



Faculté: DES SCIENCES DE L'INGENIORAT

Département : DE GENIE MECANIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNIQUES

Filière : GENIE MECANIQUE

Spécialité : FABRICATION MECANIQUE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème :

**Etude et réalisation des pièces mécaniques par la Fabrication
Additive (Impression 3D)**

Présenté par : Abdelli Ziyad

Encadrant : MEKHILEF. S

Grade : MCA

Université : UBM Annaba

Jury de Soutenance:

Laouar Lakhdar	PROF	UBM Annaba	Président
Mekhilef Slimane	MCA	UBM Annaba	Encadrant
Bouchelaghem Abd El Aziz	PROF	UBM Annaba	Examinateur

Année Universitaire:2024/2025

Remercîments

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude au **Docteur Mekhilef Slimane**, mon encadrant, pour son accompagnement, sa disponibilité et ses conseils précieux tout au long de la réalisation de ce travail.

Son encadrement rigoureux et bienveillant a grandement contribué à la qualité de ce projet. Je remercie également l'ensemble des membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant d'évaluer ce travail. Leurs remarques et suggestions seront, sans nul doute, d'un grand apport pour la suite de mon parcours.

Enfin, j'adresse mes sincères remerciements à toutes les personnes qui M'ont soutenu de près ou de loin durant cette aventure.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mes chers parents, pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices et leur soutien sans faille.

À ma famille, pour leurs encouragements constants et leur présence rassurante.

À mes amis fidèles, pour leurs mots d'encouragement et les moments partagés tout au long de ce parcours. À tous ceux qui ont cru en moi, de près ou de loin.

Table des matières

Introduction générale	1
ChapitreI: Généralité Sur La Fabrication Additive	1
I. Fabrication soustractive et fabrication additive:	2
I.1.La fabrication additive(FA):.....	3
1.2 Historique	Error! Bookmark not defined.
1.3.Tendances marquantes en fabrication additive:	5
1.4.L'impact mondiale de l'impression 3D I.4.1.l'impact de l'impression 3D dans l'industrie:	7
1.5.Les avantages de l'imprimante 3D.....	7
1.6.Lescharges:	8
1.61.Les charges liées au fonctionnement de la machine:.....	8
1.6.1. Les charges des matériaux:.....	9
1.6.3. Les charges de la main-d'œuvre:.....	9
1.7. La vitesse de fabrication:.....	9
1.8. Atténuation des risques:.....	10
1.9. L'adaptation sur mesure:.....	10
Chapitre II : Différentes Types De Machines Et Matériaux Et Domaine D'application De La Fabrication Additive.....	13
II.1. Les différents types d'imprimantes 3D.....	11
II.1.1. Les imprimantes 3D cartésiennes:.....	11
II.1.2. Les imprimantes delta:	12
II.1.3. Les imprimantes 3D polaire:.....	13
II.1.4. Imprimante 3D avec un bras robotique:.....	13
II.2. Fonctionnement de l'impression 3D:.....	14
II.3. Les différents types de technologie d'impression 3D:	16
II.3.1. Modélisation des depots fondus (FDM)	16
II.3.2. Stérolithographie(SLA):	17
II.3.3. Frittage laser sélectif (SLS):	18
II.3.4. Le reste-SLM,LOMetEBM:.....	20
II.4. Matériaux d'impression:.....	20
II.4.1. Les polymères:	20
• PLA (Polylactique)	21
• Les Polyamides.....	21
• PET(Polytéraphthalate)	22

● PP (Le Polypropylène)	23
b) Les Résines	24
II.4.2. Les matériaux composites :	24
a) L'alumide.....	25
II.4.3. Autres matériaux.....	25
❖ La Céramique	26
❖ Le Sable	27
❖ LeBéton.....	27
❖ Le Bois.....	28
II.5. Les champs d'applications:	29
II.5.1. Applications médicales de l'impression 3D:.....	29
II.5.2. Architecture Et Bâtiment:	30
II.5.3. Impression3Dalimentaire:	31
II.5.4. Bijoux :.....	Error! Bookmark not defined.
II.5.5. Automobile:	33
Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive.....	34
III. Les étapes pour imprimer en 3D III.1.Obtenir ou créer un modèle 3D:.....	35
b- Les scanner 3D:.....	35
C-Obtenir un modèle 3D:.....	36
III.2. Modélisation :.....	Error! Bookmark not defined.
III.3. Fichier de stéréolithographie(STL):.....	37
III.4. LeGcode:	38
III.5. Les logiciels utilisés:.....	38
Logiciel de tranchage	38
Exemple D'application:réalisation d'un pignon	39
III.6. Etapes modélisation 3D:	40
III.6.1. Première étape:La création de la pièce tridimensionnelle.....	40
III.6.2. Étape3:on lance l'impression 3D	52

Chapitre IV : Précision dimensionnelle en Fabrication Additive et comparaison avec les pièces moulées

IV.1. La précision dimensionnelle en fabrication additive	55
IV.1.1. Définition.....	55
IV.1.2. Facteurs influençant la précision	55
Tableau comparatif des précisions selon les technologies de fabrication additive	55
IV.1.3. Influence de la géométrie	56
IV.2. Cas des pièces moulées	56

IV.2.1. Principe du moulage	56
IV.2.2. Précision et répétabilité	56
2.3. Avantages du moulage	57
IV.3..Comparaison technique : Impression 3D vs Moulage	57
IV.4. Applications industrielles liées à la précision	58
Conclusion:	Error! Bookmark not defined.

Liste De Figure

ChapitreI.....	
Figure I .01 : Processus de fabrication : Enlèvement de matière (1) /Ajoute matière (2).....	02
Figure I.02 : Des pièces fabriquées par la fabrication additive.....	03
Figure I.03 : Les trois procédés les plus courants d'impression.....	04
Figure I.04 : Structure complexe design	07
ChapitreII.....	
Figure II.01 : les imprimantes cartésiennes.....	11
Figure II.02 : Les imprimantes Delta.....	12
Figure II.03 : L'imprimante 3D polaire.....	13
Figure II.04 : Imprimer une maison avec un bras robotisé	14
Figure II.05 : Principe général de la fabrication additive par couche	15
Figure II.06 : Schéma du processus FDM.....	17
Figure II.07 : Schéma représentant le fonctionnement de l'impression par stéréolithographie	18
Figure II.08 : Le procédé de fabrication additive SLS	19
Figure II.09: Exemples d'objet en ABS	21
Figure II.10: Exemples d'objet en PLA.	21
Figure II.11: Exemple d'objet en polyamide	22
Figure II.12: Exemples d'objet en PET.....	23
Figure II.13: Exemples d'objet en PP	23
Figure II.14: Exemples d'objet en alumide.....	25
Figure II.15: Impression 3D Aluminium avec la technologie SLM.....	26
Figure II.16: Exemple d'objet en titane.....	26
Figure II.17: Exemple d'objet en céramique.....	27
Figure II.18: Exemple d'objet en sable.	27
Figure II.19: Exemple d'objet en Béton.....	28
Figure II.20: Exemple d'objet en bois	28
Figure II.21: Une pointe de nez bionique.....	30
Figure II.22: prothèse de main imprimée en 3D	30
Figure II.23: Imprimer une maison en 3D.....	31
Figure II.24: Impression 3D alimentaire	32
Figure II.25: Bijoux imprimés en 3D	32
Figure II.26: La technologie 3D dans l'automobile	33
ChapitreIII.....	
Figure III.01: Equipement nécessaire pour imprimer en 3D	35
Figure III.02: Scanner 3d	36
Figure III.03: Processus d'impression.....	37
Figure III.04: Choix du plan.	39

FigureIII.05 : Création d'un cercle.....	40
FigureIII.06 : Création d'un cercle($\varnothing 40$).....	40
FigureIII.07 : Extrusion (25mm)	41
FigureIII.08 : création d'un cercle extérieur de la dent	42
FigureIII.09 : création de la ligne de construction	42
FigureIII.10 : création d'une ligne de diamètre intérieur.....	43
FigureIII.11 : création des lignes d'aides	43
FigureIII.12 : création d'un Arc ($\varnothing=30\text{mm}$)	44
FigureIII.13 : création d'un deuxième arc	44
FigureIII.14 : modification de la position des points d'intersection.....	45
FigureIII.15 : Extrusion en direction négative	45
FigureIII.16 : Répétition circulaire	46
FigureIII.17 : Quelques ajustements(congé)	46
FigureIII.18 : enlèvement de la matière	47
FigureIII.19 : La forme obtenue	48
FigureIII.20 ; l'emplacement, de la clavette	49
FigureIII.21 : La forme final en 3D	50
Figure III.22 : Préparation pour l'impression d'un « Pignon » sur le logiciel cura	51
Figure III.23 : L'impression du pignon	53
 Chapitre IV.....	
FigureIV.1 : Illustration de la précision dimensionnelle en FA.....	55
Figure IV. Pièce aéronautique imprimée avec finition.....	58

LISTE DES TABLEAUX

Table 1 :Tableau comparatif des précisions selon les technologies de fabrication additive	55
Table 2: Comparaison technique Impression 3D vs Moulage.....	57

Liste des symboles

FA : Fabrication Additive

3D : Tridimensionnel.

CAO : Conception assistée par ordinateur.

ABS : Acrylonitrile Butadiène Styrene.

PLA : Polylactique.

PP : Polypropylène.

PET : Polytéréphthalate.

FDM : Fused Deposition Modeling (Dépôt de matière fondu).

FFF : Fabrication de filaments fondus.

SLA : stéréolithographie.

SLS : Le frittage sélectif au laser

SLM : Fusion sélective par laser

LOM : Fabrication d'Objet Stratifié

EBM : la fusion par faisceau numérique

Résumé :

Avec le développement rapide des procédés de fabrication additive (impression 3D) et L'augmentation du nombre d'acteurs dans ce domaine depuis 2010, cette technologie connaît une diffusion croissante à l'échelle mondiale, grâce à la diversité de ses applications dans des Secteurs tels que l'industrie et la médecine. Elle permet la production de pièces complexes et personnalisées à des coûts réduits par rapport aux méthodes de fabrication traditionnelles.

Ce mémoire a pour objectif de présenter les principes de base de la fabrication Additive, en comparant cette technologie à la fabrication soustractive traditionnelle.

Il explore les matériaux utilisés, ainsi que les domaines d'application variés de L'impression 3D. De plus, une méthodologie d'élaboration d'une pièce par fabrication Additive est détaillée, illustrée par un exemple concret de la réalisation d'un pignon,

Afin de mieux comprendre les étapes de conception et de fabrication.

Summary:

With the rapid development of additive manufacturing processes (3D printing) and the increase in the number of players in this field since 2010, this technology is becoming increasingly widespread on a global scale, thanks to the diversity of its applications in Sectors such as industry and medicine. It enables the production of complex, customized parts at lower costs than traditional manufacturing methods.

The aim of this thesis is to present the basic principles of Additive Manufacturing, comparing this technology with traditional subtractive manufacturing.

It explores the materials used, as well as the various fields of application for 3D printing. In addition, a methodology for producing a part using Additive Manufacturing is detailed, illustrated by a concrete example of the production of a sprocket,

To give a better understanding of the design and manufacturing stages.

Introduction générale

La Fabrication Additive (FA), également connue sous le nom d'impression 3D, est un procédé de production qui a émergé dans les années 1980 et qui a depuis connu une évolution significative. Aujourd'hui, cette technologie est suffisamment développée pour être exploitée de manière efficace et rentable par les industriels [1]. Contrairement aux méthodes traditionnelles de fabrication basées sur l'enlèvement de matière (comme l'usinage) ou la déformation plastique (telles que l'emboutissage, le forgeage ou le thermoformage), la FA repose sur l'ajout progressif de matière pour créer une pièce.

Parmi les principaux atouts de cette technologie, on note la capacité à produire des formes complexes, parfois impossibles à obtenir par les procédés conventionnels, ainsi que la possibilité d'utiliser une large gamme de matériaux. Elle permet également la réalisation de pièces monolithiques, c'est-à-dire fabriquées en une seule étape sans assemblage [2].

Aujourd'hui, les champs d'application de la fabrication additive sont très diversifiés. Elle est notamment prisée pour le prototypage rapide, qui permet de réduire les délais et les coûts liés à la conception de nouveaux produits. En outre, l'impression 3D est de plus en plus présente dans des secteurs tels que l'aéronautique, l'industrie automobile, ou encore le domaine médical, notamment pour la fabrication d'implants dentaires ou de prothèses sur mesure.

Les procédés classiques de fabrication de maquettes ou de prototypes sont souvent complexes et onéreux. La fabrication additive offre alors une alternative rapide, économique et flexible.

Cependant, cette technologie n'est pas exempte de limitations. En effet, comme elle repose sur le dépôt successif de couches de matière, cela introduit un effet de planification dans la structure, ce qui peut affecter certaines propriétés mécaniques. De plus, la qualité de surface dépend fortement de l'épaisseur des couches déposées.

Ce mémoire est structuré en trois parties principales :

Le premier chapitre est dédié aux notions de base de la fabrication additive.

Le deuxième chapitre présente les différents types de machines utilisées ainsi que les matériaux disponibles.

Le troisième chapitre propose une démarche pratique pour la fabrication d'une pièce via l'impression 3D, illustrée par un exemple d'application.

Le quatrième chapitre présente précision dimensionnelle en Fabrication Additive

Chapitre I: Généralité Sur La Fabrication Additive

Ce premier chapitre présente une étude bibliographique (généralité sur la fabrication additive).

Dans l'introduction on définit la fabrication additive avec son principe de fonctionnement, les trois procédés les plus courants d'impression, L'impact mondiale de l'impression 3D, les avantages.

I. Fabrication soustractive et fabrication additive:

Depuis un certain temps, notre processus de production se fonde sur différentes techniques : la plus courante étant la fabrication soustractive qui nécessite l'élimination de matière (par le biais de l'usinage, du fraisage CNC et de la sculpture), la transformation des matériaux (comme le pliage ou l'emboutissage) et l'emploi d'associations de matériaux (à l'instar du composite). La particularité commune à toutes ces techniques est que nous débutons avec un « bloc de matière » que nous façonnons par la suite pour obtenir la forme souhaitée.

L'impression 3D, également appelée fabrication additive, révolutionne l'ensemble du processus de production. À la différence des méthodes précédemment citées, l'impression 3D consiste à superposer progressivement des matériaux sur une plateforme jusqu'à la création finale de l'objet. Cette technologie présente l'avantage de minimiser significativement le gaspillage de matière, d'offrir une production à la demande et de permettre la conception de pièces complexes impossibles à réaliser avec les méthodes traditionnelles [3].

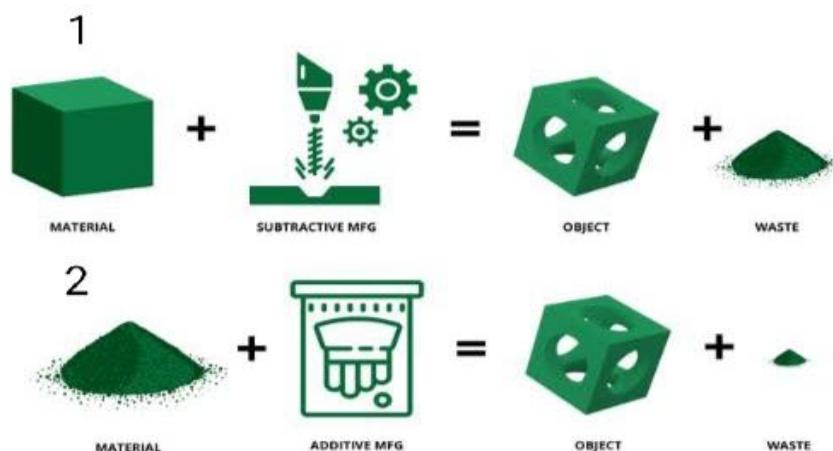


Figure I.01 : Processus de fabrication : Enlèvement de matière (1) /Ajout de matière (2)

I.1. La fabrication additive (FA):

La méthode d'impression en trois dimensions ou de production additive facilite la création d'objets solides en 3D à partir d'un fichier digital. L'élément créé par impression 3D est conçu en superposant des strates de matériaux. On peut considérer chaque couche comme une tranche horizontale mince de l'objet temporaire.

Ce procédé est aussi connu sous le nom de processus additif [1].

Selon la norme ASTM, l'impression 3D est une technique de fusion de matériaux qui autorise la construction d'objets à partir des informations d'un modèle tridimensionnel, habituellement en empilant les couches, contrairement aux méthodes de production par soustraction [2].

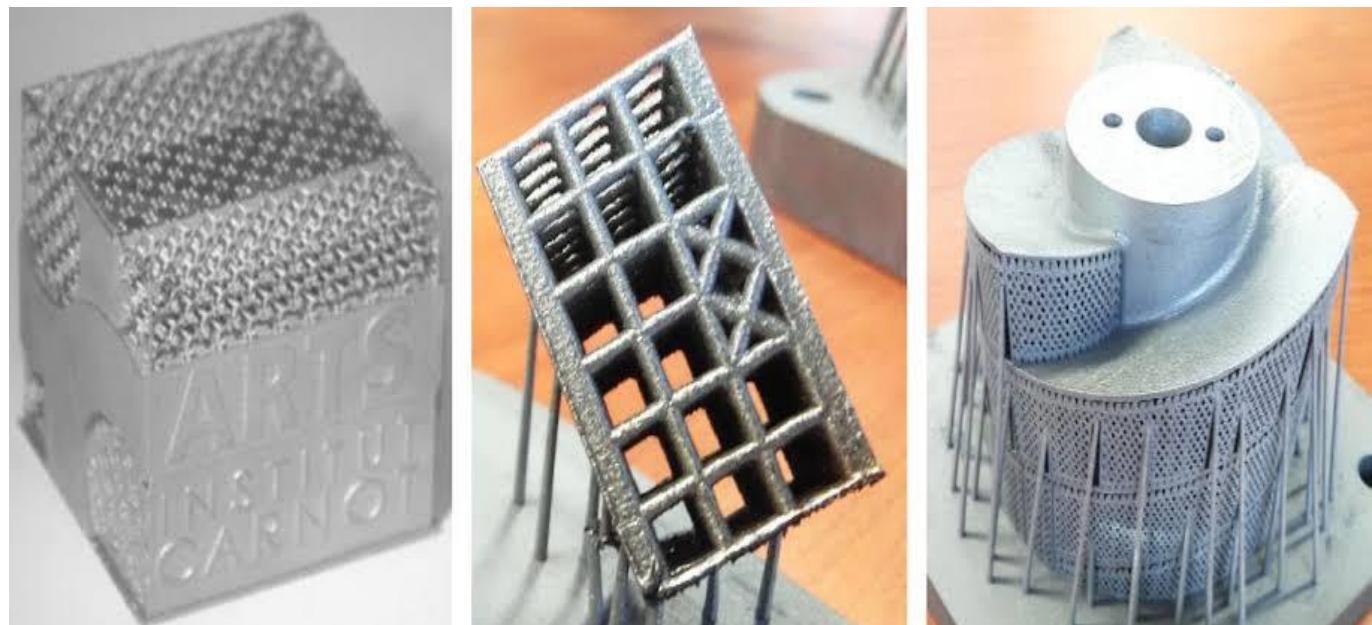


Figure I.02: Des pièces fabriquées par la fabrication additive [3]

1.2 Historique :

Pour mieux comprendre la place de l'impression 3D dans le contexte des innovations technologiques et de la révolution numérique, il est essentiel de revenir sur son évolution historique et sur les avancées majeures dans le domaine de la fabrication additive. Dès 1903, l'Américain G.J. Peacock dépose un brevet intitulé « Method of composition horseshoes », posant

Chapitre I Généralité sur la fabrication additive

ainsi, sans en avoir pleinement conscience, les bases de la fabrication additive. Son invention Écrit la création d'un fer à cheval par super position de couches de tissu. Ce n'est qu'en 1968 que Des recherches sur les résines photo polymérisables émergent, avec Wyn Kelly Swainson qui dépose un brevet intitulé « Method of producing a 3D figure by holography », exposant le durcissement d'une résine liquide sous l'effet de deux faisceaux laser. Toutefois, Charles Hull, aujourd'hui vice-président de 3D Systèmes, est reconnu comme le véritable pionnier de l'impression 3D. En 1984, il dépose un brevet portant sur la stéréolithographie intitulé « Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography ». Trois ans plus tard, la première machine industrielle, la SLA-1, est lancée sur le marché. Peu après, en 1989, l'entreprise Stratasys dépose un brevet pour la technologie FDM (Fused Deposition Modeling), devenue aujourd'hui l'une des méthodes d'impression 3D les plus répandues. En 1992, ils commercialisent leur premier modèle, baptisé 3D Modeler. Au début des années 1990, le prototypage rapide s'impose dans l'industrie, soutenu par l'essor des méthodes agiles et des processus de conception traditionnels, et enrichi par de nouvelles applications, telles que la fabrication de tissus biologiques imprimés en 3D pour traiter les lésions ostéochondrales.[3]

1.3. Tendances marquantes en fabrication additive :

Au cours des trois premières décennies de leur développement, les imprimantes 3D étaient uniquement réservées aux grandes entreprises et bureaux d'études, du fait de leur coût prohibitif et de leur complexité technique. Vers le début des années 2010, l'émergence d'appareils intégrés plus sophistiqués, l'arrivée à échéance de brevets et le niveau de maturité technologique ont facilité l'entrée sur le marché pour des centaines d'entreprises, contribuant ainsi à sa saturation avec des imprimantes 3D. Une bulle s'est rapidement formée.

