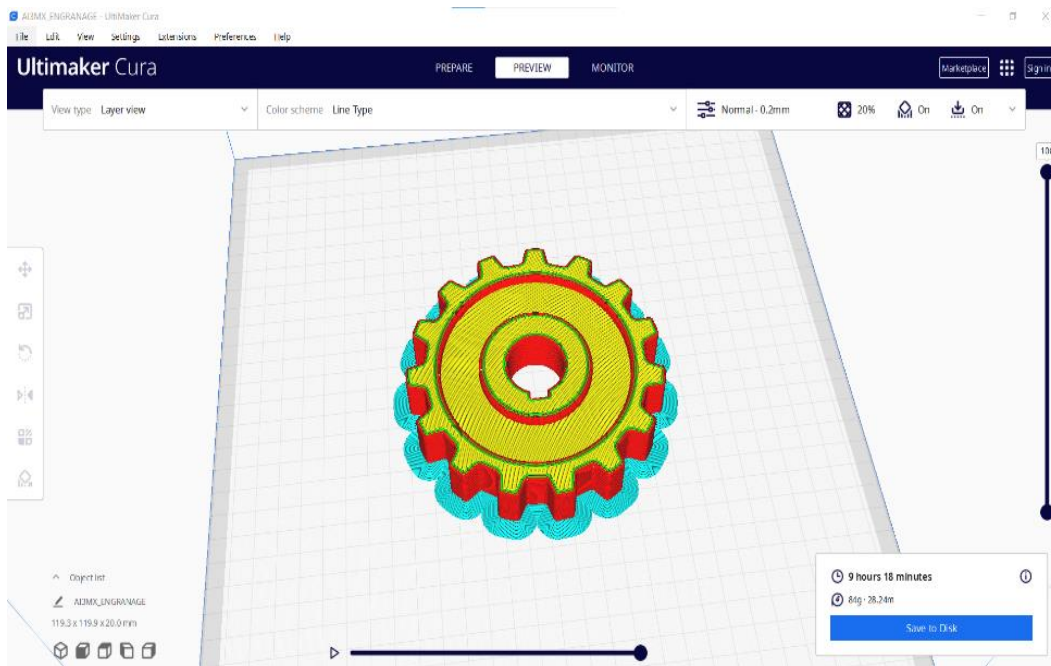


Figure IV.3 : Génération du G-code

Une fois le code G-Code généré, vous pouvez le transférer sur votre imprimante 3D et lancer l'impression. Ultimaker Cura est compatible avec une large gamme d'imprimantes 3D et offre des fonctionnalités avancées pour des projets plus complexes, comme la prise en charge de plusieurs extrudeurs pour l'impression en deux couleurs ou la création de supports pour les pièces en porte-à-faux.

IV. 2 Analyse et optimisation du G-code

IV. 2.1 Visualisation du G-code généré

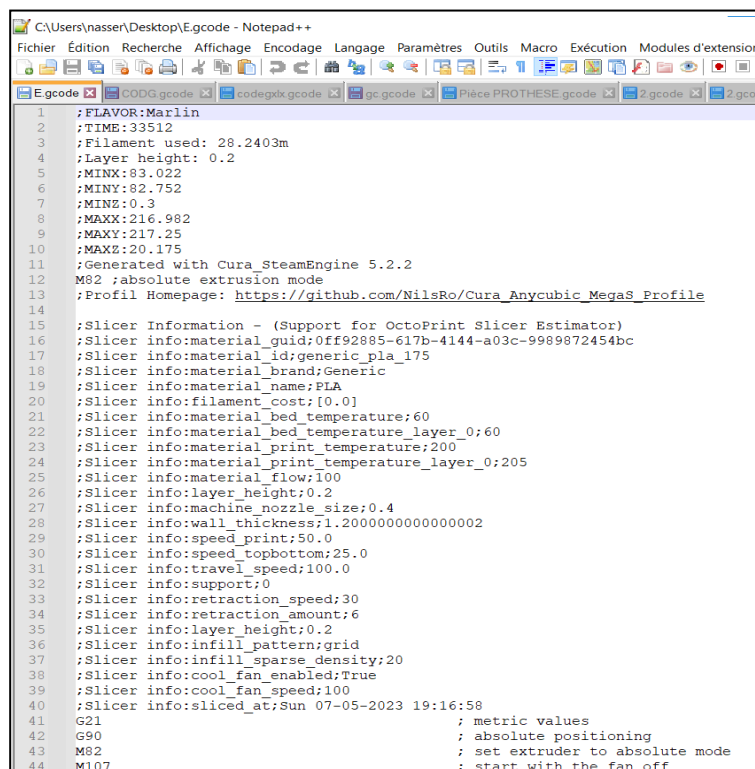
La visualisation du G-code généré est une étape importante pour s'assurer que le fichier est correct et qu'il ne contient pas d'erreurs avant l'impression. Il existe plusieurs outils de visualisation de G-code disponibles en ligne et en logiciel.

