

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



Mémoire en Vue de l'Obtention du Diplôme de MASTER BREVET / STARTUP

En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Thème Mémoire et du Projet

***Fabrication par Extrusion de Filaments Composites
Spécifiques Pour Imprimantes 3D***

Réalisé par

- ***M. ZIDANE Yuva***
- ***M. TESBIA Amar***

Encadrement

- ***. Dr. MEGHLOUI Bahia***
- ***. Pr. OULD OUALI Mohand***

Devant les Jurys

- ***Mr. BOURAS Rachid***
- ***Mme. AIMENE Kahina***

Nombres de CATI

- ***Mr. KHELIL Nacim***
- ***Mr. TEBBICHE Hocine***

Année Universitaire 2023/2024

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes et institutions qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce mémoire.

Dr. MEGHLAOUI Bahia, notre encadrante, pour sa disponibilité, ses conseils avisés et son soutien tout au long de ce travail. Sa rigueur scientifique et son accompagnement bienveillant ont été indispensables à la réalisation de ce projet.

Pr. OULD OUALI Mohand, notre Co-encadrant, pour ses orientations précieuses, son expertise technique et son soutien dans la concrétisation de notre projet.

L'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, et particulièrement le Département de Génie Mécanique, pour l'ensemble de la formation reçue et les moyens mis à notre disposition durant nos études.

L'incubateur de projet start-up, pour son soutien financier et logistique, ainsi que pour la confiance accordée à notre projet. Votre accompagnement nous a permis de transformer notre vision en une réalité tangible.

Nos familles et proches, pour leur patience, leur compréhension et leurs encouragements constants, même dans les moments les plus difficiles.

Nos amis et camarades de promotion, pour leur soutien moral, leur bonne humeur et les échanges enrichissants tout au long de ce parcours.

Enfin, nous remercions toutes les personnes qui, d'une manière ou d'une autre, ont contribué à la réussite de ce travail.

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire à :

- *Nos parents, pour leur amour inconditionnel, leur soutien indéfectible et leurs sacrifices constants. Sans eux, rien de tout cela n'aurait été possible.*
- *Nos familles et Nos amis, pour leur présence réconfortante et leur soutien moral tout au long de ces années d'études.*

M.ZIDANE Spécial Dédicace

Avec tout mon amour et ma reconnaissance que :

*Je dédie ce travail spécialement à ma nièce nouvellement née, **B. EMILY**, à qui je souhaite une vie remplie de bonheur, de réussite et de lumière.*

*Je rends également hommage à la mémoire de mon cher oncle, **BEZZAOU SADDEK**, en ce huitième année de son départ. Que Dieu l'accueille dans Son éternel paradis et qu'il repose en paix.*

*À ma **chère mère** bien-aimée, ma source de force et de motivation, ma raison d'existence et de vivre.*

*À mes précieuses sœurs, **THINHINAN** et **THANINA**, et son mari **B. GHILAS** ainsi qu'à sa famille, pour leur amour et leur soutien inconditionnels.*

M.TESBIA Spécial Dédicace

C'est avec les sentiments les plus profonds que Je dédie ce travail à :

*A ma très **chère mère**, ma source de tendresse et l'exemple de dévouement qui n'a pas cessé de m'encouragé et de prier pour moi.*

*A mon **père**, rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être.*

A mes très chers frères et sœurs et à toute ma famille.

*A tous mes amis et **mes collègues** spécialement*

*(**DJAMEL, HAKIM, MEHDI, GHILES** et **RADOUANE**).*

*A mon **binôme YUVA ZIDANE***

A tous ceux qui ont contribué de près ou de loin dans la réussite de ce projet

Résumé

*Ce mémoire est centré sur la **caractérisation d'un filament spécifique pour imprimantes 3D**, avec pour objectif la **conception de filaments innovants**. Le projet porte sur le développement de filaments composites renforcés par des **fibres naturelles et des éléments conducteurs électriques**, conçus pour répondre à des besoins techniques précis dans le domaine de la fabrication additive.*

*L'objectif principal de ce travail est de **développer un processus de production de filaments haute performance** à travers un système d'extrusion intégrant des **renforts en fibres naturelles**. La recherche explore également des **traitements d'adhésion fibre-matrice** afin d'améliorer les propriétés mécaniques et électriques des filaments.*

*Un prototype de la machine d'extrusion a été conçu et testé, avec des caractéristiques innovantes telles qu'un **système de ventilation fermé** pour le refroidissement des fibres et un mécanisme combiné pour le **bobinage des filaments composites à fibres longues**. L'étude évalue également la faisabilité de ces nouveaux filaments dans diverses applications industrielles, en particulier dans les matériaux écologiques et biodégradables.*

À travers cette recherche, nous visons à contribuer au développement de matériaux durables dans le domaine de l'impression 3D, en fournissant une nouvelle génération de filaments alliant résistance mécanique, conductivité et responsabilité environnementale.

Abstract

*This dissertation is focused on the **characterization of a specific filament for 3D printers**, aiming towards the **design of innovative filaments**. The project involves the development of composite filaments reinforced with **natural fibers and electric conductive elements**, tailored to meet specific technical needs in the field of additive manufacturing.*

*The main objective of this work is to **develop a process for producing high-performance filaments** through an extrusion system that integrates **natural fiber reinforcements**. The research also explores **fiber-matrix adhesion treatments** to improve the mechanical and electrical properties of the filaments.*

*A prototype of the extrusion machine was designed and tested, with innovative features such as a **closed ventilation system** for fiber cooling and a combined mechanism for **winding long-fiber composite filaments**. The study also examines the feasibility of these new filaments in various industrial applications, particularly in eco-friendly and biodegradable materials.*

Through this research, we aim to contribute to the development of sustainable materials in the field of 3D printing, providing a new generation of filaments that combine mechanical strength, conductivity, and environmental responsibility.

Sommaire

<i>Remerciements</i>	002
<i>Dédicaces</i>	003
<i>Résumé</i>	004
<i>Abstract</i>	005
<i>Sommaire</i>	006
<i>Liste des Figures</i>	009
<i>Liste des Tableaux</i>	012
<i>Liste des symboles</i>	013
<i>Introduction Générale</i>	015
Chapitre 01 : Généralités sur l'impression des filaments 3D	016
I.1 Introduction	017
I.2 Généralités sur L'impression 3D	017
I.2.1 Définition.....	017
I.2.2 Historique et l'évolution de l'impression 3D.....	019
I.2.3 Domaines d'application de l'impression 3D.....	020
I.2.4 Les principes de fonctionnement de l'impression 3D.....	023
I.2.4.1 Description générale du processus.....	023
I.2.4.2 Techniques d'impression 3D courantes.....	025
I.3 Généralités sur les filaments d'impression 3D	031
I.3.1 Les types de filaments les plus importants.....	031
I.3.1.1 Le PLA (Acide Poly lactique)	031
I.3.1.2 L'Acrylonitrile Butadiène Styrene (ABS).....	032
I.3.1.3 Le Polycarbonate (PC).....	033
I.3.1.4 Le polyéthylène téréphtalate mélange de glycol (PETG).....	034
I.3.1.5 Le nylon (PA)	035
I.3.2 Autres types de filaments moins courants.....	035
I.3.2.1. Polypropylène (PP).....	035
I.3.2.2. Filament souple (TPU).....	036
I.3.2.3. HIPS (polystyrène à fort impact)	036

I.3.3 Les filaments composites	037
I.3.3.1 Renforcement par fibres courtes et continue.....	037
I.3.3.2 Impression 3D et technologies spécifiques.....	038
I.3.3.3 Types de filaments composites professionnels.....	038
I.3.3.4 Autres filaments spécialisés	039
I.3.3.5 Conclusion.....	039
I.3.4 Choix des Filaments pour l'Impression 3D.....	039
I.3.4.1 Types de Filaments : Rigides, Souples et Élastiques.....	039
I.4 Conclusion	042
Chapitre 02 : La conception d'une machine extrudeuse et système de bobinage pour les filaments 3D.....	043
II.1 Introduction	044
II.2 La conception d'une machine extrudeuse	045
II.2.1 Le principe et mécanisme de fonctionnement d'une machine extrudeuse	045
II.2.2 Les composants d'une machine d'extrusion pour les filaments 3D	046
II.2.3 Les caractéristiques des composants mécaniques et thermoélectriques de l'extrudeuse	047
II.2.3.1 Les composants mécaniques.....	047
II.2.3.2 Les composants thermoélectrique	053
II.3 Système de refroidissement (Ventilation)	059
II.3.1 Caractéristiques de Ventilateur : 50mm 12V-DC	059
II.4 La conception de système bobinage	061
II.4.1 Les composants du système de bobinage manuel pour les filaments 3D	062
II.4.1.1 Filament extrudé	062
II.4.1.2 Guide de fil par roulettes.....	063
II.4.1.3 Moteur de Bobinage Pas à Pas	063
II.4.1.4 Contrôleur de système (Bobine d'enroulement + Variateur de vitesse).....	064
II.4.1.5 Bobine de réception manuelle	065
II.4.2 Les composants du système de bobinage auto contrôlé pour les filaments 3D ...	066
II.4.2.1 Capteur de Tension et Bobine d'Enroulement	067
II.4.2.2 Guide de Fil	068

II.4.2.3	Contrôleur de Système avec Mécanisme Va-et-Vient Motorisé	069
II.4.2.4	Bobine de Réception	070
II.4.2.5	Moteurs Réducteurs pour le Système Contrôleur et la Bobine d'Enroulement	071
II.4.2.6	Avantages et Inconvénients du Système de Bobinage Auto contrôlé .	072
II.5	La modélisation des plans et l'assemblage des pièces.....	074
II.5.1	Assemblage de la Machine Extrudeuse	074
II.5.1.1	Assemblage châssis de base	075
II.5.1.2	Assemblage des composants de la machine d'extrusion	076
II.5.2	Assemblage de moteur réducteur	078
II.5.3	Assemblage de la chambre de refroidissement	079
II.5.4	Assemblage d'une boîte d'alimentation	080
II.5.5	Assemblage du système de bobinage	081
II.6.	Conclusion	084
Chapitre 3 :	Réalisation des filaments spécifiques et l'analyse des résultats	085
III.1	Introduction	086
III.2	Matériaux et composants	088
III.2.1	Matrices polymères	088
III.2.2	Fibres de renforcement	089
III.3	Paramètres de fabrication des filaments	090
III.3.1	Processus d'extrusion	090
III.3.2	Les filaments extrudés	094
III.3.3	Innovations techniques appliquées	095
III. 3.3.1	Le systèmes innovants intégrés dans notre processus d'extrusion	095
III. 3.3.2	Les Améliorations de la qualité des filaments produits	097
III.4	Conclusion et Perspectives	101
<i>Conclusion Générale</i>	<i>.....</i>	<i>103</i>
<i>Références et bibliographies</i>	<i>.....</i>	<i>104</i>

Liste des Figures

Figure 1.1 : L'impression 3D	018
Figure 1.2 : L'évolution de l'impression 3D.....	019
Figure 1.3 : Une Maquette d'architecte imprimée en 3D (Maison)	020
Figure 1.4 : Des modèles 3D des oses sur mesure pour une chirurgie spécifique	020
Figure 1.5 : Un Châssis de Général Electric conçu par l'impression 3D	021
Figure 1.6 : Un prototype des voitures de future (Concept) imprime en 3D	021
Figure 1.7 : Le premier village imprimé en 3D bientôt construit en Amérique latine	022
Figure 1.8 : La future technologie d'alimentation le food printing	022
Figure 1.9: Le Procède d'impression 3D	025
Figure 1.10 : le principe de fonctionnement de procède de dépote de filament fondu (FDM)..	027
Figure 1.11: le principe de fonctionnement de procède stéréolithographie (SLA)	028
Figure 1.12: le principe de fonctionnement de procède frittage laser (SLS)	029
Figure 1.13: le principe de fonctionnement de procède Poly Jet	030
Figure 1.14 : Formule chimique du PLA (acide poly lactique)	031
Figure 1.15 : Les bobines des Filaments en PLA	032
Figure 1.16 : Formule chimique du L'ABS	032
Figure 1.17 : Les bobines Des Filaments en ABS	033
Figure 1.18 : Formule chimique de polycarbonate (PC)	033
Figure 1.19 : Formule chimique de polyéthylène téréphtalate glycolase	034
Figure 1.20 : Les bobines Des Filaments en PETG	034
Figure 1.21 : Formule chimique du nylon	035
Figure 1.22 : schéma représente le composite obtenu par la fibre et la matrice	037
Figure 1.23 : un filament composite de la résine renforce par une fibre	038
Figure 1.24 : Types de Filaments : Rigides, Souples et Élastiques	039
Figure 1.25 : Le Diagramme de ASHBY pour le choix de matériaux conçu pour les filaments de l'impression 3D	041
Figure II.1: schéma général d'une machine extrudeuse pour les filaments	044

Figure II.2: La forme fondamentale d'une machine extrudeuse pour les filaments	046
Figure II.3 : Les composants fondamentaux d'une machine d'extrusion pour les filaments 3D.....	046
Figure II.4 : Moteur (WIPER ENGINE)	048
Figure II.5 : La trémie	049
Figure II.6 : Vis sans fin d'extrusion	050
Figure II.7 : Le fourreau (ou tube)	050
Figure II.8 : Ensemble, la vis sans fin et fourreau	051
Figure II.9 : Le roulement d'accouplement (A) et le roulement mécanique (B)	051
Figure II.10 : La filière 01 et 02	052
Figure II.11 : Système de pignons	053
Figure II.12 : Collier mica blindé, haute charge	054
Figure II.13 : Régulateur thermique de type REX-C100	055
Figure II.14 : Indice d'utilisation de régulateur thermique REX-C100	056
Figure II.15 : Relai Statique type SSR-40	057
Figure II.16: Thermocouple Type K	057
Figure II.17 : Le fonctionnement de thermocouple avec le relai statique et le régulateur	058
Figure II.18 : Les ventilateurs 50 mm 12V-DC	059
Figure II.19 : Chambre à refroidissement 1 et 2 pour les ventilateurs 50mm	060
Figure II.20 : Schéma simplifié d'un système de bobinage	061
Figure II.21 : Les composants du système de bobinage manuel pour les Filaments 3D	062
Figure II.22 : Le Filament extrudé	062
Figure II. 23 : Les composants du guide de fil par roulettes	063
Figure II.24 : Moteur (REF 430512N)	064
Figure II.25 : Bobine d'enroulement	064
Figure II.26 : Variateur de vitesse	065
Figure II.27: Bobine de réception manuelle	065
Figure II.28 : Les Composants du Système de Bobinage auto contrôlé pour les Filaments 3D.....	066
Figure II.29 : Capteur de Tension et la Bobine d'enroulement	068
Figure II.30 : Guide de Fil	069
Figure II.31: Mécanisme de système va-et-vient motorisé	070
Figure II.32 : Bobine de réception	071
Figure II.33 : Motoréducteur pas à pas bipolaire	072

Figure II.34: SOLID WORKS logo	074
Figure II.35 : Assemblage de la machine extrudeuse	075
Figure II.36 : Châssis de base	075
Figure II.37 : Les composants de la machine d'extrusion	076
Figure II.38 : Les plans des 6 composants de la machine d'extrusion	077
Figure II.39 : Assemblage moteur réducteur	078
Figure II.40 : Les plans des 2 composantes de l'assemblage moteur réducteur	078
Figure II.41 : Assemblage de la chambre de refroidissement	079
Figure II.42 : les plans des 2 composantes d'assemblage de la chambre de refroidissement	079
Figure II.43 : Assemblage d'une boite d'alimentation	080
Figure II.44 : les plans des 4 composants d'assemblage d'une boite d'alimentation	081
Figure II.45 : L'assemblage du système de bobinage	081
Figure II.46 : Assemblage des composants du système de bobinage	082
Figure II.47 : les plans des 6 composants du système de bobinage	083
Figure III.1: Granulés de PEHD noir	088
Figure III.2 : Granulés de PEBD	089
Figure III.3 : Farine de bois	089
Figure III.4 : La préparation du dosage 95% PEHD et 5% poudre de bois. Pour 30g de métiers premiers	090
Figure III.5 : Les mélanges dans la machine extrudeuse : (a) 80% PEHD/ 20% poudre de bois, (b) 95% PEHD /5% poudre de bois, (c) 100% PEHD	091
Figure III.6 : Système de refroidissement des filaments extrudés	092
Figure III.7 : Bobinage des filaments extrudés	093
Figure III.8: Système du mélangeur pour fibres courtes	096
Figure III.9 : Contrôleur de système (Variateur de vitesse)	096
Figure III.10 : Un système de refroidissement par air forcé	097
Figure III.11: Les ruptures sur le filament 4 (Composite de 80% PEHD et 20% poudre de bois).....	099
Figure III.12 : Les ruptures sur le filament 5 (Composite de 95% PEHD et 5% poudre de bois)	099
Figure III.13: Les ruptures sur le filament 6 (Composite de 98% PEHD et 2% poudre de bois)	099

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Les différents composants d'une machine extrudeuse	047
Tableau II.2 : Les différents types des colliers et leurs milieux d'utilisation	054
Tableau III.1 : Les paramètres de l'extrusion	092
Tableau III.2 : Les types des filaments extrudés	094

Liste des symboles

- **ASTM** (American Society for Testing and Materials) : Organisation internationale qui développe et publie des normes techniques pour les matériaux, produits, systèmes et services.
- **FAO** (Fabrication Assistée par Ordinateur)
- **CAM** (Computer-Aide Manufacturing) : un procédé utilisant des outils numériques pour piloter la production.
- **FDM** (Modélisation par Dépôt Fondu) : Fused Deposition Modeling, une méthode d'impression 3D déposant des couches de matériau fondu.
- **DMLS** (Frittage Laser Direct du Métal) : Direct Metal Laser Sintering, une technologie d'impression 3D utilisant un laser pour fritter des particules métalliques.
- **MJF** (Fusion par Jet de Matière) : Multi Jet Fusion, une technologie d'impression 3D développée par HP qui utilise un liant activé par chaleur pour fusionner les matériaux.
- **CAO** (Conception Assistée par Ordinateur)
- **CAD** (Computer-Aide Design), conception assistée par ordinateur pour créer des modèles numériques.
- **STL/OBJ** : Formats de fichiers utilisés en impression 3D pour représenter des modèles 3D à l'aide de triangles formant les surfaces des objets.
- **SLA** (Stéréolithographie) : Stereolithography, une méthode d'impression 3D utilisant une résine photopolymère durcie par un laser UV.
- **SLS** (Frittage Sélectif par Laser) : Selective Laser Sintering, une technologie d'impression 3D qui fritte des particules de poudre avec un laser.
- **DLP** (Procédé DLP) : Digital Light Processing, une technologie similaire à la SLA mais utilisant un projecteur numérique pour durcir les couches de résine.
- **UV** (Ultra-Violet) : Rayonnement ultraviolet, utilisé pour durcir certains matériaux en impression 3D.
- **PLA** (Acide Poly Lactique) : Polylactic Acid, un bioplastique utilisé comme matériau d'impression 3D.
- **ABS** (Acrylonitrile Butadiène Styrène) : Un plastique robuste souvent utilisé en impression 3D.
- **PC** (Polycarbonate) : Un plastique transparent et résistant aux chocs.

- **PETG** (Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé) : Une variante de PET qui est plus facile à imprimer et plus résistante.
- **PET** (Polyéthylène Téréphtalate) : Utilisé dans les bouteilles et emballages plastiques.
- **PA** (Nylon) : Polyamide, un matériau flexible et résistant à l'usure.
- **PP** (Polypropylène) : Un plastique léger et résistant.
- **TPU** (Filament Souple) : Thermoplastique Polyuréthane, un matériau flexible et élastique.
- **HIPS** (Polystyrène à Fort Impact) : High Impact Polystyrene, souvent utilisé comme support soluble en impression 3D.
- **PMMA** (Polyméthacrylate de Méthyle) : Connus sous le nom de Plexiglas, un plastique transparent et rigide.
- **PVDF** (Polyfluorure de Vinyldène) : Un polymère fluoré résistant aux produits chimiques.
- **ASA** (Acrylique Styrene Acrylonitrile) : Un plastique résistant aux intempéries et aux UV.
- **PTFE** (Polytétrafluoroéthylène) : Téflon, un matériau antiadhésif et résistant à la chaleur.
- **PEEK/PEKK/PEI** (Filaments Hautes Performances) : Polyetheretherketone, Polyetherketoneketone et Polyetherimide, des plastiques techniques pour des applications exigeantes.
- **SSR** (Relais Statiques) : Solid State Relay, utilisé pour contrôler les circuits sans composants mobiles.
- **PEBD** (Polyéthylène Basse Densité) : Polyéthylène Basse Densité, un plastique souple et léger.
- **PEHD** (Polyéthylène Haute Densité) : Polyéthylène Haute Densité, un plastique rigide et robuste.
- **RPM** (Tours Par Minute) : Revolutions Per Minute, une unité de mesure de la vitesse de rotation.

Introduction Générale

L'impression 3D, également connue sous le nom de fabrication additive, a émergé comme une révolution transformative dans le domaine de la fabrication. Cette technologie novatrice permet la création de prototypes complexes, de pièces personnalisées et de produits sur mesure avec une agilité sans précédent. Au cœur de cette révolution se trouve le filament, la matière première cruciale utilisée dans les imprimantes 3D.

La qualité et les propriétés du filament jouent un rôle déterminant dans le succès de l'impression 3D. Afin de répondre aux exigences spécifiques des applications variées, il devient impératif de caractériser minutieusement ces filaments. C'est dans ce contexte que s'inscrit notre recherche, visant à explorer en profondeur les différentes facettes de la caractérisation des filaments pour l'impression 3D, avec un accent particulier sur la conception de filaments spécifiques adaptés à des applications précises.

Cette étude vise à combler les lacunes actuelles dans la compréhension des propriétés mécaniques, thermiques et chimiques des filaments, tout en explorant la manière dont ces caractéristiques influencent sur la conception de filaments adaptés à des besoins spécifiques. En considérant l'impact de la caractérisation des filaments sur la qualité des impressions, nous aspirons à contribuer à l'avancement continu de la technologie d'impression 3D.

Au fil de ce mémoire, nous explorerons la méthodologie utilisée pour caractériser divers types de filaments, analyserons en détail les résultats obtenus, et discuterons des implications de nos découvertes pour la conception de filaments adaptés à des applications industrielles précises. En somme, cette recherche aspire à élargir les frontières de la compréhension des filaments pour l'impression 3D, ouvrant la voie à des innovations significatives dans le domaine de la fabrication additive.

Chapitre 01

Généralités sur l'impression des filaments 3D

I.1 Introduction

L'impression 3D a radicalement transformé la fabrication en permettant la création d'objets complexes couche par couche. Toutefois, le succès de cette technologie repose en grande partie sur la qualité des filaments utilisés. Ces matériaux, qui alimentent les imprimantes 3D, nécessitent une caractérisation approfondie de leurs propriétés pour garantir des résultats optimaux.

La caractérisation des filaments devient essentielle pour comprendre et optimiser leurs propriétés mécaniques, thermiques et chimiques. Cela permet d'ajuster les paramètres d'impression pour garantir la qualité des objets finaux. La diversité croissante des filaments, du PLA aux composites avancés, souligne l'importance de caractériser chaque matériau de manière spécifique.

L'application de l'impression 3D dans des domaines tels que la médecine et l'aérospatiale exige des filaments adaptés à des besoins spécifiques. Ainsi, la caractérisation des filaments devient un outil clé pour concevoir des matériaux sur mesure, répondant précisément aux exigences de chaque application.

Dans ce premier chapitre nous présentons à explorer en détail l'importance cruciale de la caractérisation des filaments pour l'impression 3D. En analysant les propriétés fondamentales de ces matériaux, nous cherchons à démontrer que la caractérisation va au-delà d'une simple étape technique ; c'est un pilier essentiel permettant d'exploiter pleinement le potentiel de l'impression 3D dans divers secteurs industriels. [1][2][3]

I.2 Généralités sur L'impression 3D

I.2.1 Définition

D'après la norme **ASTM** (American Society for Testing and Materials) L'organisme mondial pour Le développement et l'établissement de normes dans l'industrie manufacturière a défini l'impression 3D comme :

« Un procédé d'assemblage de matériaux pour fabriquer des objets à partir des données numériques d'un modèle tridimensionnel, généralement couche par couche, par opposition à des méthodes de fabrication soustractives ». [4]

(ASTM, 2013)

Donc l'impression 3D est un dispositif de fabrication assistée par ordinateur (FAO) qui crée des objets en trois dimensions.