La méthode initiale mise en place a été l'impression par dépôt de filament fondu (FDM). Ces imprimantes 3D, qui utilisent la fusion sélective du plastique, sont désormais abordables pour les consommateurs, bien que leur performance ait demeuré confinée. L'engouement s'est rapidement estompé et l'utopie d'une imprimante 3D indispensable dans chaque ménage n'a pas encore vu le jour à ce jour.

Hormis cet univers de consommation centré sur l'impression 3D, les technologies d'ajout de matière ont poursuivi leur évolution. Les imprimantes conçues pour les professionnels de l'ingénierie, du prototypage et de la production industrielle ont commencé à franchir des seuils critiques en ce qui concerne la qualité d'impression, la fiabilité et la structure des coûts.

La stéréolithographie (SLA) a été la seconde technologie à se présenter sous une forme plus accessible, plus compacte et plus simple à utiliser. En 2013, Formlabs a mis sur le marché la Form1, une imprimante 3D professionnelle haute résolution accessible à un prix de 3000€. Auparavant, elle n'était accessible qu'à travers des imprimantes 3D dont le prix excédait les 80 000 €. Grâce à une large gamme de matériaux fonctionnels, la technologie a ouvert la voie de l'impression 3D pour l'élaboration de produits et l'ingénierie, ainsi que pour les domaines dentaires et de la joaillerie.

La troisième génération de méthodes d'impression 3D opérant sur un bureau (ou plus précisément à l'atelier, sur les tables de travail) se base sur la technique du frittage sélectif par laser (SLS), qui s'est révélée indispensable pour les utilisateurs industriels.

Chapitre I Généralité sur la fabrication additive

À l'inverse de nombreuses méthodes de fabrication additive en bureau, la technique SLS autorise la création de pièces d'une robustesse exceptionnelle à partir de thermoplastiques tels que le nylon, dont la solidité se rapproche presque de celle des pièces réalisées par moulage par injection. La poudre offre un support aux pièces avant leur fusion, augmentant ainsi le nombre de pièces pouvant être imprimées, ce qui améliore la productivité et facilite un post-traitement moins laborieux.

Jusqu'à il y a trois ans, les imprimantes SLS les moins chères coûtaient environ 200000€ (et les systèmes industriels les plus grands, de l'ordre de plusieurs millions de dollars). Les imprimantes SLS d'atelier qui produisent des pièces en nylon sont maintenant disponibles à environ 10 000 €, rendant cette technologie beaucoup plus accessible et baissant significativement les coûts de production lorsqu'on prend en compte le coût de possession. Le procédé SLS en atelier peut s'étendre au-delà du prototypage et entrer dans le domaine de la fabrication des produits finis. [4]

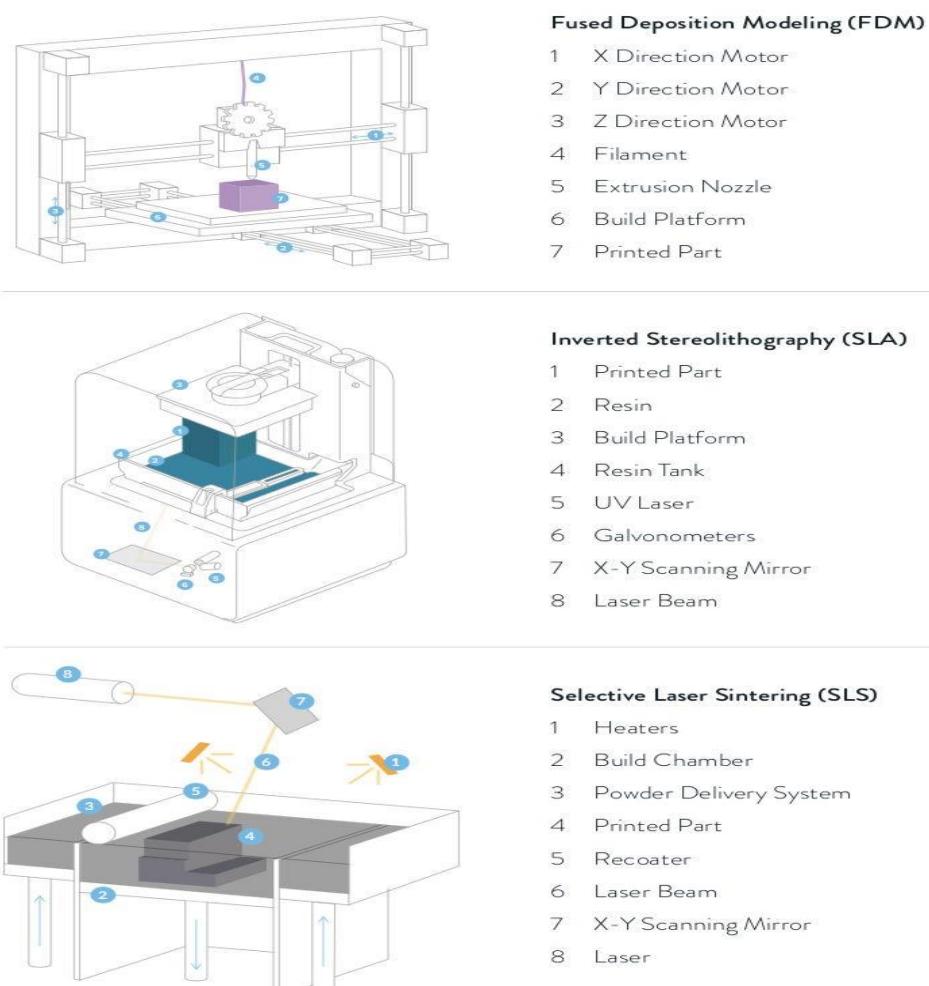


Figure I.03 : Les trois procédés les plus courants d'impression

Les trois méthodes d'impression 3D les plus répandues Les imprimantes 3D FDM réalisent des pièces en extrudant un filament thermoplastique qui a été préalablement fondu. La méthode de stéréolithographie (SLA) consiste à polymériser la résine liquide à l'aide d'un laser. Le frittage sélectif par laser (SLS) fait appel à un laser de haute intensité pour fusionner des particules de poudre polymère en petite taille.

1.4. L'impact mondiale de l'impression 3D

I.4.1. L'impact de l'impression 3D dans

l'industrie :

Il est déjà possible de constater l'influence du secteur de l'impression 3D sur la production d'articles. Cette technologie transforme la signification sociale, économique, environnementale et sécuritaire de la fabrication de produits d'une manière favorable.

Un des avantages de cette technologie récente est la diminution du nombre d'intermédiaires entre les producteurs et les consommateurs. Avec une chaîne d'approvisionnement allégée, il est plus simple d'offrir des produits sur mesure et surtout de minimiser les inventaires.

Il est également possible de prévoir que la production locale supprimera le besoin de transport, réduisant ainsi l'impact environnemental. L'un des buts est de donner, à terme, la possibilité à tous les consommateurs, qu'ils soient privés ou publics, de disposer de leur propre imprimante 3D et d'imprimer leurs produits par eux-mêmes. Cette perspective future soulève également des interrogations sur l'amélioration potentielle de certains produits déjà en place grâce à une imprimante 3D, tels que la réalisation de nouvelles formes qui ne pourraient être produites qu'avec une imprimante 3D.

1.5. Les avantages de l'imprimante 3D

1.5.1. Fabriquer des objets de toutes sortes

L'idée fondamentale de l'imprimante 3D destinée au grand public est de donner la possibilité aux particuliers de produire leurs propres objets en plastique. Par conséquent, on peut par exemple produire

Chapitre I Généralité sur la fabrication additive

de la vaisselle en plastique, donc non cassable, ainsi que des jouets pour les petits. L'imprimante 3D destinée au grand public offre une précision suffisante pour la création d'objets plutôt techniques. Ainsi, l'imprimante 3D constitue un instrument idéal pour stimuler la créativité.

1.5.2. Réparer ses objets cassés

Il est courant, face à une panne d'appareil électroménager, de penser immédiatement à acheter un nouveau modèle de même catégorie via un magasin ou en ligne, car les pièces de rechange sont souvent difficiles à trouver, y compris auprès du fabricant. L'imprimante 3D offre à chaque utilisateur la capacité de concevoir sur son ordinateur l'élément qui lui fait défaut, puis de le reproduire en volume. On considère donc l'imprimante 3D comme un instrument anticonsumériste qui aide à combattre l'obsolescence.

1.5.3. L'amélioration des conditions de vie

Par le biais de l'impression 3D, des améliorations significatives pourraient être apportées aux conditions d'existence de chacun, y compris des individus avec un handicap. Étant donné que le plastique est un matériau moins lourd que le métal, son utilisation pour des enfants est tout à fait envisageable : un exosquelette destiné à une fillette de 4 ans a déjà été conçu. La possibilité d'une imprimante 3D accessible au grand public pourrait offrir à tous la chance de concevoir une réponse spécifique à leur problème et de la produire sur mesure et à un coût réduit, étant donné que le prix d'une cartouche de plastique est habituellement inférieur à 60 euros.

1.6. Les charges :

Définir la réduction des dépenses grâce à cette nouvelle technologie s'articule en 3 catégories : les coûts de fonctionnement de la machine, le coût de la matière première, le coût de la main d'œuvre.

1.6 1.Les charges liées au fonctionnement de la machine :

En matière de consommation énergétique, la majorité des imprimantes 3D de bureau requièrent une quantité d'énergie similaire à celle d'un ordinateur portable. En revanche, les imprimantes professionnelles consomment beaucoup d'énergie. Cependant, leur capacité à produire en une seule étape entraîne une réduction des dépenses énergétiques par rapport aux méthodes conventionnelles.

1.6.1. Les charges des matériaux :

Le coût des matériaux utilisés dans la fabrication additive fluctue grandement selon la technologie sélectionnée.

Les imprimantes FDM de bureau fonctionnent avec des rouleaux de filaments dont le coût moyen est de 20 euros au kilo, alors que l'impression SLA requiert une résine d'environ 120 euros le litre. Comparer les coûts de la production additive et ceux de la production traditionnelle s'avère complexe.

1.6.3. Les charges de la main-d'œuvre :

L'un des principaux avantages de l'impression 3D est le coût de la main-d'œuvre. La majorité des imprimantes 3D nécessite une seule personne qualifiée pour régler la machine et lancer l'impression. L'imprimante 3D suit alors un processus entièrement automatisé pour produire la pièce. En comparaison à la fabrication traditionnelle où du personnel qualifié est généralement requis, les coûts de la main-d'œuvre pour une imprimante 3D sont presque nuls.

Pour produire à faible volume, l'impression 3D représente un gros avantage en temps et en argent. [6]

1.7. LA Vitesse de fabrication:

L'un des principaux avantages de l'impression 3D réside dans la rapidité de production des pièces comparée aux méthodes conventionnelles. Il est possible d'imprimer des modèles simples ou très élaborés en simplement quelques heures. Le bénéfice réside dans la possibilité de valider rapidement la faisabilité d'un projet sans être soumis à aucune restriction créative. Auparavant, il fallait souvent des jours, voire des semaines, pour obtenir un prototype. Grâce à la fabrication additive, l'imagination des créateurs prend forme en quelques heures.

Cette technologie révolutionnaire offre aux entreprises et aux particuliers l'opportunité de diminuer largement leurs temps de production tout en leur donnant la capacité de rectifier rapidement d'éventuelles fautes.[7]

1.8. Atténuation des risques:

Les modifications et les rectifications sont usuelles dans le monde de la fabrication et peuvent avoir un impact important sur le coût final de la conception d'un produit.

Pouvoir vérifier un design en l'imprimant et effectuer les changements nécessaires jusqu'à l'obtention d'un produit prêt à l'emploi réduit considérablement les dépenses et les temps de conception. [8]

1.9. L'adaptation sur mesure:

L'impression 3D offre de nombreux avantages : elle permet de réduire les coûts, de limiter les risques liés à la conception, de repousser les limites de la créativité, d'accélérer le processus de production en une seule étape, tout en rendant possible la personnalisation des objets fabriqués. La fabrication additive se prête particulièrement bien à la réalisation de pièces uniques. Contrairement aux méthodes traditionnelles qui exigent l'adaptation de nombreux outils pour chaque modification, il suffit ici d'ajuster le fichier numérique pour personnaliser la pièce. Cette technologie innovante rend la production de pièces sur mesure à la fois simple et économiquement viable [9]

1.10. L'analyse SWOT :

L'analyse ou matrice SWOT, de l'anglais Strengths (atouts), Weaknesses (faiblesses), Opportunities (opportunités), Threats (menaces) est un outil de stratégie d'entreprise permettant de déterminer les options offertes dans un domaine d'activité stratégique tout comme la fabrication additive qui se distingue par sa rapidité, la possibilité de fabriquer plus aisément des pièces comportant des canaux internes, le recours à des structures lattices permettant l'allègement des pièces ou une fabrication multi-matériaux. Elle permet également de diminuer les assemblages et de faciliter la personnalisation. Cependant, il existe quelques obstacles qui freinent le déploiement de cette technologie, notamment pour la production en masse.

a) Atouts

- ✓ Réduction des délais de fabrication ;
- ✓ Conception innovante et optimisée;
- ✓ Diminution des opérations d'assemblages;
- ✓ Production des formes complexes impossibles à obtenir avec les techniques classiques
Demoulage et d'usinage;
- ✓ Production de produits personnalisés;
- ✓ Réalisation de pièces de petites dimensions ;

- ✓ Diminution des stocks;
- ✓ Délocalisation/décentralisation facile de la production (avec des imprimantes connectées Wi-Fi) [1].

b) Faiblesses

- ✓ Prix de machines est élevés ;
- ✓ Temps de réalisation de meurent encore trop long, comparés à ceux des chaines de production de masse optimisées ;
- ✓ Matériaux chers et peu variés ;
- ✓ Résines photo sensibles mono-utilisation ;
- ✓ Taille des pièces limitée par la capacité de la machine (en général 300x300x300mm³) ;
- ✓ Technologies de fabrication additive ne permettent pas d'assurer une reproductibilité de Certaines pièces;
- ✓ Caractéristiques mécaniques et qualité des états de surface obtenues pouvant rester éloignées de celles attendues (rugosité, contraintes résiduelles élevées, porosité) ;
- ✓ Certification de ces technologies (normes procédés et matériaux) : les nombreux matériaux, machines et procédés rendent l'élaboration de standards pour la qualification et la certification compliquée [1].

c) Opportunités

- ✓ Applications « phares » dans les domaines de l'aéronautique, tel que l'injecteur de carburant;
- ✓ Accès facile à la technologie pour une TPE/PME ;
- ✓ Développement de nouveaux matériaux;
- ✓ Émergence de nouveaux fabricants et distributeurs de matières premières ;
- ✓ Développement de machines hybrides (machines combinant procédés additifs et soustractifs) ;
- ✓ Développement en cours pour fiabiliser les équipements et améliorer les caractéristiques mécaniques de pièces ;
- ✓ Augmentation des capacités des équipements [1].

d) Menaces

- ✓ Accès facile à l'utilisation du logiciel et de l'imprimante ce qui peut générer des Objets inappropriés comme des bombes ;

- ✓ Propriété intellectuelle poser a bientôt un problème car la reproduction d'objets sera facile : l'utilisation systématique d'un fichier 3D (peut ensuite être dupliqué) et les banques de données de modèles CAO rend la notion de droit d'auteur plus délicate à gérer [1].

**Chapitre II : Différentes Types De
Machines Et Matériaux Et Domaine
D'application De La Fabrication
Additive**

Dans ce deuxième chapitre nous présentons le procédé de mise en forme des matériaux par ajout de matière appelé fabrication additive, ainsi les éléments importants concernant ce procédé tel que les différents types de machines, les technologies existantes, les différents champs d'application et les matériaux d'impression...

II.1. Les différents types d'imprimantes 3D

II.1.1. Les imprimantes 3D cartésiennes:

Il s'agit des modèles les plus répandus sur le marché de l'impression FDM. En se fondant sur le modèle cartésien de la mathématiques, cette technologie exploite les trois axes – X, Y et Z – pour établir les emplacements corrects et l'orientation de la tête d'impression. Dans ce genre d'imprimante, le plateau d'impression se déplace généralement seulement sur l'axe Z, tandis que la tête d'impression opère en deux dimensions, c'est-à-dire sur le plan X-Y. Ultimaker et Makerbot, les deux marques les plus réputées sur ce marché, appartiennent à cette classe de machines.

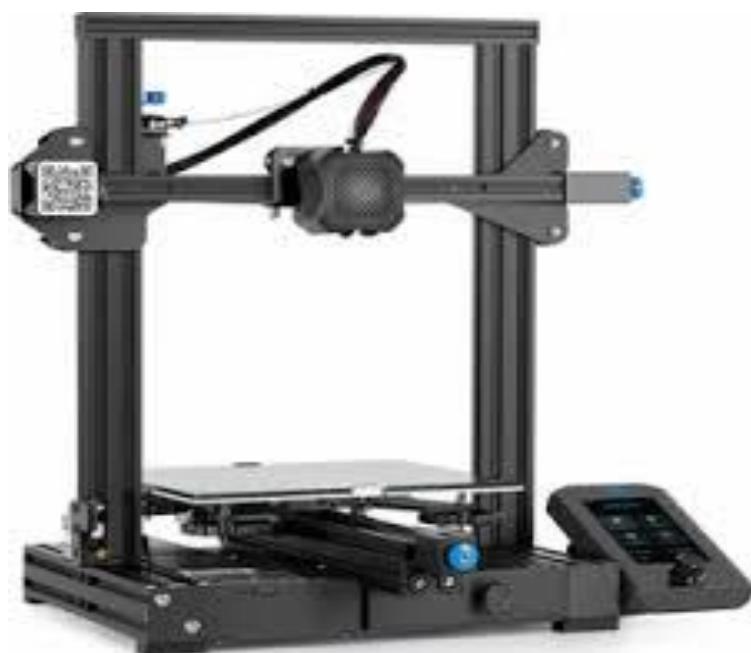


Figure II.01: l'imprimante cartésienne

II.1.2. Les imprimantes delta:

Ces appareils opèrent selon un système de coordonnées cartésiennes ; leur trait distinctif majeur est la plateforme d'impression circulaire liée à l'extrudeuse qui est ancrée à trois emplacements dans la structure triangulaire. Chaque point d'attache se déplace verticalement, ce qui définit la localisation et l'orientation de la tête d'impression. Les imprimantes Delta ont été élaborées dans le but de rendre le processus d'impression plus rapide. En ce qui concerne la plate-forme d'impression fixe, elle est bénéfique pour des projets particuliers. Cependant, on affirme fréquemment que ce genre d'imprimante ne possède pas la même précision qu'une imprimante cartésienne traditionnelle.



Figure II.02: L'imprimante Delta

II.1.3. Les imprimantes 3D polaire:

Ce genre d'imprimantes se sert du système de coordonnées polaires. La position n'est pas définie par les trois coordonnées X, Y et Z, mais plutôt par un angle et une distance, ce qui signifie que la plateforme pivote et se déplace simultanément dans une seule direction. L'extrudeuse se déplace de manière verticale. L'avantage majeur de cette méthode réside dans le fait qu'elle nécessite uniquement deux moteurs, alors que les imprimantes cartésiennes en requièrent au moins trois. À long terme, l'imprimante polaire présente une meilleure efficacité énergétique.