Ultimaker Cura, un logiciel de découpe 3D, propose également une fonction de visualisation de G-code. Il permet de prévisualiser le modèle imprimé couche par couche et de détecter les erreurs potentielles avant l'impression.

Dans l'ensemble, la visualisation du G-code généré est une étape importante pour s'assurer que le fichier est correct avant l'impression et peut aider à éviter les échecs d'impression.

IV. 2.1 .1 Génération du fichier G-code

Le résultat obtenu nous est présenté sous la forme du fichier G-code pour pouvoir guider notre imprimante 3D, ce fichier est composé de plusieurs instructions en commande numériques pour déplacer les buses de l'extruder et le dépôt de la matière en fusion



```
1 ;FLAVOR:Marlin
2 ;TIME:33512
3 ;Filament used: 28.2403m
4 ;Layer height: 0.2
5 ;MINX:83.022
6 ;MINY:82.752
7 ;MINE:0.3
8 ;MAXX:216.982
9 ;MAXY:217.25
10 ;MAXZ:20.175
11 ;Generated with Cura_SteamEngine 5.2.2
12 M82 ;absolute extrusion mode
13 ;Profil Homepage: https://github.com/NilsRo/Cura\_Ancubic\_MegaS\_Profile
14
15 ;Slicer Information - (Support for OctoPrint Slicer Estimator)
16 ;Slicer info:material_guid;0ff92885-617b-4144-a03c-9989872454bc
17 ;Slicer info:material_id;generic_pla_175
18 ;Slicer info:material_brand;Generic
19 ;Slicer info:material_name;PLA
20 ;Slicer info:filament_cost;[0.0]
21 ;Slicer info:material_bed_temperature;60
22 ;Slicer info:material_bed_temperature_layer_0;60
23 ;Slicer info:material_print_temperature;200
24 ;Slicer info:material_print_temperature_layer_0;205
25 ;Slicer info:material_flow;100
26 ;Slicer info:layer_height;0.2
27 ;Slicer info:machine_nozzle_size;0.4
28 ;Slicer info:wall_thickness;1.2000000000000002
29 ;Slicer info:speed_print;50.0
30 ;Slicer info:speed_topbottom;25.0
31 ;Slicer info:travel_speed;100.0
32 ;Slicer info:support;0
33 ;Slicer info:retraction_speed;30
34 ;Slicer info:retraction_amount;6
35 ;Slicer info:layer_height;0.2
36 ;Slicer info:infill_pattern;grid
37 ;Slicer info:infill_sparse_density;20
38 ;Slicer info:cool_fan_enabled;True
39 ;Slicer info:cool_fan_speed;100
40 ;Slicer info:sliced_at;Sun 07-05-2023 19:16:58
41 G21 ; metric values
42 G90 ; absolute positioning
43 M82 ; set extruder to absolute mode
44 M107 ; start with the fan off
```

Figure IV.4 : La partie de démarrage du fichier G-code

```

81854 M205 X10 Y10
81855 G1 F1800 E2786.62719
81856 G1 F480 Z6.375
81857 G0 F6000 X162.644 Y156.987 Z6.375
81858 M205 X8 Y8
81859 G1 F480 Z6.3
81860 G1 F1800 E2792.62719
81861 G1 F3000 X191.431 Y185.774 E2793.98124
81862 G1 X191.501 Y185.844
81863 M205 X10 Y10
81864 G0 F6000 X192.824 Y186.371
81865 M205 X8 Y8
81866 G1 F3000 X198.987 Y180.208 E2794.27113
81867 G1 X199.057 Y180.138
81868 M205 X10 Y10
81869 G1 F1800 E2788.27113
81870 G1 F480 Z6.375
81871 G0 F6000 X196.349 Y177.189 Z6.375
81872 M205 X8 Y8
81873 G1 F480 Z6.3
81874 G1 F1800 E2794.27113
81875 G1 F3000 X188.61 Y184.928 E2794.63515
81876 G1 X188.54 Y184.998
81877 M205 X10 Y10
81878 G1 F1800 E2788.63515
81879 G1 F480 Z6.375
81880 G0 F6000 X186.179 Y186.179 Z6.375
81881 M205 X8 Y8
81882 G1 F480 Z6.3
81883 G1 F1800 E2794.63515
81884 G1 F3000 X160.173 Y160.173 E2795.85839
81885 G1 X160.103 Y160.103
81886 M205 X10 Y10
81887 G1 F1800 E2789.85839
81888 G1 F480 Z6.375
81889 G0 F6000 X156.882 Y162.539 Z6.375
81890 M205 X8 Y8
81891 G1 F480 Z6.3
81892 G1 F1800 E2795.85839
81893 G1 F3000 X183.202 Y188.859 E2797.0964
81894 G1 X183.272 Y188.929
81895 M205 X10 Y10
81896 G1 F1800 E2791.0964
81897 G1 F480 Z6.375
    
```