Comme l'imprimante traditionnelle, une imprimante 3D reçoit les données numériques d'un ordinateur. Cependant, au lieu d'imprimer sur le papier, une imprimante 3D construit un modèle 3D à partir d'un matériau personnalisé.

Le processus d'imprimante d'un modèle 3D varie en fonction du matériau (filaments) utilisé pour créer l'objet.

Par exemple

- **Un processus de modélisation par dépôt fondu (FDM) :** Lors de la création d'un objet en plastique (polymère), une imprimante 3D peut chauffer et fondre les couches ensemble.
- **Un processus frittage laser direct du métal (DMLS) :** Lors de la construction d'un modèle métallique... [1]



Figure 1.1 : L'impression 3D

I.2.2 Historique et l'évolution de l'impression 3D

L'impression 3D, également connue sous le nom de fabrication additive, a été développée dans les années 1980. Au fil des années, la technologie d'impression 3D s'est améliorée en termes de vitesse, de précision et de matériaux utilisés.

De nouveaux procédés d'impression ont également été développés, tels que :

- **La stéréolithographie (SLA)**, une technique utilisant la photo polymérisation pour créer des objets en couches successives à partir de résines liquides. Cette technique a été inventée par Chuck Hull en 1984. [5]
- **La technique de dépôt de filament fondu (FDM) et la fusion par jet de matière (MJF)**, qui offrent différentes approches pour créer des objets en couches successives à partir de matériaux tels que le plastique, le métal... [6]

Les environs des années 2000, l'impression 3D a connu une évolution significative, passant de l'utilisation dans le prototypage à des applications dans divers secteurs tels que l'aérospatiale, l'automobile et la médecine.

Aujourd'hui, l'impression 3D est une technologie mature et incontournable pour produire des pièces sur mesure et la fabrication rapide de prototypes avec des structures plus complexes. Les recherches et innovations continuent d'ouvrir de nouvelles possibilités passionnantes pour cette technologie. [7]

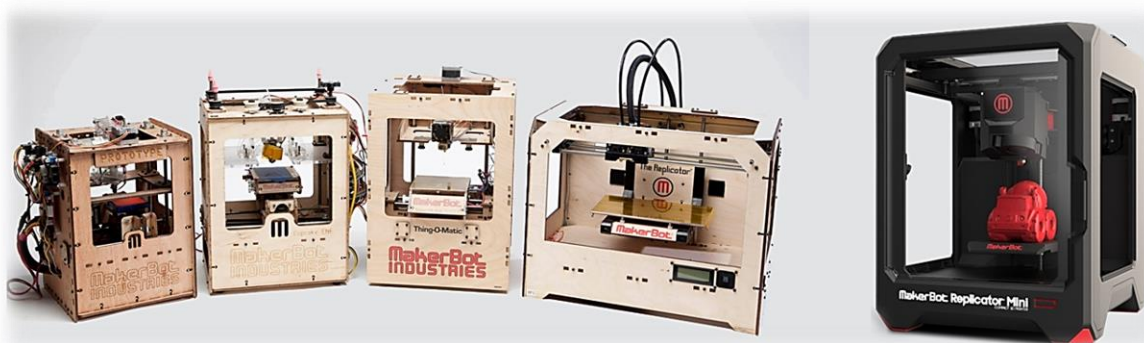


Figure 1.2 : L'évolution de l'impression 3D

I.2.3 Domaines d'application de l'impression 3D

- **Le prototypage rapide** : Est l'une des applications les plus historiques et répandues de l'impression 3D. Cette technique sert à créer un prototype avant leur production en série. [8]



Figure 1.3 : Une Maquette d'architecte imprimée en 3D (Maison)

- **Secteur médical** : Le domaine de la médecine profite aussi de L'impression 3D en offrant des solutions innovantes dans diverses applications, de la conception personnalisée de prothèses et implants (hanches artificielles, bras, appareils dentaires et auditifs personnalisés) à la modélisation d'organes pour la planification chirurgicale avec la création d'un matériau semblable à un os. [9]

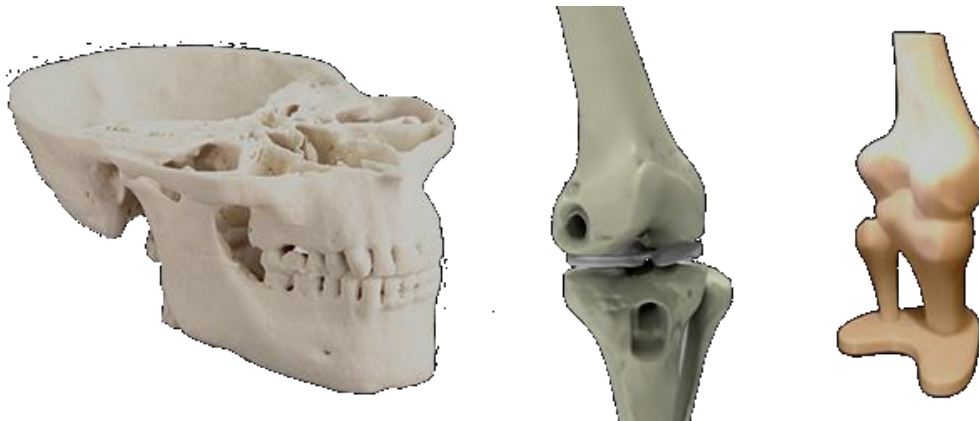


Figure 1.4 : Des modèles 3D des oses sur mesure pour une chirurgie spécifique

- **Industrie aéronautique :** L'impression 3D a apporté d'importantes innovations dans le secteur aéronautique, offrant des avantages en termes de légèreté, de complexité de conception et de rapidité de production. [10]



Figure 1.5 : Un Châssis de Général Electric conçu par l'impression 3D

- **Secteur d'automobile :** L'impression 3D a considérablement influencé l'industrie automobile, offrant des avantages tels que la personnalisation, la légèreté des composants, et la possibilité de produire des prototypes rapidement. [11]

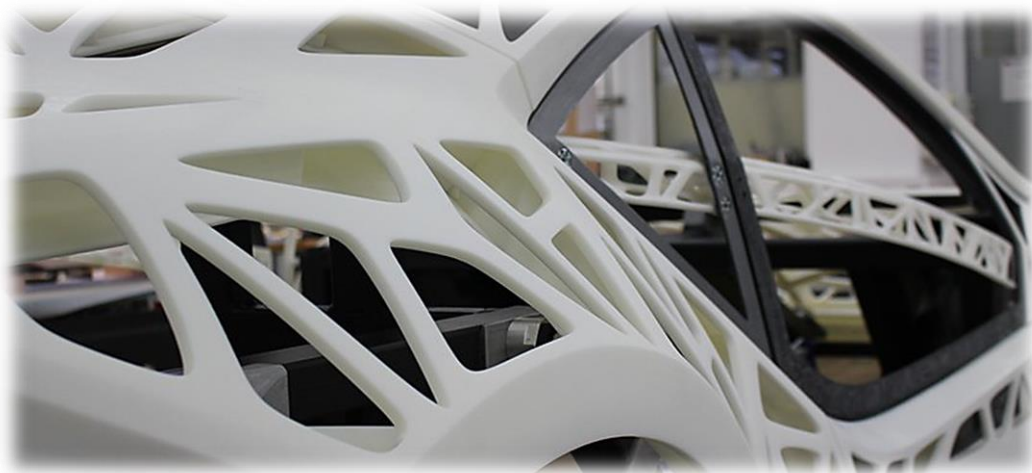


Figure 1.6 : Un prototype des voitures de future (Concept) imprime en 3D

- **Architecture, Bâtiments, Structures** : La technologie d'impression 3D permet de construire des bâtiments de façon très précise, prenant en compte de très petits détails et le tout en un temps réduit. De nombreux cabinets d'architecture ont découvert le potentiel de la technologie d'impression 3D notamment dans la construction de modèles.[12]



Figure 1.7 : Le premier village imprimé en 3D bientôt construit en Amérique latine

- **Alimentation 3D ou le food-printing** : L'impression 3D alimentaire, également appelée food-printing, est une technologie novatrice permettant la création d'objets comestibles à l'aide de matériaux alimentaires. Cette approche révolutionne la préparation alimentaire en offrant plusieurs avantages. [13]



Figure 1.8 : La future technologie d'alimentation le food printing

- **D'autre application :** L'impression 3D est largement utilisée dans la fabrication d'accessoires, offrant la possibilité de créer des objets personnalisés, innovants et esthétiquement uniques tels que des bijoux personnalisés, des lunettes, des casques audios personnalisés, des poignées de vélo....

I.2.4 Les principes de fonctionnement de l'impression 3D

I.2.4.1 Description générale du processus

a) Modélisation 3D

Le processus commence par la création d'un modèle tridimensionnel de l'objet souhaité à l'aide de logiciels de conception assistée par ordinateur (**CAO**) ou en utilisant des fichiers 3D préexistants.

Exemple : Catia, SolidWorks, Sprout, SketchUp ; Autodesk ; Tinker cad ; 3DTin; FreeCad3D

Les fichiers utilisés pour l'impression 3D sont généralement sauvegardés sous des formats tels que **STL** (Standard Tessellation Language) ou **OBJ**, qui convertissent les modèles 3D en une série de triangles formant la surface de l'objet.

b) Préparation du modèle

Une fois le modèle créé, il est importé dans un logiciel de découpage (**slicer**). Ce logiciel divise le modèle en couches horizontales extrêmement fines, définissant ainsi le chemin que l'imprimante 3D suivra pour construire l'objet couche par couche.

Exemple : Des logiciels tels que **Cura**, **Simplify3D**, ou **Prusa Slicer** permettent non seulement de découper le modèle, mais aussi de contrôler des paramètres cruciaux comme la **hauteur de couche**, la **vitesse d'impression**, et la **densité de remplissage**, qui affectent directement la précision et la solidité de l'objet.

c) Choix du matériau

Différents types de matériaux sont utilisés dans l'impression 3D, chacun ayant des propriétés spécifiques. Le choix du matériau dépend de l'application et peut inclure des polymères (**PLA**, **ABS**), des résines, des métaux, des céramiques, des composites, etc.

Exemple : Le **PLA (acide poly lactique)**, par exemple, est apprécié pour sa biodégradabilité et sa facilité d'impression, tandis que l'**ABS** est souvent choisi pour ses propriétés mécaniques supérieures et sa résistance à la chaleur.

d) Préparation de l'imprimante

Avant de lancer le processus d'impression, l'utilisateur doit préparer l'imprimante. Cela implique généralement le chargement du matériau d'impression, le calibrage du plateau d'impression, et la vérification de la température et d'autres paramètres.

e) Impression de la première couche

L'imprimante démarre en déposant la première couche du matériau sur le plateau d'impression. Cette couche sert de base pour le reste de l'objet.

f) Construction couche par couche

L'imprimante ajoute ensuite des couches successives de matériau, en suivant précisément les instructions générées par le logiciel de découpage. Chaque couche est solidifiée avant d'ajouter la suivante.

g) Refroidissement et solidification

Selon la technologie d'impression 3D utilisée, certaines méthodes nécessitent un système de refroidissement pour solidifier rapidement chaque couche. Cela peut inclure l'utilisation de ventilateurs ou d'autres dispositifs de refroidissement.

h) Types de technologies

Il existe plusieurs technologies d'impression 3D, chacune avec ses propres méthodes.

- **Le dépôt de filament fondu (FDM)** utilise un filament plastique fondu,
- **La Stéréolithographie (SLA)** utilise une résine photosensible durcie par la lumière UV,
- **Le frittage sélectif par laser (SLS)** fusionne des poudres pour créer des objets.

i) Supports et structures internes

Dans certains cas, des supports temporaires peuvent être ajoutés pendant l'impression pour maintenir des parties surplombantes de l'objet. Ces supports sont retirés après l'impression.

Exemple : Des matériaux de support solubles (comme le **PVA** ou le **HIPS**) sont souvent utilisés en tandem avec les matériaux principaux pour créer des supports facilement retirables, particulièrement dans les géométries complexes.

j) Post-traitement

Après l'impression, certains objets peuvent nécessiter des étapes de post-traitement telles que le ponçage, le polissage, ou l'application de revêtements spéciaux pour améliorer la finition.

k) Contrôle qualité

L'objet imprimé est inspecté pour vérifier la qualité et l'exactitude. Des ajustements peuvent être apportés au modèle ou au processus d'impression pour améliorer les résultats. [1] [7] [14][15]

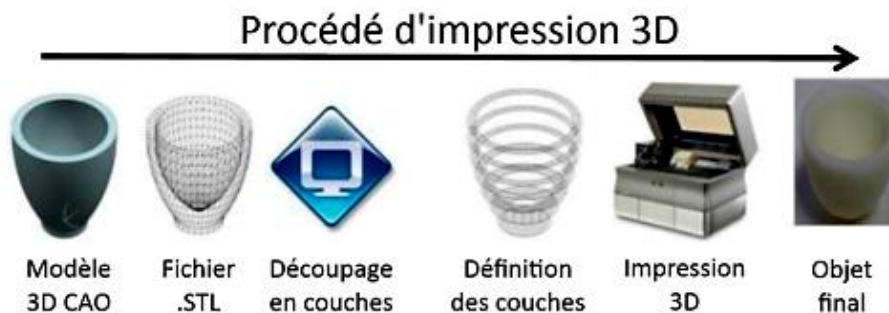


Figure 1.9: Le Procède d'impression 3D

I.2.4.2 Techniques d'impression 3D courantes

Il existe plusieurs procédés d'impression 3D, chacun utilisant des techniques spécifiques pour créer des objets tridimensionnels. Chacun offre des avantages spécifiques en termes de matériaux utilisés, de précision, de vitesse d'impression et de coût. Le choix du procédé dépend des besoins spécifiques de la conception et des caractéristiques recherchées pour l'objet final.

La fabrication additive regroupe aujourd'hui sept catégories de procédés de fabrication additive officiellement normalisés en anglais

- Vat Photopolymerization (Photo polymérisation)
- Powder Bed Fusion (Fusion sur lit de poudre)
- Binder Jetting (Jet de liant)
- Material Extrusion (Extrusion de matière)

- Material Jetting (Projection de matière)
- Sheet Lamination (Strato conception ou laminage de feuilles)
- Directed Energy Deposition (Dépôt sous énergie concentrée)

a) Le dépôt de filament fondu (FDM)

Plus connue sous l'acronyme **FDM** (**F**used **D**eposition **M**odeling), son principe de fonctionnement est simple : un matériau (polymère), souvent présenté sous forme de bobine, passe à travers une buse d'extrusion chauffée entre 170 et 260°C. Il fond et se dépose sur un support par couches dont la finesse varie en fonction du matériel et des réglages (0,02 mm en moyenne). Une fois la première couche terminée, le plateau d'impression descend pour recevoir la seconde et ainsi de suite.

Exemple : La **hauteur de couche** (typiquement entre 0,1 et 0,4 mm) influe sur la finition de surface et le temps d'impression, tandis que la **température d'extrusion** et la **vitesse d'impression** sont cruciales pour obtenir une bonne adhésion entre les couches et éviter des défauts.

On peut également trouver des imprimantes FDM dotées de 2 buses d'extrusion. Cela permet entre autres d'imprimer un objet dans deux couleurs différentes ou deux matériaux différents.

En plus d'être très abordable comparée aux autres procédés la FDM permet d'utiliser une grande variété de matériaux et de couleurs. [16][17][18]

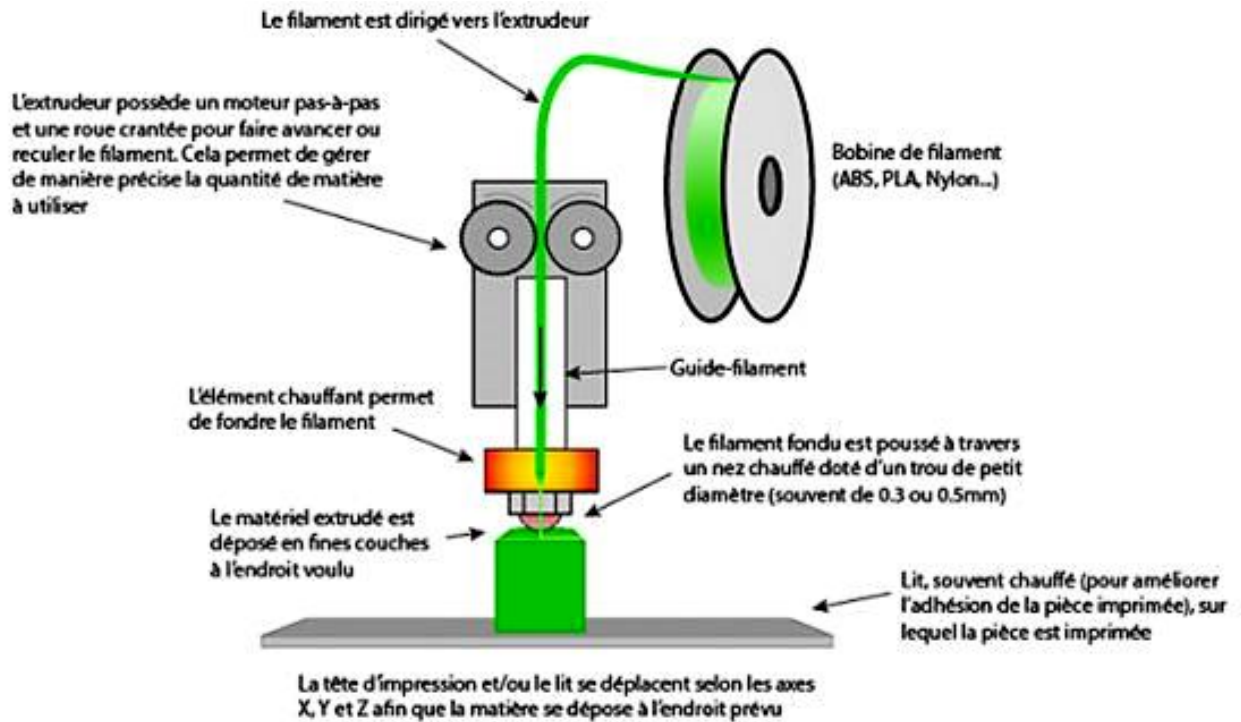


Figure 1.10 : le principe de fonctionnement de procédé de dépôt de filament fondu (FDM)

b) La stéréolithographie (SLA)

Il s'agit de la première technologie d'impression 3D, apparue en 1986, utilisant un laser ultraviolet et un bac de photopolymère liquide. Comme le système à dépôt de filament, ce procédé imprime couche par couche. Le laser frappe le liquide qui se solidifie sous l'effet des ultraviolets. Un plateau immergé dans le bac supporte le matériau ainsi solidifié et descend, comme pour la **FDM**, pour passer d'une couche à la couche suivante.

Une fois l'impression terminée, il faut rincer l'objet pour le débarrasser des restes de photopolymère avec un solvant. L'objet est ensuite passé au four pour le solidifier.

Exemple : Après l'impression SLA, le **lavage** de la pièce dans de l'alcool isopropylique permet de retirer l'excès de résine non durcie, tandis que l'utilisation d'un **four UV** améliore la solidité et la durabilité du produit fini.

Les matériaux utilisables restent assez peu nombreux et malgré la grande précision offerte par la **SLA**, cette technique délivre des objets relativement fragiles. Elle se limite donc à du prototypage plutôt qu'à la production d'objets. [16][19][20]

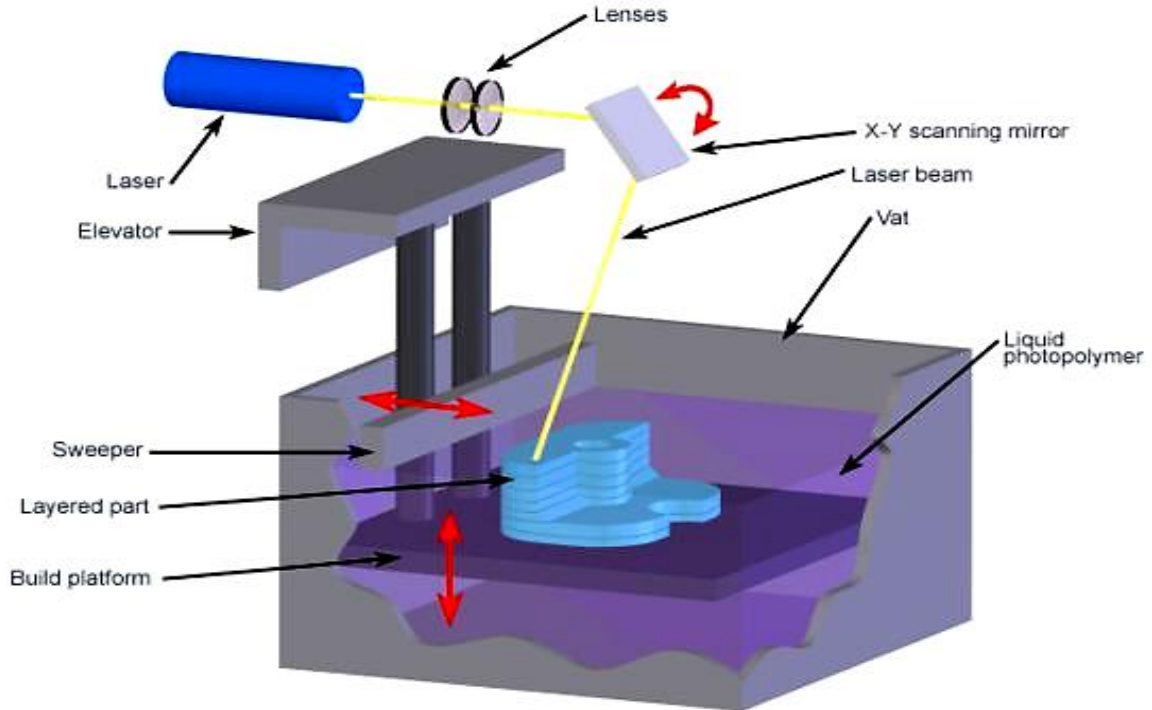


Figure 1.11: le principe de fonctionnement de procédé stéréolithographie (SLA)

c) Le frittage laser (SLS)

À l'instar de la **SLA**, le procédé **SLS** utilise un laser. En revanche, la différence se situe au niveau du matériau, qui n'est plus liquide, mais sous forme de poudre de plastique, de céramique, de verre ou de métal ; pour ce dernier, on parle de **DMLS (Direct Metal Laser Sintering)**.

Exemple : Le **SLS** est largement utilisé dans des applications de haute performance pour l'aérospatiale, où des alliages métalliques peuvent être frittés pour fabriquer des pièces structurales.