Figure II.03: L'imprimante 3D polaire

II.1.4. Imprimante 3D avec un bras robotique :

On connaît généralement les bras robotiques pour leur rôle dans l'assemblage de pièces sur les chaînes de production industrielles, en particulier dans d'importantes usines automobiles. On les utilise rarement pour l'extrusion de filament. L'impression 3D à l'aide de ces appareils est encore en phase de développement, seules quelques entreprises exploitent cette technologie pour la construction de maisons, par exemple.

Cependant, l'adoption de cette technique d'impression FDM s'accroît, car le processus n'est pas contraint à une surface d'impression, ce qui lui confère une grande mobilité. Les bras de robotisation ont la capacité de pivoter à 360°, ce qui autorise l'impression de volumes considérables. La conception de structures complexes est facilitée par la flexibilité offerte par le positionnement de la tête d'impression. Il convient néanmoins de souligner que la qualité d'impression finale n'égale pas celle des imprimantes cartésiennes traditionnelles.



Figure II.04: Imprimer une maison avec un bras robotisé

II.2. Fonctionnement de l'impression 3D:

La première étape consiste à dessiner la forme souhaitée sur un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Il existe un nombre important de logiciels sur le marché qui permettent de créer ces modèles 3D. Les plans sont ensuite transmis à l'imprimante. En deuxième étape, l'imprimante traite cette modélisation 3D conformément à la logique de fabrication additive : c'est-à-dire découper la modélisation 3D en couches 2D grâce à un logiciel approprié. Autour de ces deux grandes fonctions, d'autres logiciels sont intégrés notamment pour assurer la communication entre l'imprimante et les ordinateurs.

L'imprimante 3D reçoit donc une série d'instructions qu'elle va restituer en objets 3D. Plusieurs technologies existent pour passer de couches 2D à un objet 3D. Deux grands types de procédés sont en fait utilisés pour former les objets :

Soit la matière travaillée peut entrer en fusion et en quel cas, elle peut être fondues peu à peu pour obtenir la forme souhaitée. (Exemple : polymère).

Soit la matière peut être solidifiée sous l'action de la chaleur ou de la lumière (laser).
(Exemples : résine ou alliage de titane).

Mais dans les deux cas, l'imprimante 3D « pense » couche par couche pour obtenir la forme 3D. Chacune de ces méthodes implique des qualités propres qui jouent sur la durée nécessaire à l'obtention de l'objet mais aussi sur leur taille limite [1].

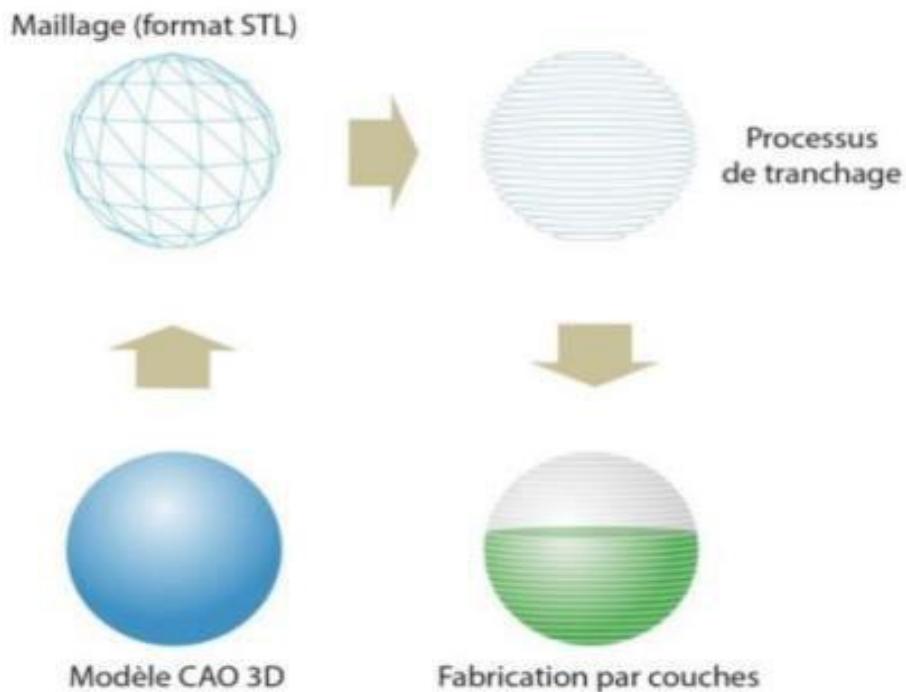


Figure II.05: Principe général de la fabrication additive par couche.

II.3. Les différents types de technologie d'impression 3D :

Il existe différentes méthodes d'impression 3D qui ont été développées pour construire des structures et des objets 3D. Un certain nombre d'entre eux sont répandus de nos jours, et quelques-uns sont tombés au bord du chemin.

Vous trouverez ci-dessous une liste des technologies les plus couramment utilisées en impression 3D aujourd'hui :

II.3.1. Modélisation des dépôts fondus (FDM)

La technologie FDM, aussi connue sous le nom de fabrication par dépôt de filament fondu (FFF), est l'une des méthodes d'impression 3D les plus répandues, notamment pour les machines accessibles au grand public.

Cette technique consiste à créer un objet en superposant des couches de matière thermoplastique. Le filament, chauffé jusqu'à devenir semi-liquide, est extrudé à travers une buse qui le dépose avec précision selon la forme définie par le modèle numérique. Le déplacement de la buse ou du plateau, selon le type d'imprimante, permet de former progressivement l'objet couche après couche.

Le temps nécessaire pour l'impression varie selon la taille et la complexité de la pièce. Les petites créations se réalisent rapidement, alors que les objets plus grands ou détaillés demandent davantage de temps.

Le PLA et l'ABS sont les matériaux couramment employés, parmi d'autres. Sous l'effet de la chaleur, ces deux thermoplastiques deviennent malléables. Facile à imprimer, le PLA est biodégradable et non toxique, alors que l'ABS, qui est plus solide et durable, requiert des températures supérieures (de 225 °C à 250 °C) pour son extrusion.

La technologie FDM est couramment utilisée pour produire des pièces techniques, des prototypes et même des articles finis. En utilisant des matériaux tels que le PLA, elle trouve également des utilisations dans les secteurs de l'alimentation et de la médecine, en particulier pour les emballages ou les appareils non invasifs.

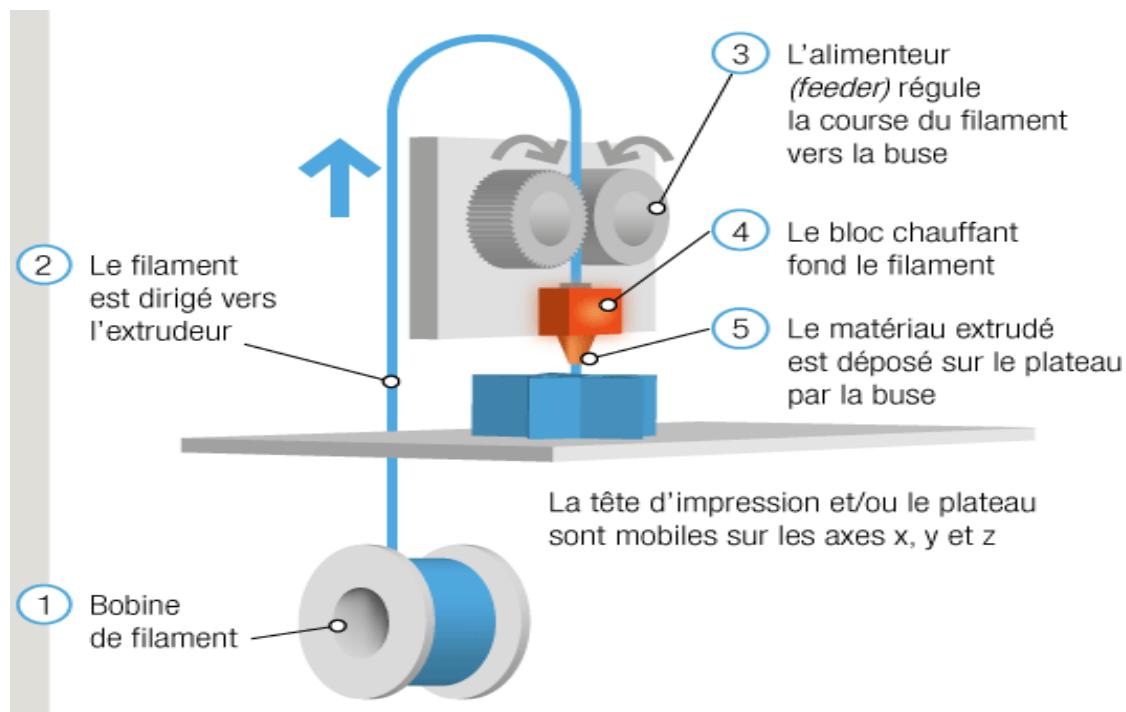


Figure II.06 : Schéma du processus FDM

II.3.2. Stéréolithographie (SLA):

La stéréolithographie, ou SLA (Stéréolithographie Apparatus), repose sur la capacité de certaines résines liquides à durcir sous l'effet d'une source lumineuse, généralement un laser ou une lumière UV. Cette méthode d'impression 3D ne fonctionne pas comme les imprimantes classiques à jet d'encre. Au lieu d'extruder du matériau, elle utilise un bain de résine photosensible que la lumière vient solidifier couche par couche.

Lors du processus, un faisceau laser trace la forme de la pièce sur la surface de la résine liquide, provoquant sa polymérisation. Une fois une couche solidifiée, la plateforme s'abaisse légèrement, et le processus se répète jusqu'à obtenir l'objet final. Les pièces produites par SLA se distinguent par leur finition lisse et leur grande précision, bien que le rendu final dépende de la qualité de la machine utilisée.

Une fois imprimé, l'objet doit être soumis à un post-traitement : il est initialement rincé avec un solvant pour retirer les restes de résine, puis généralement positionné dans un four UV afin de parfaire la polymérisation et d'augmenter la solidité de la structure.

La durée de l'impression dépend de la taille de l'objet et des performances de l'imprimante. Avec des équipements de taille réduite, les modèles simples peuvent être imprimés en 6 à 8 heures, alors que les impressions plus imposantes pourraient nécessiter plusieurs jours.

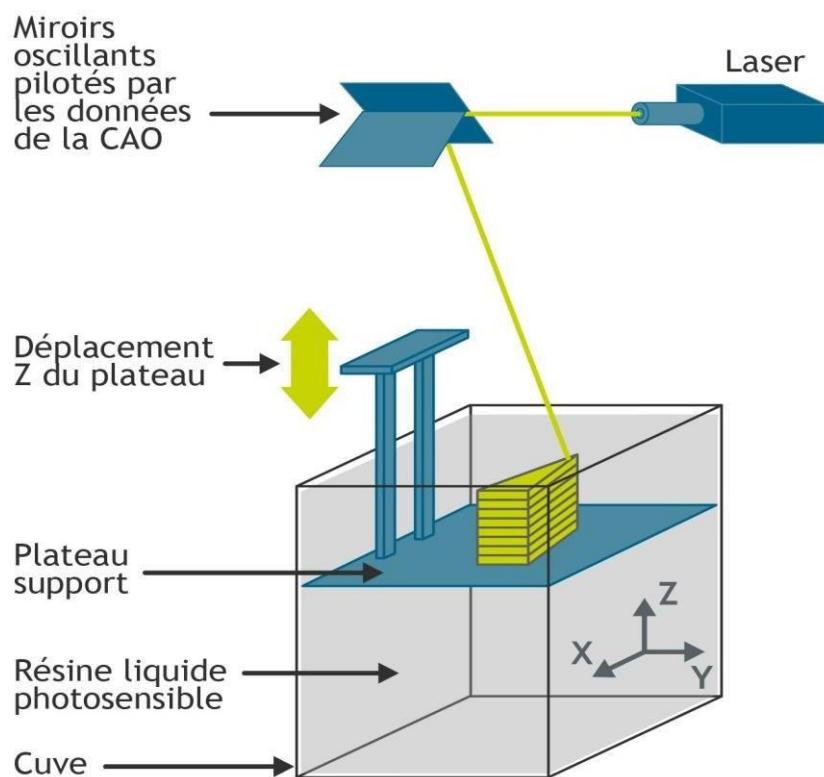


Figure II.07 : Schéma représentant le fonctionnement de l'impression par stéréolithographie

II.3.3. Frittage laser sélectif (SLS):

SLS est une technique qui utilise un laser comme source d'alimentation pour former de solides objets imprimés en 3D. Cette technique a été développée par Carl Deckard, un élève de l'Université du Texas, et son professeur Joe Beaman à la fin des années 1980.

La différence la plus notable entre SLS et SLA est qu'elle utilise du matériau en poudre dans la cuve plutôt que de la résine liquide dans un cube, comme le fait SLS. Contrairement à certains autres processus de production additive, tels que FDM et SLA, SLS n'a pas besoin d'utiliser d'autres structures de support car l'objet à imprimer est entouré de poudre non frittée.

La procédure débute par l'élaboration d'un fichier de conception assistée par ordinateur (CAO), qui doit par la suite être transformé en format Stl à l'aide d'applications spécifiques. Les matériaux pouvant être imprimés vont du nylon, du verre et de la céramique à divers métaux comme l'aluminium, l'argent ou l'acier. Cette technologie est très prisée pour l'impression 3D de produits sur mesure, grâce à la vaste gamme de matériaux susceptibles d'être utilisés avec ce type d'imprimante 3D.

La technologie SLS est davantage utilisée par les fabricants que par les passionnés d'impression 3D à domicile, car elle requiert des lasers puissants, ce qui rend ces imprimantes assez onéreuses.

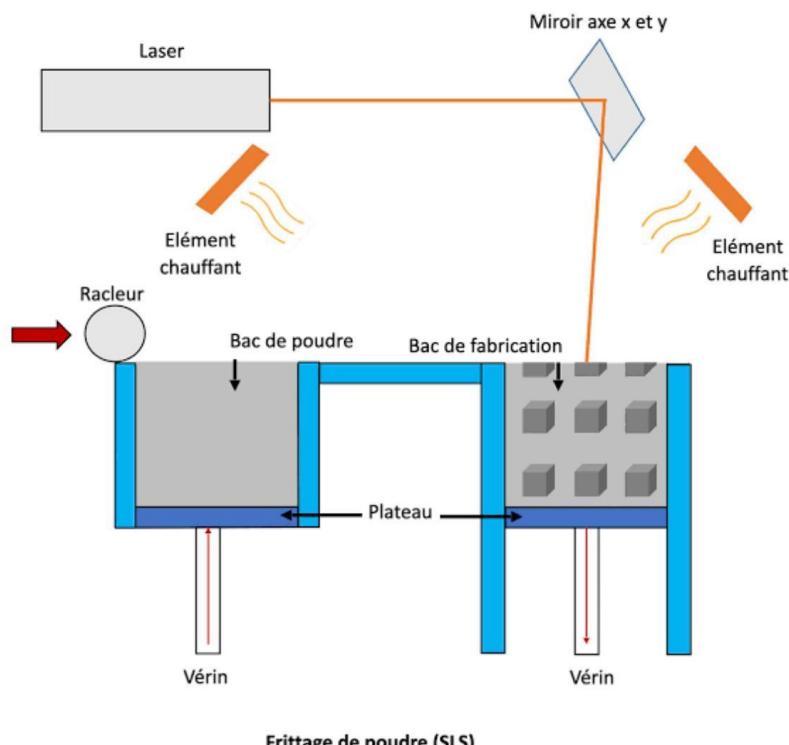


Figure II.08: Le procédé de fabrication additive SLS

II.3.4. Le reste-SLM, LOM et EBM:

Les trois derniers types de technologies d'impression 3D sont la fusion laser sélective (SLM), la fabrication d'objets stratifiés (LOM) et la fusion par faisceau numérique (EBM). Au cours des deux dernières décennies, ces technologies sont tombées en désuétude ou se sont révélées économiquement non viables [5].

II.4. Matériaux d'impression:

Cette technologie offre aujourd'hui un très large panel de consommable en effet chaque procédé d'impression 3D fonctionne avec son propre type de matériaux c'est pour cela on les a classés en trois catégories : polymères, composites et autres matériaux.

II.4.1. Les polymères:

a) Les thermoplastiques

- ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène)**

Les techno-polymères ABS constituent une catégorie distincte de polymères. On les appelle ainsi parce qu'ils sont désignés par les premières lettres des trois monomères qui le composent : l'acrylonitrile, qui assure la résistance thermique face au vieillissement ; le butadiène, qui participe à la conservation des caractéristiques face aux basses températures, à la robustesse et à la résistance aux impacts ; et le styrène, qui apporte rigidité et facilité de mise en forme. Généralement, les ABS ne tiennent pas face aux conditions atmosphériques. Si les meubles en ABS sont placés à l'extérieur, leur couleur peut changer et s'estomper [6]. On préfère généralement l'ABS au PLA lorsque l'on requiert une résistance plus élevée à la chaleur et une solidité accrue.

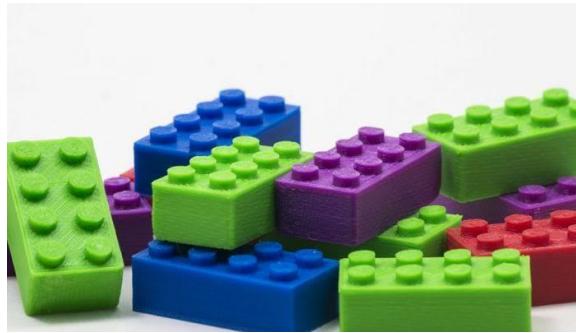


Figure II.09: Exemples d'objet en ABS.

- **PLA (Polylactique)**

Le produit de l'acide polylactique est un intermédiaire obtenu par la fermentation du sucre ou de l'amidon (comme le maïs ou la betterave) : ce processus de fermentation est réalisé par des bactéries lactiques. Par la suite, l'acide lactique est polymérisé grâce à une méthode de fermentation innovante, pour se transformer en acide polylactique/polylactide (PLA). Ce matériau transparent est comparable aux produits thermoplastiques synthétiques largement utilisés, non seulement pour ses caractéristiques mécaniques et thermiques, mais il peut également être façonné sur les équipements en place pour produire des films, des pièces moulées, des gobelets, etc. [6]. Le PLA est le polymère le plus simple à imprimer et garantit une qualité visuelle satisfaisante. Les impressions sont extrêmement robustes et rigides, cependant le filament se brise facilement.



Figure II.10: Exemple d'objet en PLA.

- **Les Polyamides**

Des polyamides tels que le PA11 et le PA12 sont biocompatibles, ce qui les rend aptes à être utilisés pour des éléments en contact alimentaire (à l'exception de ceux qui contiennent de l'alcool). Contrairement au PLA et à l'ABS, ils offrent des surfaces plus lisses sans ondulations.

Ces informations ont été recueillies jusqu'en octobre 2023. Ce matériau, qui est formé de structures semi-cristallines, constitue un équilibre satisfaisant entre propriétés mécaniques et chimiques, ce qui se traduit par sa stabilité thermique, sa rigidité et sa flexibilité. Ces bénéfices conduisent à une vaste sélection d'applications et un haut degré de précision. Une qualité élevée utilisée notamment pour la production d'engrenages, de composants pour l'aéronautique, l'automobile, la robotique et les prothèses médicales [7].



Figure II.11: Exemple d'objet en polyamide.

- **PET(Polytéraphthalate)**

Le polytéraphthalate d'éthylène, couramment désigné par l'acronyme PET, est surtout employé dans la fabrication de bouteilles en plastique. Il s'agit d'un matériau parfait pour les composants en contact avec la nourriture, semi-rigide et présentant une excellente durabilité. Pour obtenir des impressions optimales, il faut atteindre une température comprise entre 75°C et 90°C, car la température de transition vitreuse du PET est de 70°C. Souvent présenté sous forme de filament transparent, la version la plus répandue dans le domaine de l'impression 3D est le PETG, un copolymère obtenu par la copolymérisation du PET avec le cyclohexano diméthanol [7].



Figure II.12 : Exemples d'objet en PET.

- **PP (Le Polypropylène)**

Un autre thermoplastique très utilisé en automobile, pour les emballages, les vêtements professionnels, et dans la fabrication d'une centaine d'objets du quotidien. Le polypropylène (PP) est connu pour sa résistance à l'abrasion et sa capacité à absorber les chocs, en plus d'une relative rigidité et flexibilité. Un de ses inconvénients est sa faible stabilité thermique et sa sensibilité au rayonnement UV, raison pour laquelle plusieurs fabricants d'imprimantes ont développé des dérivés de ce matériau, les simili-polypropylènes (Exemple : filaments de polypropylène renforcé avec la fibre de verre pour éviter le phénomène du warping), afin de renforcer ses propriétés physiques et mécaniques [7].