Figure IV.5 :La partie au milieu du fichier G-code

```

286971 G0 F6000 X163.11 Y168.946 Z20.175
286972 M205 X8 Y8
286973 G1 F480 Z20.1
286974 G1 F1800 E3295.56719
286975 G1 F1500 X169.311 Y162.746 E3295.85884
286976 G1 X169.381 Y162.676
286977 M205 X10 Y10
286978 G1 F1800 E3289.85884
286979 G1 F480 Z20.175
286980 G0 F6000 X167.237 Y165.385 Z20.175
286981 M205 X8 Y8
286982 G1 F480 Z20.1
286983 G1 F1800 E3295.85884
286984 G1 F1500 X165.712 Y166.91 E3295.93057
286985 G1 X165.642 Y166.98
286986 ;TIME_ELAPSED:33512.123849
286987 G1 F1800 E3289.93057
286988 M205 X10 Y10
286989 M107
286990 M104 S0 ; Extruder off
286991 M140 S0 ; Heatbed off
286992 M107 ; Fan off
286993 G91 ; relative positioning
286994 G1 E-5 F300 ; retract a little
286995 G1 Z+10 E-5 ; X-20 Y-20 F(travel_xy_speed) ; lift print head
286996 G28 X0 Y0 ; homing
286997 G1 Y180 F2000 ; reset feedrate
286998 M84 ; disable stepper motors
286999 G90 ; absolute positioning
287000 M300 S440 P200 ; Make Print Completed Tones
287001 M300 S660 P250 ; beep
287002 M300 S880 P300 ; beep
287003 M82 ;absolute extrusion mode
287004 M104 S0
287005 ;End of Gcode
287006 ;SETTING 3 {"global_quality": "[general]\\nversion = 4\\nname = Normal #2\\ndefi
287007 ;SETTING 3 nition = anycubic_i3_mega_x\\n\\n[metadata]\\nntype = quality_changes\\
287008 ;SETTING 3 \nquality_type = normal\\nsetting_version = 20\\n\\n[values]\\nadhesi
287009 ;SETTING 3 on_type = brim\\nnsupport_enable = True\\n\\n", "extruder_quality": ["
287010 ;SETTING 3 [general]\\nversion = 4\\nname = Normal #2\\ndefinition = anycubic_i3
287011 ;SETTING 3 _mega_x\\n\\n[metadata]\\nntype = quality_changes\\nquality_type = nor
287012 ;SETTING 3 mal\\nsetting_version = 20\\n\\nposition = 0\\n\\n[values]\\nfill_spar
287013 ;SETTING 3 se_density = 20\\n\\n"}
287014
    
```

Figure IV.6 :La partie de fin du fichier G-code

IV. 2.1.2 Analyse des instructions et des paramètres

L'analyse des instructions et des paramètres du G-code est une étape cruciale pour optimiser le G-code et améliorer la qualité de l'impression 3D. Voici quelques-unes des instructions et des paramètres les plus courants qui doivent être pris en compte :

- 1. La vitesse d'impression :** la vitesse à laquelle l'extrudeuse déplace le filament est un paramètre important à prendre en compte pour optimiser la qualité de l'impression. Si la vitesse est trop élevée, cela peut entraîner des bavures et des déformations sur l'impression.
- 2. La température d'impression :** la température à laquelle le filament est extrudé est également un paramètre clé pour obtenir une bonne qualité d'impression. Si la température est trop basse, le filament peut ne pas adhérer correctement à la surface de l'impression, tandis qu'une température trop élevée peut causer des problèmes de bavures et de déformation.
- 3. La hauteur de couche :** la hauteur de couche est le paramètre qui détermine l'épaisseur de chaque couche de filament extrudé sur l'impression. Une hauteur de couche trop élevée peut entraîner une perte de détails, tandis qu'une hauteur de couche trop basse peut augmenter le temps d'impression.
- 4. La densité de remplissage :** la densité de remplissage détermine la quantité de matière qui est extrudée à l'intérieur de l'objet imprimé pour le remplir. Une densité de remplissage trop élevée peut rendre l'impression trop lourde et augmenter le temps d'impression, tandis qu'une densité de remplissage trop faible peut affecter la solidité de l'objet.
- 5. Le support d'impression :** si l'impression nécessite un support, le type de support utilisé et la manière dont il est généré peuvent affecter la qualité de l'impression. Un support mal conçu peut entraîner des imperfections sur l'impression.