Là aussi, on trouve un bac qui contient le matériau (la poudre), mais c'est un rouleau qui vient déposer une fine couche (0,1 mm) sur la plateforme d'impression. Le laser entre alors en action pour fusionner sélectivement des particules de poudres pour former des objets 3D couche par couche. L'avantage de cette technologie est qu'il y a très peu de déchet et que la poudre non fusionnée peut être réutilisée par la suite. En revanche, le SLS demande une poudre aux grains homogènes et un réglage très précis du laser. [16][21][22]

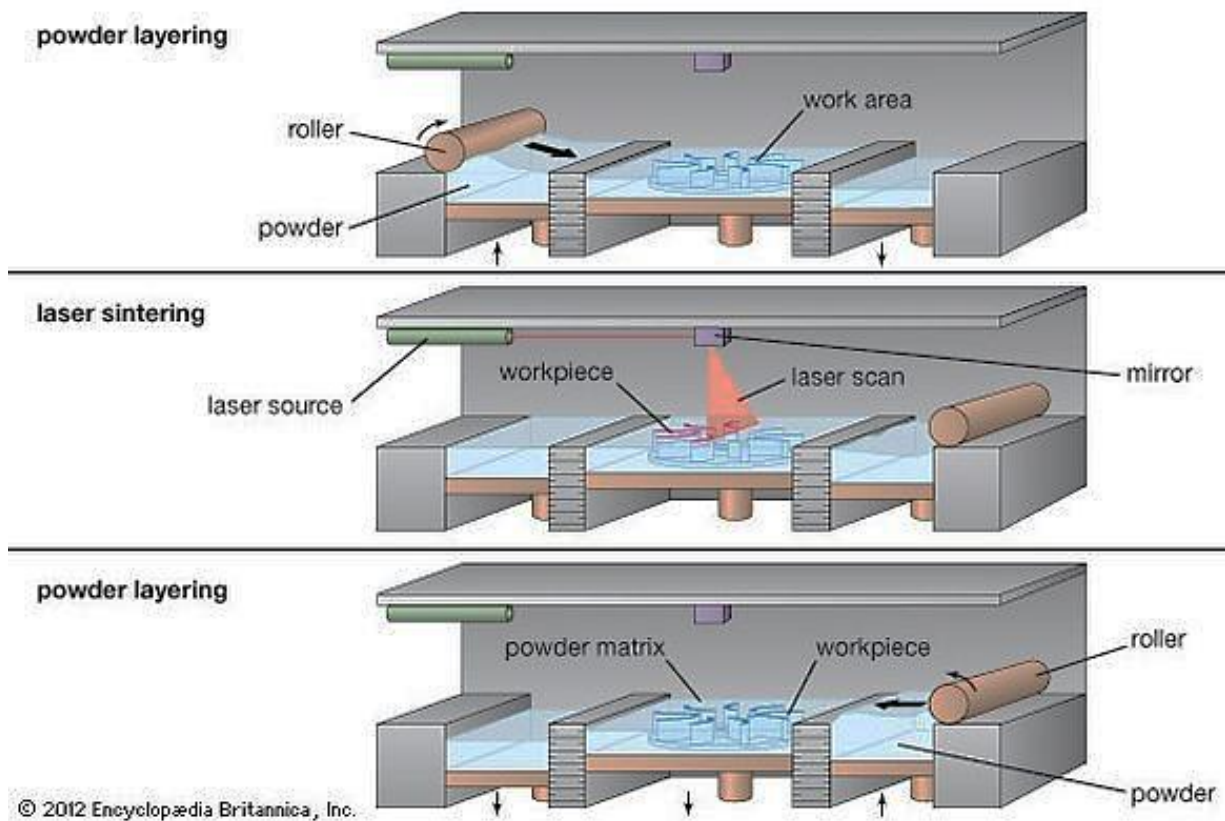


Figure 1.12: le principe de fonctionnement de procédé frittage laser (SLS)

d) Le procédé PolyJet

Le procédé dit **PolyJet** s'appuie sur la **photo polymérisation**. Tout comme le **SLA**. Ici, des jets de matériau sont projetés sur le support d'impression. Après chaque jet, le polymère est solidifié grâce à un rayon UV. Avantage certain de cette technologie, elle ne nécessite pas de post-traitement, comme le ponçage ou le rinçage. Il est également possible d'imprimer des modèles multi matériaux en mélangeant différentes résines photo polymérisables pendant le processus d'impression. [16][23][24]

Exemple : Le **PolyJet** permet de combiner des matériaux rigides et flexibles dans une même impression, ce qui est utile dans les secteurs médicaux pour produire des prothèses avec différentes zones de dureté.

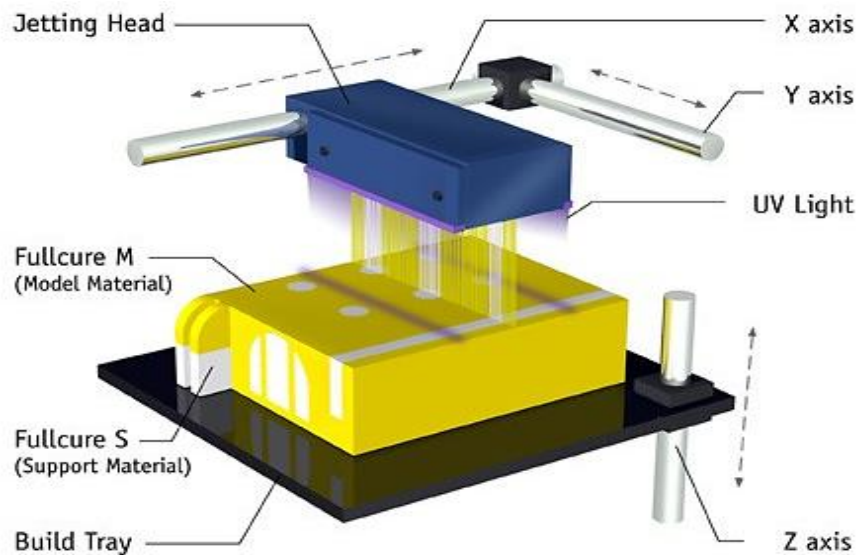


Figure 1.13: le principe de fonctionnement de procédé Poly Jet

e) Le procédé DLP

Développé pour des travaux nécessitant une grande précision, comme la bijouterie ou la fabrication de prothèses, le procédé **DLP** s'appuie sur la même technologie que celle qui est embarquée dans bon nombre de vidéoprojecteurs.

Le principe est similaire à la **SLA**, dans le sens où la lumière est utilisée pour solidifier un polymère liquide. Une puce composée d'une matrice de miroirs orientables parfois plusieurs millions réfléchit une lumière UV et projette une sorte d'image correspondant à la forme de la couche à imprimer. Cette lumière vient donc frapper le polymère qui se trouve dans un bac pour le solidifier. Le traitement se fait couche par couche, comme dans le cas du **SLA**.

L'avantage du procédé **DLP** sur la **stéréolithographie (SLA)** est sans conteste la rapidité. En effet, une couche peut être solidifiée à chaque projection de lumière. Seul un déplacement vertical de la plateforme est nécessaire. [16][25][26]

Exemple : Le procédé **DLP** est préféré pour des applications nécessitant une grande précision, comme la production de couronnes dentaires ou de bijoux sur mesure, en raison de sa capacité à capturer des détails extrêmement fins avec une vitesse plus rapide que la **SLA**.

I.3 Généralités sur les filaments d'impression 3D

Les imprimantes 3D deviennent de plus en plus populaires, les fabricants développent également de nouveaux filaments avec des couleurs différentes ou /avec des caractéristiques spécifiques. Actuellement, il existe une large gamme de filaments disponibles et sont fabriqués à partir de matériaux tels que l'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrene), le PLA (Polyacide lactique), le PETG (Poly téréphtalate d'éthylène glycolase), Le PC (Poly Carbonate) et le Nylon et bien d'autres.

I.3.1 Les types de filaments les plus importants

I.3.1.1 Le PLA (Acide Poly lactique)

Le PLA est un biomatériau composé la plupart du temps d'amidon de maïs possède un impact environnemental réduit comparé à d'autres plastiques. [27]

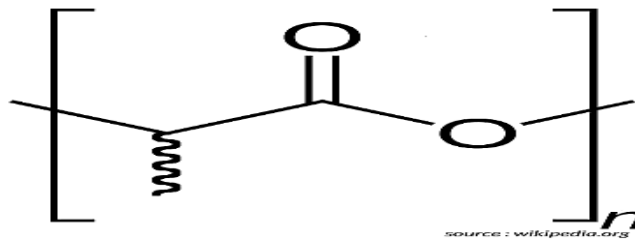


Figure 1.14 : Formule chimique du PLA (acide poly lactique)

Le Filament en PLA est le plus utilisé dans l'impression 3D pour sa facilité d'utilisation, sa biodégradabilité et sa disponibilité dans une gamme de couleurs (voir figure I. 14).

Comme tous les matériaux utilisés en impression 3D, le PLA représente certains inconvénients qui limitent son utilisation. Il n'est pas adapté à toutes les utilisations, sensible à l'humidité, les objets imprimés en PLA ne devront pas être exposés à l'eau, ou ils devront être recouvert de résine. Le PLA n'est ni flexible ni résistant à la chaleur et aura tendance à se casser et à se ramollir.[28][29].



Figure 1.15 : Les bobines des Filaments en PLA

I.3.1.2 L'Acrylonitrile Butadiène Styrène (ABS)

Un thermoplastique à base de produits pétroliers, de formule chimique [30]

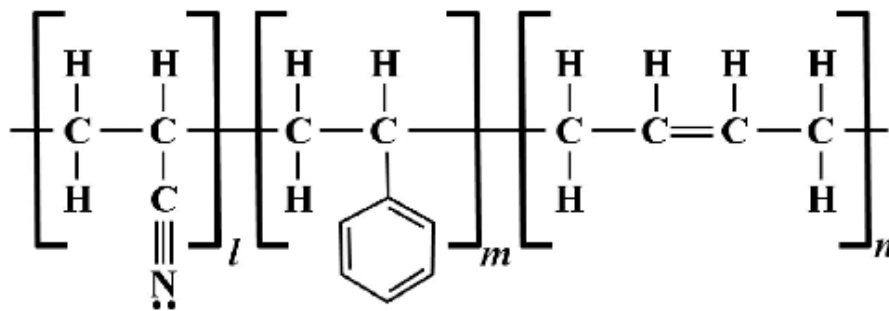


Figure 1.16 : Formule chimique du L'ABS

Le filament ABS sera plus capricieux lorsqu'on voudra l'imprimer. Contrairement au PLA, l'ABS dégage une forte odeur lors de sa fusion, ainsi que des fumées et des particules potentiellement nocives. Il est de ce fait recommandé d'équiper un système de filtration de l'air. Malgré la difficulté que peut apporter l'ABS lors de son impression, il reste un plastique très intéressant. L'ABS possède une très grande résistance aux chocs. De plus, il ne se cassera pas facilement et aura tendance à se plier plutôt qu'à se rompre.

Nécessitant une assez haute température d'impression, l'ABS résiste à des températures plus hautes que le PLA, fondant entre 200 et 250 °C, une fois durci, l'ABS est capable de résister à d'importantes variations de température, allant de -20 °C à +80 °C

De plus, il s'agit d'un matériau durable, qui ne se dégradera pas facilement avec le temps et les conditions climatiques pour un usage extérieur. Certains ABS auront tendance à jaunir au contact prolongé des UV du soleil.

Une application typique de l'ABS comprend par exemple les appareils électroménagers, casques de vélo et blocs pour enfants

Toutes sortes de boîtiers, couvercles, poignées, leviers ou petits éléments de finition sont également en ABS. Il faut aussi souligner que ce matériau ne doit pas entrer en contact avec des aliments. [31]



Figure 1.17 : Les bobines Des Filaments en ABS

I.3.1.3 Le Polycarbonate (PC)

Le filament Polycarbonate (PC) est le plus solide des matériaux thermoplastiques courants de formule chimique [32]

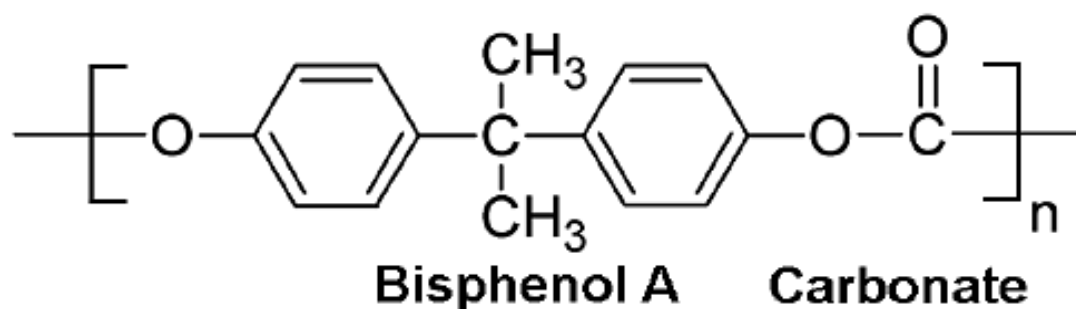


Figure 1.18 : Formule chimique de polycarbonate (PC)

Ce plastique est présent autour de nous sous la forme de phares de voiture, de verre de lunettes, de carter d'appareil ménager par exemple. Les caractéristiques de polycarbonate en termes de résistance mécanique sont élevées et résiste à des hautes températures (jusqu'à 140°).

Cette gamme de filament 3D en polycarbonate s'adresse particulièrement aux industriels des secteurs de l'automobile, de l'aérospatiale ou de l'industrie. Il est primordial d'être équipé d'une imprimante 3D suffisamment performante et fiable pour utiliser ce dernier. Les hautes températures d'utilisation de ce matériau exigent lors de la phase d'impression un contrôle thermique important. [33]

I.3.1.4 Le polyéthylène téréphtalate mélange de glycol (PETG)

Le PETG, dérivé du PET (Polyéthylène téréphtalate) est un polymère pétro source possédant de grandes qualités. Le PETG est plus facile à imprimer que l'ABS et plus résistant à la chaleur que le PLA [34]

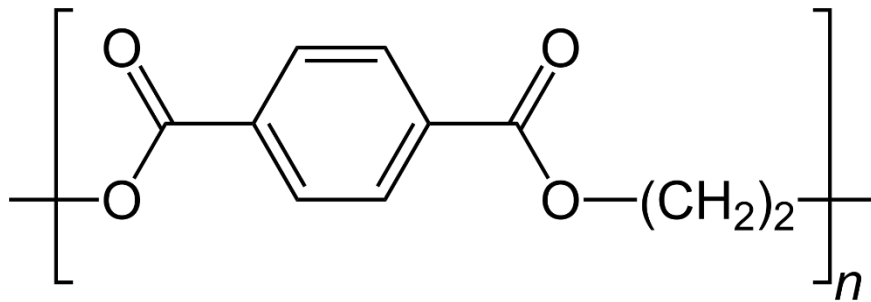


Figure 1.19 : Formule chimique de polyéthylène téréphtalate glycolase

C'est un type de filament durable et flexible avec une résistance totale à l'eau et aux produits chimiques, c'est pourquoi il est régulièrement utilisé pour imprimer des articles tels que des bouteilles et autres emballages.



Figure 1.20 : Les bobines Des Filaments en PETG

I.3.1.5 Le nylon (PA)

Le Nylon est un plastique de la famille des polyamides, il est un thermoplastique cristallin. Il dégage peu d'odeur lors de l'impression 3D.

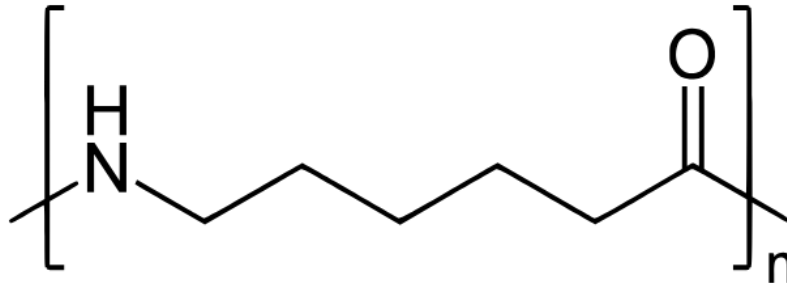


Figure 1.21 : Formule chimique du nylon

Le filament Nylon est une famille de matériau à part dans la gamme des thermoplastiques, ces polyamides existent sous différentes formes. C'est un type de filament durable et flexible, insoluble et résistant à l'abrasion et aux dommages mécaniques. Mais comme inconvénient, pour l'imprimer il faudra veiller à une bonne stabilité de la température de la zone d'impression. Enfin, le Nylon est très sensible à l'humidité et il ne faudra donc pas laisser vos impressions dans un milieu humide et stocker vos bobines entamées dans un endroit sec.

Le choix du filament dépend entièrement de l'application spécifique et des besoins de l'utilisateur. Chaque type de filament a ses propres avantages et inconvénients, et ce qui peut être moins important dans un contexte peut être crucial dans un autre. Cependant, voici quelques filaments qui pourraient être considérés comme moins courants dans certaines situations à savoir les filaments Polypropylène, les filaments composites... [35]

I.3.2 Autres types de filaments moins courants

Certains filaments en impression 3D, bien que moins courants, sont adaptés à des besoins spécifiques selon leurs propriétés.

I.3.2.1. Polypropylène (PP)

Ce filament est un matériau polyvalent, fréquemment utilisé pour des applications alimentaires, les pièces automobiles et la vaisselle micro-ondable. Il résiste aux acides, aux alcalins et aux frottements tout en étant durable, flexible et un bon isolant électrique. [36]

Avantages

- Usage alimentaire et haute durabilité
- Bonne résistance aux produits chimiques
- Semi-rigide, convient aux pièces fines

Inconvénients :

- Nécessite un revêtement d'accroche sur le plateau d'impression
- Cristallisation qui limite les détails
- Impression de lentilles

I.3.2.2. Filament souple (TPU)

Le TPU est un matériau flexible souvent utilisé pour remplacer les caoutchoucs rigides. Mesuré par duretés Shore, il est compatible avec la plupart des imprimantes 3D FDM et permet des applications flexibles résistances aux impacts. [37]

Avantages

- Résistance aux chocs et à la déchirure
- Mémoire de forme, combinable avec le support PVA (soluble)

Inconvénients

- Limité aux formes géométriques simples
- Flexibilité semblable au caoutchouc rigide, mais moins que le silicone

I.3.2.3. HIPS (polystyrène à fort impact)

Le HIPS, un copolymère de butadiène et de styrène, est résistant aux chocs et peut servir de support pour les pièces en ABS en raison de sa solubilité. Cependant, il nécessite des températures élevées d'impression et émet des vapeurs généralement nocives. [38]

Avantages

- Excellente résistance aux chocs, supporte de hautes températures
- Solubilité qui facilite les supports complexes pour ABS

Inconvénients

- Imprimable seulement à haute température (220-250°C) avec un plateau chauffant

I.3.3 Les filaments composites

Les matériaux composites ont été appliqués au domaine de l'impression 3D pour produire des pièces mécaniques plus résistantes par rapport aux thermoplastiques traditionnels (tels que l'ABS ou le PLA), les matériaux composites sont plus solides, plus rigides, plus résistants à la chaleur et plus durables, ce qui élargit les domaines d'application de l'impression 3D. La qualité d'impression est affectée par la quantité de fibres employée. Les composites à fibres courtes renforcent uniformément l'ensemble de la pièce. Cependant, au-delà d'un certain seuil, la pièce imprimée en 3D perd en qualité de surface. D'autre part, l'impression 3D à fibres continues est un processus plus compliqué, qui nécessite deux buses pour imprimer simultanément. Parmi ces composites on peut citer :

- Filaments en Fibre de carbone
- Filaments en Fibre de verre
- Filaments en Fibre métallique
- Filaments Composites 3D spéciaux : Filaments conducteurs, Filaments magnétiques...
- Filaments composites Naturels (poly BOIS) et écologique. [39]

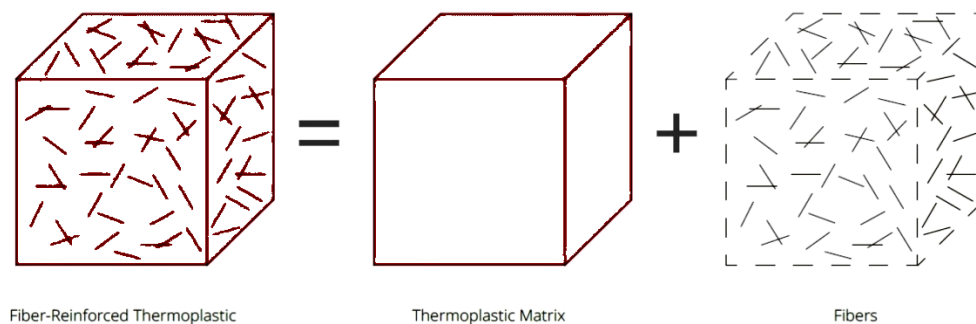


Figure 1.22 : schéma représente le composite obtenu par la fibre et la matrice

I.3.3.1 Renforcement par fibres courtes et continue

Les composites sont souvent renforcés avec des fibres comme le carbone, le Kevlar ou la fibre de verre, qui améliorent leur résistance mécanique. Deux formes principales de fibres sont utilisées [40]

1. **Fibres courtes** : Ces fibres sont découpées en petits morceaux et mélangées avec un thermoplastique (souvent nylon ou ABS). Ce mélange est ensuite extrudé en filaments pour l'impression FDM, offrant un renfort uniforme dans la pièce.
2. **Fibres continue** : Dans ce cas, la fibre est insérée dans la pièce imprimée pendant le processus d'impression 3D à l'aide d'une seconde buse dédiée. La fibre continue fusionnée avec le thermoplastique, un processus appelé « Continuous Fibre Fabrication » (CFF), améliorant la résistance aux zones critiques.

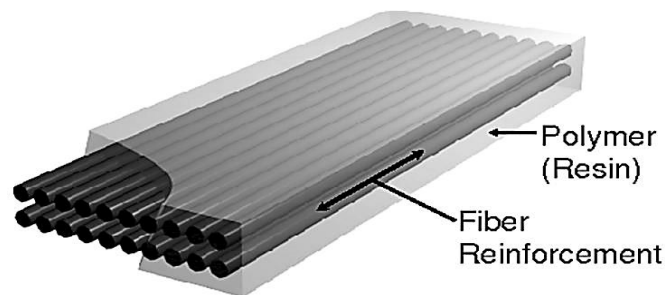


Figure 1.23 : un filament composite de la résine renforcé par une fibre

I.3.3.2 Impression 3D et technologies spécifiques

Pour les composites, les imprimantes FDM ont souvent des buses plus larges et durcies, en raison de l'abrasivité des fibres. Par exemple, des filaments en fibre de carbone nécessitent des buses de 0,4 mm, tandis que les filaments de bois peuvent nécessiter jusqu'à 0,8 mm. Une réduction de la vitesse d'impression est également nécessaire pour atteindre le serrage élevé et éviter une usure rapide des composants. [41]

I.3.3.3 Types de filaments composites professionnels

Les principaux types de filaments composites incluent : [42][43]

1. **Fibre de carbone** : offrant une rigidité élevée et une légèreté, les filaments renforcés de fibre de carbone sont utilisés pour des applications nécessitant des structures rigides, mais utilisent rapidement les buses.
2. **Fibre de verre** : Très résistance à la chaleur et aux chocs, elle est idéale pour des pièces structurales exposées à des contraintes élevées.
3. **Filaments métalliques** : Composés d'un pourcentage élevé de poudre métallique, ils subissent des processus complexes d'impression, de délainage et de frittage pour obtenir

des pièces métalliques denses, robustes et résistantes à la corrosion, utilisées pour l'outillage et les composants fonctionnels.

I.3.3.4 Autres filaments spécialisés

D'autres matériaux comme le basalte, le bois, la céramique, et les nano-composites sont également employés pour des applications plus techniques. Les propriétés spécifiques de chaque type de filament permettent de répondre à des besoins précis, du secteur automobile à l'aérospatiale, en passant par les équipements de protection. [44]

I.3.3.5 Conclusion

Les filaments composites élargissent les capacités de l'impression 3D en permettant la création de pièces durables et résistantes, adaptées aux besoins industriels. Bien que l'impression 3D avec des composites nécessite des ajustements techniques et des précautions, elle représente une avancée majeure pour la production de composants de haute performance.

I.3.4 Choix des Filaments pour l'Impression 3D

I.3.4.1 Types de Filaments : Rigides, Souples et Élastiques

Rigides : PLA, ABS, PET-G, parfaits pour des objets solides et non déformables comme les boîtiers.

Souples : Nylon, Polypropylène, adaptés pour des objets compressibles mais non étirables.

Élastiques : TPU, TPS, utilisés pour des objets étirables comme les coques de téléphone. [45]

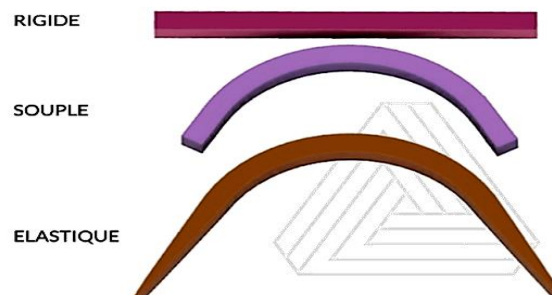


Figure 1.24 : Types de Filaments : Rigides, Souples et Élastiques

- 1) **Résistance mécanique** : Chaque matériau a des propriétés différentes :
 - PLA : Bonne résistance à la traction, mais faible compression.
 - ABS : Bonne résistance à la compression, faible flexion.
 - PET-G : Compromis entre PLA et ABS.
- 2) **Résistance thermique** :
 - PLA supporte jusqu'à 50°C, PET-G jusqu'à 70°C, et ABS jusqu'à 90°C.
- 3) **Esthétique et Facilité d'impression** :
 - PLA : Finition satinée, facile à imprimer.
 - PET-G : Aspect brillant, adhérence au plateau parfois difficile.
 - ABS : Aspect mat, impression complexe nécessitant une enceinte fermée pour éviter les déformations.
- 4) **Matériaux Purs pour Applications Spécifiques**
 - **PMMA** : Transparence élevée.
 - **PVDF** : Résistant aux produits chimiques.
 - **ASA** : Résistant aux UV.
 - **Polycarbonate** : Grande résistance aux chocs et à la chaleur.
- 5) **Filaments Esthétiques**
 - **Bois, Effet Métal, Ultra Brillant, Mat et Phosphorescents** : Offrent des options esthétiques variées pour l'impression.
- 6) **Filaments Chargés pour Performances Améliorées**
 - Exemples : **PET-G carbone, Nylon carbone, Polypropylène fibre de verre** pour une durabilité et résistance mécanique accrues.
- 7) **Alliages et Filaments Hautes Performances**
 - **Alliages** comme **PC-ABS** ou **PC-PTFE** pour des améliorations mécaniques.
 - **Filaments hautes performances** : **PEEK, PEKK, PEI, PPSU** pour des applications exigeant des propriétés mécaniques et thermiques exceptionnelles.