Figure II.13: Exemple d'objet en PP

b) Les Résines

La résine est un polymère liquide photosensible. L'impression avec ce matériau consiste en un dépôt successif de couches qui sont immédiatement solidifiées par UV. La pièce prend alors les allures d'une pièce plastique rigide et lisse [9].

D'après une recherche qui a été faite en Corée du sud. Ils ont annoncé qu'il allait Bientôt pouvoir commencer la commercialisation de son premier œil artificiel imprimé en 3D (2020), fabriqué par une photo polymérisation où une lumière laser UV est projetée sur une résine liquide photosensible qui se durcit au contact de celle-ci. La lumière fabrique ainsi la pièce selon la forme souhaitée, couche par couche [9].

II.4.2. Les matériaux composites:

Les composites sont créés lorsqu'un deuxième matériau : un renfort est ajouté à un Matériau de base : la matrice. L'un des matériaux de base les plus communs en impression 3D est le polyamide utilisé dans les systèmes de fusion sur lit de poudre, mais aussi grandement utilisé dans les systèmes d'extrusion de matière (FDM/FFF) [10].

Les matériaux ajoutés pour former un composite comprennent le verre, l'aluminium et les fibres de carbone. Les matériaux composites sont souvent utilisés afin d'améliorer les propriétés du produit fini, telles que sa résistance à la traction, sa densité ou encore sa rigidité [10]. Depuis une trentaine d'années, les matériaux composites occupent une place toujours plus importante dans de nombreux secteurs industriels. Utilisés pour des applications qui exigent de hautes performances, ils ont l'avantage d'être beaucoup plus légers que les matériaux métalliques. Aujourd'hui, de nombreux progrès ont été accomplis, mais la production de pièces critiques souvent complexes, avec des matériaux composites peut relever du défi, et exige des connaissances approfondies et spécialisées.

a) L'alumide

Les objets en alumide sont fabriqués à partir d'une combinaison entre polyamide et Aluminium en poudre en utilisant la technologie de frittage sélectif par laser (SLS). Avec une surface légèrement poreuse d'un aspect sableux et granuleux, ce matériau offre une grande solidité, et supporte des températures moyennement élevées et aux chocs et une relative flexibilité. Cependant, des post-traitements sont généralement nécessaires : meulage, polissage, revêtement et fraisage par exemple.

L'alumide est utilisé pour des modèles complexes, pièces de conception ou pour des Petites séries de modèles fonctionnels ayant besoin d'une rigidité importante et d'un aspect proche de l'aluminium. La technique employée implique des limites géométriques faibles [7].



Figure II.14: Exemples d'objet en alumide.

II.4.3. Autres matériaux

❖ Les métaux

L'aluminium : ce matériau est un excellent compromis entre légèreté et solidité. En plus d'être résistant à la corrosion, il peut être soudé. Par rapport aux aciers, il est moins robuste à la fatigue et aux hautes températures, il est principalement utilisé dans les domaines où la notion de poids est essentielle : pièces mécaniques des voitures de course, aéronautique, aérospatiale, vélos etc.... [11].



Figure II.15: Impression 3D Aluminium avec la technologie SLM

Le titane : c'est le matériau phare de la médecine et de l'aéronautique grâce à son excellent compromis entre solidité et poids, en plus de sa grande résistance à la corrosion et sa biocompatibilité. Comme pour l'aluminium, les alliages de titane présentent des propriétés mécaniques et un comportement chimique améliorés [11].



Figure II.16 : Exemple d'objet en titane.

❖ La Céramique

Présent dans les applications médicales, sanitaires ou industrielles la céramique est de plus en plus utilisée dans l'impression 3D. Les objets céramiques peuvent être imprimés avec la technique du frittage sélectif par laser (SLS) à partir d'une poudre sèche préalablement comprimée, ou par solidification du matériau à l'état liquide, processus ressemblant à la technique FDM avec une tête d'impression modifiée [12].

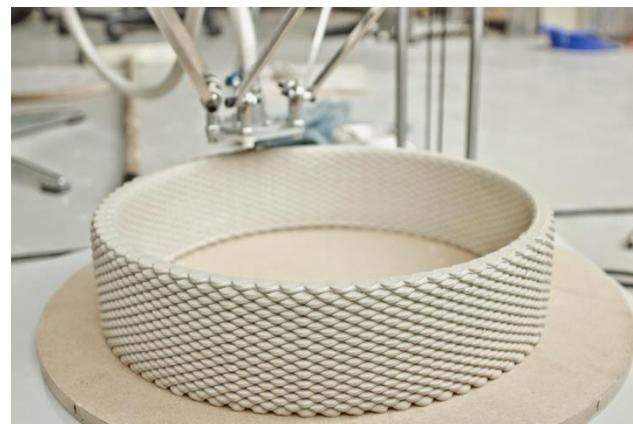


Figure II.17 : Exemple d'objet en céramique.

❖ Le Sable

Le sable est utilisé principalement pour la fabrication des moules de fonderie mais il peut-être aussi très utile dans le domaine de l'architecture quand il est combiné avec d'autres matériaux [12].



Figure II.18: Exemple d'objet en sable.

❖ Le Béton

Le même principe d'impression des céramiques peut être utilisé pour imprimer du béton ou un d'importe quel autre matériau composite fabriqué à partir d'une pâte humide [12].



Figure II.19: Exemple d'objet en Béton

❖ Le Bois

la forme de filament, le bois est utilisé dans de nombreuses technologies de l'impression 3D. Il ne s'agit pas de bois brut mais de bois composite, matériau composé de fibres de bois et de résine de polymère. Très utilisé pour l'habillage et l'isolation de bâtiment et de mobilier extérieur, ce matériau souple a aussi l'avantage d'être en partie fabriqué en bois recyclé. Le bois composite, ou WPC pour Wood-plastic composite en Anglais, résiste aux intempéries, au soleil et ne pourra pas avec le temps. De plus, il ne nécessite pas d'entretien particulier comme le demanderait du vrai bois. Ces avantages en font une matière première intéressante pour imprimer des objets à l'aspect du bois mais sans ses inconvénients. La température d'impression, comprise entre 185 et 230°C, permet d'obtenir une couleur claire ou foncée à partir d'un bois standard. On peut donc nuancer et apporter une touche personnelle sans couche additive [12].



Figure II.20: Exemple d'objet en bois

II.5. Les champs d'applications:

En dehors de ses avantages en termes de rapidité et de précision, ce qui rend l'impression 3D révolutionnaire, ce sont ses applications potentielles. Elle s'applique à des domaines qui peuvent sembler évidents, mais également à des domaines qui pourraient paraître plus insolites. Quelques exemples d'utilisation :

- Le Domaine médical
- La construction et architecture
- Le Domaine culinaire
- Le recyclage des objets du quotidien
- L'habillement
- Automobile

II.5.1. Applications médicales de l'impression 3D :

Le domaine de la médecine profite aussi de l'impression 3D, avec la création d'un matériau semblable à un os ou encore la création de prothèses et implants (hanches artificielles, bras, appareils dentaires et auditifs personnalisés) et exosquelettes personnalisés. Récemment les chercheurs de l'AECS (université de Wollongong) ont conçu un crayon, le Bio Pen, capable d'imprimer des cellules souches (nerveuses, musculaires, osseuses) sur des zones lésées.

Il est possible d'imprimer des prothèses adaptées à la morphologie de la personne. Un bras cassé oblige aujourd'hui à poser un plâtre présentant des problèmes d'hygiène.

L'impression 3D permet d'imprimer des prothèses parfaitement adaptées aux besoins de la personne. Les avantages de cette technologie sont que la prothèse peut être imprimée en quelques heures

Avant une opération, un chirurgien peut imprimer en 3D une réplique de l'organe à opérer fin de savoir exactement à quoi s'attendre, ce qui lui permettra de gagnèrent temps et en efficacité.

L'impression tridimensionnelle permet de matérialiser des espaces creux ou des organes mous.

Des tissus humains peuvent également être créés grâce à l'impression 3D par laser, c'est le défi de l'entreprise BordelaisePoietis. L'entreprise travaille avec les grands

Groupes cosmétiques et les laboratoires pharmaceutiques pour des applications industrielles et a pour objectif de se tourner vers la médecine génératrice.

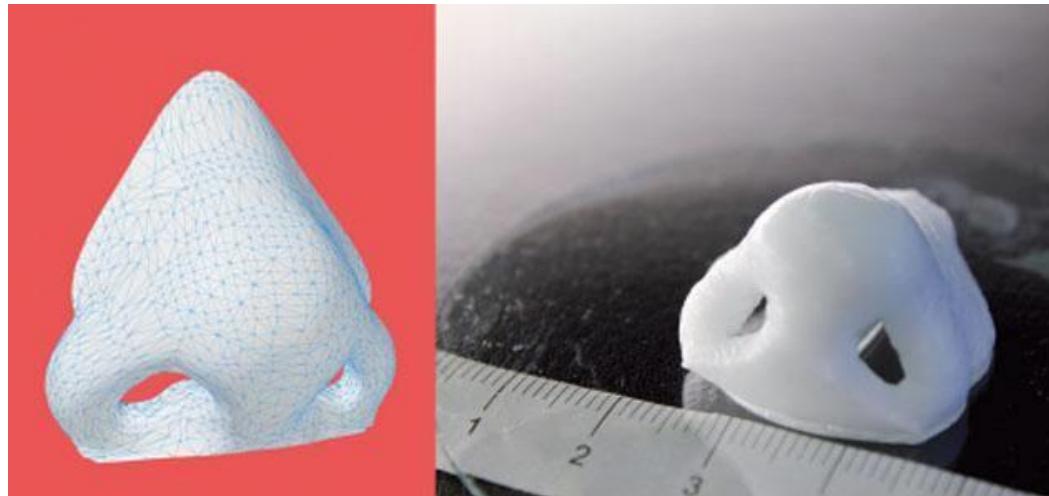


Figure II.21: une pointe de nez en FA

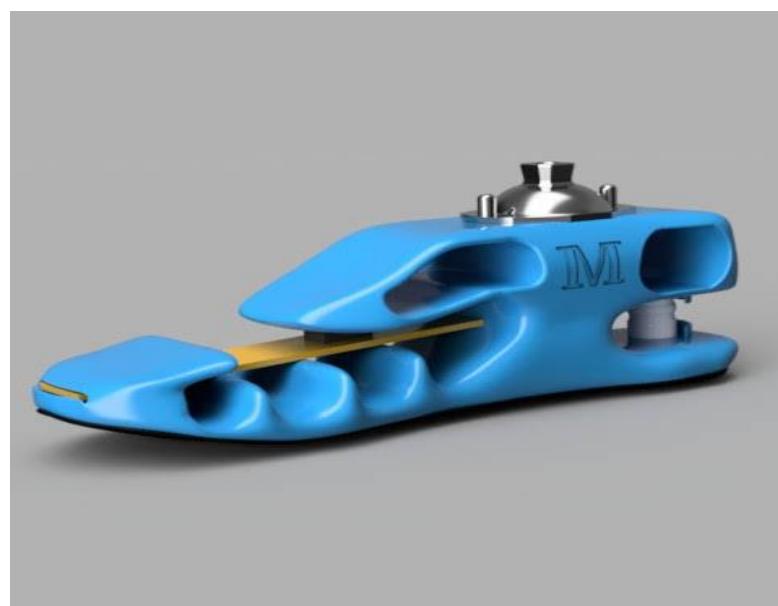


Figure II.22 : prothèse de pied imprimée en3D

II.5.2. Architecture Et Bâtiment:

La technologie d'impression 3D permet de construire des bâtiments de façon très précise en prenant en compte de très petits détails et dans un temps réduit. De nombreux cabinets d'architecture ont découvert le potentiel de la technologie d'impression 3D notamment dans la construction de modèles.

En 2013, la société WinSun a bâti dix maisons et une villa, par impression 3D.

En mars 2017, un start up américaine a imprimé une maison entière en 3D en vingt- quatre heures seulement. L'entreprise Apis Cor et PIK group ont mis sur pied une petite maison dans le village russe de Stoupino. Les gains d'argent et de temps sont considérables, c'est une véritable révolution dans le secteur de l'architecture et le monde de la construction La startup explique pouvoir faire une économie de 25 % à 40 % par rapport aux coûts engendrés pour la construction classique d'une maison.

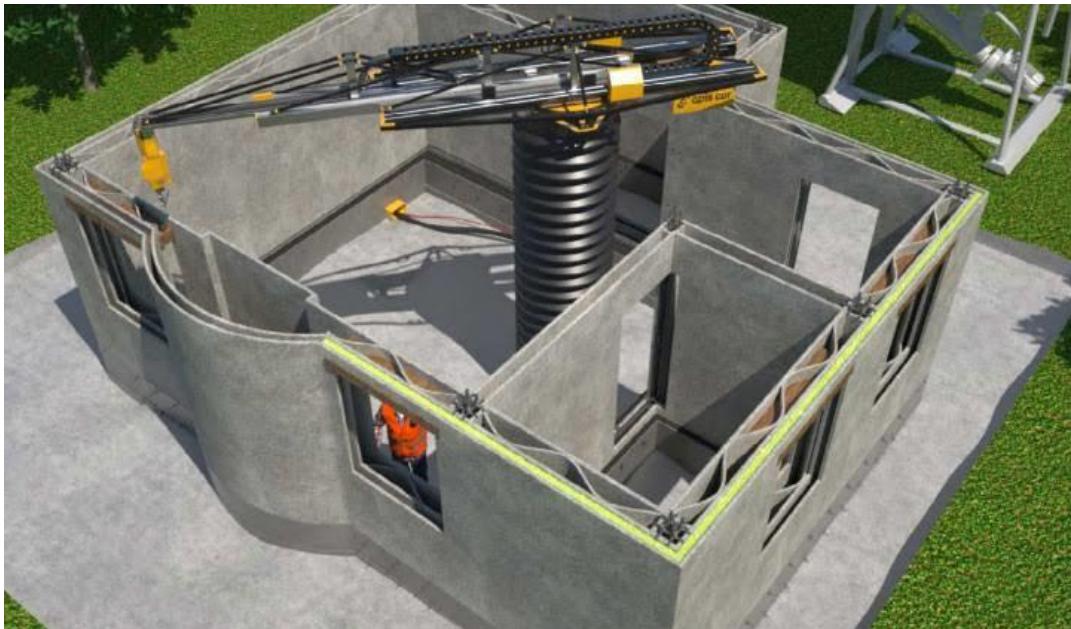


Figure II.23: Imprimer une maison en 3D

II.5.3. Impression 3D alimentaire:

Dans le domaine de l'alimentaire il est également possible d'imprimer en 3D. Par exemple à Londres le restaurant Food Ink imprime ses plats en 3D. Le restaurant possède de plusieurs imprimantes 3D destinées à une utilisation alimentaire uniquement. Elles sont composées de plusieurs branches d'une très grande précision et peuvent reproduire des dessins complexes. Cette technologie permet de reproduire des formes et dessins complexes qu'aucun cuisinier ne pourrait dessiner.

La startup Natural Machines a créé une imprimante 3D exclusivement alimentaire, la Foodini, proposée aux restaurateurs et aux traiteurs mais également dans les secteurs de la santé pour les hôpitaux.



Figure II.24: Impression 3D alimentaire

II.5.4. Bijoux:

Il est désormais possible d'imprimer des bijoux en 3D, permettant en joaillerie d'exprimer leur créativité : bagues, pendentifs...etc.



Figure II.25 : Bijoux imprimé en 3D

II.5.5. Automobile:

L'industrie automobile a grande ment bénéficier de la rapidité d'exécution et de la facilité de personnalisation offertes par l'impression 3D.

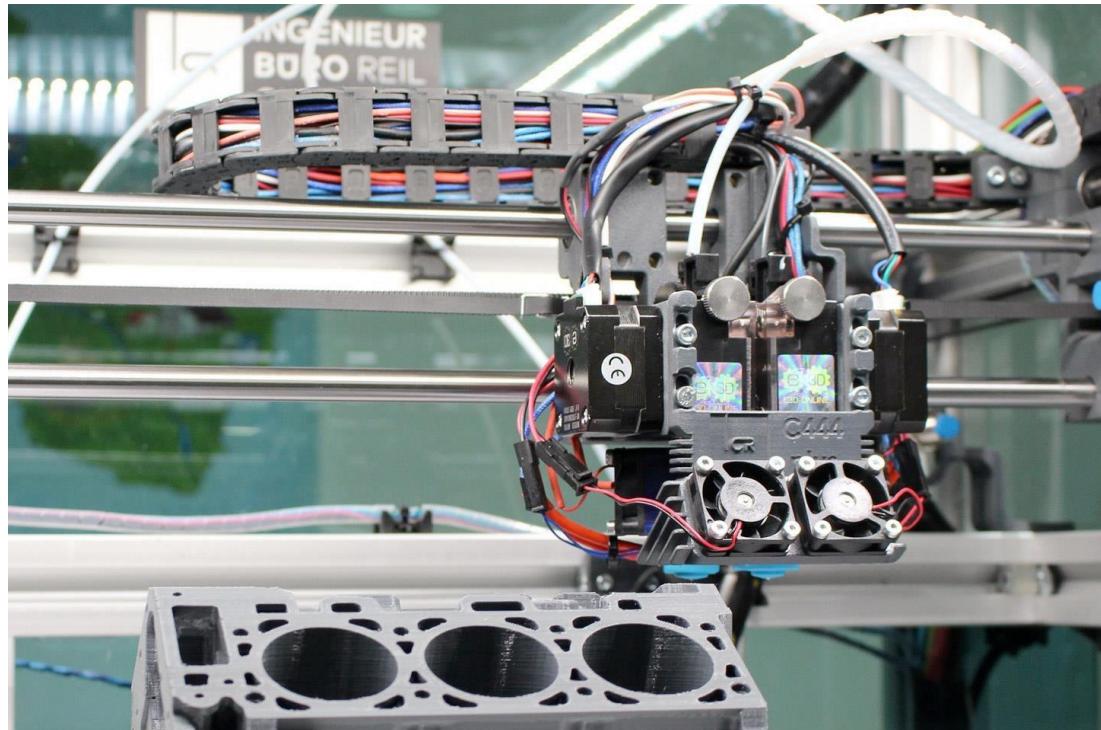


Figure II.26:La technologie 3D dans l'automobile

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

Pour imprimer un objet en 3D, il est d'abord indispensable d'utiliser des logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO), qui servent à définir les caractéristiques de l'objet telles que les volumes, les proportions ou encore la densité. Ensuite, une imprimante 3D adaptée est utilisée pour réaliser l'objet. Dans ce chapitre, nous détaillerons les différentes étapes de modélisation ainsi que les logiciels employés au cours de notre étude.

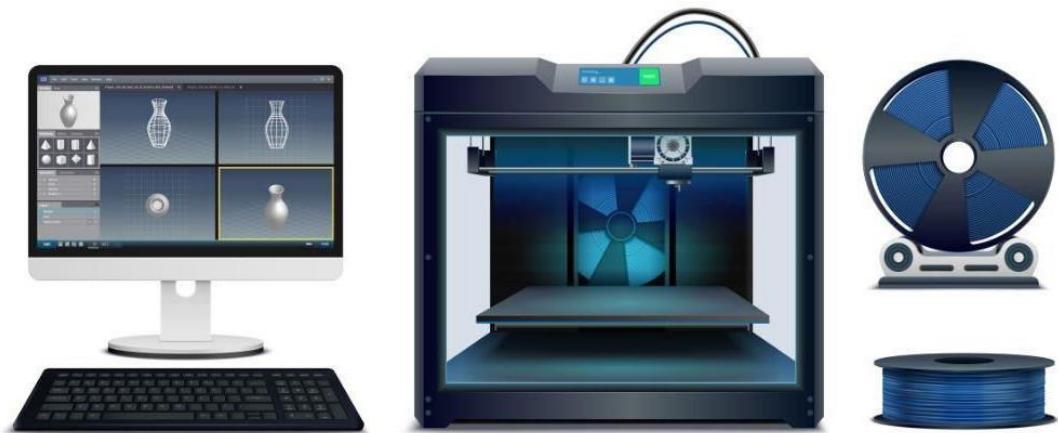


Figure III.01 : Equipment nécessaire pour imprimer en 3D

III. Les étapes pour imprimer en 3D

III.1. Obtenir ou créer un modèle 3D:

Sans modèle, pas d'impression 3D (tout comme l'on n'imprime pas sur une imprimante classique sans fichier Word, Excel...). Trois solutions peuvent s'offrir pour le modèle 3D:

a- On dessine notre modèle 3D à l'aide d'un logiciel adapté comme (SolidWorks, Autocad, Autodesk fusion 360, Google SketchUp, blender, 3DS Max ou d'autres logiciels.

b- Les scanner 3D:

Pour répliquer une pièce déjà existante sans avoir à repartir de zéro, il est également possible de recourir à un scanner 3D. Par définition, les scanners 3D permettent d'obtenir un modèle 3D à partir d'un objet physique déjà existant, de la même

Manière que l'on viendrait scanner une feuille de papier. On retrouve ainsi des scanners fixes associés à un plateau rotatif ou bien des scanners manuels qui nécessitent de tourner autour du modèle à numériser.