Ces paramètres et d'autres, il est possible d'optimiser le G-code pour améliorer la qualité de l'impression.

IV. 2.2 Optimisation du G-code pour améliorer la qualité de l'impression

L'optimisation du G-code est une étape importante pour améliorer la qualité de l'impression 3D. quelques méthodes pour y parvenir :

- 1. Réduire la vitesse d'impression :** Si la vitesse d'impression est trop élevée, cela peut entraîner des problèmes de qualité tels que des surépaisseurs, des filaments qui s'accumulent, des bavures, etc. En réduisant la vitesse d'impression, vous pouvez obtenir une surface plus lisse et des bords plus nets.

2. Optimiser le remplissage : La densité de remplissage est un paramètre important pour la qualité de l'impression. Une densité de remplissage trop élevée peut causer des problèmes de déformation et de surchauffe, tandis qu'une densité de remplissage trop faible peut entraîner une faible résistance et une mauvaise qualité d'impression. En optimisant la densité de remplissage, vous pouvez améliorer la qualité de l'impression.

3. Utiliser des supports d'impression : Les supports d'impression sont utilisés pour imprimer des modèles qui ont des surplombs ou des porte-à-faux. Les supports d'impression peuvent être ajoutés manuellement ou générés automatiquement par le logiciel de découpe. En utilisant les supports d'impression de manière efficace, vous pouvez améliorer la qualité de l'impression et éviter les problèmes tels que les déformations.

4. Optimiser la température d'impression : La température d'impression est un paramètre clé pour obtenir une bonne qualité d'impression. En optimisant la température d'impression, vous pouvez éviter les problèmes tels que les bavures, les fils, les déformations et les problèmes de cohésion entre les couches.

5. Modifier les paramètres du G-code : Les paramètres du G-code tels que la rétraction, la hauteur de la couche, l'extrusion, etc. peuvent être modifiés pour améliorer la qualité de l'impression. En ajustant ces paramètres, vous pouvez améliorer la qualité de l'impression et résoudre les problèmes de qualité tels que les bavures, les fils, les déformations, etc.

IV. 3 Impression 3D :

IV. 3.1 Imprimante 3D Anycubic Mega X3 :

Est une imprimante 3D de bureau facile à utiliser et abordable qui peut être utilisée pour imprimer des objets en 3D à partir de modèles numériques.



Figure IV.7 : Imprimante 3D Anycubic Mega X3

IV. 3.2 Les étapes de base pour l'impression 3D avec Anycubic Mega X3 :

- 1. Préparation du modèle 3D :** Tout d'abord, vous devez préparer votre modèle 3D sur un logiciel de modélisation 3D, tel que SolidWorks ou Blender. Une fois que vous avez terminé la modélisation, vous devez l'exporter au format STL, qui est le format de fichier utilisé par la plupart des logiciels de découpe 3D.
- 2. Importation du modèle dans le logiciel de découpe :** Ensuite, vous devez importer votre modèle STL dans un logiciel de découpe 3D, tel que Cura ou Simplify3D. Dans le logiciel de découpe, vous pouvez ajuster les paramètres d'impression, tels que la résolution et la densité de remplissage, pour optimiser l'impression.
- 3. Préparation de l'imprimante 3D :** Avant de lancer l'impression, vous devez préparer l'imprimante 3D en installant le filament, en nivelant le lit d'impression et en chauffant l'extrudeuse à la température appropriée pour le matériau que vous utilisez.
- 4. Lancement de l'impression :** Une fois que l'imprimante 3D est prête et que vous avez chargé le fichier G-code généré par le logiciel de découpe 3D, vous pouvez lancer l'impression. Pendant l'impression, l'extrudeuse dépose le filament en fusion sur le lit d'impression pour créer l'objet en 3D.



Figure IV.8 :Lancement de l'impression

5. Retrait de l'objet imprimé : Après l'impression, vous devez retirer l'objet imprimé du lit d'impression. Si vous avez utilisé un lit d'impression adhésif, vous pouvez le retirer en le pliant légèrement. Sinon, vous pouvez utiliser une spatule pour décoller l'objet du lit d'impression.