En résumé, le choix du filament dépend des besoins en résistance, esthétique, et contraintes thermiques.

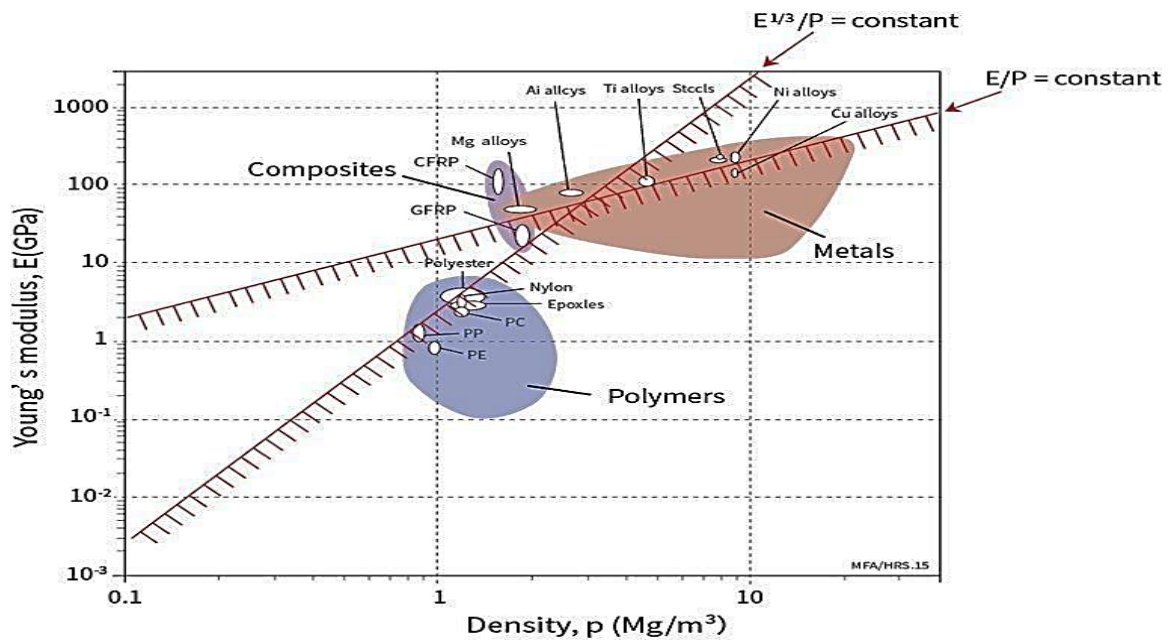


Figure 1.25 : Le Diagramme de ASHBY pour le choix de matériaux conçu pour les filaments de l'impression 3D

I.4 Conclusion

La première partie de ce travail a exploré les principes fondamentaux et les technologies de l'impression 3D, mettant en lumière les avancées significatives dans ce domaine en rapide évolution. Ces technologies, associées à divers types de matériaux, permettent aujourd'hui de créer des prototypes, des pièces fonctionnelles et des produits finaux dans un éventail d'industries telles que l'aérospatiale, la médecine, l'automobile et bien d'autres. Les processus d'impression, notamment le dépôt de fil fondu (FDM), jouent un rôle essentiel dans la précision et la complexité des pièces produites, tout en répondant à des exigences spécifiques en matière de résistance mécanique, de durabilité et de fonctionnalité.

La seconde partie a permis de passer en revue les types de filaments couramment utilisés dans l'impression 3D, chacun présentant des caractéristiques et des applications distinctes. Le PLA, l'ABS, le polycarbonate (PC), le PETG, et le nylon (PA) figurent parmi les matériaux les plus populaires en raison de leurs propriétés uniques et de leur accessibilité. En parallèle, des filaments moins conventionnels et des composites renforcés de fibres courtes ou continues (telles que les fibres de carbone ou de verre) sont utilisés pour répondre à des besoins techniques plus exigeants, notamment pour des applications industrielles où la résistance, la légèreté et la durabilité sont essentielles. Ces matériaux ouvrent des perspectives nouvelles, bien que leur impression requière un équipement spécialisé en raison de leur nature abrasive ou de leurs propriétés spécifiques.

En somme, l'évolution des filaments d'impression 3D et des technologies associées permet de répondre aux besoins variés et exigeants des industries modernes. La diversité de ces matériaux et la possibilité d'intégrer des renforts naturels ou techniques sont des atouts majeurs pour répondre aux défis de performance, d'éco-responsabilité et d'optimisation des coûts dans un contexte industriel. Ces avancées permettent d'envisager l'impression 3D non seulement comme un outil de prototypage, mais aussi comme un processus de fabrication directe offrant un potentiel immense d'innovation.

Chapitre 02

**La conception d'une machine
extrudeuse et système de bobinage
pour les filaments 3D**

II.1 Introduction

Dans le domaine de l'impression 3D, les filaments jouent un rôle crucial en tant que matériau de base pour la création d'objets tridimensionnels. Cependant, la qualité des impressions 3D dépend en grande partie des propriétés des filaments utilisés. Une machine extrudeuse efficace et précise est essentielle pour produire des filaments de haute qualité, uniformes et adaptés à différentes applications.

Les objectifs visés dans ce chapitre sont

- Concevoir une machine extrudeuse capable de produire des filaments 3D de haute qualité avec une grande précision et une uniformité.
- Optimiser les paramètres de fabrication pour obtenir des filaments adaptés à différentes technologies d'impression 3D.
- Proposer une conception modulaire et évolutive permettant d'adapter la machine aux besoins spécifiques des utilisateurs et aux évolutions technologiques du secteur.
- Concevoir un système de refroidissement.
- Concevoir un système de bobinage pour les filaments.

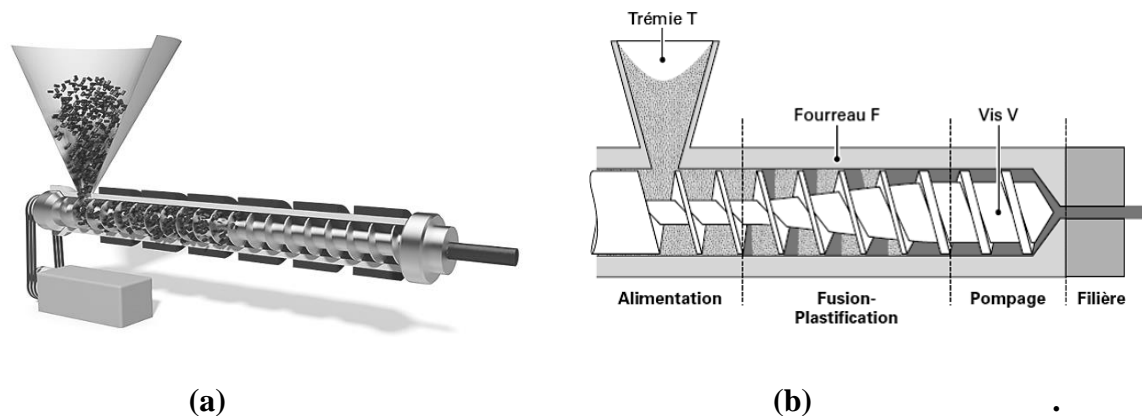


Figure II.1: schéma général d'une machine extrudeuse pour les filaments.

II.2 La conception d'une machine extrudeuse

Dans cette phase, nous examinons en détail les composants et le fonctionnement de la machine d'extrusion pour les filaments 3D, ainsi que les principes fondamentaux qui soutiennent son mécanisme. Cette étude approfondie permettra de comprendre les besoins spécifiques de conception et de développer une solution robuste et efficace.

En analysant chaque aspect du mécanisme et du fonctionnement de la machine d'extrusion pour les filaments 3D de manière détaillée, nous pourrions acquérir une compréhension approfondie de son fonctionnement et de ses exigences de conception, ce qui servira de base solide pour la conception et le développement ultérieurs.

II.2.1 Le principe et mécanisme de fonctionnement d'une machine extrudeuse

Le principe de fonctionnement repose sur plusieurs étapes clés, depuis l'alimentation du matériau jusqu'à l'extrusion du filament final. Le processus d'extrusion passe par les étapes suivantes :

- 1. Alimentation du matériau :** Le processus débute par l'alimentation des granulés de matériau polymère dans la trémie de la machine d'extrusion.
- 2. Transport et compression :** Les granulés sont acheminés vers la zone d'alimentation par une vis d'extrusion rotative. À mesure que les granulés avancent le long de la vis, ils sont comprimés, compactés et chauffés progressivement.
- 3. Fusion et mélange :** Les granulés chauffés entrent dans une zone de fusion où ils sont soumis à une température contrôlée. Sous l'effet de la chaleur et de la pression exercée par la vis, les granulés fondent et se transforment en une masse malléable. Les additifs, tels que les colorants ou les agents de renforcement, peuvent être ajoutés à cette étape pour modifier les propriétés du matériau.
- 4. Extrusion :** La masse plastique fondue est poussée à travers une filière de forme spécifique pour former un filament continu. La filière détermine le diamètre et la forme du filament final, qui peut varier en fonction des besoins de l'utilisateur ou de l'application.

5. **Refroidissement et solidification** : Le filament extrudé passe à travers un système de refroidissement qui utilise de l'air ou de l'eau pour refroidir rapidement le matériau. Ce refroidissement rapide permet au filament de solidifier et de conserver sa forme et ses dimensions finales.
6. **Bobinage ou coupe** : Une fois refroidi et solidifié, le filament peut être enroulé sur une bobine pour un stockage ultérieur ou coupé à la longueur souhaitée pour une utilisation immédiate.

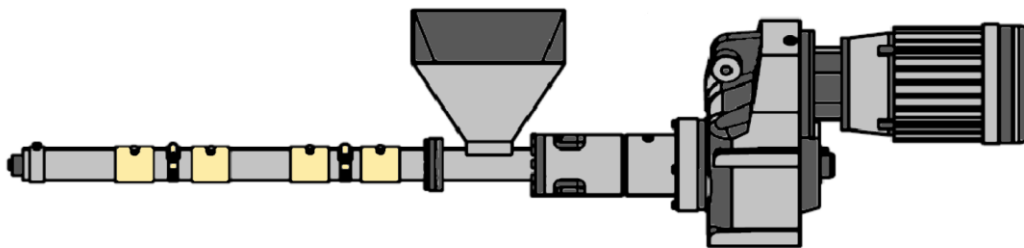


Figure II.2: La forme fondamentale d'une machine extrudeuse pour les filaments.

Les principes fondamentaux de fonctionnement

- Contrôle de la température
- Pression et cisaillement
- Mélange homogène
- Refroidissement rapide
- Contrôle des paramètres

II.2.2 Les composants d'une machine d'extrusion pour les filaments 3D

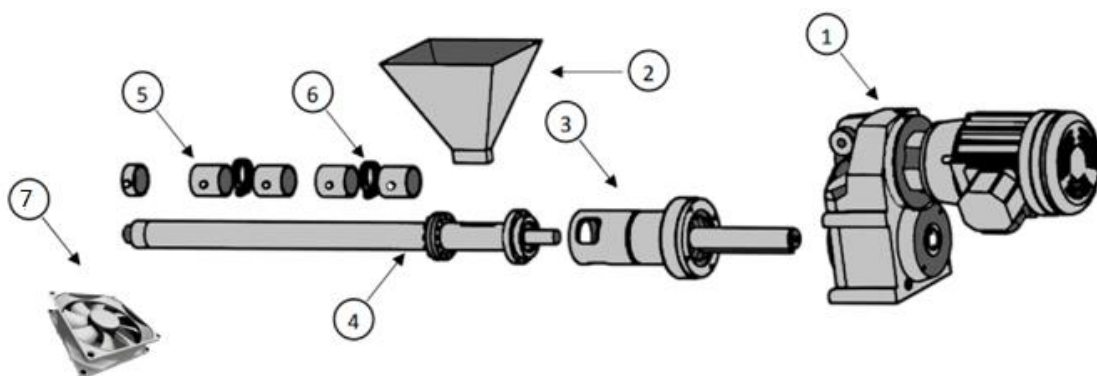


Figure II.3 : Les composants fondamentaux d'une machine d'extrusion pour les filaments 3D

Tableau II.1 : Les différents composants d'une machine extrudeuse.

Numéro du composant	Nom du composant	Nombre utilisé
1	Moteur Réducteur	01
2	Trémie	01
3	Roulement D'accouplement	01
4	Vis-Fourreau (tube et vis)	01
5	Colliers Chauffants	04
6	Thermo Couples	02
7	Système de Ventilation	02

II.2.3 Les caractéristiques des composants mécaniques et thermoélectriques de l'extrudeuse

II.2.3.1 Les composants mécaniques

a) Le moteur réducteur

Le moteur réducteur est un composant clé, responsable de la transmission du mouvement rotatif de la vis d'extrusion. Le type de moteur utilisé dans cette présente étude est **WIPER ENGINE**.

- **Fonctionnement**

Le moteur électrique génère un couple rotatif qui est transmis à un système de réduction de vitesse, tel qu'un jeu d'engrenages, pour augmenter le couple et réduire la vitesse de rotation. Ce mouvement rotatif est ensuite transmis à la vis d'extrusion, qui agit comme un piston pour comprimer, fondre et extruder le matériau plastique à travers la machine

- **Caractéristiques importantes**

Puissance : La puissance du moteur réducteur doit être adaptée aux exigences de la machine d'extrusion, en fournissant suffisamment de couple pour déplacer efficacement le matériau polymère.

- Tensions disponibles : 12V - 24V CC, 110V – 220V (50-60Hz) AC
- Consommation d'énergie maximum : 55W

- Puissance de démarrage : 220W

Vitesse et couple : La sélection du rapport de réduction de vitesse et du couple du moteur réducteur dépend des spécifications de la machine et des propriétés du matériau à extruder.
Balayage par minute : 45+2

Fiabilité : Le moteur réducteur est robuste et fiable et garanti un fonctionnement continu et sans problème de la machine d'extrusion.

- Distance de sécurité du compas : 1.5 m
- Poids : 3kg
- Température moyenne de fonctionnement : -30° à +40°C
- Température maximum du casing (environnement 25°C) : 60°C
- Moteur protégé par interrupteur thermique (65°C)
- Niveau de protection du couvercle : IP 50

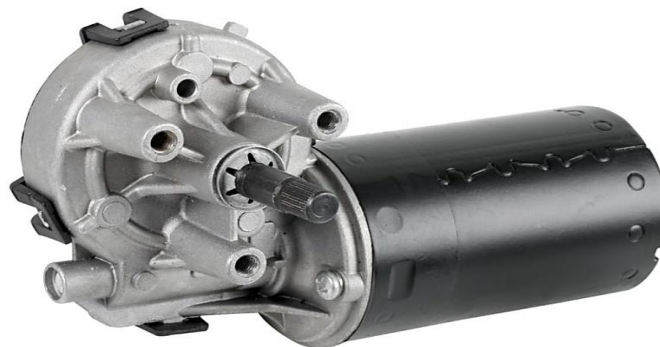


Figure II.4 : Moteur (WIPER ENGINE)

b) La trémie

La trémie est une composante essentielle de la machine, jouant un rôle crucial dans le processus d'alimentation et de dosage du matériau.

- **Le fonctionnement**

L'opérateur verse les granulés dans la trémie, qui les stocke temporairement.

Un système d'alimentation contrôlé régule ensuite la quantité de granulés introduite, permettant un débit continu et constant vers la vis d'extrusion pour garantir une extrusion uniforme du matériau.

- **Caractéristiques importantes**

Capacité : Détermine la quantité de matériau pouvant être stockée et traitée par la machine. Elle doit être adaptée aux besoins de production spécifiques de l'application.

Conception : ergonomique facilite le chargement des granulés

Forme : Pyramide rectangulaire tronquée minimise les risques de blocage ou d'obstruction du matériau.

Étanchéité : Il est important que la trémie soit étanche pour éviter les fuites de matériau et assurer un processus d'extrusion propre et efficace.

- **Matériaux de construction :**

Les trémies sont fabriquées à partir de matériaux robustes et durables tels que l'acier inoxydable ou le plastique renforcé.

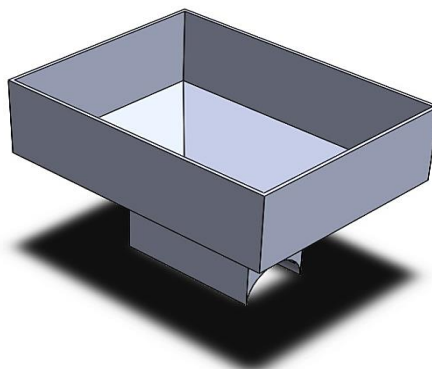


Figure II.5 : La trémie

c) **La vis sans fin et du fourreau**

La combinaison de la vis sans fin et du fourreau (ou tube) constitue un élément central dans le processus d'extrusion des filaments 3D.

- **Vis sans fin d'extrusion**

La vis sans fin est une composante cylindrique dotée d'un filet hélicoïdal, qui tourne à l'intérieur du fourreau. Elle est responsable du transport, de la compression, de la fusion et de l'extrusion du matériau polymère à travers la machine.

La vis est conçue avec différentes zones, telles que la zone d'alimentation, de compression, de fusion et d'extrusion, chacune ayant un rôle spécifique dans le processus d'extrusion.



Figure II.6 : Vis sans fin d'extrusion.

- **Fourreau (ou tube)**

Le fourreau, également appelé tube d'extrusion, est un élément cylindrique à travers lequel passe la vis d'extrusion. Il fournit un canal de guidage pour la vis et maintient son alignement pendant le processus d'extrusion. Le fourreau est généralement fabriqué à partir de matériaux résistants à la chaleur et à l'usure, tels que l'acier trempé ou le carbure de tungstène.

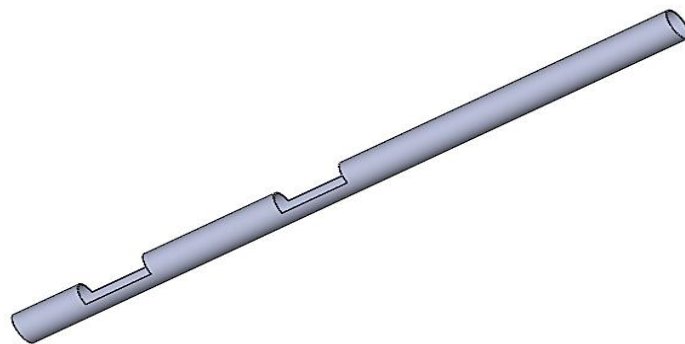


Figure II.7 : Le fourreau (ou tube).

Ensemble, la vis et le fourreau forment le cœur du système d'extrusion. Leur conception et leur fonctionnement doivent être soigneusement optimisés pour assurer un flux régulier et contrôlé du matériau plastique, ainsi qu'une fusion homogène et une extrusion précise du filament final.



Figure II.8 : Ensemble, la vis sans fin et fourreau.

d) Roulement d'accouplement et mécanique

Le roulement d'accouplement a le rôle d'accoupler le moteur réducteur avec la vis sans fin. Le moteur réducteur tourne avec une vitesse connue puis il fait tourner l'arbre par une clavette entre eux.

Pour le roulement mécanique qui est un dispositif destiné à guider un assemblage en rotation, c'est-à-dire à permettre à une pièce de tourner par rapport à une autre selon un axe de rotation. Par rapport aux paliers lisses, le roulement permet d'avoir une très faible résistance au pivotement tout en supportant des efforts importants. Nous pouvons en trouver dans les machines à café, les skateboards, les trottinettes, les voitures...

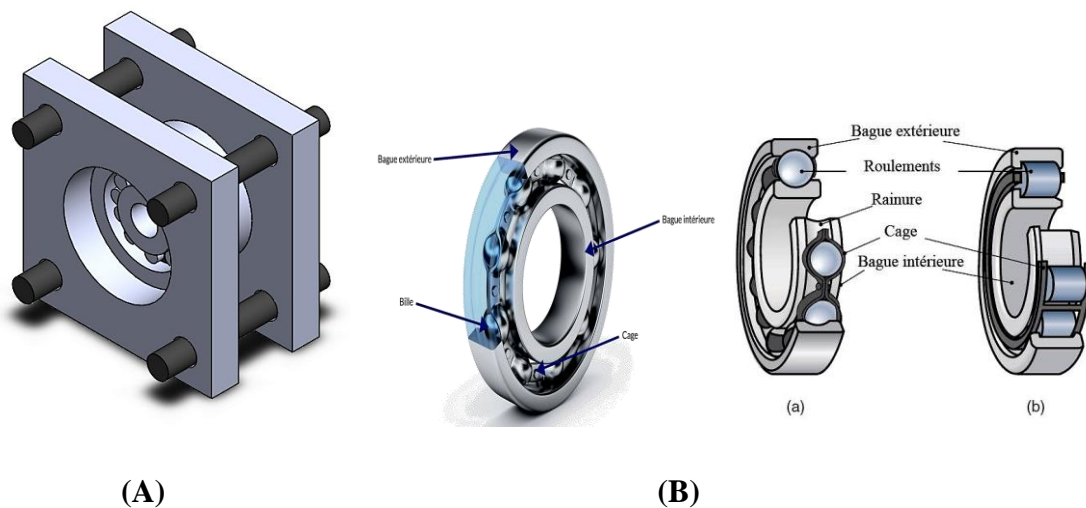


Figure II.9 : Le roulement d'accouplement (A) et le roulement mécanique (B).

e) La tête et la filière finale

- **La tête d'extrusion**

La tête d'extrusion est la partie de la machine où le matériau fondu est formé en un filament continu. Elle est généralement située à la sortie de la vis d'extrusion et juste avant la filière.

La tête d'extrusion est souvent composée de plusieurs éléments, y compris des dispositifs de chauffage pour maintenir le matériau à l'état fondu jusqu'à ce qu'il atteigne la filière.

- **La filière (Die) :**

Une pièce d'outil située à la sortie de la tête d'extrusion, juste avant que le matériau fondu ne soit formé en un filament. Elle détermine la forme et les dimensions finales du filament extrudé. Par exemple, elle peut produire des filaments de diamètres différents ou de sections transversales spécifiques.

La filière est généralement fabriquée en acier trempé et possède des ouvertures de taille précise correspondant au diamètre et à la forme du filament souhaités. Elle peut être conçue pour être interchangeable, permettant ainsi de produire des filaments de différentes tailles et formes avec la même extrudeuse.

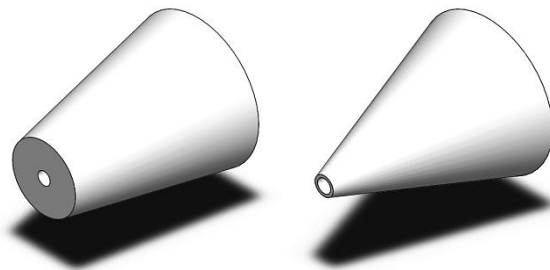


Figure II.10 : La filière 01 et 02

f) Le système de pignons

Utilisé pour les moteurs d'extrudeuses, joue un rôle crucial dans la transmission de la puissance et le contrôle précis de la vitesse et du couple.

- **Fonctionnement du système de pignons :**

Dans un système d'extrudeuse, le **système de pignons** assure la transmission de puissance du moteur à la vis de l'extrudeuse en ajustant la **vitesse et le couple**. Grâce à l'engrènement des pignons, on peut ralentir la rotation pour un contrôle précis du débit de matériau, en utilisant

des rapports de réduction spécifiques. Les **engrenages à vis sans fin** et **engrenages hélicoïdaux** permettent une transmission efficace et une répartition uniforme des forces, offrant durabilité et précision, essentielles pour des matériaux exigeants.