Figure III.02 : Scanner 3d

C-Obtenir un modèle 3D :

La méthode la plus simple lorsque l'on n'a ni les moyens ni les compétences techniques, consiste à récupérer directement son fichier sur une plateforme dédiée. Il existe une multitude de sites web proposant gratuitement ce genre de modèles 3D (Thingiverse, happy 3D, Cults, Pinshape, MyMiniFactory).

III.2. Modélisation:

Toutes les pièces réelles fabriquées par la technique FDM sont constituées de plusieurs couches, et chaque couche est composée d'un réseau de filaments fondus. Alors pour modéliser ces pièces sur SolidWorks, nous devons les créer de la même façon. Donc, la pièce ou le modèle CAO, doit être constitué de plusieurs couches de fils virtuels. Ces fils doivent avoir une section qui est proche de la section du filament fondu réel. Pour modéliser des pièces obtenues par le procédé de fabrication additive de type FDM, nous avons suivi plusieurs étapes.

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

- Première étape

La création de la pièce tridimensionnelle de géométrie continue, puis l'enregistrer sous format STL. Cette dernière sera importée dans le logiciel « Slicer » qui va la découper en plusieurs couches suivant les paramètres de fabrication que nous sélectionnons [33].

- Deuxième étape

La simulation de la fabrication de la pièce à partir de code CN (programmation de Commande numérique) dans un environnement virtuel, en utilisant un interfaçage de plusieurs logiciels. Nous obtenons comme résultat de cette simulation un nuage de Points qui présentent le parcours de la buse de l'extrudeuse. Nous enregistrons ces Points dans un fichier texte sous forme de coordonnées cartésiennes.

- Troisième étape

La pièce sous format STL sera envoyée vers l'imprimante en question soit par wifi soit par clé USB et ce pour obtenir une pièce tridimensionnelle.

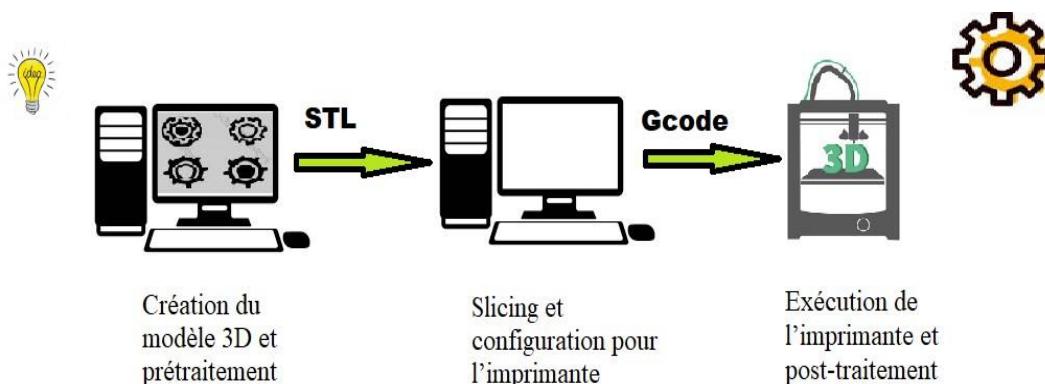


Figure III.03: Processus d'impression

III.3. Fichier de stéréolithographie (STL):

Le format de fichier STL est un format utilisé dans les logiciels de stéréolithographie (STL pour Stéréolithographie). Ce format a été développé par la société 3D Systèmes. Ce format de fichier est utilisé par de nombreuses autres sociétés. Il est largement utilisé pour faire du prototypage rapide et de la fabrication assistée par ordinateur. Le format de fichier STL ne décrit que la géométrie de surface d'un objet.

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

En 3d imensions. Ce format ne comporte notamment pas d'informations concernant la couleur, la texture ou les autres paramètres habituels d'un modèle de conception assistée par ordinateur.

III.4. Le Gcode:

Le Gcode est un langage pour contrôler des machines qui fonctionnent avec des coordonnées : imprimantes 3D, CNC, et toutes de sortes de machines qui travaillent sur 3 axes.

La machine est donc contrôlée pour se déplacer sur les 3 axes en fonction des coordonnées que lui envoie le G code et des actions à effectuer (extruder du filament ou non, augmenter la température ...)

C'est un peu le GPS de votre imprimante avec tout l'itinéraire et les actions à faire.

III.5. Les logiciels utilisés:

III.5.1. Logiciel modélisation 3D

a- SolidWorks :

SolidWorks, développé par Dassault Systèmes, est l'un des logiciels les plus populaires dans le domaine de la conception mécanique. Il offre un excellent compromis entre performance technique et facilité d'utilisation. SolidWorks permet une intégration complète des étapes de conception, allant de la modélisation 3D à la simulation, en passant par la préparation à la fabrication [20]. Le logiciel est généralement payant, mais une version d'essai gratuite est disponible pour une durée limitée.

Logiciel de tranchage

a- UltimakerCura:

Ultimaker Cura (ou plus simplement Cura) est un logiciel libre de découpe (slicer en anglais) pour impression 3D fourni par la société Ultimaker. Reconnu par des millions d'utilisateurs, Ultimaker Cura est le logiciel d'impression 3D le plus populaire au monde [21].

Exemple D'application : réalisation d'un pignon

III.2. Dessin de définition de la

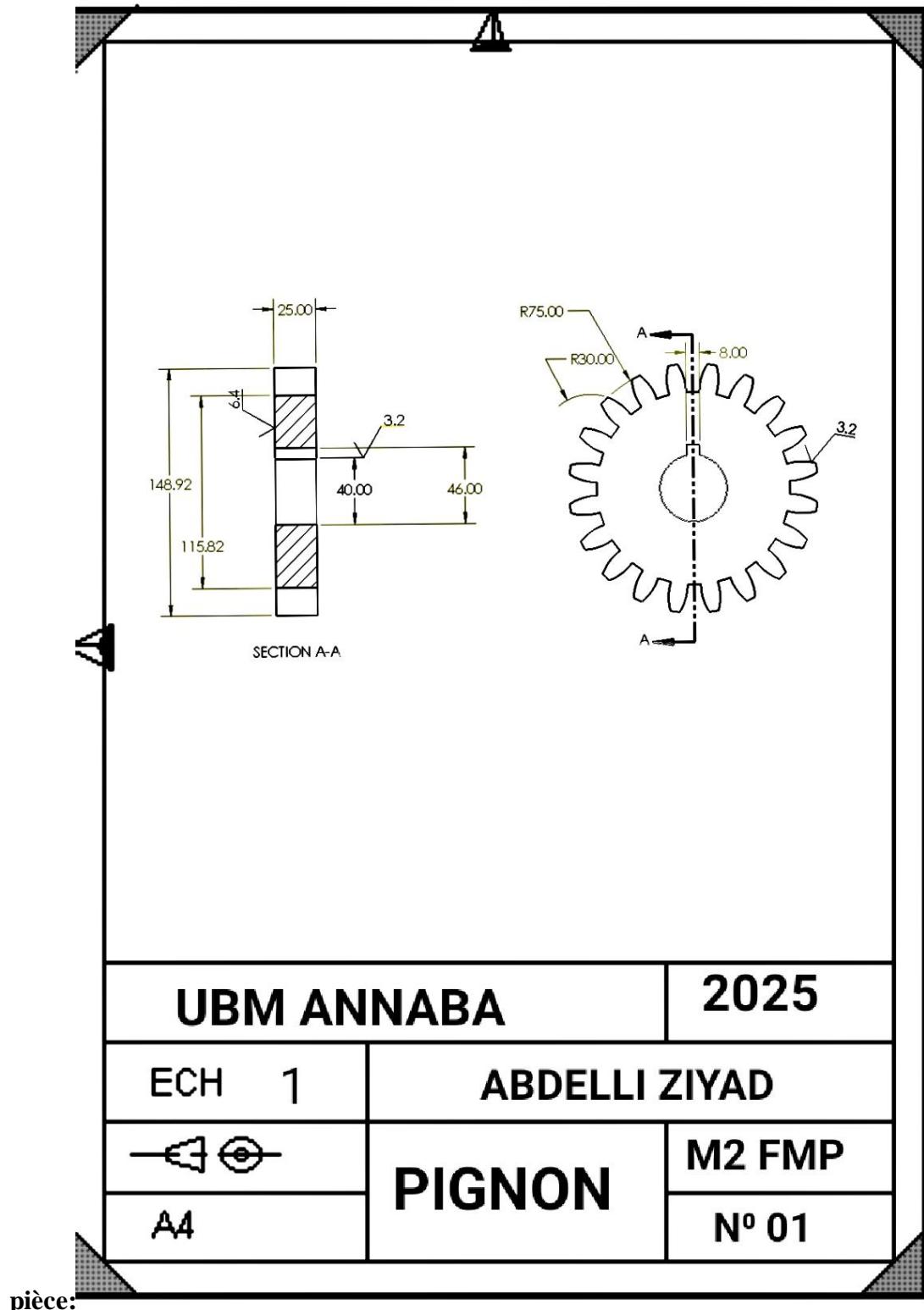


Figure III.03: Dessin de définition, de la pièce

III.3. Etapes de modélisation 3D:

III.3.1. Première étape : La création de la pièce tridimensionnelle

a) La première partie : Pour la partie modélisation 3D, on a choisi le logiciel SolidWorks.

On plusieurs étapes à suivre.

- Choisir un plan

Les esquisses peuvent être créées sur n'importe quel plan, face plane ou surface.

Le logiciel ou fournit trois plans centralisés à l'origine et dans notre cas on a opté pour l'axe (XY) (Figure III.4).

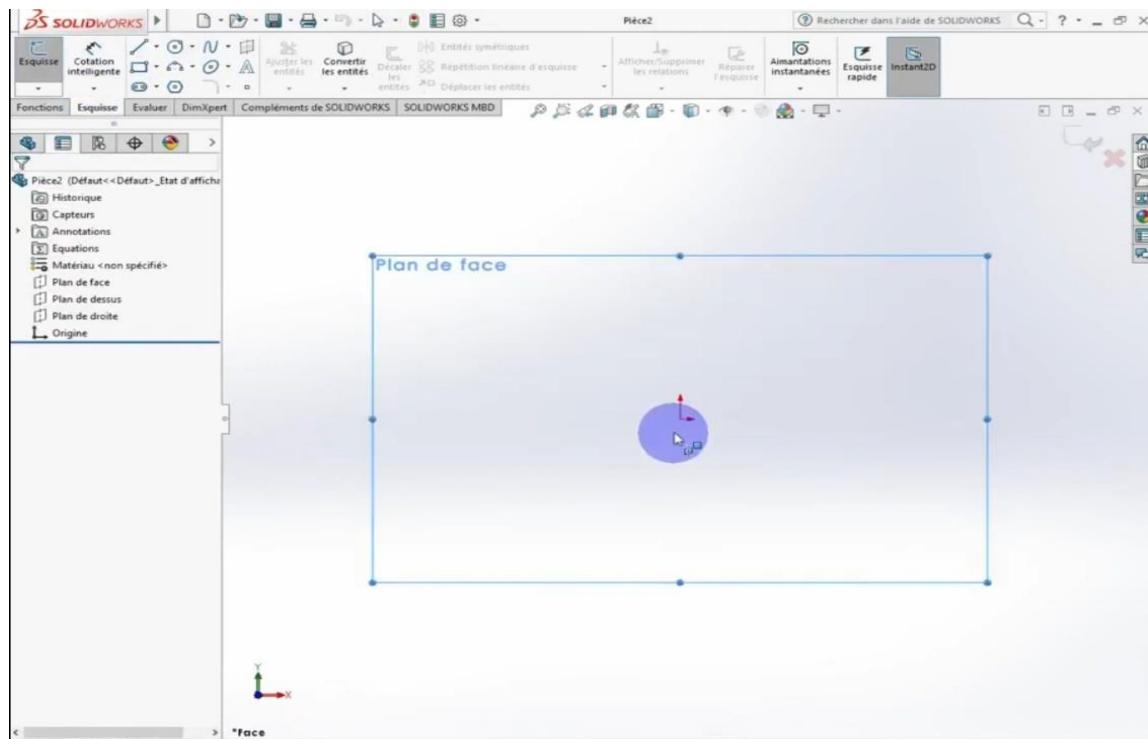


Figure III.04: Choix du plan.

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

- Créer une nouvelle esquisse
- On va cliquer sur le cercle pour faire un petit cercle de diamètre 150mm.

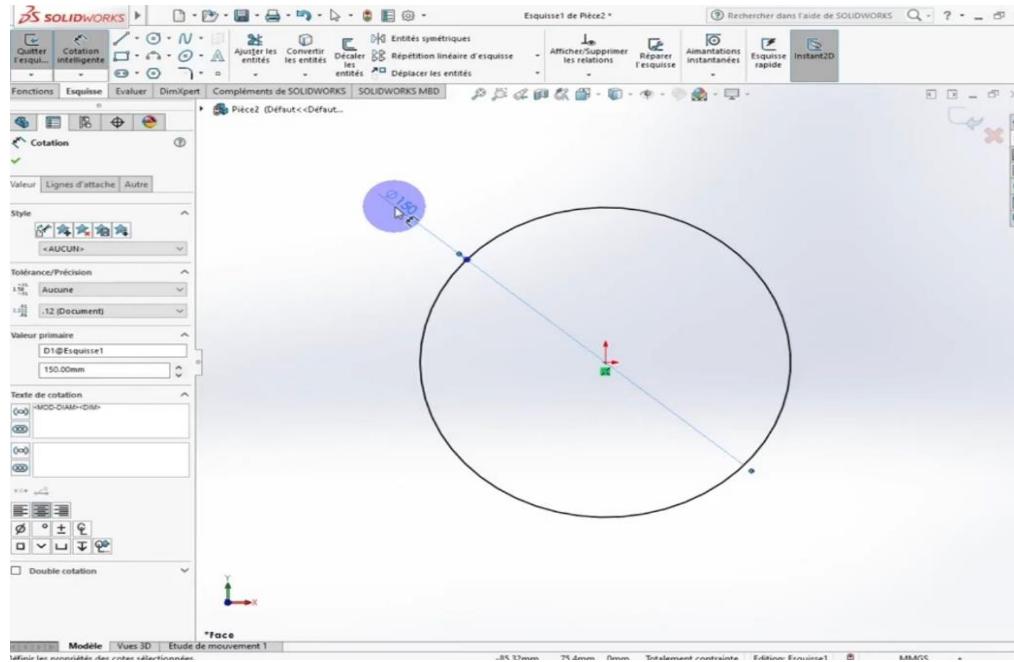


Figure III.05: Crédit d'un cercle

- On va cliquer sur le cercle pour faire un cercle de diamètre 40 mm (le trou)

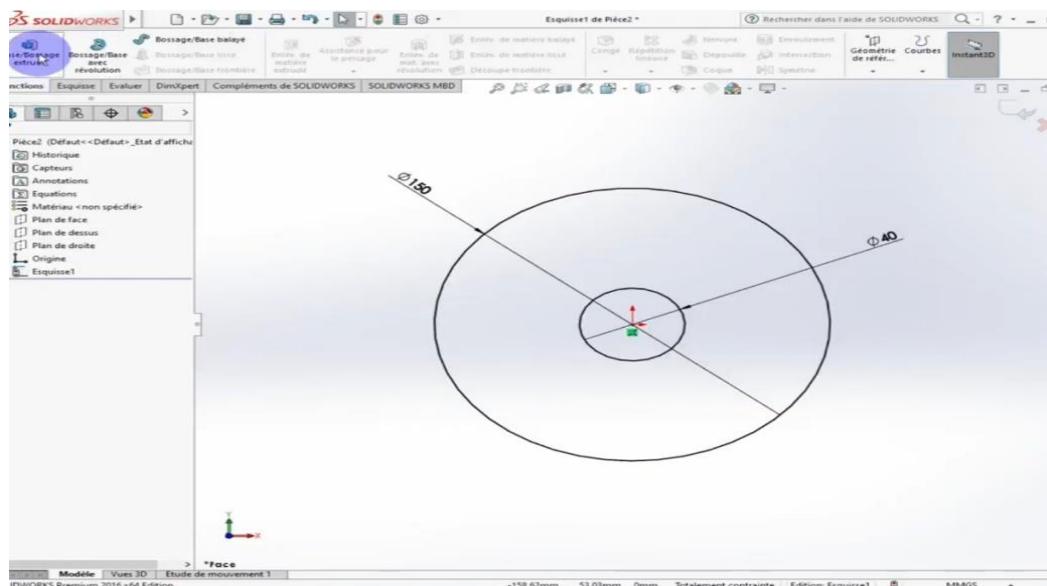


Figure III.06: Crédit d'un cercle($\varnothing 40$)

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

○ Extrusion

On lance la commande d'extrusion ; et comme il n'existe qu'une seule forme fermée, L'esquisse sélectionne le contour automatiquement. Ensuite on clique sur la flèche pour la faire glisser afin d'observer la modification de la valeur d'épaisseur puis on Clique sur OK.

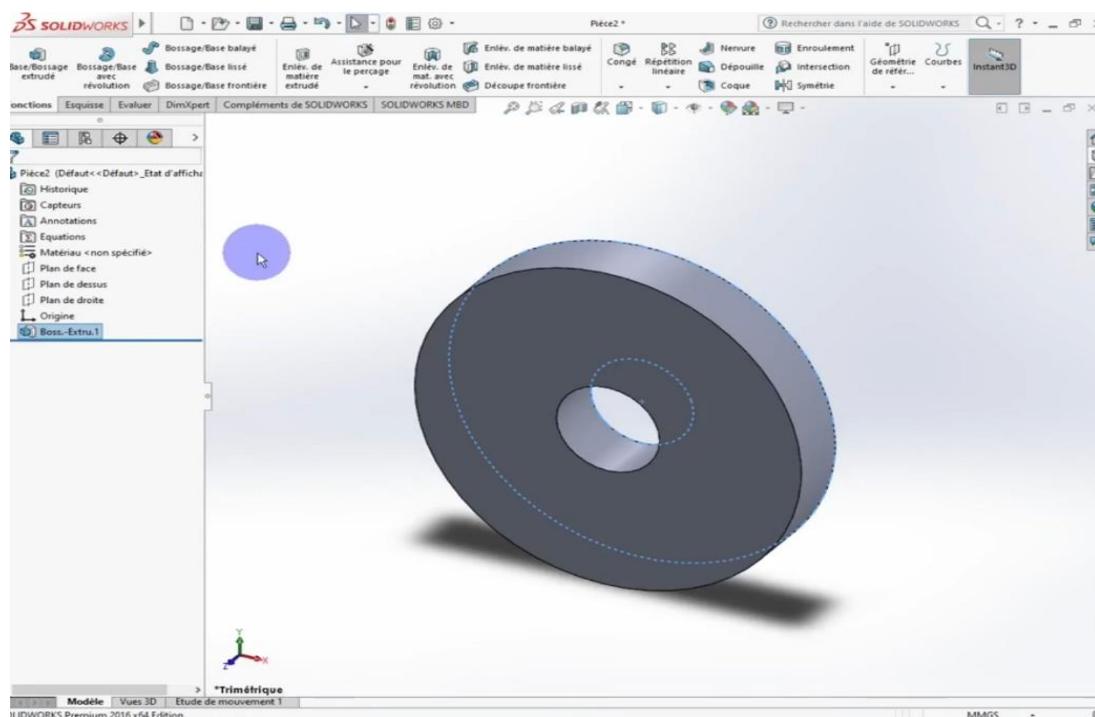


Figure III.07: Extrusion (25mm)

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

- Créer une nouvelle esquisse
- On fait un nouveau cercle (cercle extérieur de la dent) de
- Eton doit faire un cercle de ($\phi 165$ mm)

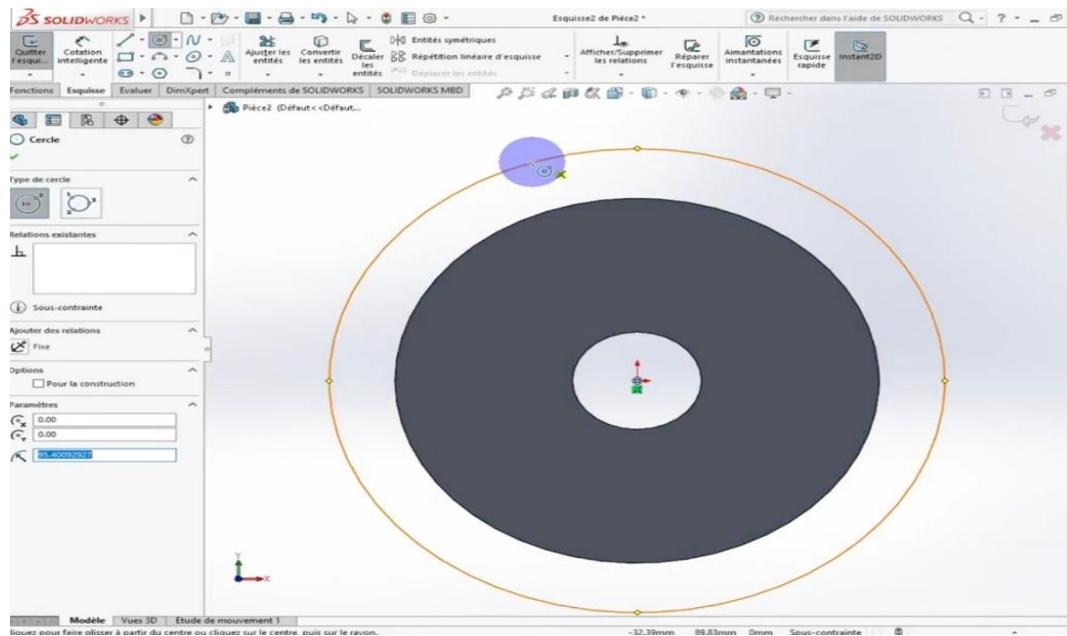


Figure III.08: création d'un cercle extérieur de la dent.