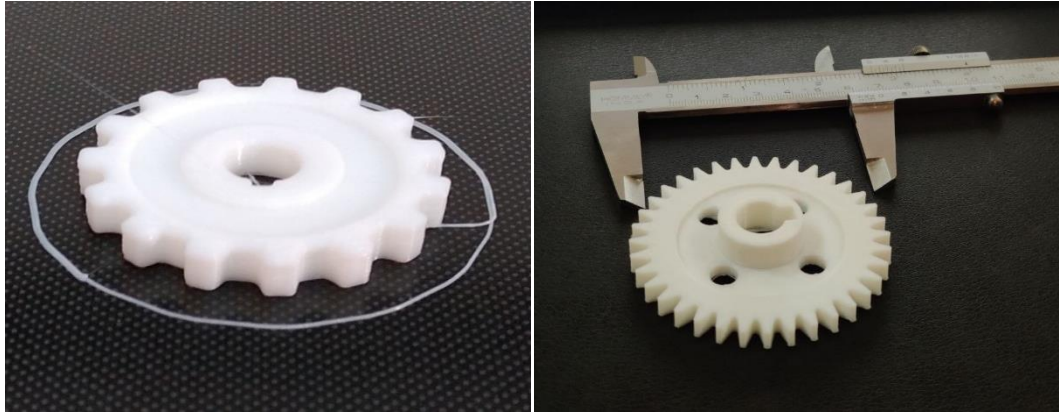


Figure IV.9 :Retrait de l'objet imprimé

En résumé, l'impression 3D avec Anycubic Mega X3 nécessite la préparation du modèle 3D, l'importation dans un logiciel de découpe 3D, la préparation de l'imprimante 3D, le lancement de l'impression et le retrait de l'objet imprimé.

IV. 4 Usinage avec machine-outil à commande numérique :

IV. 4.1 CNC router 1325 :

Le CNC Router 1325 est une machine-outil à commande numérique qui permet de découper, percer, graver et sculpter différents matériaux tels que le bois, le plastique, le PVC, le MDF et l'aluminium. Voici quelques caractéristiques et étapes typiques pour utiliser une machine CNC Router 1325 :

IV. 4.1.1 Les Caractéristiques :

- Zone de travail : 1380 mm x 2500 mm
- Précision de positionnement : +/- 0,03 mm
- Vitesse de gravure : 200 mm/s
- Broche : 3 kW, refroidissement par air ou par eau
- Logiciel de commande : Mach 3 ou NC Studio

IV. 4.2 Les Étapes typiques :

1. **Conception** : Créez un fichier de conception dans un logiciel de CAO ou de dessin tel que AutoCAD ou SolidWorks. Assurez-vous que le fichier est au format approprié pour être importé dans le logiciel de commande CNC.