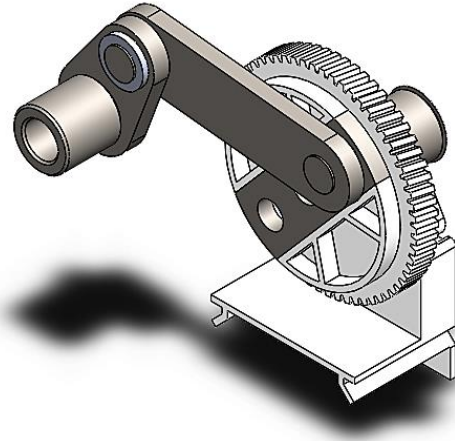


Figure II.11 : Système de pignons.

II.2.3.2 Les composants thermoélectrique

Les composants thermoélectriques sont des dispositifs qui utilisent l'effet Peltier pour transférer la chaleur d'un côté à l'autre lorsqu'une tension électrique leur est appliquée. Dans le contexte de l'extrusion des filaments 3D, ces composants peuvent être utilisés pour plusieurs applications, notamment le contrôle de la température et le refroidissement des différents éléments de la machine.

a) Les colliers chauffants

Les colliers chauffants sont des éléments de diamètres et hauteurs variés, destinés au chauffage et au maintien en température de pièces cylindriques. Les transferts de chaleur entre le collier et la pièce à chauffer, se font principalement par conduction, ou par rayonnement pour les colliers les plus puissants. Ils peuvent chauffer aussi bien les solides, que les liquides ou les gaz. Les applications des colliers sont diverses par exemple ils peuvent équiper des buses ou des fourreaux d'extrudeuse, pour transformer des matières plastiques.

Les colliers sont utilisés dans des applications nécessitant des montées en température rapides.

Tableau II.2 : Les différents types des colliers et leurs milieux d'utilisation

Les types des colliers	Différents milieux d'utilisation
<ul style="list-style-type: none">• Colliers mica blindés à profilé étanche	<ul style="list-style-type: none">• Forte humidité
<ul style="list-style-type: none">• Colliers mica	<ul style="list-style-type: none">• Utilisation standard
<ul style="list-style-type: none">• Colliers céramiques• Colliers à isolant minéral	<ul style="list-style-type: none">• Besoin de hautes températures
<ul style="list-style-type: none">• Colliers blindés à connecteur radial	<ul style="list-style-type: none">• Nécessité de robustesse
<ul style="list-style-type: none">• Colliers à économie d'énergie	<ul style="list-style-type: none">• Installation calorifugée
<ul style="list-style-type: none">• Colliers ventilés	<ul style="list-style-type: none">• Limitation d'inertie thermique

Le collier utilisé dans la présente étude est de type mica blindé, haute charge (Figure II.11). Ce collier présente ces caractéristiques suivantes :

- Modèle étudié pour un chauffage nécessitant une forte densité de puissance.
- Température max. sur le corps du collier : 340°C,
- Charge max. sur le corps du collier : 8 W/cm².
- Diamètre: 25 mm. Hauteur: 30 mm. Epaisseur: 25 mm
- Tôlerie : Tôle aluminée.
- Isolation électrique par mica.
- Connectique : Fils dans l'épaisseur.

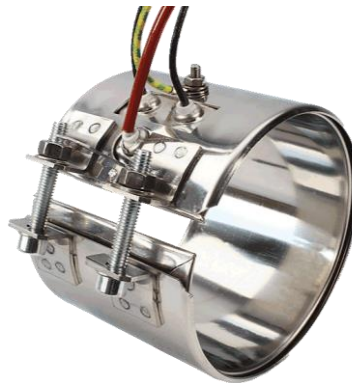


Figure II.12 : Collier mica blindé, haute charge.

b) Régulateur thermique

Un régulateur thermique est un dispositif électronique utilisé pour contrôler et maintenir la température d'un système ou d'un processus à un niveau spécifique. Dans le contexte de

l'extrusion des filaments 3D, il est utilisé pour contrôler la température des différents composants de la machine, tels que la tête d'extrusion, la filière et les colliers chauffants.

Type de régulateur thermique utilisé est de type REX-C100 (Figure II.12)



Figure II.13 : Régulateur thermique de type REX-C100.

Parmi les types de régulateurs de température, les régulateurs PID sont les types les plus rapides et les plus précis. Ils utilisent des systèmes de rétroaction en boucle fermée pour surveiller de manière lâche la température actuelle et effectuer des ajustements si nécessaire.

Le contrôleur REX-C100. Il dispose d'un affichage sept segments à deux lignes. La ligne du haut affiche la température actuelle, également appelée Variable de processus (PV). La ligne du bas affiche la température cible ou Définir la variable (SV).

Il existe 5 principaux types de contrôleurs de la série Cxx : C900, C700, C400, C410 et C100. Le C100 est celui qui a le plus petit encombrement.

Ils peuvent être alimentés par des alimentations 100-240VAC ou 24VAC/DC selon la configuration.

L'entrée de signal vers l'appareil peut être un thermocouple (compatible avec les types K, J, R, S, B, E, T, N, PLII, W5Re/W26Re, U, L)

- M – Sortie contact relais
- V – Sortie d'impulsion de tension
- 8 – Sortie courant
- G – Impulsion déphasée

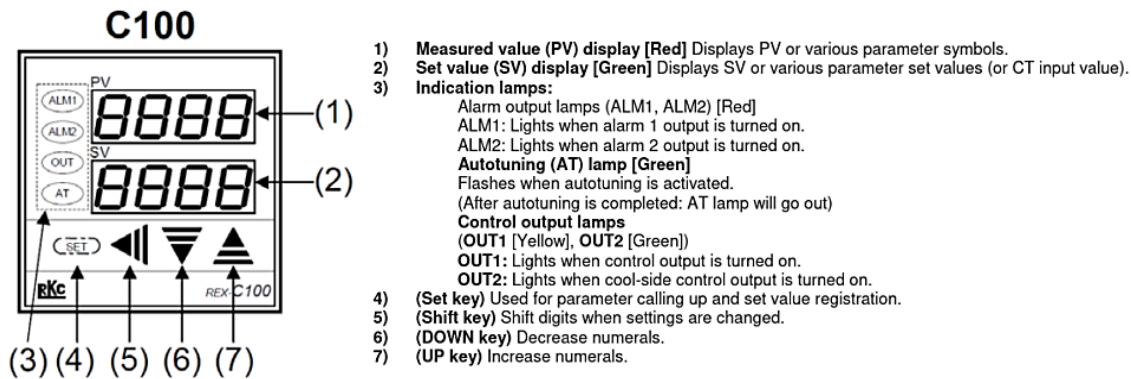


Figure II.14 : Indice d'utilisation de régulateur thermique REX-C100.

c) Le Relai statique

Les relais statiques (**SSR**) sont des dispositifs de commutation électriques qui servent aux mêmes fins que les relais électromécaniques, mais sans les pièces mobiles, d'où le nom de « forme solide ». Sans pièces mobiles, les relais statiques ont tendance à assurer une durée de vie plus longue car ils ne sont pas soumis à l'usure et à la déchirure. Ils sont capables d'effectuer des commutateurs plus rapidement que leurs homologues électromécaniques, car ils utilisent les propriétés électriques et optiques des semi-conducteurs pour effectuer les fonctions de commutation. Les principaux avantages des relais statiques par rapport aux relais électromécaniques conventionnels sont qu'ils n'ont pas de pièces mobiles à user, et donc aucun problème de rebond de contact. Les relais statiques sont capables de commuter « marche » et « arrêt » beaucoup plus rapidement que l'armature d'un relais mécanique peut se déplacer, ainsi que la mise sous tension nulle et la mise hors tension nulle, ce qui élimine le bruit électrique et les transitoires.

Les relais statiques sont disponibles dans une variété d'options de forfait, allant de seulement quelques volts ou ampères à de nombreuses centaines de volts et d'ampères de capacité de commutation de sortie. Une faible tension d'entrée, généralement de 3 à 32 V c. c., peut être utilisé pour contrôler une tension de sortie ou un courant de sortie beaucoup plus grande.

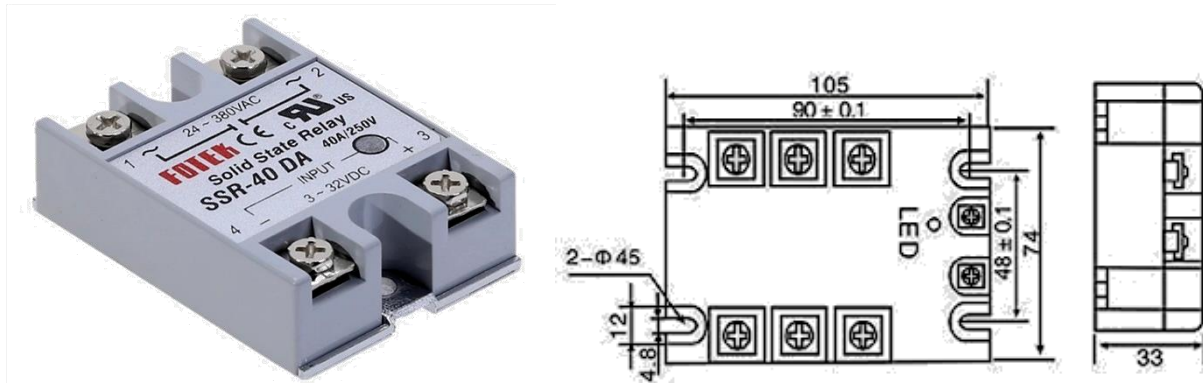


Figure II.15 : Relai Statique type SSR-40

d) Thermo Couple

Un thermocouple est un capteur servant à mesurer la température. Il se compose de deux métaux de natures différentes reliés à une extrémité. Quand la jonction des métaux est chauffée ou réfrigérée, une tension variable est produite, qui peut être ensuite transcrite en température. Les alliages thermocouples sont généralement disponibles en fils.

Les thermocouples sont largement utilisés dans les machines d'extrusion pour surveiller et contrôler la température dans différentes parties de la machine, telles que la zone de fusion du matériau plastique, la tête d'extrusion et la filière. Les données de température fournies par les thermocouples sont utilisées pour réguler la puissance des éléments chauffants, tels que les colliers chauffants, afin de maintenir la température désirée tout au long du processus d'extrusion.



Figure II.16: Thermocouple Type K.

L'enchaînement entre le régulateur de température REX-C100 avec le relai statique SSR et le thermocouple de type K est illustré sur la figure II. 17.

Le REX-C100 peut être câblé avec un SSR pour contrôler la température. La figure ci-dessous a la configuration suivante :

- Alimentation 100-240VAC
- Sortie SSR
- Type d'entrée de thermocouple de type K
- Sortie d'alarme pour écart/indication de processus

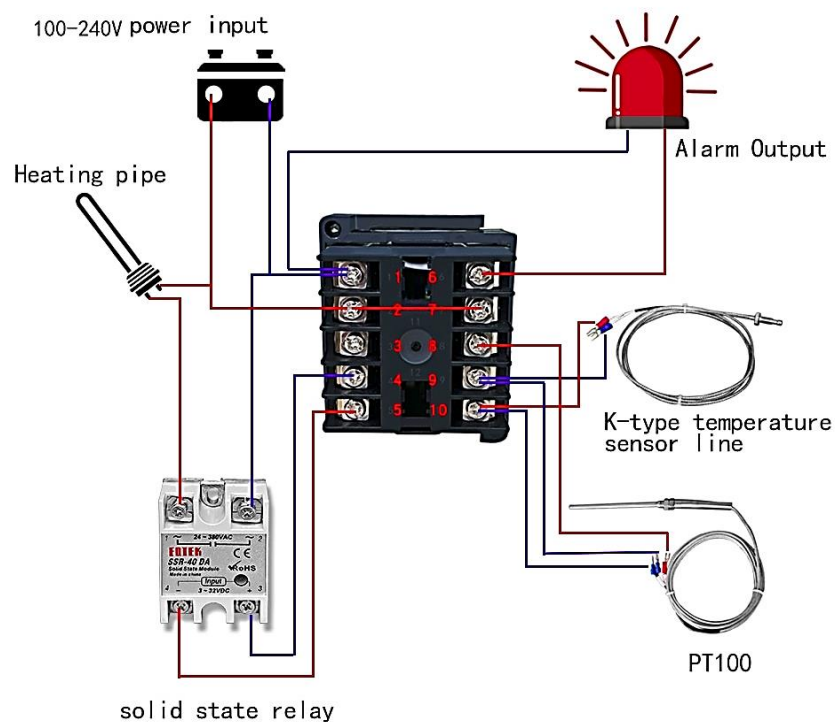


Figure II.17 : Le fonctionnement de thermocouple avec le relai statique et le régulateur.

II.3 Système de refroidissement (Ventilation)

Le système de refroidissement, souvent impliquant la ventilation, composante essentielle de deux ventilateurs refroidisseurs de type 12V extenseur des filaments 3D (figure II.19). Après avoir été extrudé à travers la filière, le filament chaud doit être refroidi rapidement pour solidifier sa structure et maintenir sa forme. Cela peut impliquer l'utilisation de ventilateurs ou d'autres moyens de circulation d'air pour souffler de l'air frais sur le filament pendant qu'il est encore chaud. Un système de refroidissement efficace garantit que le filament conserve ses dimensions et sa géométrie désirées, ce qui est essentiel pour des impressions 3D précises et de haute qualité.

Le système de refroidissement peut être équipé de capteurs de température et de contrôles pour surveiller et ajuster la température de refroidissement en temps réel. Cela permet de maintenir des conditions de refroidissement optimales pour différents types de matériaux polymères et de diamètres de filaments.



Figure II.18 : Les ventilateurs 50 mm 12V-DC.

II.3.1 Caractéristiques de Ventilateur : 50mm 12V-DC

- Dimensions : 50x50x15mm
- Connecteur : XH2.54-3P
- Tension nominale : DC 24V
- Courant nominal : 0.1 Amp \pm 10 %
- Vitesse nominale : 4000rpm \pm 10%
- Débit d'air : 15.9CFM \pm 10%

- Bruit : 26dBA±10%
- Type De roulement : Manches
- Vie : 35 000 heures
- Longueur du câble : 15 cm

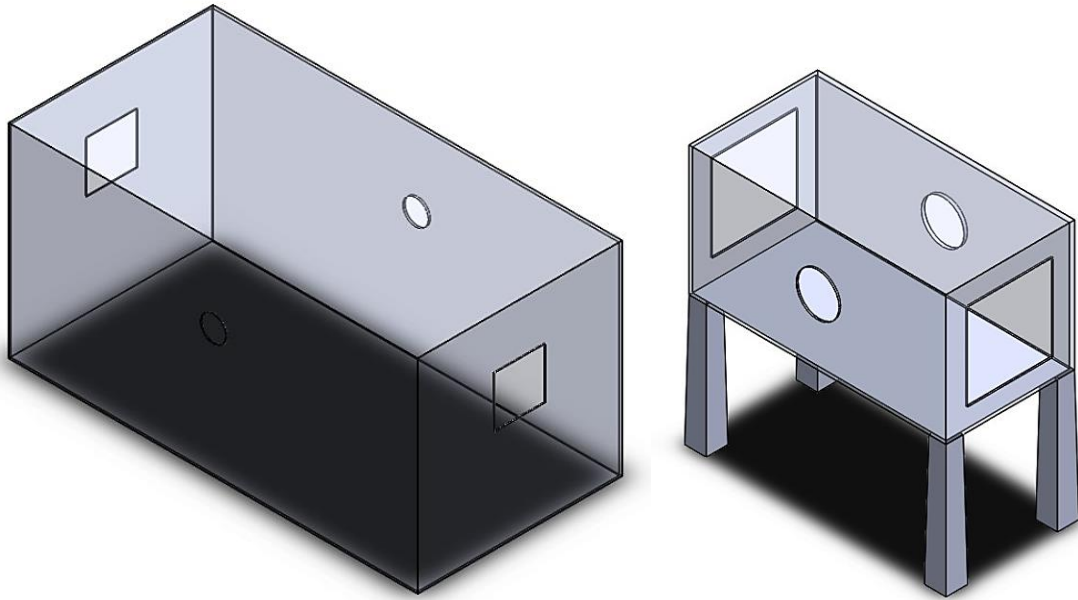


Figure II.19 : Chambre à refroidissement 1 et 2 pour les ventilateurs 50mm.

II.4 La conception de système bobinage

Le système de bobinage pour les filaments 3D a pour but de collecter le filament extrudé de manière uniforme et sans tension excessive sur une bobine de réception. Le filament, après avoir été extrudé, est guidé vers une bobine tournante où il est enroulé. Ce processus doit être synchronisé avec l'extrusion pour assurer une tension constante et éviter les problèmes tels que les nœuds ou les cassures.

Les Principes Fondamentaux de Fonctionnement

- **Synchronisation de la Vitesse :** La vitesse de rotation de la bobine de réception doit être synchronisée avec la vitesse d'extrusion pour éviter l'accumulation ou l'étirement du filament.
- **Contrôle de la Tension :** La tension du filament doit être contrôlée en permanence pour éviter les cassures et les déformations. Cela est réalisé à l'aide de capteurs de tension qui ajustent la vitesse de la bobine en temps réel.
- **Enroulement Uniforme :** Le filament doit être enroulé de manière régulière sur la bobine pour éviter les chevauchements et les nœuds. Un guide-fil se déplace latéralement pour assurer cet enroulement uniforme.
- **Automatisation et Contrôle :** Un contrôleur électronique gère l'ensemble du processus, coordonnant les mouvements du moteur, du guide-fil et des capteurs de tension pour maintenir une opération fluide et précise.

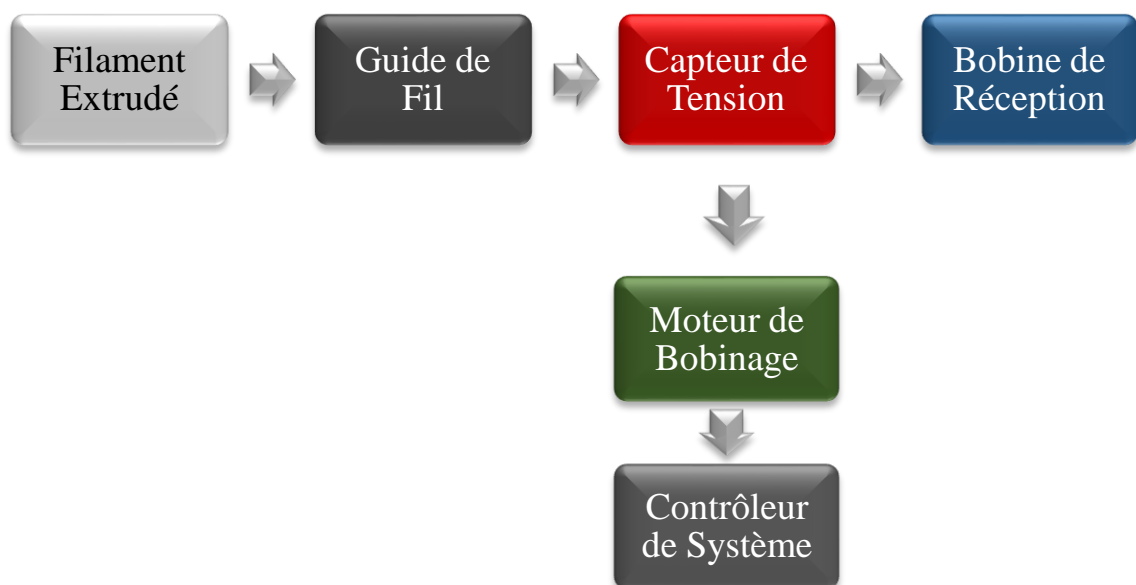


Figure II.20 : Schéma simplifié d'un système de bobinage.

II.4.1 Les composants du système de bobinage manuel pour les filaments 3D

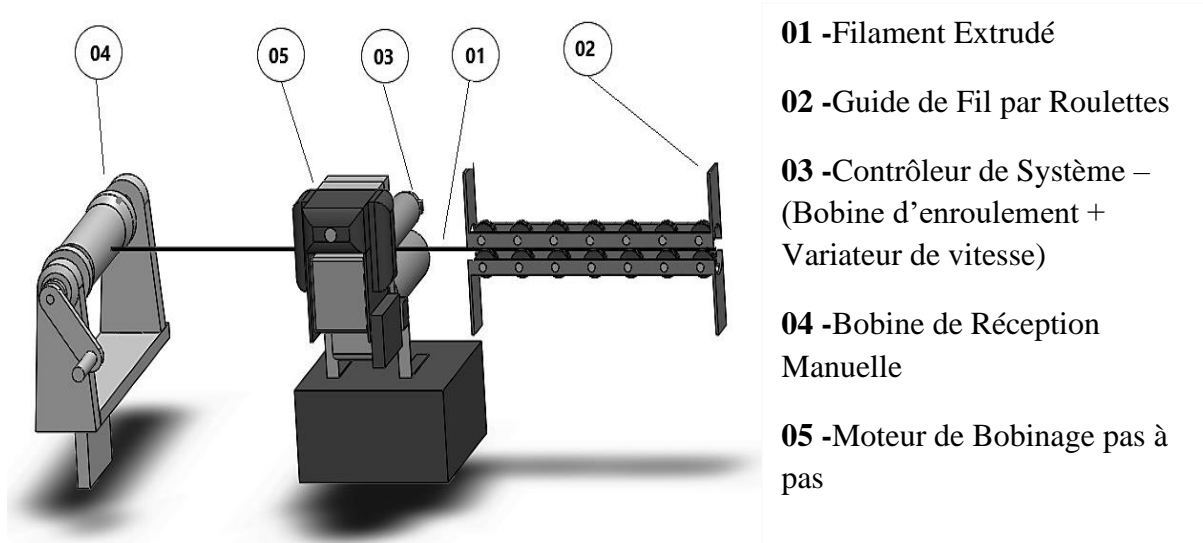


Figure II.21 : Les composants du système de bobinage manuel pour les Filaments 3D

II.4.1.1 Filament extrudé

Le filament extrudé est le produit final du processus d'extrusion utilisé dans l'impression 3D afin de créer des objets tridimensionnels en superposant des couches successives.

Ses principales caractéristiques incluent :

1. **Diamètre** : Essentiel pour une alimentation régulière dans l'imprimante, les diamètres standards sont de 1,75 mm ou 2,85 mm, avec des tolérances précises pour garantir une impression homogène.
2. **Uniformité** : Un filament uniforme en diamètre et en composition réduit les risques de bouchages et assure une qualité constante.
3. **Qualité des matériaux** : Déterminée par le type de plastique et les conditions d'extrusion, influençant la résistance, la flexibilité et l'adhésion entre les couches.
4. **Température d'impression** : Varie selon le matériau ; par exemple, le PLA s'imprime à une température plus basse que l'ABS.



Figure II.22 : Le Filament extrudé

II.4.1.2 Guide de fil par roulettes

Son rôle est de diriger le filament extrudé vers la bobine de réception de manière uniforme. Ce type de guide est conçu pour minimiser la friction et l'usure du filament, tout en assurant un enroulement précis et régulier. Ce guide est composé de roulettes et de support de roulettes.

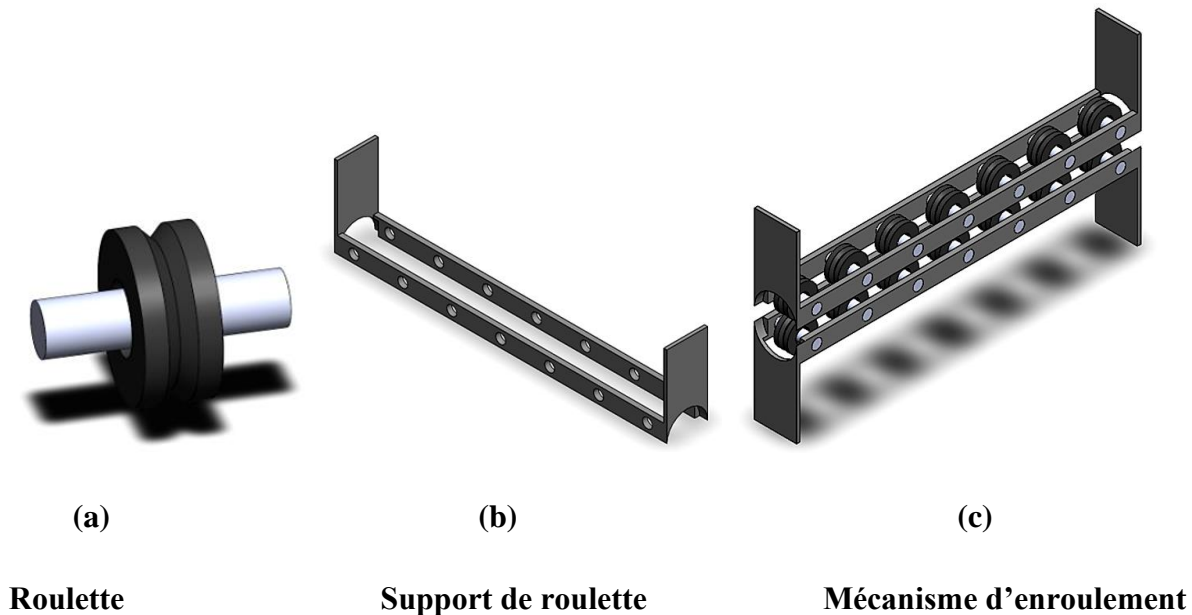


Figure II. 23 : Les composants du guide de fil par roulettes.