- Création d'une ligne de construction il faut qu'elle soit verticale

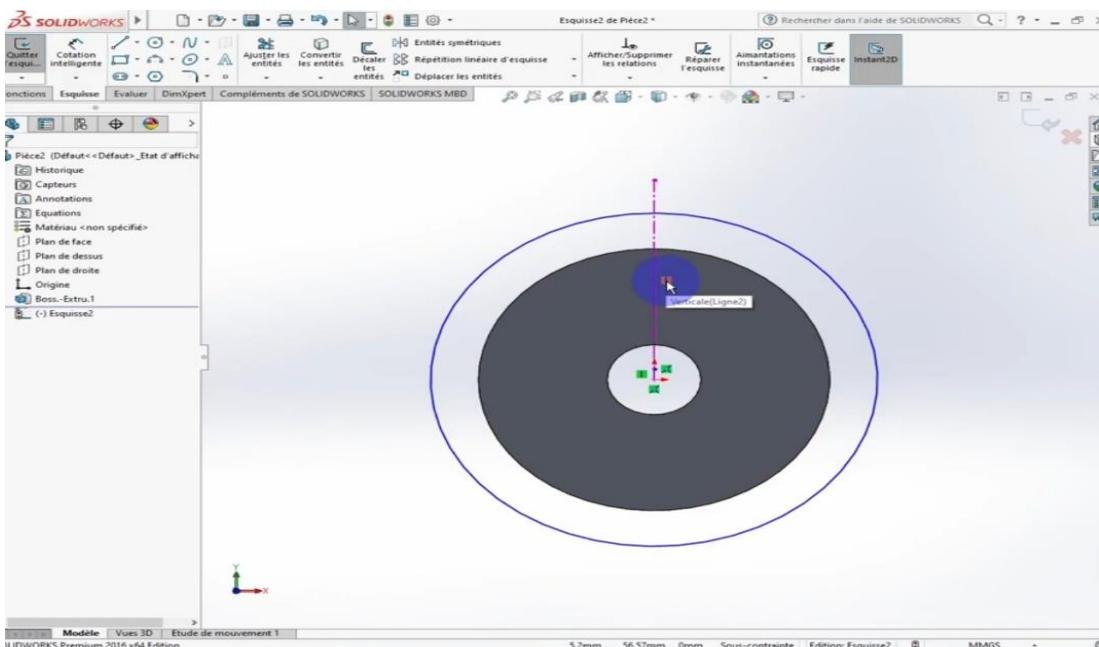


Figure III.09: la ligne de construction

- Création de la ligne de diamètre intérieur de la dent (58mm)

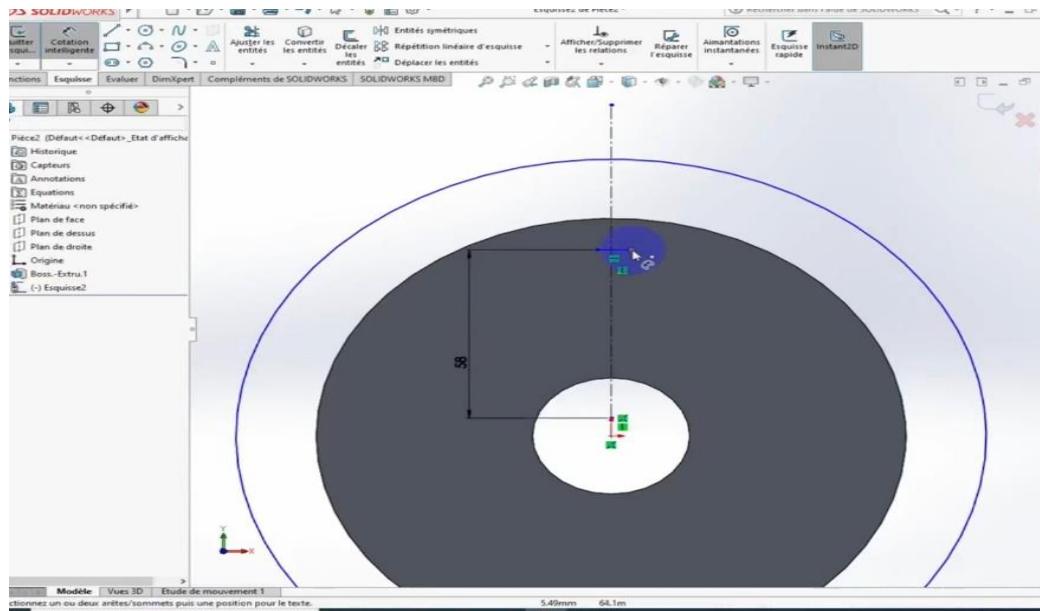


Figure III.10: création d'une ligne de diamètre intérieur 58mm

- On crée une autre petite ligne de 8 mm
- On va créer une autre ligne au milieu (4mm)

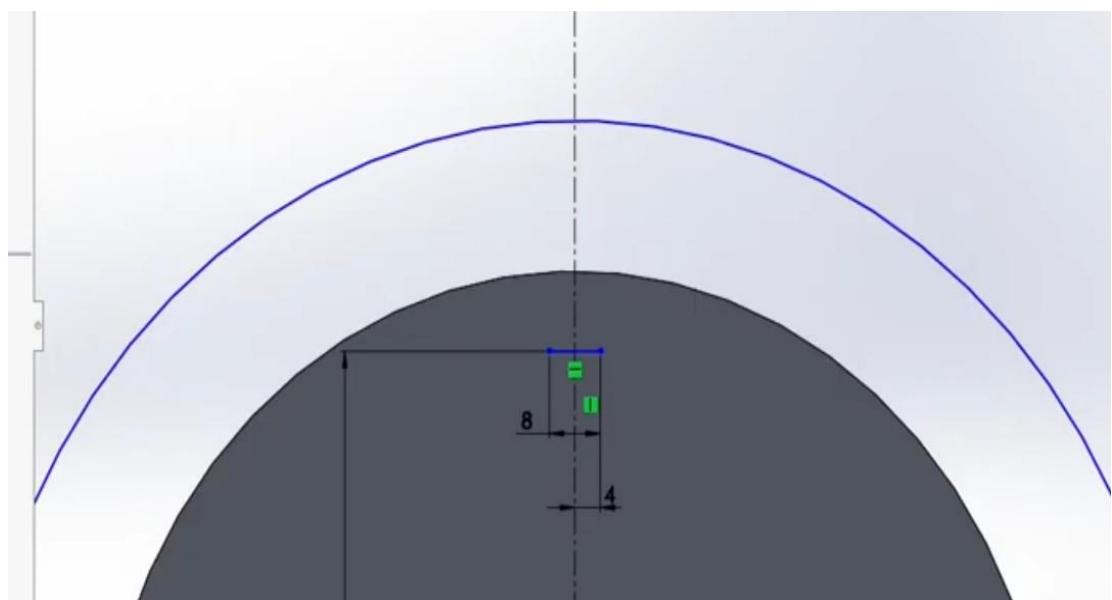


Figure III.11: création des lignes d'aides

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

- On va créer un arc de diamètre (30 mm)

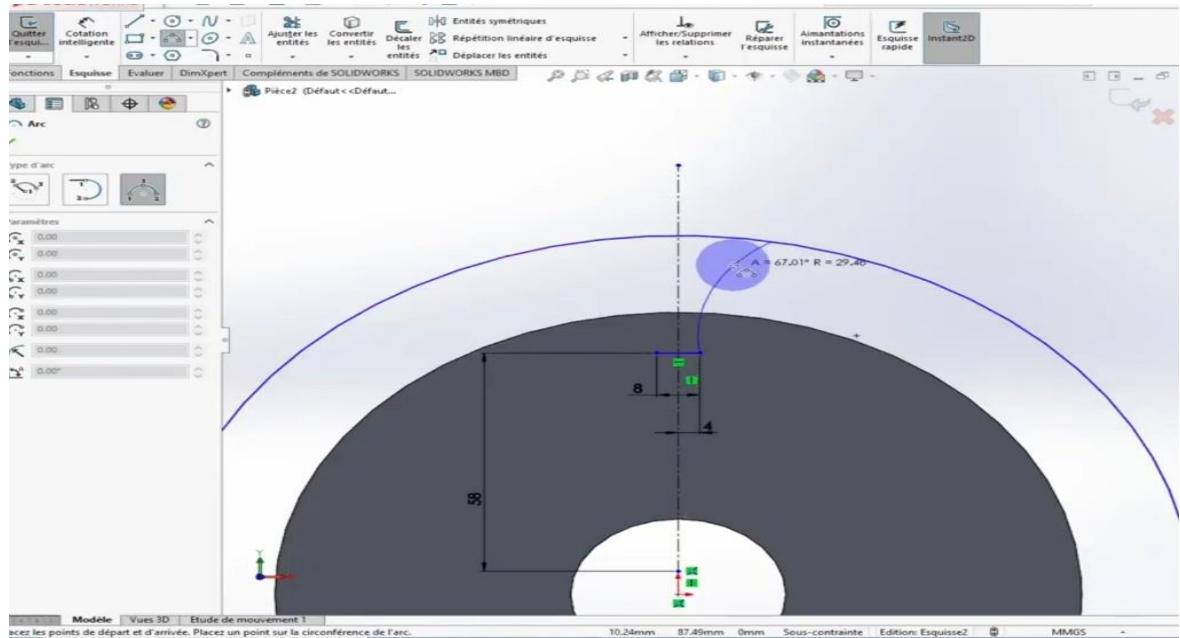


Figure III.12: création d'un arc ($\phi=30$ mm)

- On crée un autre arc pour compléter la dent $\phi 30$ mm

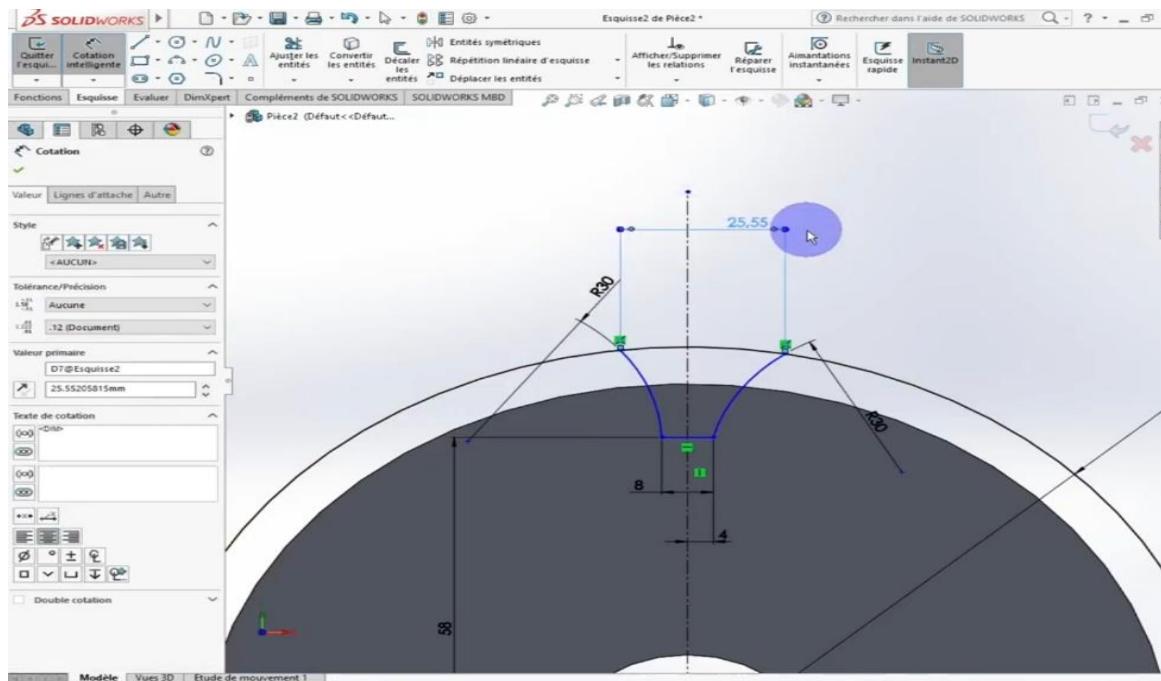


Figure III.13: création du deuxième arc

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

- On fait des ajustements entre les 2 points (30 mm)

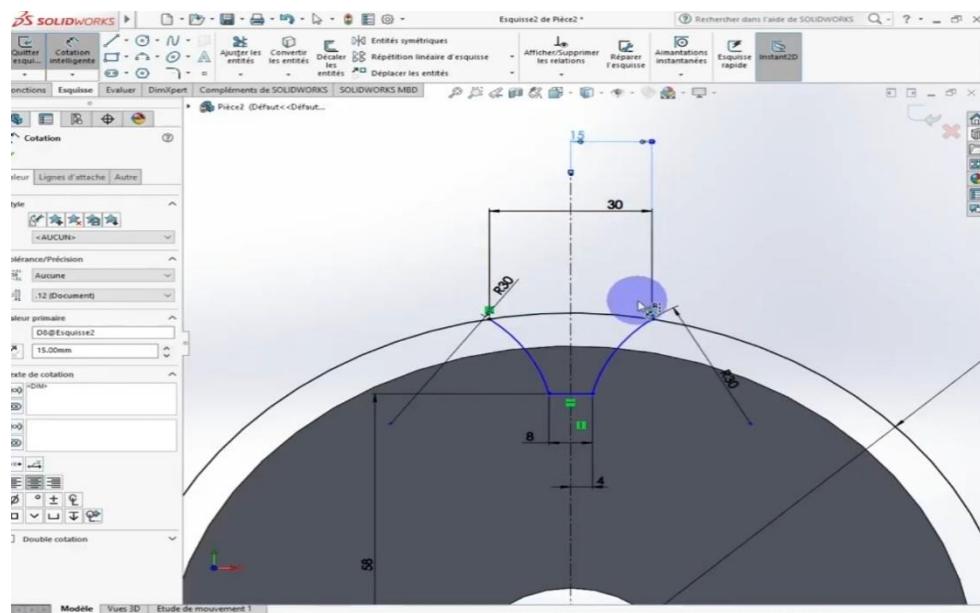


Figure III.14: Modification de la position des points d'intersection

- Ensuite, l'enlèvement de matière (extrusion)

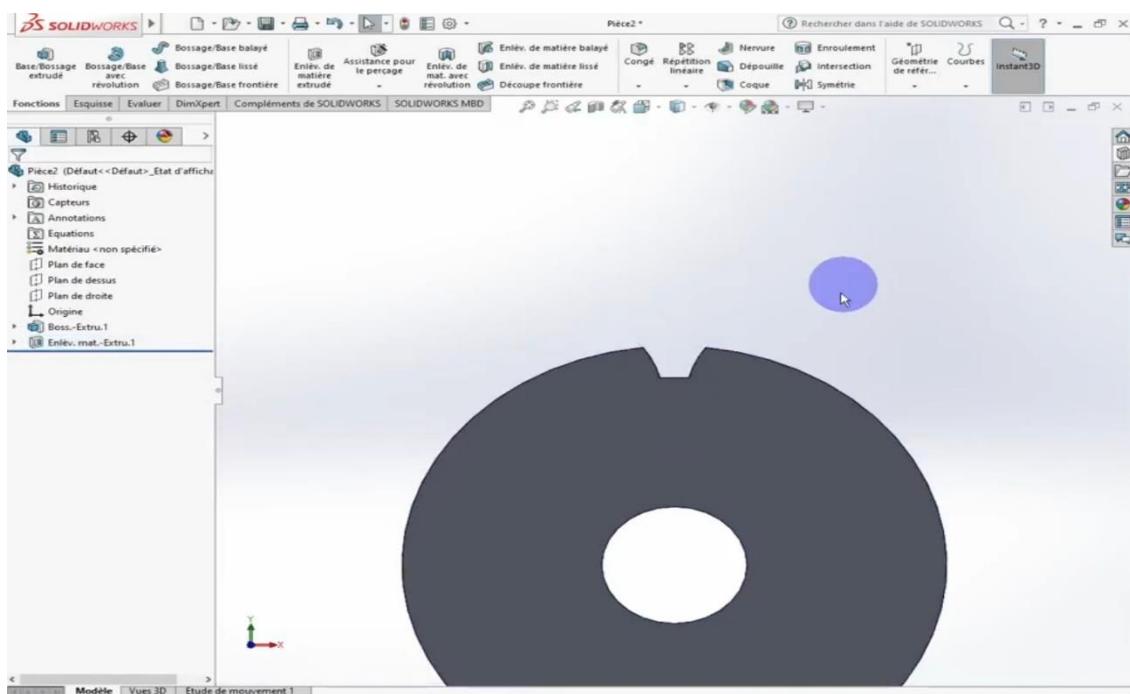


Figure III.15: Extrusion en direction négative

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

- On clique sur répétition circulaire

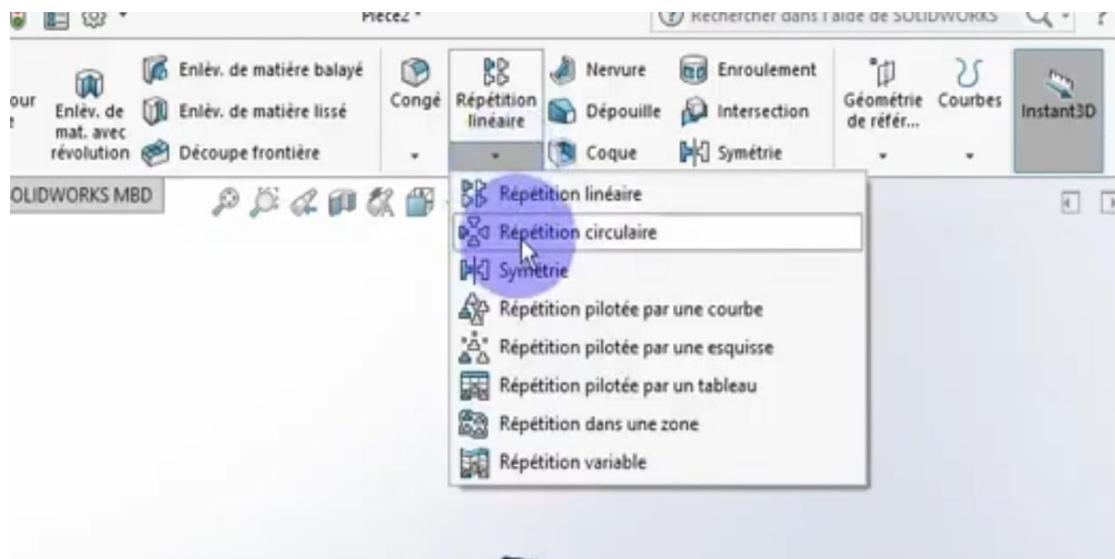


Figure III.16: Répétition circulaire

- On clique sur la face enlève et on clique sur l'axe de répétition
- On clique sur profil et après on clique sur espacement constant pour qu'elle soit répétée sur tout le cercle
- On choisit le nombre de dents (20) le nombre de dents c'est calculé aussi et c'est normalisé par rapport à le pas angulaire