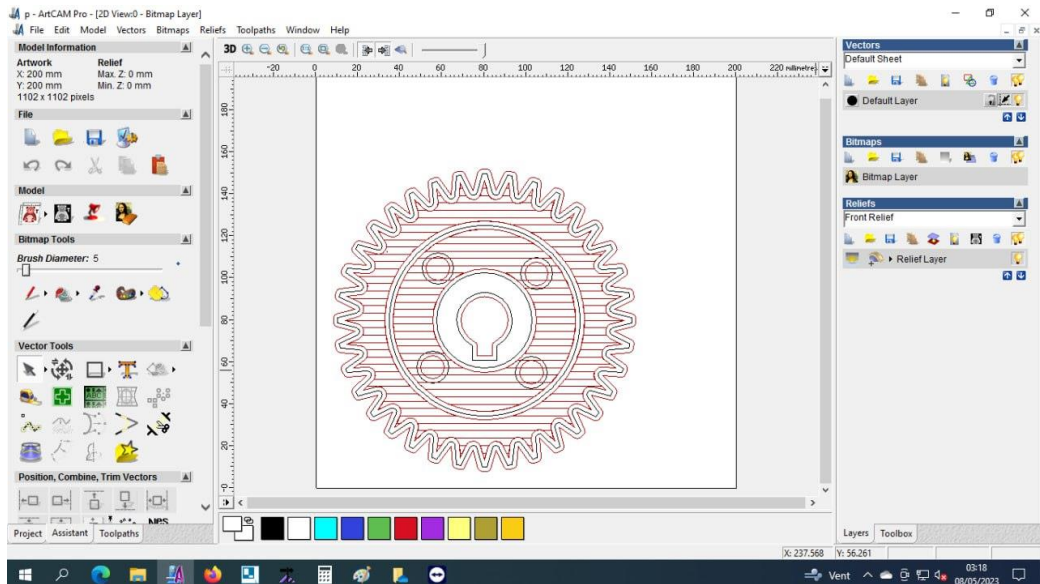


Figure IV.10 : toolpath avec artcam

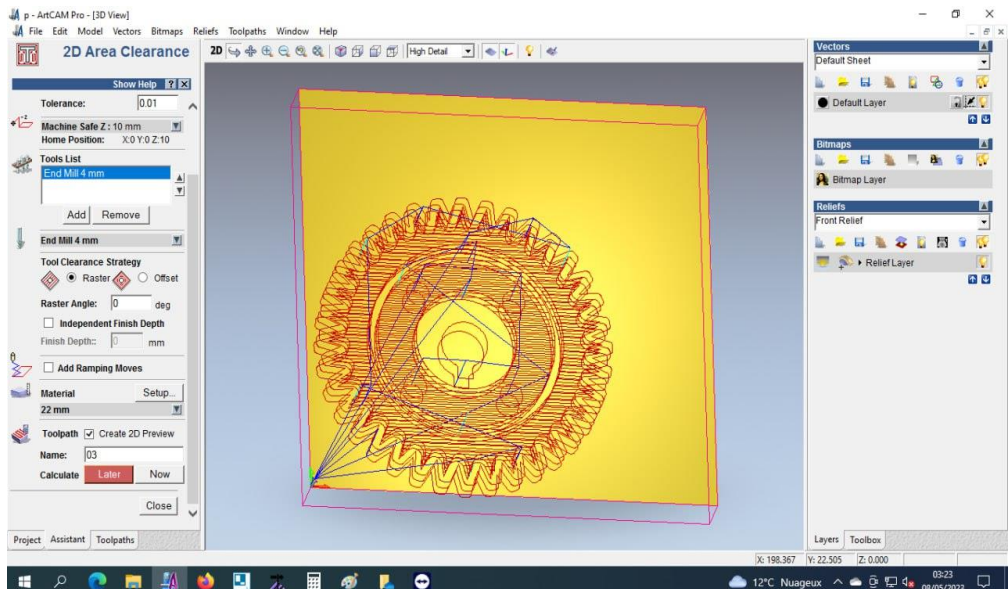
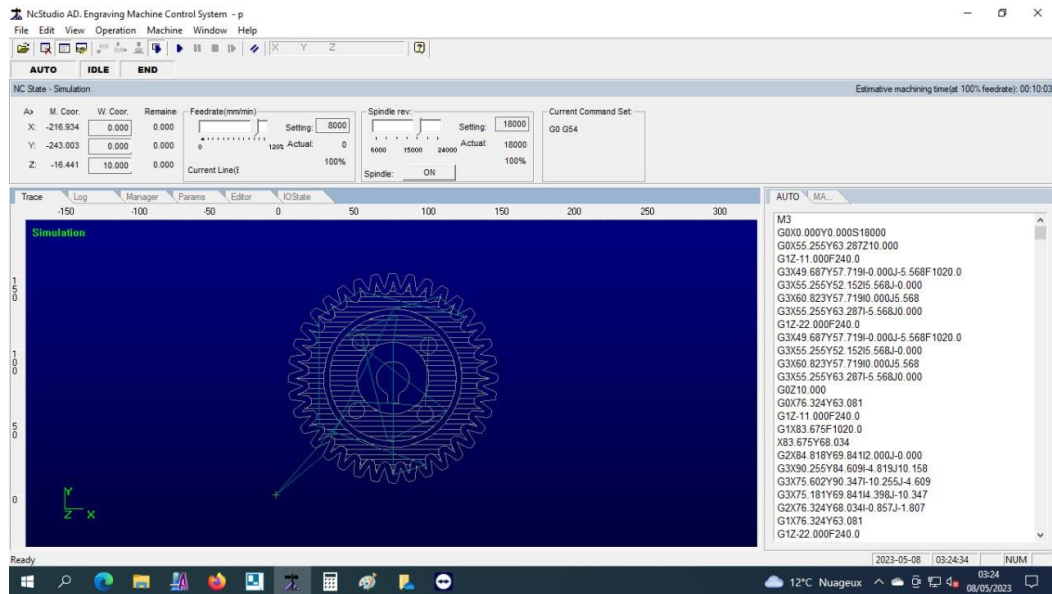


Figure IV.11 : Simulation avec artcam

2.Importation : Importez le fichier de conception dans le logiciel de commande CNC, tel que Mach3 ou NC Studio.



- 4. Réglage de l'origine :** Réglez l'origine de la machine CNC Router 1325 pour déterminer le point de départ de l'usinage.



Figure IV.14 : Réglage de l'origine

- 5. Lancement de l'usinage :** Lancez l'usinage en appuyant sur le bouton de démarrage de la machine CNC.