II.4.1.3 Moteur de Bobinage Pas à Pas

Le moteur de bobinage pas à pas est un composant clé du système de bobinage pour les filaments 3D. Il permet de contrôler avec précision la vitesse et la position de la bobine de réception, garantissant ainsi un enroulement uniforme du filament extrudé. Les moteurs pas à pas sont particulièrement adaptés à cette application en raison de leur capacité à effectuer des mouvements discrets et précis. Le type de moteur utilisé dans cette présente étude **Moteur (REF 430512N)**.

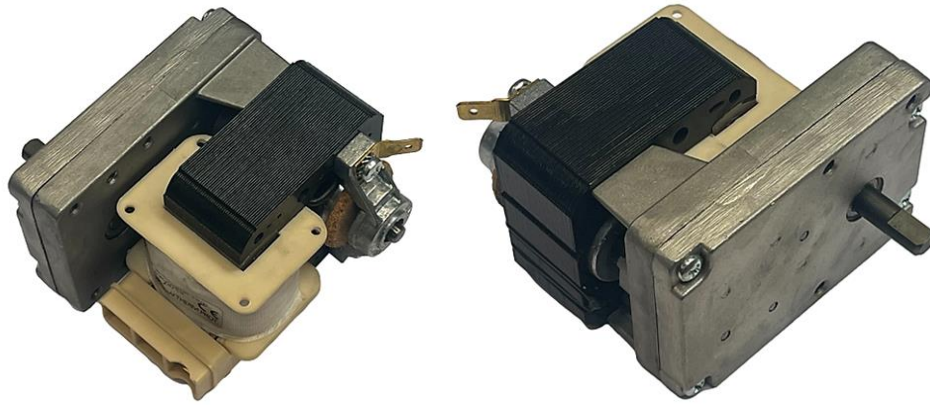


Figure II.24 : Moteur (REF 430512N)

II.4.1.4 Contrôleur de système (Bobine d'enroulement + Variateur de vitesse)

Le contrôleur de système, composé de la bobine d'enroulement et du variateur de vitesse, est crucial pour le bon fonctionnement d'un système de bobinage pour les filaments 3D. Ce contrôleur permet de réguler la vitesse et la tension du filament, assurant un enroulement uniforme et de haute qualité.

1) Bobine d'enroulement

La bobine d'enroulement reçoit le filament extrudé et le maintient sous tension constante. La position et la rotation de la bobine sont contrôlées pour garantir un enroulement uniforme.

- Supporte et enroule le filament extrudé.
- Conçue pour minimiser la friction et les tensions variables sur le filament.

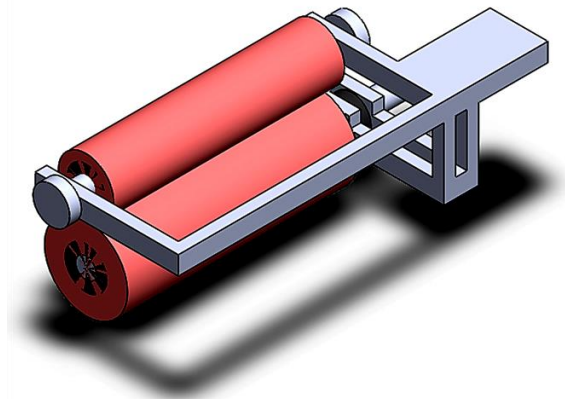


Figure II.25 : Bobine d'enroulement

2) Variateur de vitesse

Le variateur de vitesse ajuste la vitesse du moteur de bobinage en fonction des besoins du processus. Il permet de synchroniser la vitesse de bobinage avec la vitesse d'extrusion du filament, maintenant ainsi une tension constante.

Module la vitesse du moteur de bobinage pour assurer une tension et une vitesse constantes.

Permet des ajustements en temps réel pour adapter le processus aux variations du filament.

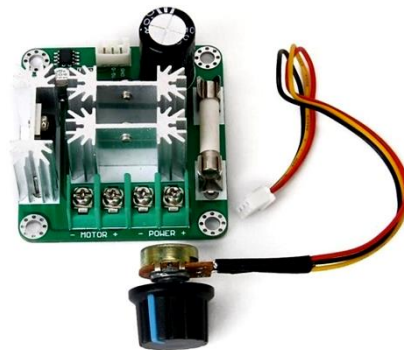


Figure II.26 : Variateur de vitesse.

II.4.1.5 Bobine de réception manuelle

Est un composant simple mais essentiel du système de bobinage. Elle permet de recueillir le filament extrudé et enroulé d'une manière contrôlée et ordonnée. Bien que ce processus soit manuel, il reste crucial pour garantir la qualité et la cohérence du filament enroulé.

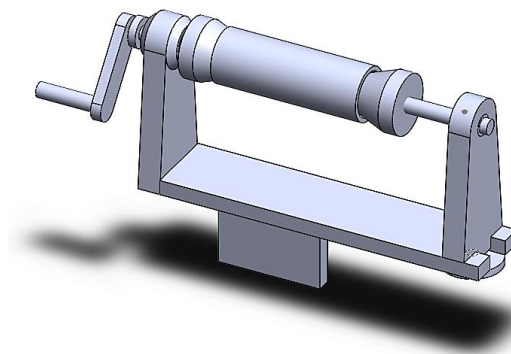


Figure II.27: Bobine de réception manuelle.

En conclusion, un système de bobinage manuel est adapté pour des opérations à petite échelle ou pour des besoins spécifiques où la flexibilité et le coût sont des considérations majeures. Cependant, pour des productions à grande échelle, un système automatisé serait plus approprié pour garantir la consistance et l'efficacité.

II.4.2 Les composants du système de bobinage auto contrôlé pour les filaments 3D

Il existe un autre système de bobinage auto contrôlé qui est conçu pour automatiser le processus de bobinage, assurant ainsi une qualité constante et une efficacité accrue.

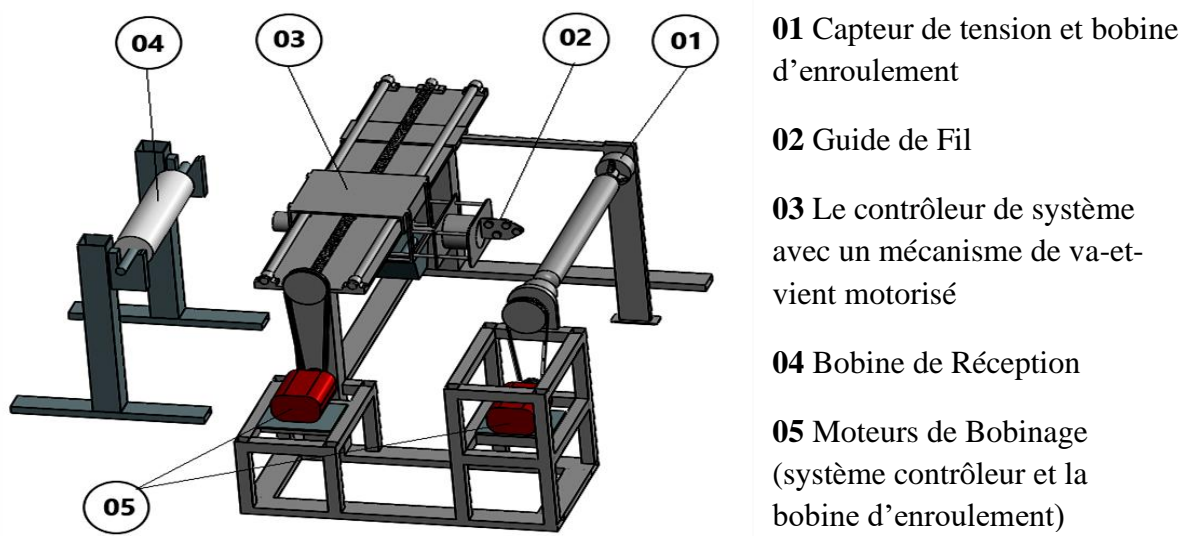


Figure II.28 : Les Composants du Système de Bobinage auto contrôlé pour les Filaments 3D

Principe et Mécanisme de Fonctionnement

1. **Introduction du Filament** : Le filament extrudé est dirigé vers le guide de fil automatique.
2. **Guide de Fil Automatique** : Déplace le filament de manière précise pour un enroulement uniforme sur la bobine.
3. **Capteurs de Tension** : Mesurent la force exercée sur le filament et envoient les données au contrôleur de système.
4. **Contrôleur de Système** : Analyse les données des capteurs et ajuste la vitesse du moteur et la position du guide de fil pour maintenir une tension constante.

5. **Moteur de Bobinage et Variateur de Vitesse** : Le moteur entraîne la bobine de réception, et le variateur ajuste la vitesse pour garantir une tension appropriée.
6. **Enroulement sur la Bobine de Réception** : Le filament est enroulé uniformément à une vitesse régulée.
7. **Interface Utilisateur** : Permet de surveiller et de contrôler les paramètres du processus en temps réel.
8. **Capteur de Détection de Fin de Filament** : Détecte la fin du filament ou les anomalies, arrêtant le système automatiquement si nécessaire.
9. **Système de Sécurité** : Comprend des dispositifs de sécurité pour protéger l'opérateur et le matériel.

II.4.2.1 Capteur de Tension et Bobine d'Enroulement

Le capteur de tension surveille la force appliquée au filament pendant son enroulement. Le capteur, assurant ainsi une tension constante pour maintenir la qualité du filament :

1. **Mesure et Conversion** : Il détecte la force et la traduit en signal électrique.
2. **Transmission et Ajustement** : Les données sont envoyées au contrôleur, qui ajuste la vitesse du moteur et la position du guide de fil pour préserver la tension.
3. **Ajustements en Temps Réel** : Le contrôleur ajuste en continu pour éviter les cassures ou déformations du filament.

Avantages : précision de mesure, de la qualité du filament, et productivité accrue grâce aux ajustements en temps réel.

Bobine d'Enroulement La bobine reçoit le filament extrudé. Elle peut fonctionner manuellement ou de manière motorisée avec un système auto-contrôlé pour un enroulement précis.

1. **Rotation Régulée** : La bobine tourne à une vitesse ajustée selon la tension, contrôlée par le moteur.
2. **Distribution Uniforme** : Un guide de fil répartit le filament de manière uniforme.
3. **Ajustement de la Vitesse** : La rotation est ajustée en fonction des mesures de tension.

Avantages : uniformité de l'enroulement, automatisation impliquant les interventions manuelles, et qualité optimale du filament.

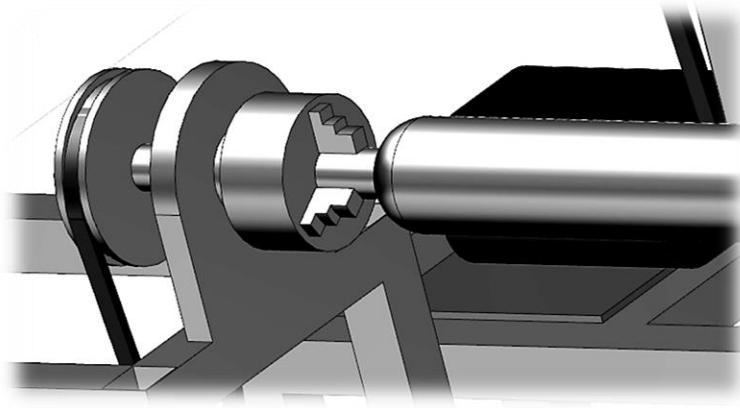


Figure II.29 : Capteur de Tension et la Bobine d'enroulement

II.4.2.2 Guide de Fil

Le guide de fil est crucial pour orienter précisément le filament vers la bobine d'enroulement, assurant un enroulement uniforme et sans défauts.

Fonctionnement

1. **Direction Précise** : Le guide de fil oriente le filament de manière contrôlée sur la bobine, en utilisant un mouvement linéaire ou oscillatoire.
2. **Mouvement Synchronisé** : Il fonctionne en synchronisation avec la rotation de la bobine pour garantir un enroulement homogène.
3. **Ajustement en Temps Réel** : En fonction des données de tension, le guide ajuste sa position pour maintenir une tension constante.

Types de guides :

- **Par Roulettes** : Réduit la friction et facilite un mouvement fluide.
- **Motorisé** : Contrôlé par moteur pour un déplacement automatisé.

Avantages : Il assure un enroulement précis, améliore la qualité en entraînant les chevauchements et réduit les interventions manuelles, ce qui augmente la productivité.

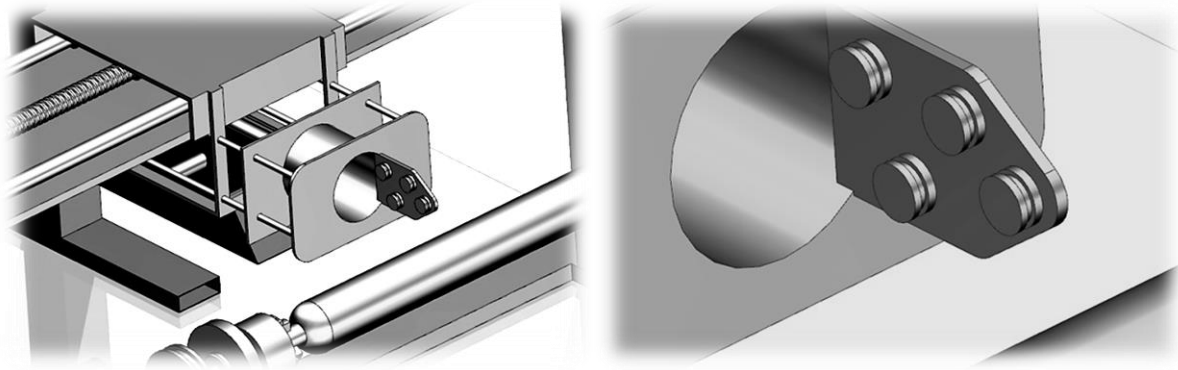


Figure II.30 : Guide de Fil

II.4.2.3 Contrôleur de Système avec Mécanisme Va-et-Vient Motorisé

Le contrôleur de système avec un mécanisme va-et-vient motorisé est essentiel dans le bobinage de filaments 3D, permettant un enroulement uniforme et constant du filament sur la bobine.

Fonctionnement

1. **Collecte et Analyse des Données** : Le contrôleur reçoit et analyse les informations des capteurs pour surveiller la tension et la position du filament.
2. **Mécanisme Va-et-Vient** : Il entraîne un mouvement linéaire du guide de fil pour répartir le filament de manière homogène.
3. **Réglages Automatiques** :
 - a. Ajustez la **vitesse du moteur de bobinage** pour une tension constante.
 - b. Modifiez la **position du guide de fil** pour garantir une répartition régulière.
4. **Synchronisation** : Tous les composants du système sont coordonnés pour éviter les erreurs d'enroulement.
5. **Interface Utilisateur** : Permet aux opérateurs de contrôler et d'ajuster les paramètres (vitesse, tension) en temps réel.

Avantages : Ce système garantit une répartition précise et homogène du filament, améliore la qualité et l'efficacité du bobinage, et permet des ajustements adaptés aux besoins de production.

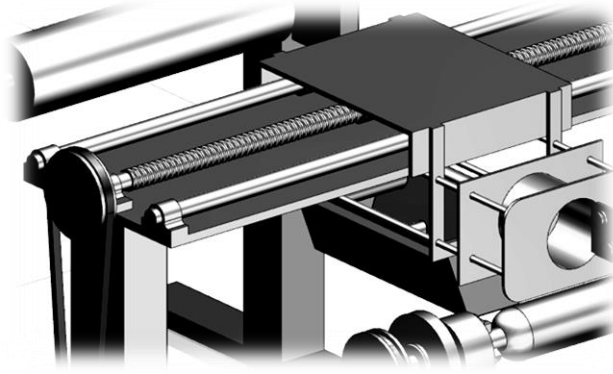


Figure II.31: Mécanisme de système va-et-vient motorisé

II.4.2.4 Bobine de Réception

La bobine de réception est essentielle pour l'enroulement du filament extrudé, que ce soit manuellement ou automatiquement, et assure qualité et uniformité.

Fonctionnement

1. **Fixation Initiale** : Le filament est attaché en début de processus pour assurer un enroulement stable.
2. **Rotation** : La bobine tourne pour enrouler le filament ; en mode automatique, la rotation est contrôlée par un moteur réglable.
3. **Enroulement Uniforme** : Le guide de fil répartit le filament de façon homogène sur la bobine grâce aux ajustements de vitesse et de tension.
4. **Capacité Variable** : La bobine peut s'adapter en taille en fonction de la longueur et du diamètre du filament.
5. **Déroulement** : Une fois pleine, la bobine peut être déroulée pour le stockage ou le transport.

Avantages : Garantit un enroulement précis, flexible, et adapté aux besoins de production, tout en maintenant une tension constante pour éviter les déformations.

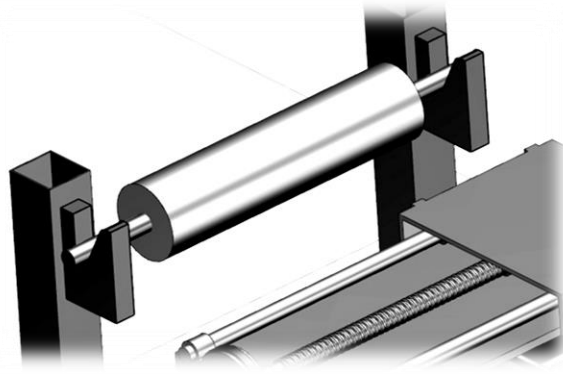


Figure II.32 : Bobine de réception

II.4.2.5 Moteurs Réducteurs pour le Système Contrôleur et la Bobine d'Enroulement

Les moteurs réducteurs sont essentiels pour garantir un enroulement précis et uniforme du filament dans un système de bobinage 3D. Il y a deux moteurs réducteurs clés dans ce processus

1. Moteur pour le Système de Contrôle Va-et-Vient :

- a. **Rôle** : Contrôler le déplacement linéaire du guide de fil, assurant une distribution égale du filament sur la bobine.
- b. **Précision** : Grâce à la technologie pas à pas, le moteur offre une grande précision pour un enroulement uniforme.
- c. **Coordination** : Il est synchronisé avec la rotation de la bobine pour éviter des irrégularités dans l'enroulement.

2. Moteur pour la Bobine d'Enroulement avec Capteur de Tension :

- a. **Rôle** : Ce moteur contrôle la vitesse de rotation de la bobine en fonction de la tension mesurée par le capteur.
- b. **Contrôle de la Tension** : Ajuste la vitesse pour maintenir une tension constante sur le filament, éventuellement ainsi les cassures.
- c. **Adaptabilité** : Il ajuste la vitesse pour s'adapter aux variations de tension.

3. Interaction entre les Moteurs :

- a. **Synchronisation** : Les deux moteurs fonctionnent ensemble pour assurer une tension stable et un enroulement homogène.
- b. **Feedback en Temps Réel** : Le capteur fournit des données pour ajuster en continu la vitesse du moteur de la bobine.

Avantages

- **Précision et Qualité** : Le contrôle précis du mouvement et de la vitesse assure un enroulement uniforme et une tension constante.
- **Fiabilité** : Les réducteurs intégrés assurent une stabilité élevée, même à basse vitesse.
- **Adaptabilité** : Le système s'ajuste aux différents types de filaments et aux conditions de production.

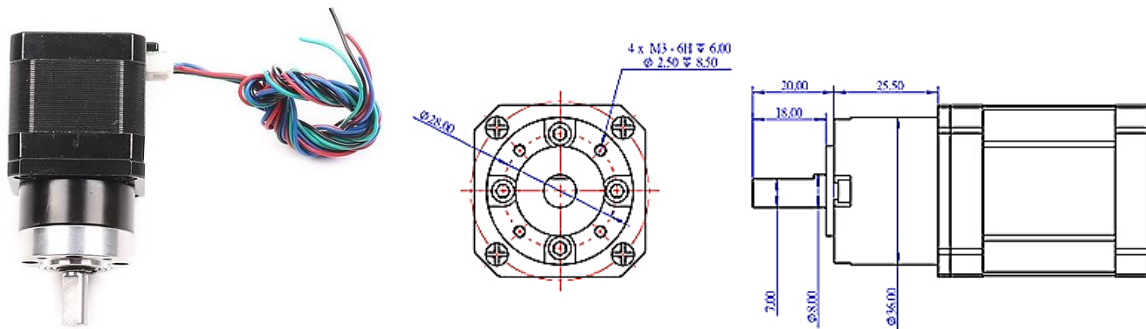


Figure II.33 : Motoréducteur pas à pas bipolaire

II.4.2.6 Avantages et Inconvénients du Système de Bobinage Auto contrôlé

Avantages

1. Précision et Uniformité

Garantit un enroulement uniforme du filament.

Maintient une tension constante, réduisant les risques de cassure.

2. Automatisation et Efficacité

Réduit la nécessité d'une intervention manuelle.

Optimise la vitesse et la précision de l'enroulement, réduisant les temps de production.

3. Adaptabilité

Ajuste rapidement aux variations de tension et de vitesse.

Polyvalent pour différents types de filaments.

4. Qualité et Fiabilité

Réduit les défauts d'enroulement, améliorant la qualité globale.

Fonctionnement stable et fiable.

5. Contrôle Intelligent

Interface utilisateur pour un contrôle précis.

Feedback en temps réel pour des ajustements instantanés.

Inconvénients

1. Coût Initial :

Investissement initial élevé.

Coût des composants (moteurs, capteurs, contrôleurs).

2. Complexité Technique :

Installation et configuration complexes.

Nécessite une maintenance spécialisée régulière.

3. Dépendance Technologique :

Dépendance à la fiabilité des composants.

Pannes et réparations coûteuses.

4. Courbe d'Apprentissage :

Formation nécessaire pour les opérateurs.

Temps d'adaptation pour les équipes.

En conclusion, Le système de bobinage auto contrôlé offre de nombreux avantages en termes de précision, efficacité, et qualité de production.

Cependant, ces avantages viennent avec des coûts initiaux élevés, une complexité technique accrue, et une dépendance à des composants fiables et à une maintenance spécialisée.

Pour les entreprises cherchant à améliorer la qualité et l'efficacité de leur production de filaments 3D, le passage à un système auto contrôlé peut être une décision judicieuse, à condition de bien évaluer les coûts et les ressources nécessaires pour sa mise en œuvre et son entretien.

II.5 La modélisation des plans et l'assemblage des pièces

La modélisation et l'assemblage assistés par SolidWorks jouent un rôle crucial dans la conception et l'optimisation des machines industrielles, notamment dans le domaine de l'impression 3D.

SolidWorks, un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO), permet de créer des modèles tridimensionnels précis, de simuler le fonctionnement des composants et d'identifier les éventuels problèmes avant la phase de fabrication.

Dans le cadre de ce projet, nous nous concentrerons sur la conception d'une machine extrudeuse et d'un système de bobinage pour les filaments 3D. La machine extrudeuse est responsable de la fabrication des filaments à partir de matières premières, tandis que le système de bobinage assure l'enroulement précis et uniforme des filaments extrudés. Grâce à SolidWorks, nous pourrions modéliser chaque composant, assembler les pièces, et effectuer des simulations thermiques et mécaniques pour garantir une performance optimale. Ce processus permet non seulement de réduire les coûts et les délais de production, mais aussi d'assurer la qualité et la fiabilité des filaments produits.