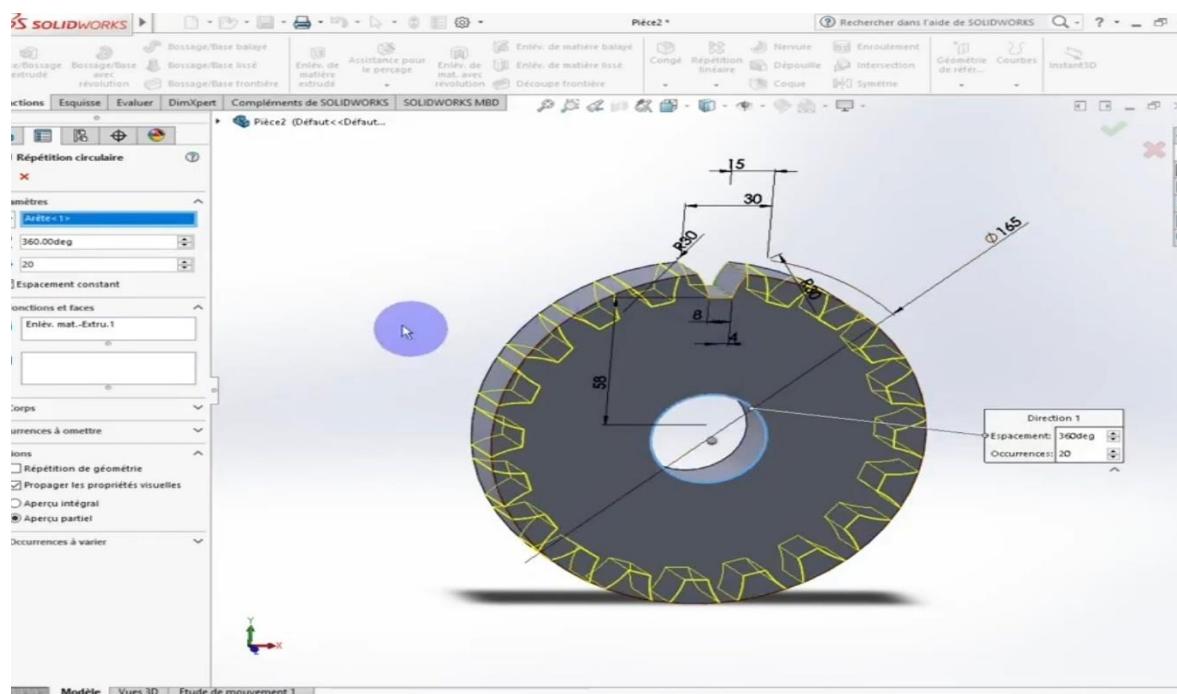


Figure III.17: Quelques ajustements (Congé)

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

- On enlève de matière

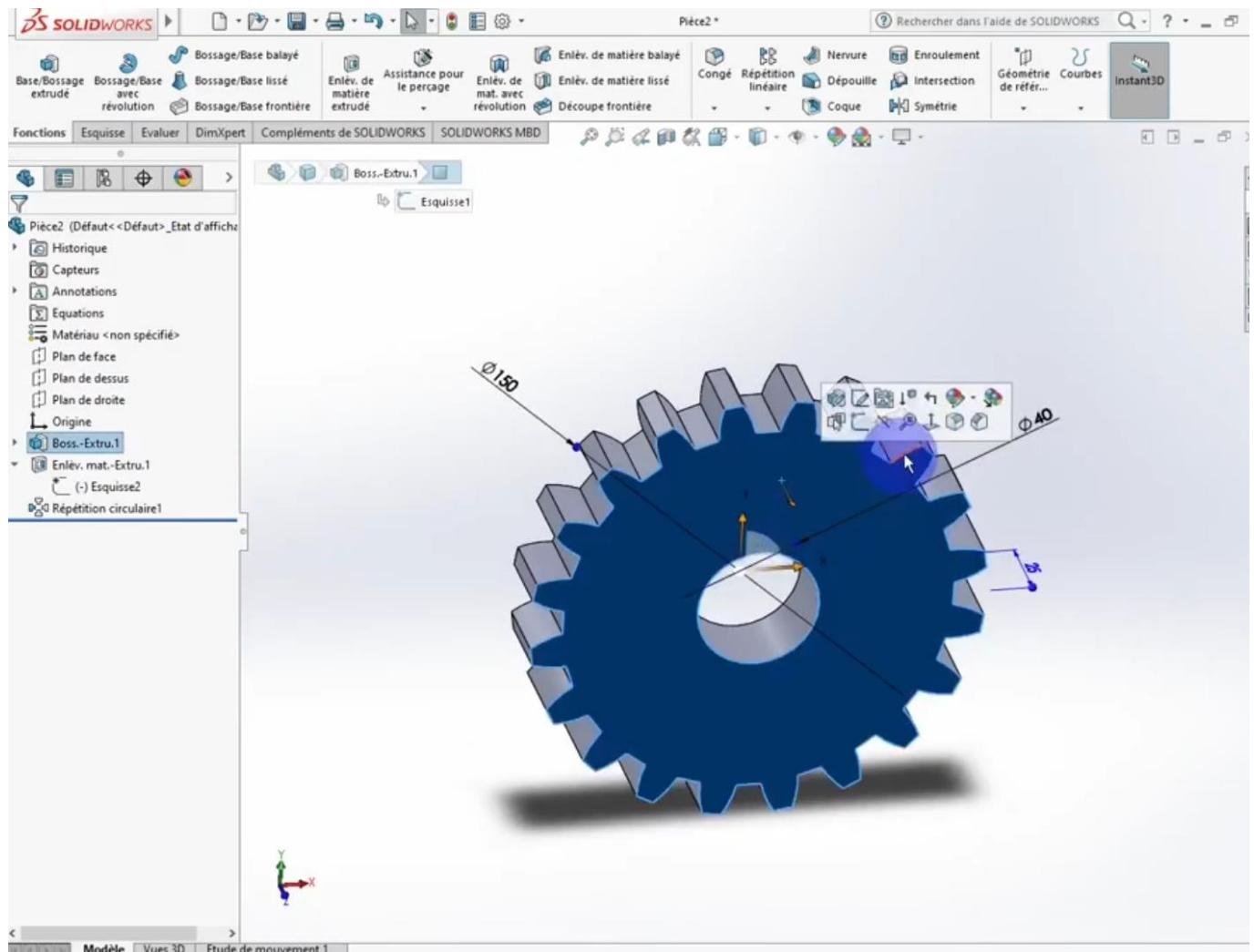


Figure III.18: Enlèvement de matière

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

- On obtenu cette forme de pièce

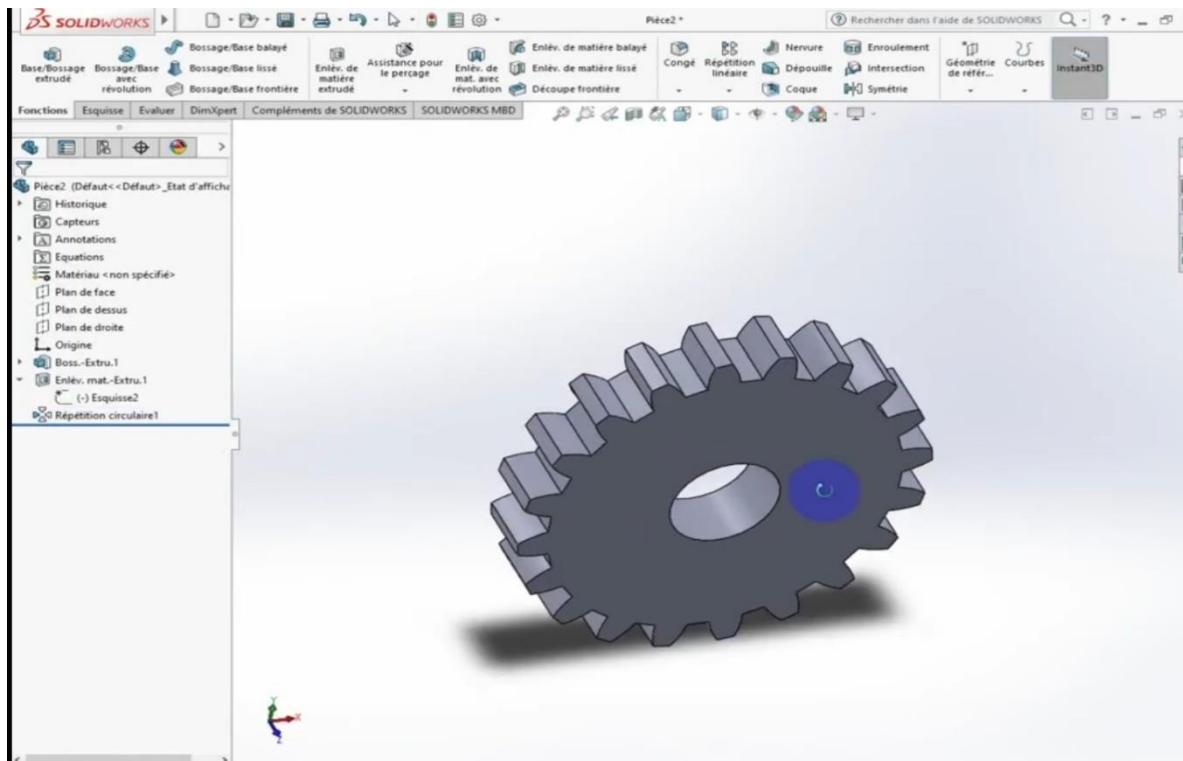


Figure III.19 : La forme obtenue

- On va dessiner un rectangle pour l'emplacement de la clavette

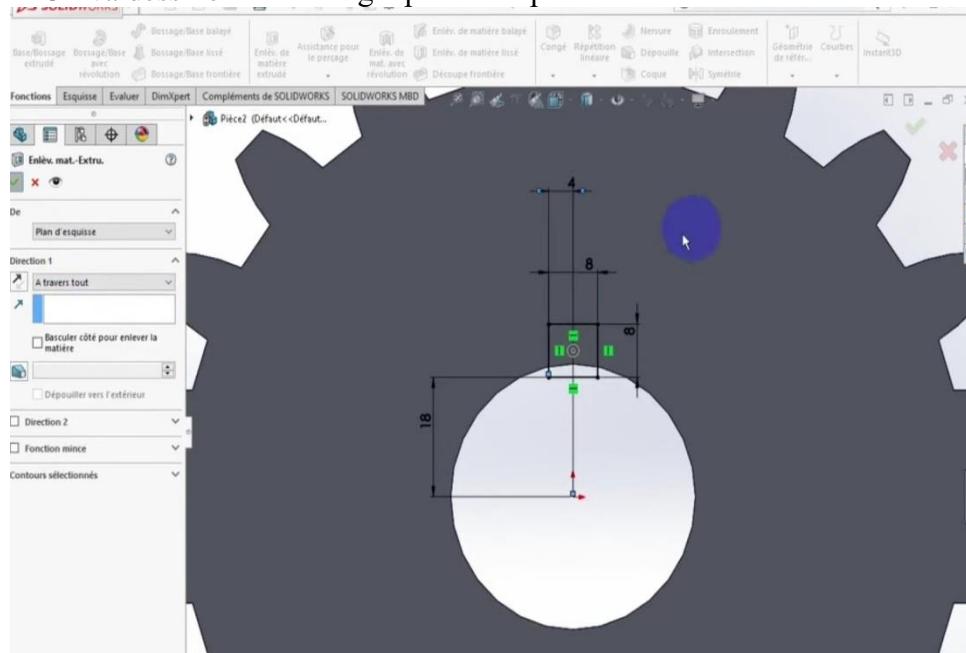


Figure III.20 ; l'emplacement, de la clavette

- On obtenu cette forme de pièce « Un pignon en3D ».

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

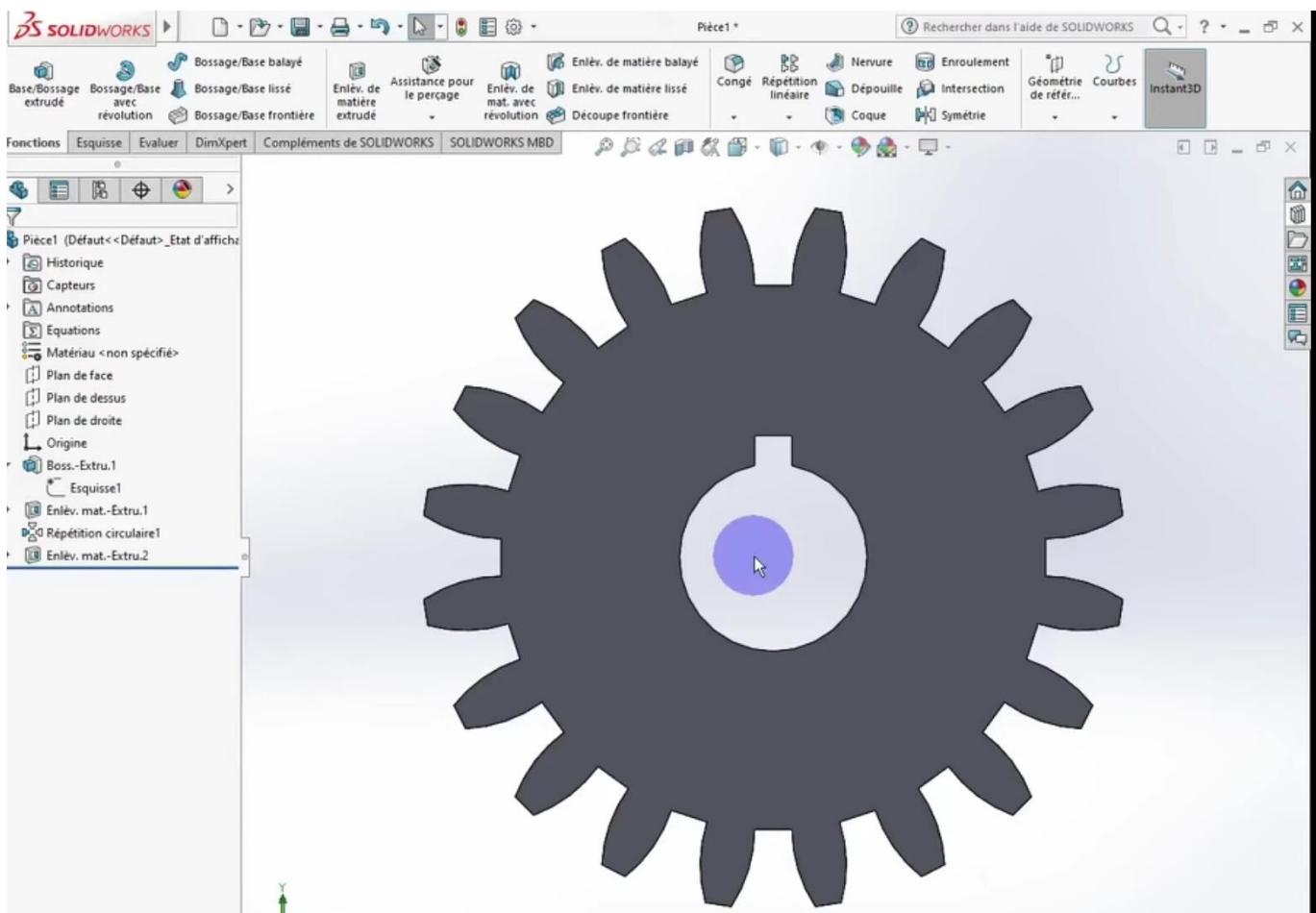


Figure III.21 ; La pièce final en 3D

Après On doit l'enregistre sous format STL

b) Deuxième partie : Préparation du fichier d'impression dans Cura Ultimaker

Après avoir exporté ta pièce au format STL depuis SolidWorks, l'étape suivante consiste à préparer cette pièce pour l'impression 3D à l'aide du logiciel Cura Ultimaker. Commence par ouvrir Cura et sélectionner le profil correspondant à ton imprimante 3D (par exemple : Ender 3, Ultimaker S5, Anycubic, etc.). Assure-toi que les dimensions et le type d'imprimante sont bien configurés.

Ensuite, importe le fichier STL dans l'espace de travail de Cura, soit en cliquant sur « Ouvrir un fichier », soit par simple glisser-déposer. Le modèle 3D s'affiche alors sur le plateau virtuel. Tu peux utiliser les outils de Cura pour ajuster la position de la pièce sur le plateau, la faire pivoter si nécessaire pour éviter les supports excessifs, ou encore modifier l'échelle si tu veux changer sa taille.

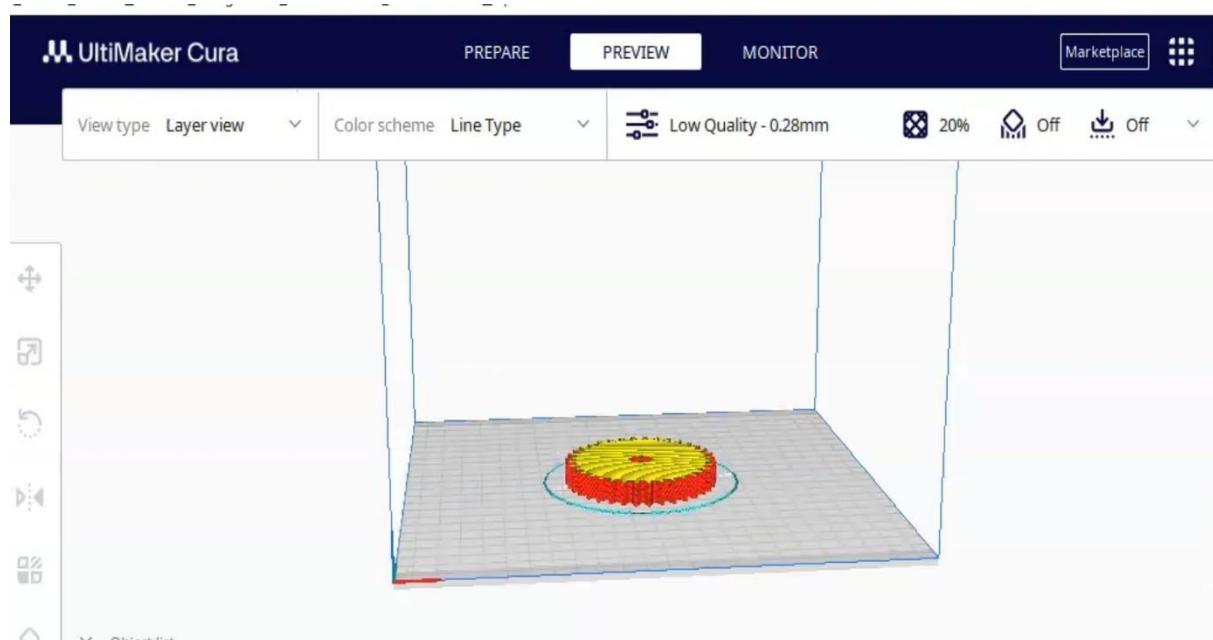


Figure III.20 : Préparation pour l'impression d'un « Pignon » sur le logiciel cura

Une fois la pièce bien positionnée, tu dois configurer les paramètres d'impression selon les besoins :

- Hauteur de couche (qualité d'impression)
- Remplissage (infill) exprimé en %
- Vitesse d'impression
- Température de la buse et du plateau chauffant
- Support (activé ou non selon la géométrie de la pièce)
- Adhérence au plateau (brim, raft, skirt)

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

Ces réglages dépendent du type de filament utilisé (PLA, ABS, PETG, etc.) et de la complexité du modèle.