Figure IV.15 : Lancement de l'usinage

6. Fin de l'usinage : Une fois l'usinage terminé, éteignez la machine CNC et retirez la pièce usinée de la table de travail

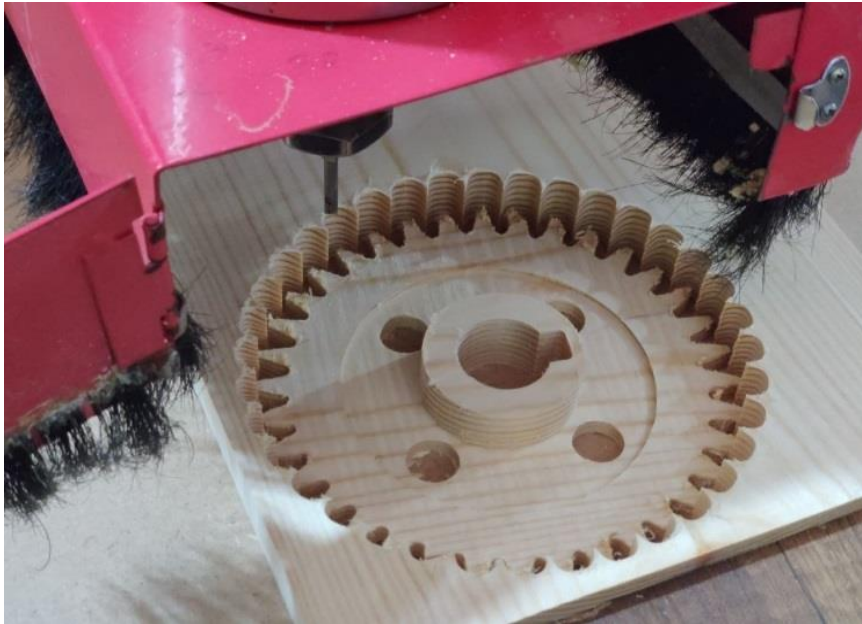


Figure IV.16 : Fin de l'usinage

IV.5 Conclusion :

En conclusion, le chapitre partie expérimentale sur l'usinage avec machine-outil à commande numérique (CNC) et l'impression 3D offre un aperçu approfondi de deux technologies révolutionnaires dans le domaine de la fabrication.

L'usinage avec CNC permet une précision et une efficacité accrues dans la production de pièces complexes. Grâce à la programmation informatique et au contrôle automatisé, les machines CNC offrent une grande flexibilité, permettant la création de pièces sur mesure avec des délais de production réduits. De plus, les avancées constantes dans les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) et les simulations de processus garantissent une optimisation des opérations d'usinage.

D'autre part, l'impression 3D est une technologie révolutionnaire qui permet de créer des objets solides en superposant des couches successives de matériau. Cette méthode offre des possibilités infinies en termes de conception et permet la réalisation de prototypes rapides, de pièces personnalisées et de structures complexes. L'impression 3D permet également de réduire le gaspillage de matière première, offrant ainsi des avantages économiques et environnementaux.

En résumé, l'usinage avec machine-outil à commande numérique et l'impression 3D sont des technologies prometteuses qui transforment la manière dont nous concevons et produisons des objets. Leur potentiel est immense, et ils joueront un rôle clé dans l'avenir de la fabrication, offrant des solutions rapides, personnalisées et économiquement viables pour répondre aux besoins de divers secteurs industriels.

Conclusion



Conclusion Générale :

En conclusion, notre étude a exploré en profondeur l'analyse et la génération d'un code G spécifiquement dédié à l'impression 3D. Grâce à une étude approfondie des différentes étapes du processus d'impression 3D, nous avons développé une méthodologie solide pour analyser les modèles de conception, générer un code G adapté et optimiser les paramètres d'impression.

Ce projet a été une expérience enrichissante dans l'analyse et la génération de code G pour l'impression 3D. Grâce à la combinaison de connaissances théoriques et d'expérimentations pratiques, nous avons pu comprendre les principaux concepts liés à l'impression 3D et les adapter pour une optimisation des trajectoires d'impression, la réduction des erreurs et l'amélioration de la qualité des pièces produites. Ce projet ouvre de nouvelles perspectives dans le domaine de la fabrication additive, offrant des solutions pour la précision, la vitesse et la fidélité de l'impression 3D.

Ce projet s'est concentré sur l'analyse et la génération d'un code G dédié à l'impression 3D, et a abouti à des résultats prometteurs. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de notre approche, avec des pièces imprimées de haute qualité et des temps d'exécution réduits. Il ouvre de nouvelles opportunités pour l'utilisation de l'impression 3D dans divers secteurs tels que l'industrie, la médecine et la conception de produits.