Figure II.34: SOLID WORKS logo

II.5.1 Assemblage de la Machine Extrudeuse

Permet de visualiser et d'optimiser la conception avant la fabrication. Ce processus assure une intégration précise des composants, impliquant les risques de problèmes lors de la production et garantissant une performance optimale de la machine extrudeuse pour les filaments 3D.

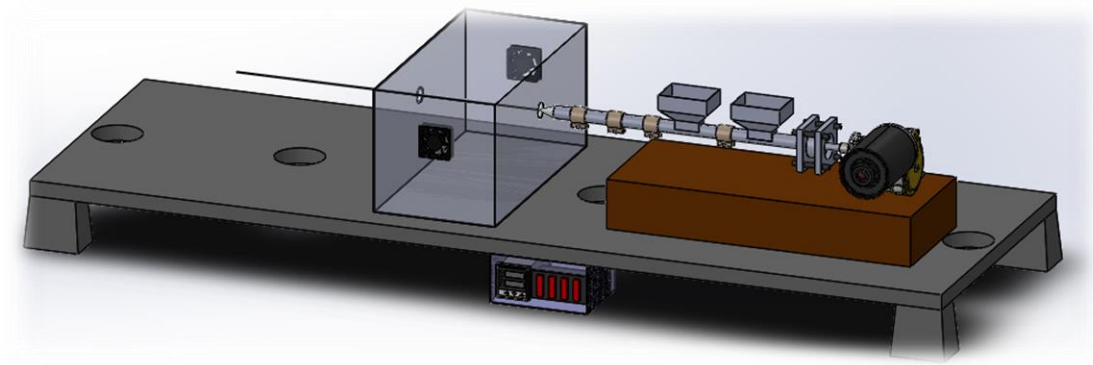


Figure II.35 : Assemblage de la machine extrudeuse.

II.5.1.1 Assemblage châssis de base

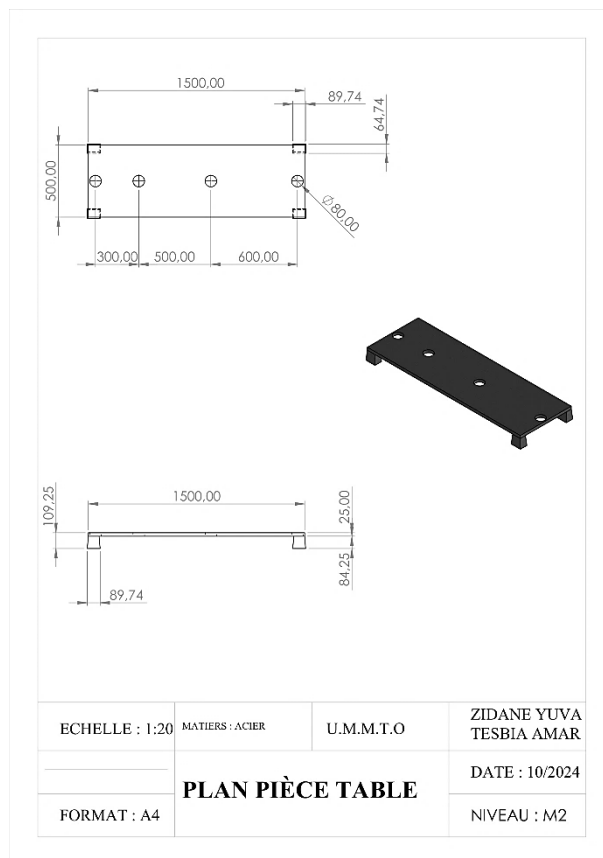
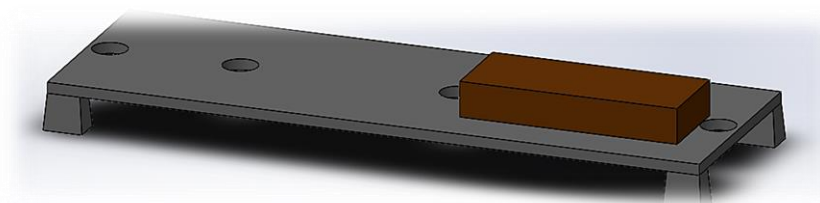
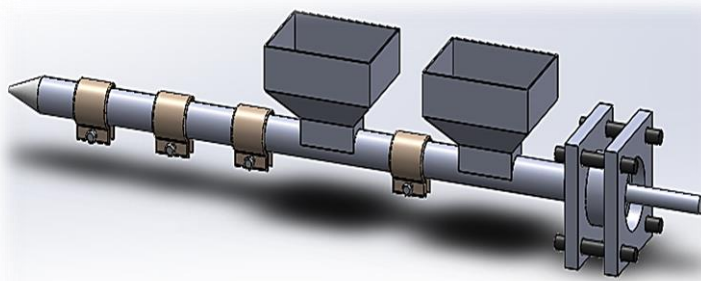
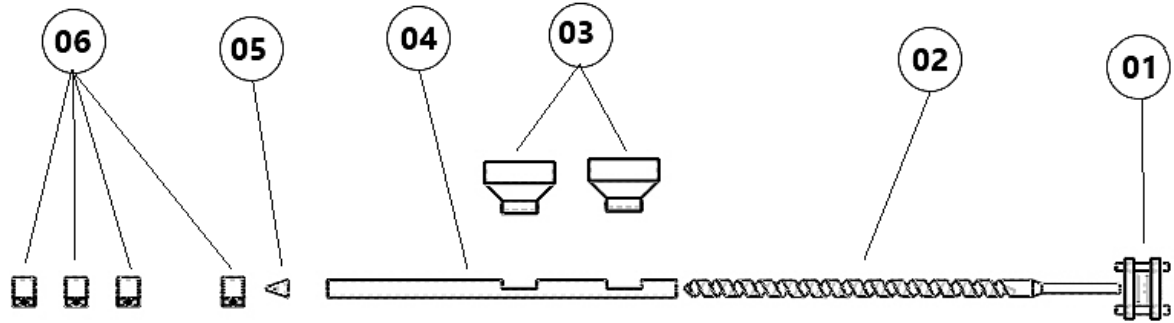


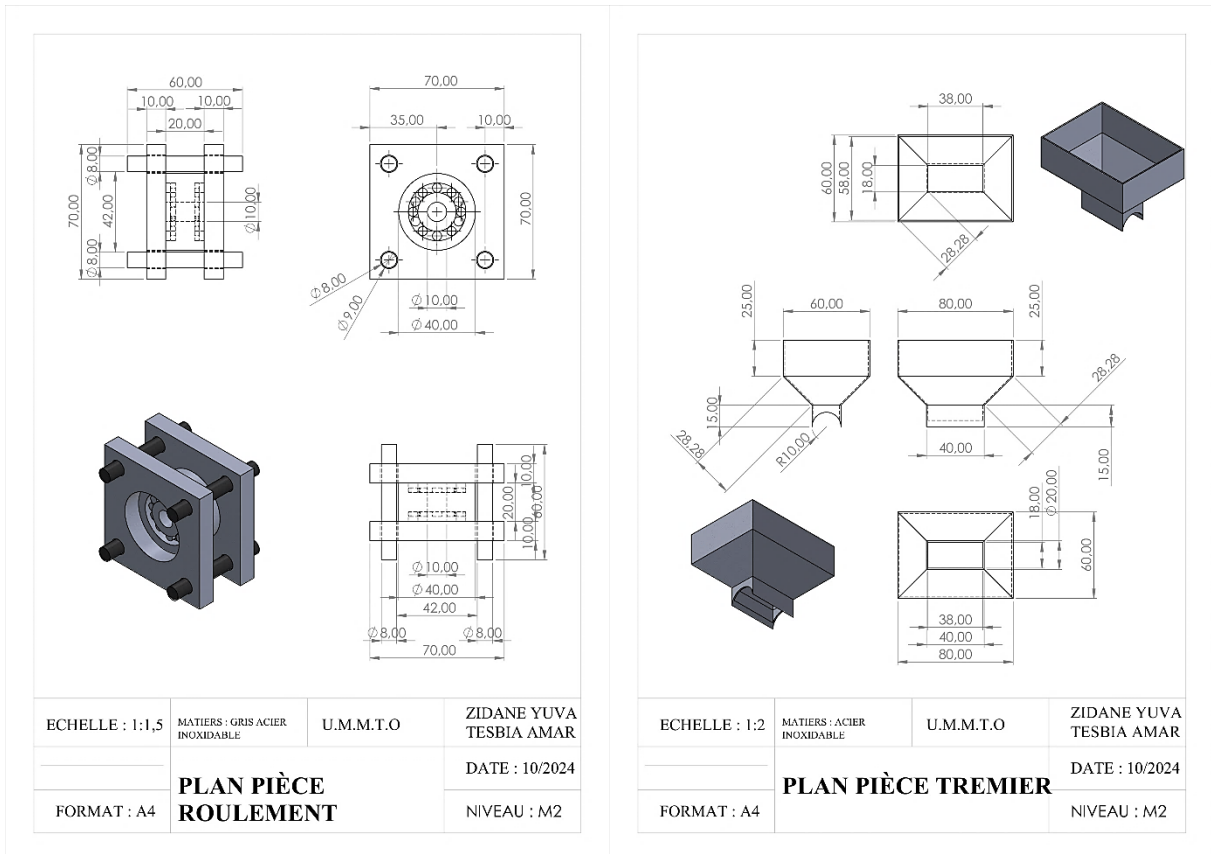
Figure II.36 : Châssis de base

II.5.1.2 Assemblage des composants de la machine d'extrusion



1. Roulement D'accouplement
2. Vis sans fin
3. 2 Trémies
4. Vis-Fourreau
5. Filière
6. 4 Colliers Chauffants

Figure II.37 : Les composants de la machine d'extrusion.



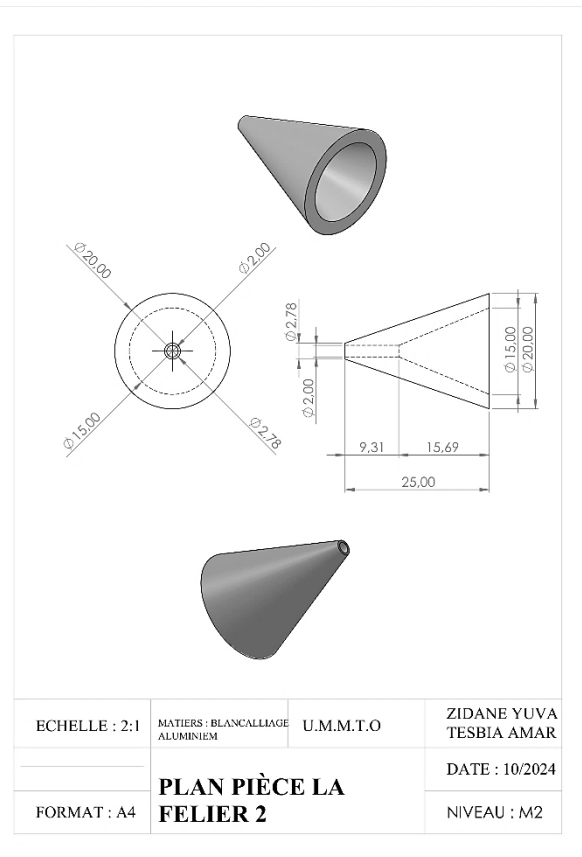
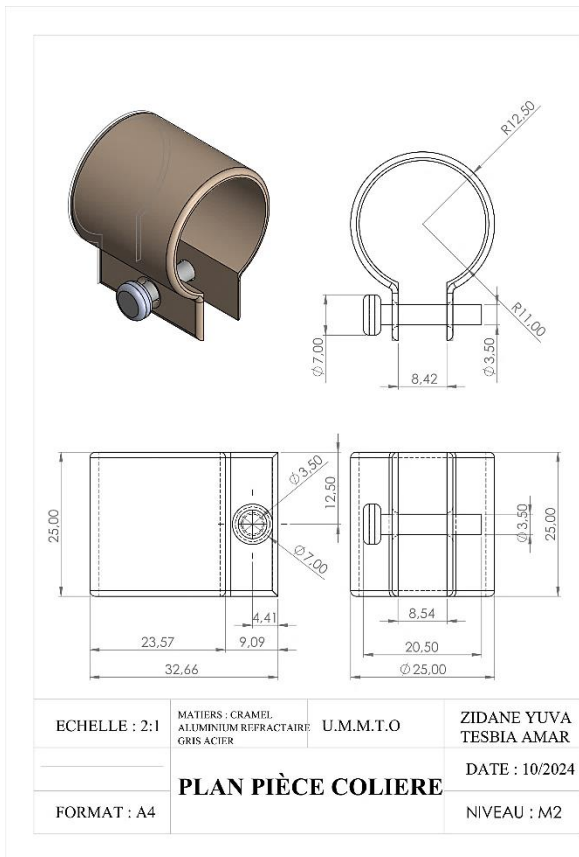
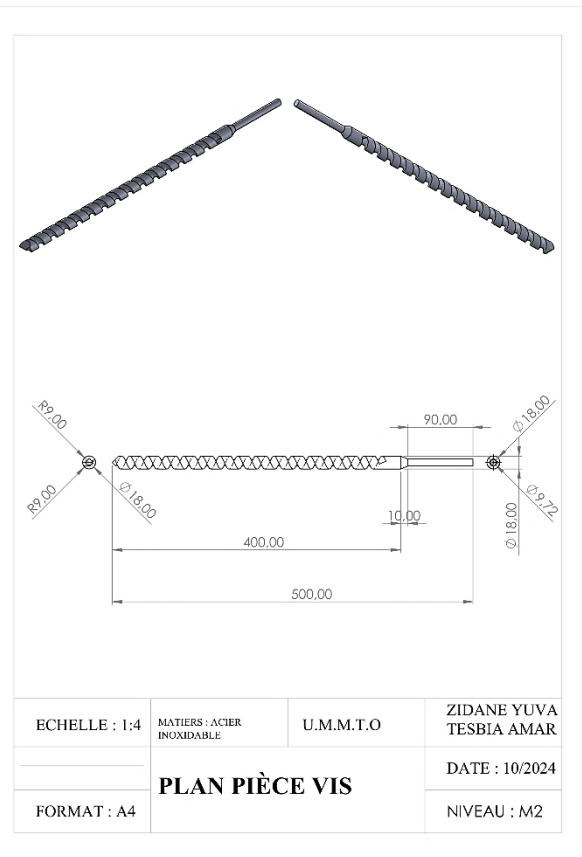
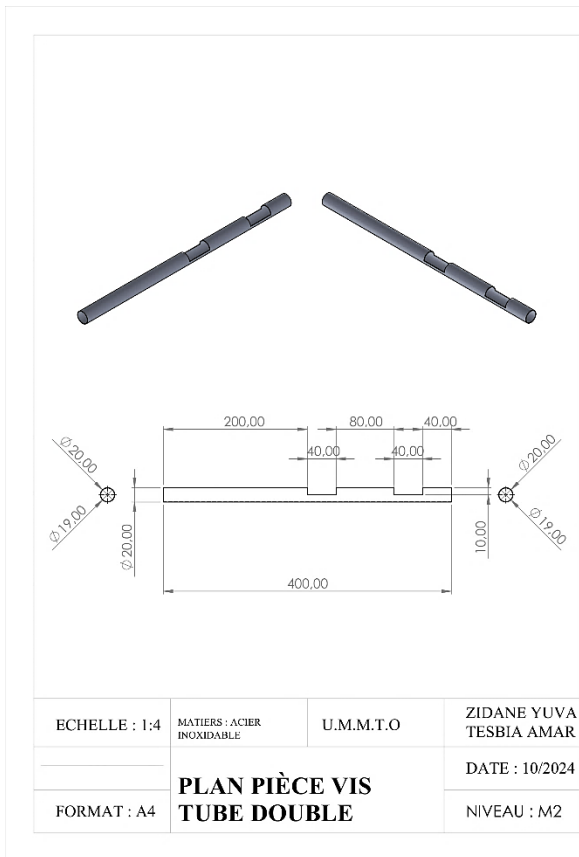


Figure II.38 : Les plans des 6 composants de la machine d'extrusion.

II.5.2 Assemblage de moteur réducteur

Composé d'un moteur réducteur et d'un système de pignon.

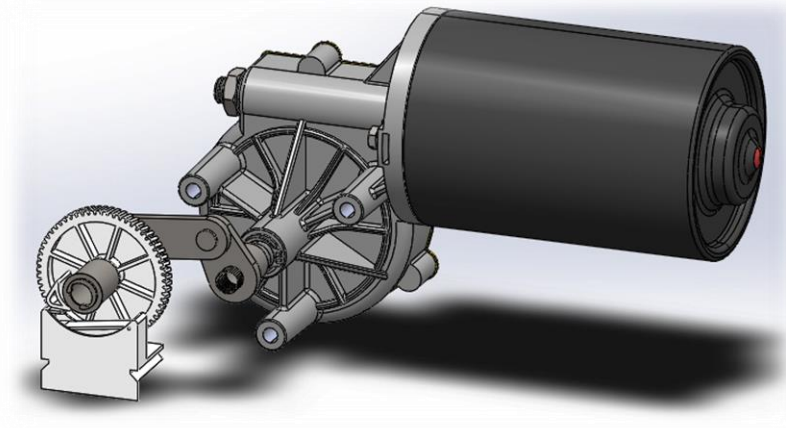


Figure II.39 : Assemblage moteur réducteur

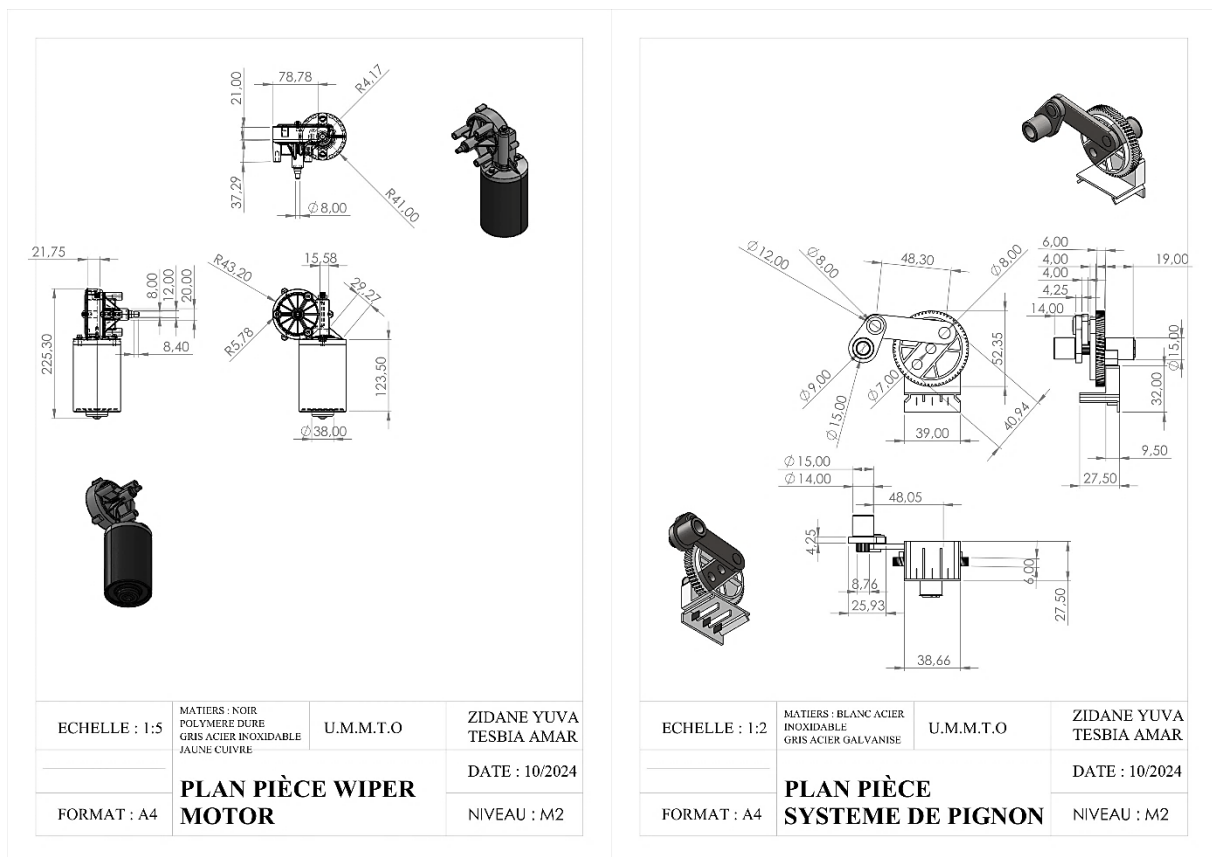


Figure II.40 : Les plans des 2 composantes de l'assemblage moteur réducteur

II.5.3 Assemblage de la chambre de refroidissement

Composé d'une chambre à froid, d'un filament extrudé et de deux ventilateurs 50 mm.

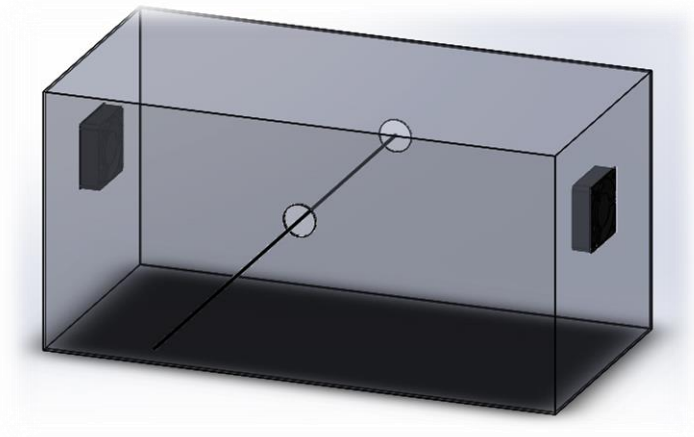


Figure II.41 : Assemblage de la chambre de refroidissement.

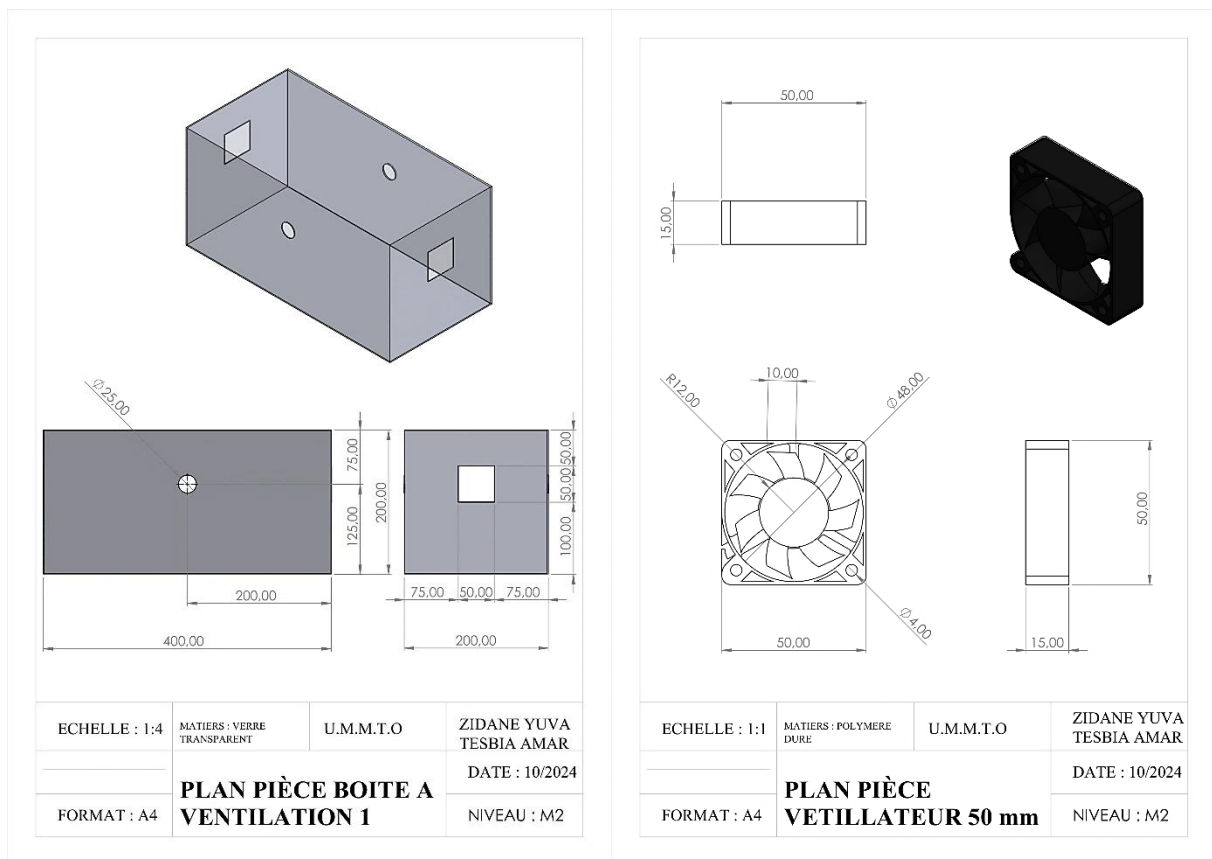


Figure II.42 : les plans des 2 composants d'assemblage de la chambre de refroidissement

II.5.4 Assemblage d'une boîte d'alimentation

Composé d'une boîte, d'un relai statique SSR, d'un régulateur thermique REX-C100 et d'un interrupteur.