Une fois tous les paramètres ajustés, clique sur « Slice » (ou « Découper ») pour que Cura transforme ton modèle 3D en un fichier G-code. Ce fichier contient toutes les instructions que l'imprimante suivra pour créer physiquement la pièce, couche par couche. Tu peux alors enregistrer le G-code sur un USB ou l'envoyer directement à l'imprimante si elle est connectée à ton ordinateur

III.6.2. Étape3 : on lance l'impression 3D

Une fois le fichier G-code généré avec Cura, la dernière étape consiste à lancer l'impression de la pièce sur l'imprimante 3D. Le fichier est transféré sur une clé USB, qui est ensuite branchée directement à l'imprimante.

Avant de démarrer, il est essentiel de procéder à une vérification de l'imprimante : s'assurer que le plateau est propre, que le filament est bien chargé, et que la buse ainsi que le plateau sont correctement calibrées. Ces vérifications permettent d'éviter les défauts d'impression dès les premières couches.

Depuis l'écran de l'imprimante, l'utilisateur sélectionne le fichier G-code présent sur la clé USB, puis lance l'impression. L'imprimante commence par chauffer la buse et le plateau aux températures spécifiées dans le fichier, puis imprime la pièce couche par couche, selon les trajectoires définies par le G-code.

Pendant l'impression, une surveillance continue est recommandée, notamment pour s'assurer que la première couche adhère bien au plateau. À la fin du processus, la pièce est laissée à refroidir avant d'être retirée. Si nécessaire, des opérations de finitions (retrait de supports, nettoyage, ponçage) peuvent être réalisées.

Cette étape marque la concrétisation du modèle numérique en objet réel, et finalise le cycle de production par impression 3D.

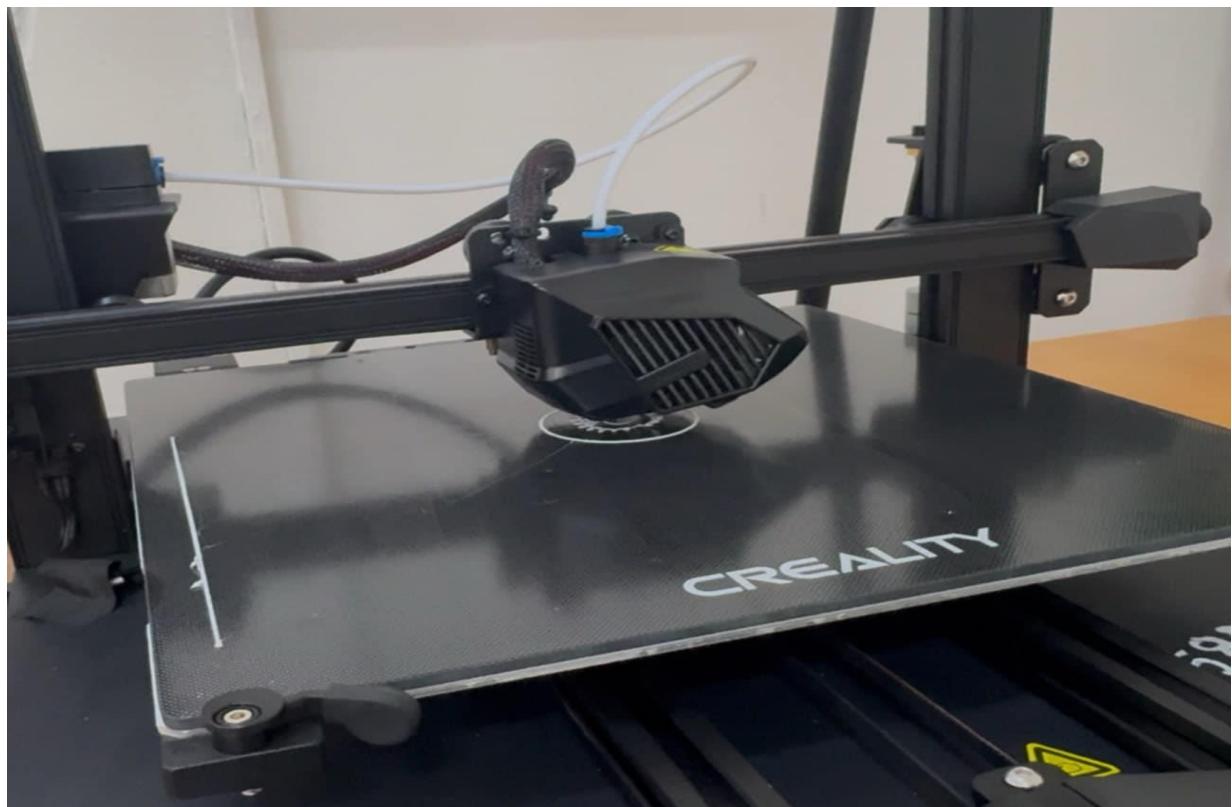


Figure III.21 : L'impression du pignon

Chapitre VI : La Précision dimensionnelle en FA

Dans ce quatrième chapitre nous présentons la précision dimensionnelle en fabrication additive

IV.1. La précision dimensionnelle en fabrication additive

IV.1.1. Définition

En FA, la précision fait référence à la différence entre les dimensions idéales (CAO) et les dimensions réelles de l'objet imprimé. Elle est déterminée par divers facteurs, y compris la technologie employée, les réglages d'impression, le comportement du matériau et les conditions environnementales.

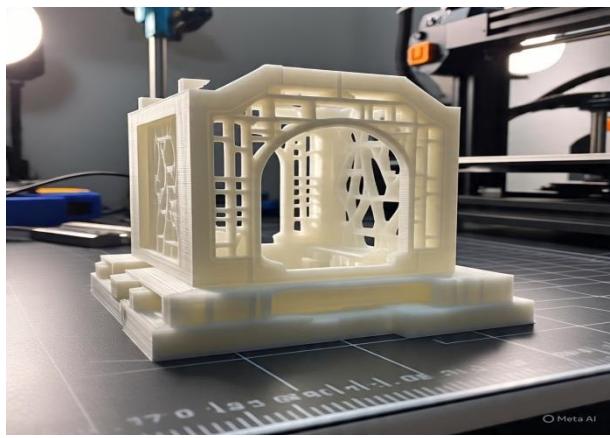


Figure IV.1: Illustration de la précision dimensionnelle en impression 3D

IV.1.2. Facteurs influençant la précision

Il existe divers éléments susceptibles de compromettre la précision des pièces fabriquées par impression 3D :

- Épaisseur de couche : une épaisseur plus mince assure une meilleure résolution verticale.
- Vitesse d'impression et température : susceptibles de causer des distorsions thermiques ou des résidus indésirables [2].
- Rétrécissement ou élargissement des matériaux lors du processus de refroidissement. Les écarts standards peuvent fluctuer entre $\pm 0,05$ mm (SLA) et $\pm 0,3$ mm (FDM), en fonction des paramètres [13].
- Des écarts typiques varient entre $\pm 0,05$ mm (SLA) et $\pm 0,3$ mm (FDM), selon les paramètres [13].

Table 1 : Tableau comparatif des précisions selon les technologies de fabrication additive

Technologie	Precision dimensionnelle typique	Épaisseur de couche	Avantages	Limitations
FDM (Fused Deposition Modeling)	$\pm 0,1$ mm à $\pm 0,5$ mm	50–300 μm	Faible coût, adapté aux prototypes	Moins précis, stries visibles, dépend de

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

			fonctionnels	l'orientation
SLA (Stéréolithographie)	$\pm 0,05$ mm à $\pm 0,1$ mm	25–100 μm	Très haute précision, surface lisse, bon rendu des détails	Résines fragiles, post-traitement nécessaire
SLS (Selective Laser Sintering)	$\pm 0,1$ mm à $\pm 0,3$ mm	80–120 μm	Bonne précision globale, pas besoin de supports	Surface rugueuse, post-traitement requis
DLP (Digital Light Processing)	$\pm 0,05$ mm à $\pm 0,1$ mm	25–100 μm	Haute précision, rapide, bon pour petits objets	Volume limité, résines fragiles
PolyJet	$\pm 0,02$ mm à $\pm 0,1$ mm	16–30 μm	Très grande précision, surface très lisse, multi-matériaux	Coût élevé, matériaux sensibles à la chaleur
EBM (Electron Beam Melting)	$\pm 0,2$ mm à $\pm 0,4$ mm	50–100 μm	Bon pour les pièces métalliques, structure dense	Moins précis que SLM, surface rugueuse
SLM (Selective Laser Melting)	$\pm 0,05$ mm à $\pm 0,1$ mm	20–50 μm	Très haute précision sur pièces métalliques, bonne densité	Coûts élevés, nécessitent finitions

IV.1.3. Influence de la géométrie

La géométrie de la pièce joue aussi un rôle :

- Les formes courbes ou inclinées sont sujettes aux effets de "stair-stepping".
- Les détails fins peuvent être déformés si la résolution n'est pas suffisante.
- Les pièces de grande taille peuvent subir des distorsions dues à la rétraction thermique [10].

IV.2. Cas des pièces moulées

IV.2.1. Principe du moulage

Le moulage fait référence à l'injection d'un matériau en fusion (comme le plastique ou le métal) dans un espace rigide. Cette méthode est bien ancrée, surtout pour la fabrication en série.

IV.2.2. Précision et répétabilité

Les moules en métal garantissent une excellente précision dimensionnelle ($\pm 0,01$ à $\pm 0,05$ mm) ainsi qu'une haute répétabilité, étant donné que la cavité du moule reste constante d'un article à l'autre [11]. Dès la phase de conception du moule, le retrait du matériau est pris en compte, ce qui permet d'améliorer la

Chapitre III : Les étapes D'élaboration D'une Pièce Par La Fabrication Additive

maîtrise des dimensions finales. Image proposée : Image d'une presse d'injection plastique en action.

2.3. Avantages du moulage

- Surface lisse sans traitement postérieur.
- Tolérances strictes possibles grâce à l'usinage du moule.
- Temps de cycle court une fois le moule fabriqué.

Cependant, la fabrication du moule est coûteuse et peu rentable pour les petites séries.

IV.3. Comparaison technique : Impression 3D vs Moulage

Table 2: Comparaison technique Impression 3D vs Moulage

Critère	Fabrication additive	Moulage	Avantages relatifs	Limitations relatives
Précision dimensionnelle	±0,02 mm à ±0,5 mm selon la technologie	±0,05 mm à ±0,2 mm selon le type de moule	La FA permet des détails complexes sans outils	Le moulage est limité par le retrait et la complexité du moule
Temps de production	Rapide pour pièces uniques	Long pour la préparation, mais rapide en série	FA idéale pour prototypes	Moulage plus efficace pour la production de masse
Coût unitaire	Élevé pour grande série	Faible en grande série	FA économique pour petites quantités	Moulage coûteux pour les faibles volumes
Matériaux disponibles	Polymères, résines, métaux (limités)	Très large gamme (plastiques, métaux, composites)	Moulage plus flexible en choix de matériaux	FA limités selon la technologie
Complexité géométrique	Très élevée (formes internes, structures lattices)	Limitée (nécessité de démoulage)	FA permet des designs impossibles au moulage	Moulage limité par la géométrie du moule
Post-traitement	Souvent nécessaire (finitions, retrait des supports)	Nécessaire (ébavurage, traitement thermique)	Les deux nécessitent du post-traitement	FA plus exigeants selon les technologies
Délais de mise en œuvre	Courts (à partir du fichier 3D)	Longs (conception et fabrication du moule)	FA plus rapide en phase de développement	Moulage nécessite des outils spécifiques

IV.4. Applications industrielles liées à la précision

- **Domaine médical** : des prothèses sur mesure fabriquées en 3D requièrent une haute précision pour correspondre à l'anatomie du patient [18].
- **Aéronautique** : les composants complexes qui ne peuvent pas être fabriqués par moulage sont réalisés en alliages métalliques, suivis de finitions d'usinage [1].
- **Automobile** : prototypes de pièces testés rapidement avant la production en série par moulage.

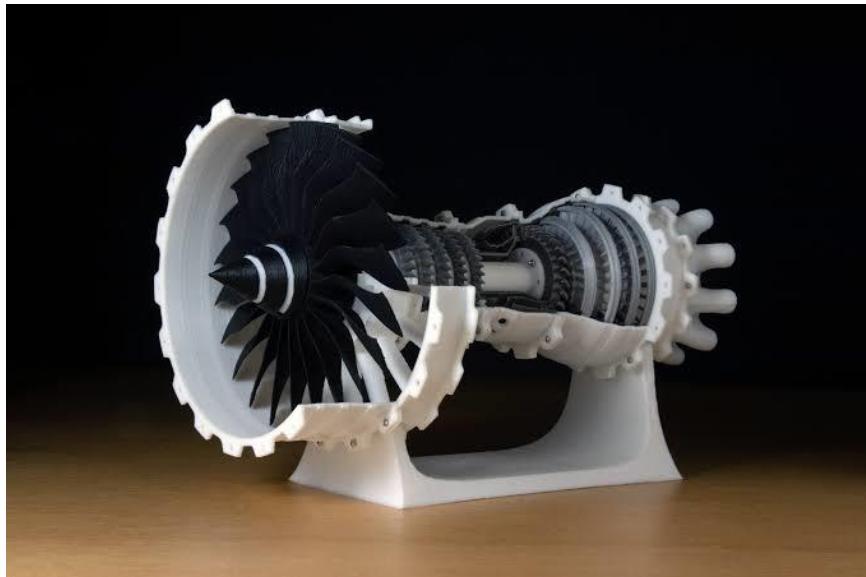


Figure IV.2 ; pièce aéronautique imprimée avec finition post-traitée

Conclusion :

D'après l'étude bibliographique menée, nous pouvons affirmer que la fabrication additive est une technologie à la fois surprenante et révolutionnaire, en particulier dans le secteur industriel. Son essor fulgurant à travers le monde se traduit par une augmentation constante des ventes d'imprimantes 3D, en raison des nombreux avantages qu'elle offre.

Tous les domaines de la production s'adaptent à cette technologie en développant des procédés spécifiques à leurs besoins, y compris le secteur biomédical, où des recherches avancées visent à imprimer des tissus et organes destinés à la greffe humaine. Ce qui relevait hier de l'impossible devient progressivement réalisable, sans nécessiter des outillages complexes et coûteux.

La fabrication additive n'en est encore qu'à ses débuts. Les recherches sur les matériaux et leurs procédés de mise en œuvre ne cessent d'évoluer, offrant aux ingénieurs de nouvelles perspectives en matière de rapidité, de précision et de performance.

Avec cette révolution technologique, l'impression 3D laisse entrevoir un avenir prometteur, où la personnalisation, la flexibilité et l'innovation occuperont une place centrale dans le monde de la fabrication.

Bibliographie

Références Bibliographique

[1] : BRETEAU, T.

Fabrication Additive Métallique Technologies et Opportunités, report. INSA Rouen, France,

2015.

[2] : Amrane, L., M. Berroubache, and M. KaciI nition à la fabrication additive (impression 3d) par la technique « fused deposition

Modeling » (FDM).2019, Université Abderrahmane Mira-Bejaia.

[3] <https://www.farinia.com/fr/fabrication-additive/techniques-fabrication-additive/qu-est-ce-que-la-fabrication-additive>

[4] :<https://formlabs.com/fr/blog/fabrication-additive-tendances-secteur/>

[5] :<https://www.farinia.com/fr/fabrication-additive/techniques-fabrication-additive/fabrication-additive-soutenir-la-fabrication-grace-a-la-conception#:~:text=Fabrication%20additive%20et%20complexit%C3%A9%20gratuite,virtuellement%20toutes%20sortes%20de%20formes.>

[6] :<https://www.freelabster.com/fr/blog/tous-les-avantages-de-l'impression-3d-pour-professionnels-les-particuliers/#:~:text=D%C3%A9finir%20la%20r%C3%A9duction%20des%20d%C3%A9penses,de%20la%20main%20d'oeuvre.&text=Il%20est%20difficile%20de%20comparer,ceux%20de%20la%20fabrication%20traditionnelle.>

[7] :<https://www.freelabster.com/fr/blog/tous-les-avantages-de-l'impression-3d-pour-professionnels-les-particuliers/#:~:text=D%C3%A9finir%20la%20r%C3%A9duction%20des%20d%C3%A9penses,de%20la%20main%20d'oeuvre.&text=Il%20est%20difficile%20de%20comparer,ceux%20de%20la%20fabrication%20traditionnelle.>

[8] :<https://www.freelabster.com/fr/blog/tous-les-avantages-de-l'impression-3d-pour-professionnels-les-particuliers/>

[9] :<https://www.freelabster.com/fr/blog/tous-les-avantages-de-l'impression-3d-pour-professionnels-les-particuliers/>

[10]https://wikilab.myhumankit.org/images/b/bc/Rapport_de_stage_-_My_Human_Kit.pdf

[11] :<http://www.calvados-strategie.com/impression-3d-avantages-et-inconvénients/#:~:text=Le%20modèle%20d'ex%C3%A9cution%20localisé%C3%A9%20de%20matériel%C3%A8res%20une%20pi%C3%A8ce.>

[12] :<https://3d-imprimantes.com/guides/differents-types-imprimantes-3d>

[13] :<https://www.universalis.fr/encyclopedie/impression-3d/4-les-principaux-procédés-de-fabrication-3d/>

[14] : A la découverte des matériaux d'impression 3D : Les plastiques, (2018).

<https://www.3dnatives.com/materiaux-impression-3d-abs-pla-polyamides-alumide>

[15] : Charline Choisnard et Romain Elineau, « l'impression en volumes, un avenir pour

l'imprimerie? », N°1-Juin 2011.

[16] : A la découverte des matériaux d'impression 3D : Les métaux, (2017).

<Https://www.3dnatives.com/a-la-decouverte-des-materiaux-d'impression-3d-deuxieme-partie-les-metaux>

[17] : A la découverte des matériaux d'impression 3D : Céramiques et matériaux organiques,

(2017).

<https://www.3dnatives.com/materiaux-impression-3d-ceramiques-bois>

[18] :[https://fr.wikipedia.org/wiki/Impression_3D#:~:text=Le%20domaine%20de%20la%20mod%C3%A9lisation,auditifs%20personnalis%C3%A9s\)%20et%20exosquelettes%20personnalis%C3%A9s.](https://fr.wikipedia.org/wiki/Impression_3D#:~:text=Le%20domaine%20de%20la%20mod%C3%A9lisation,auditifs%20personnalis%C3%A9s)%20et%20exosquelettes%20personnalis%C3%A9s.)

[19] :https://fr.wikipedia.org/wiki/Impression_3D#:~:text=de%20musique%20%C3%A9,Architecture%20et%20b%C3%A2timents,et%20dans%20un%20temps%20r%C3%A9cent.

[20] <https://www.formation-3d-france.com/fusion-360-le-nouveau-logiciel-de-la-cao-3d#:~:text=gratuitement%20le%20logiciel.-,Pr%C3%A9sentation,ing%C3%A9nierie%20et%20le%20design%203D.&text=C'est%20une%20approche%20nouvelle,renouvelée%20%C3%A0%20chaque%20nouvelle%20version.>

[21] :[https://fr.wikipedia.org/wiki/Ultimaker_Cura#:~:text=Ultimaker%20Cura%20\(ou%20plus%20simplement,3D%20pour%20maintenir%20le%20logiciel.](https://fr.wikipedia.org/wiki/Ultimaker_Cura#:~:text=Ultimaker%20Cura%20(ou%20plus%20simplement,3D%20pour%20maintenir%20le%20logiciel.)

[22] :[https://www.farinia.com/fr/fabrication-additive/techniques-fabrication-additive/impact-environnemental-de-l-impression-additive-metallique](https://www.farinia.com/fr/fabrication-additive/techniques-fabrication-additive/impact-environnemental-de-l'impression-additive-metallique)

[23] :<https://www.bouygues-construction.com/blog/fr/reflexions-prospectives/impression3d-recyclage-plastique#:~:text=L'impression%203D%20peut%20%C3%AAtre,chauff%C3%A9%20ou%20coll%C3%A9%20par%20exemple.>

Références Bibliographique

[24] :<https://www.makershop.fr/blog/le-recyclage-dans-impression-3d/#:~:text=Recyclage%20et%20r%C3%A9utilisation%20des%20chutes%20de%20filaments&text=Ces%20machines%20peuvent%20%C3%AAtre%20utilis%C3%A9es,plastique%20recycl%C3%A9%20en%20fins%20copeaux.>

[25] :<https://guides.biblio.polymtl.ca/c.php?g=479773&p=3280494>