BIBLIOGRAPHIE

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIE:

- [1] Alain, Jaillet. L'apprentissage par modélisation, simulation et prototypage avec une imprimante 3D, dans l'enseignement Technique et professionnel au Gabon. Diss. CY Cergy Paris Université, 2022.
- [2] Ian Gibson, Ian Gibson. "Additive manufacturing technologies 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing." (2015).
- [3] Rodrigue, Hugo, et al. "Une méthodologie de conception pour la fabrication additive." Congrès International de Génie Industriel, 2011.
- [4] Huang, Y., Leu, M. C., & Mazumder, J. (2015). A Review on 3D Micro-Additive Manufacturing Technologies. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 77(1-4), 463-479.
- [5] Campbell, Ian, David Bourell, and Ian Gibson. "Additive manufacturing: rapid prototyping comes of age." *Rapid prototyping journal* 18.4 (2012).
- [6] Prud'homme, G. (1997). *Commande numérique des machines-outils*. Ed. Techniques Ingénieur.
- [7] Catin, M. (1995). Les mécanismes et les étapes de la croissance régionale. *Région et développement*, 1, 11-28.
- [8] Lei, W. T., & Hsu, Y. Y. (2003). Accuracy enhancement of five-axis CNC machines through real-time error compensation. *International journal of machine tools and manufacture*, 43(9), 871-877.
- [9] Curran, J. et Stanworth, J. (1989). Éducation et formation des entreprises : problèmes de classification, d'évaluation, de politique et de recherche. *International Small Business Journal*, 7 (2), 11-22. La
- [10] Chanez, G., & Roza, A. R. (2018). *Etude et conception d'une machine CNC (Découpeuse laser)* (Doctoral dissertation, Université Mouloud Mammeri).
- [11] D. Gelin, M. Vincent « éléments des fabrications », Edition marketing, paris, Mars 1995.
- [12] Y. GUERMAT. Conception et réalisation du logo Tlemcen capitale de la Culture islamique en 3D, 2011/2012

BIBLIOGRAPHIE

- [13] T. Côme et G. Rouet, Innovations managériales, enjeux e perspectives, L'Harmattan, 2015.
- [14] J.-I. Charvolin, Conception des pièces plastiques injectées, Lavoisier, 2013.
- [15] Prototypage rapide: tout ce qu'il faut s'avoir,» Formlabs, 2020. [En ligne]. [Accès le 16 mai 2020].
- [16] «Quels objets peut-on fabriquer avec une imprimante 3D,» [En ligne]. Disponible sur: <http://www.primante3d.com/objet-impression-3d/>. [Accès le 13 MAI 2020].
- [17] D. Rieutord, Les robots terrestres parmi les hommes, Paris: L'Harmattan, 2017.
- [18] L. Gaëtan, «Le procédé d'impression 3D FDM ou FFF,» 24 février 2015. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.a3dm-magazine.fr/news/fabrication-additive- polymeres/procede-dimpression-3d-fdm-fff>. [Accès le 17 mai 2020].
- [19] A. R. Prajapati, H. K. Dave et S. R. Rajpurohit, «Investigation on Quality of In-house Fabricated PLA for 3D Printing Application,» *Advances in Additive Manufacturing and Joining*, pp. 277-285, 2020.
- [20] B. T. Dan, D. R. Khodos, O. Khairallah, R. Ramlal et Y. Budhoo, «The Effect of 3- D Printing Process on the Mechanical Properties of Materials,» 2017.
- [21] Imprimante 3D fonctionnement - Comment ça marche ?.
- [22] «Les materiaux dimpression 3D : plastiques, metaux...,» [En ligne]. Disponible sur: <http://www.primante3d.com/materiaux/>. [Accès le 12 mai 2020].
- [23] A. Charles, P. M. Bassan, T. Mueller, A. Elkasser et S. G. Scholz, «On the Assessment of Thermo-mechanical Degradability of Multi-recycled ABS Polymer For 3D Printing Applications,» chez Sustainable Desgin and Manufacturing, 2019.
- [24] O. Le Frapper, AutoCAD 2010 Des fondamentaux à la presentation détaillée, Edition ENI, 2009.
- [25] Freelabster, «Qu'est qu'un fichier STL ?,» 03 Septembre 2017. [En ligne]. Disponible sur: <https://www.freelabster.com/fr/blog/quest-quun-fichier-stl/>
- [26] D. C. Planchard, Engineering Design with Solidworks 2019, Florida: SDC Publications, 2019.