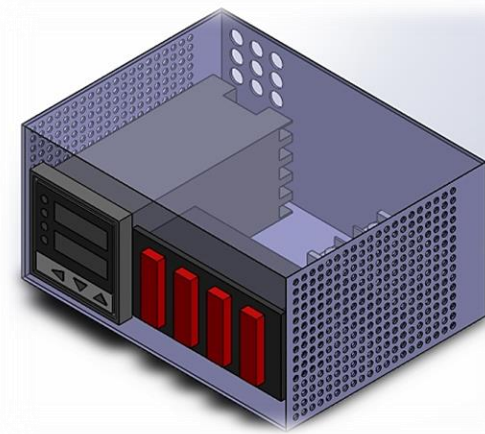
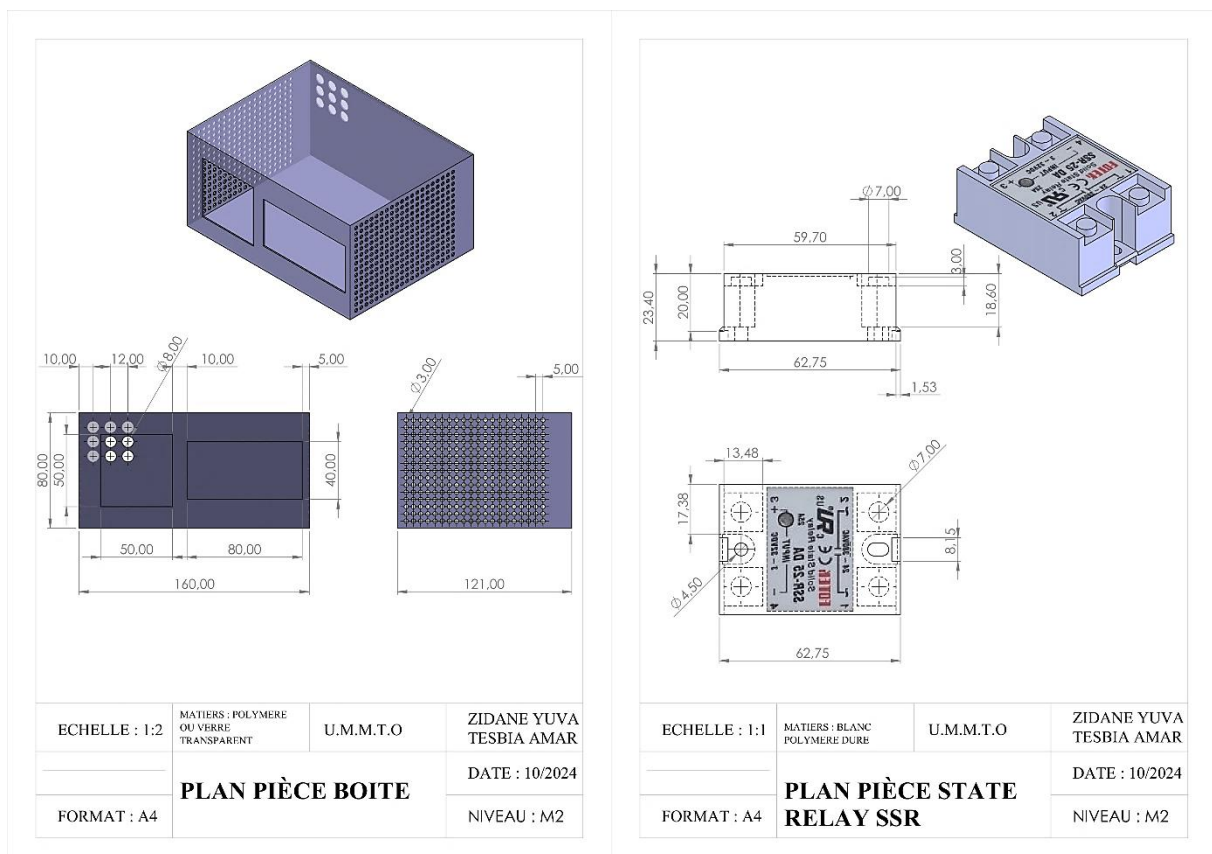


Figure II.43 : Assemblage d'une boîte d'alimentation.



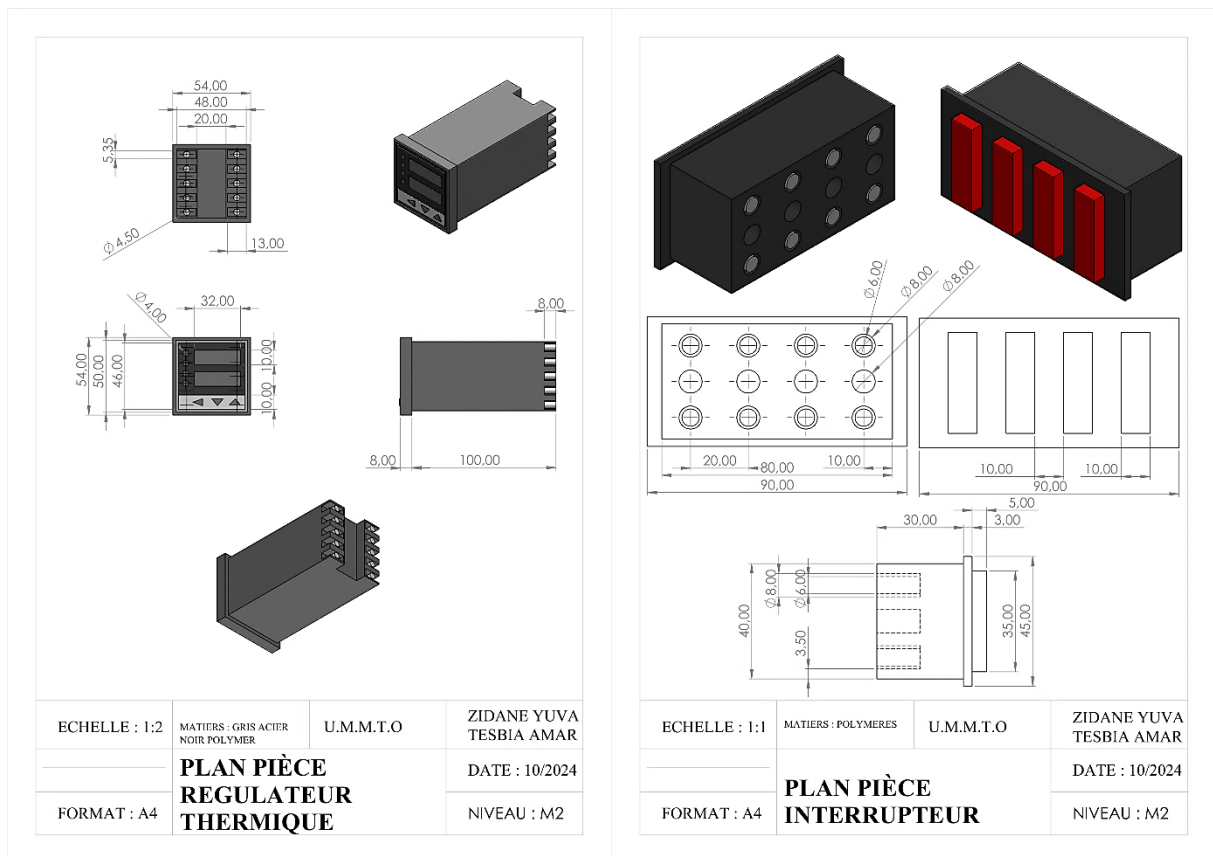


Figure II.44 : les plans des 4 composants d'assemblage d'une boîte d'alimentation.

II.5.5 Assemblage du système de bobinage

Permet de visualiser et d'optimiser la conception avant la fabrication. Ce processus assure une intégration précise des composants, réduisant les risques de problèmes lors de la production et garantissant une performance optimale du système de bobinage pour les filaments 3D.

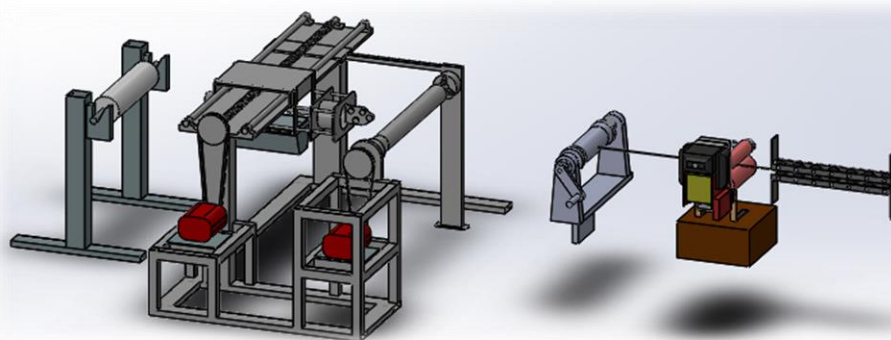
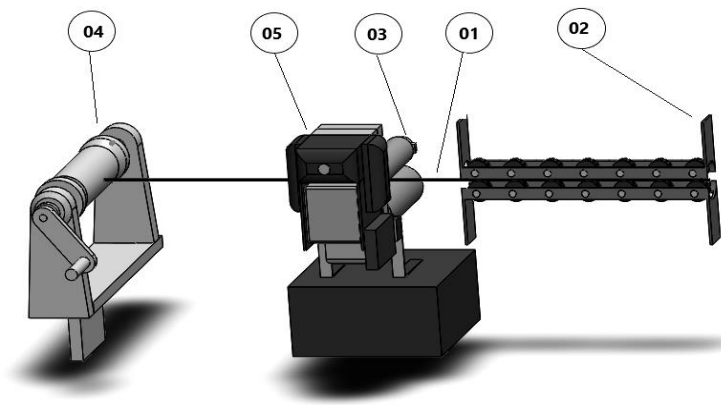
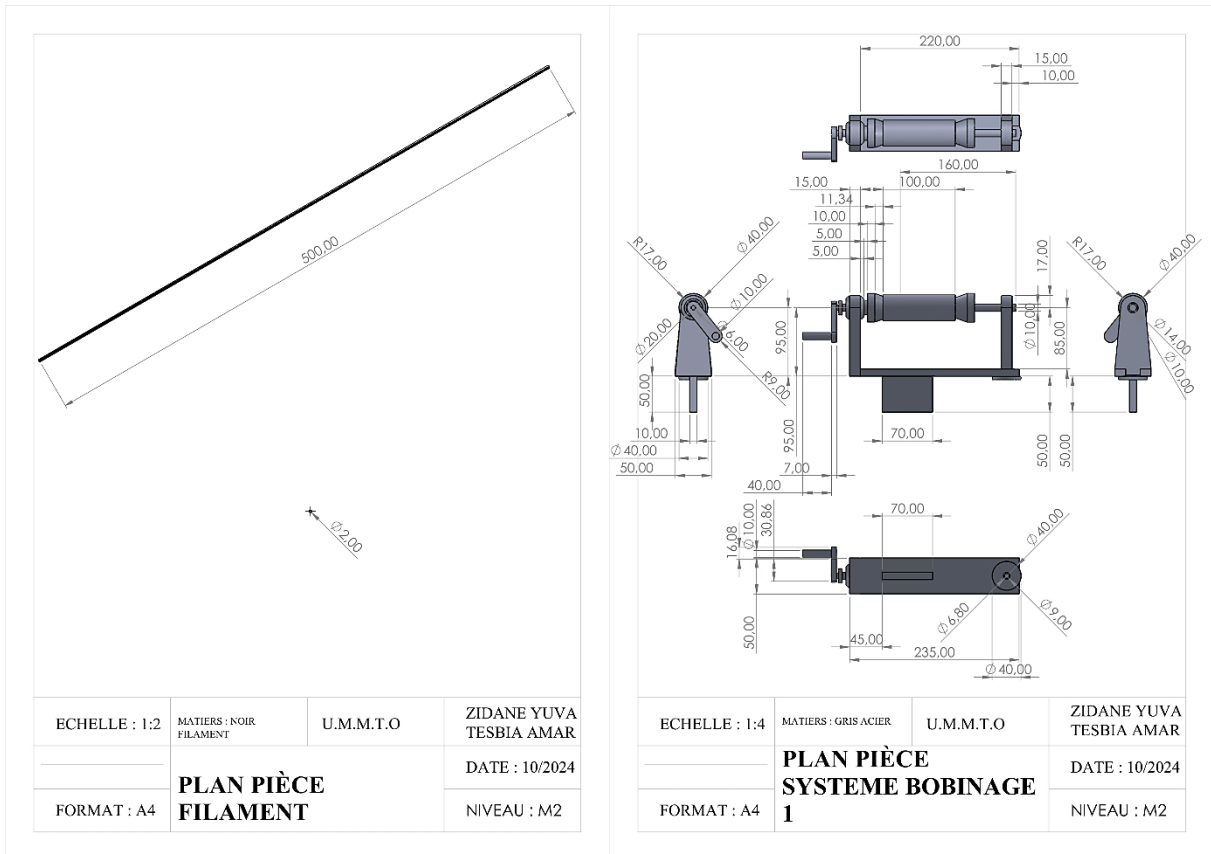


Figure II.45 : L'assemblage du système de bobinage



1. Filament Extrudé
2. Guide de Fil par Roulettes
3. Contrôleur de Système – (Bobine d’enroulement + Variateur de vitesse)
4. Bobine de Réception Manuelle
5. Moteur de Bobinage pas à pas

Figure II.46 : Assemblage des composants du système de bobinage.



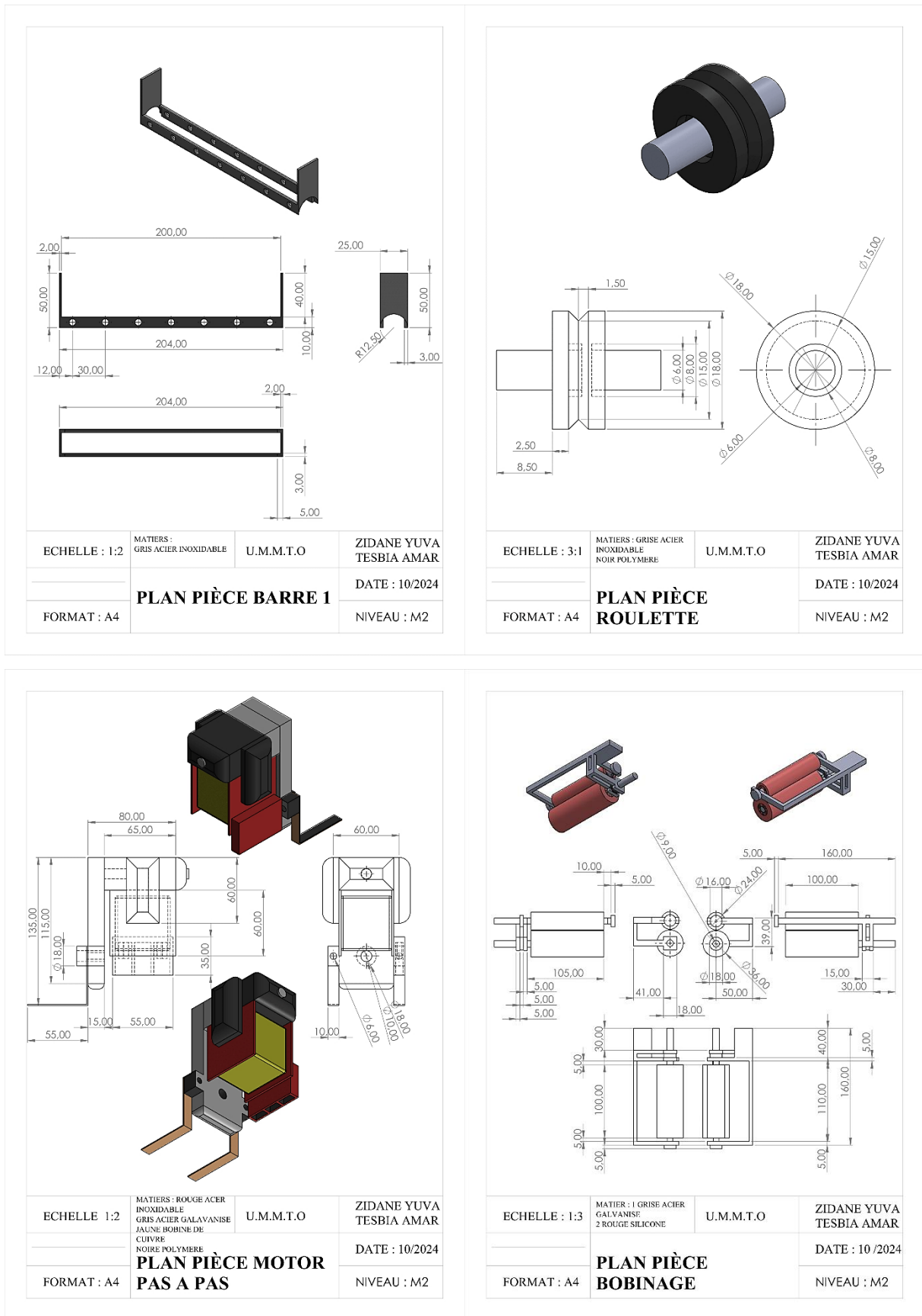


Figure II.47 : les plans des 6 composants du système de bobinage.

II.6. Conclusion

Ce chapitre a permis de détailler les aspects fondamentaux de la conception et de la réalisation de la machine extrudeuse, ainsi que du système de bobinage pour la fabrication de filaments 3D. En nous appuyant sur des principes de conception mécanique et d'ingénierie des matériaux, nous avons structuré le développement de cette machine en plusieurs phases essentielles.

Dans un premier temps, nous avons exploré les différentes composantes de la machine d'extrusion et leurs fonctions spécifiques, notamment le moteur, le système de pignon et la vis d'extrusion, chacun jouant un rôle crucial dans le processus de transformation des matières premières en filament extrudé. Par la suite, nous avons étudié les composants auxiliaires, comme la chambre de refroidissement, indispensable pour stabiliser le filament après extrusion, et la boîte d'alimentation, qui centralise les éléments de commande et de régulation thermique pour assurer un contrôle précis du processus.

L'utilisation de SolidWorks pour la modélisation 3D et l'assemblage de chaque composant a permis d'optimiser la conception, en facilitant la visualisation de la structure finale et la vérification de l'intégration des différentes pièces. Ce processus a également offert la possibilité de réaliser des simulations thermiques et mécaniques pour anticiper d'éventuels dysfonctionnements et améliorer la performance globale de la machine.

Enfin, la modélisation du système de bobinage a permis d'achever l'architecture de la machine, assurant la qualité et la fiabilité des filaments produits pour des applications en impression 3D.

En conclusion, ce chapitre met en évidence l'importance d'une conception rigoureuse et optimisée pour garantir non seulement la performance, mais aussi la durabilité et l'efficacité économique de la machine extrudeuse dans le cadre de la fabrication de filaments spécifiques pour l'impression 3D.

Chapitre 3

Réalisation des filaments spécifiques et l'analyse des résultats

III.1 Introduction

La production de filaments spécifiques constitue une étape cruciale dans la concrétisation du projet d'extrusion de matériaux pour l'impression 3D. Ce chapitre se concentre sur la réalisation de filaments innovants, conçus pour répondre à des exigences techniques avancées, telles que l'intégration de renforts naturels et l'ajout de propriétés fonctionnelles, notamment la conductivité électrique. Ces développements visent à fournir des solutions écologiques et performantes pour l'industrie de l'impression 3D, répondant ainsi aux besoins croissants en matériaux durables et multifonctionnels.

L'objectif principal est de combiner des polymères thermoplastiques avec des fibres naturelles et des composants spécifiques afin de créer des **filaments composites**. Ces filaments doivent répondre aux exigences des secteurs industriels, qui recherchent à allier **performances mécaniques** et **respect de l'environnement**. Deux axes d'innovation sont au cœur de ce développement :

- **Optimisation des matériaux** : L'utilisation de matrices polymères renforcées par des fibres naturelles telles que le lin ou la cellulose, ainsi que des fibres techniques comme la fibre de carbone, permet d'optimiser les performances mécaniques tout en minimisant l'impact environnemental. Ce renforcement améliore la résistance à la traction, la rigidité et la durabilité des filaments, tout en conservant leur caractère biodégradable.
- **Innovation technologique dans l'extrusion** : La machine d'extrusion développée (présentée dans le chapitre 2) a été conçue pour intégrer des technologies avancées, telles qu'un système de mélange interne permettant une dispersion homogène des fibres courtes dans la matrice polymère. Elle dispose également d'un dispositif de bobinage pour la fabrication de filaments composites à fibres longues. Un système de refroidissement contrôlé dans une chambre fermée garantit un refroidissement uniforme des polymères, en particulier pour les fibres naturelles, qui nécessite un refroidissement homogène afin de prévenir les déformations.

Dans cette optique, plusieurs objectifs sont visés :

- **Amélioration des propriétés mécaniques** : Le renforcement des matrices polymères par des fibres naturelles, tout en portant une attention particulière à l'adhésion fibre-matrice, est essentiel pour obtenir des filaments avec une résistance accrue et une

régulation optimisée. Une adhésion insuffisante pourrait nuire à la qualité et à la performance des filaments produits.

- **Réduction de l'impact environnemental** : En mettant l'accent sur l'utilisation de matériaux biodégradables et renouvelables, tels que les fibres naturelles, ce projet s'inscrit dans une démarche de développement de **filaments écologiquement responsables**, adaptés aux besoins de l'industrie moderne.
- **Ajout de fonctionnalités spécifiques** : En fonction des applications ciblées, certains filaments doivent posséder des **propriétés conductrices**. Cela peut être réalisé par l'intégration de charges conductrices telles que des nanoparticules de carbone ou des poudres métalliques, ouvrant ainsi la voie à des applications dans des domaines comme l'électronique imprimée ou les capteurs.

Les sections suivantes détailleront la sélection des matériaux, les paramètres d'extrusion, ainsi que les méthodes de fabrication utilisées pour la production de ces filaments spécifiques. Cette approche permettra de mesurer les performances industrielles et la pertinence des filaments produits pour répondre aux besoins de durabilité et de fonctionnalité dans l'industrie de l'impression 3D.

III.2 Matériaux et composants

Cette section vise à décrire en détail les matériaux et composants sélectionnés pour la fabrication de filaments spécifiques, en tenant compte des exigences techniques et environnementales du projet. Chaque matériau a été choisi pour ses propriétés uniques et son adéquation avec les objectifs de durabilité et de performance.

III.2.1 Matrices polymères

Pour la réalisation des filaments, les matrices polymères choisies sont les suivantes :

a) Granulés de PEHD noirs

Le PEHD est un polymère thermoplastique connu pour sa résistance mécanique exceptionnelle et sa durabilité. Il possède une excellente résistance aux chocs, à l'abrasion et aux produits chimiques. Le polyéthylène à haute densité de marque MARLEX.



Figure III.1: Granulés de PEHD noir.

b) PEBD (Polyéthylène Basse Densité)

Ce polymère se caractérise par une grande flexibilité et élasticité. Son faible poids spécifique et sa capacité à s'étirer sans se déformer le rendent adapté aux applications nécessitant une certaine souplesse. Le polyéthylène à basse densité de type MARLEX.



Figure III.2 : Granulés de PEHD.

Ces polymères ont été rigoureusement sélectionnés pour répondre à plusieurs objectifs du projet :

Le PEHD et le PEBD offrent une combinaison de résistance et de flexibilité, essentielle pour des applications industrielles. Ces propriétés garantissent que les filaments peuvent résister à des contraintes mécaniques tout en maintenant une certaine souplesse, ce qui est crucial dans de nombreuses applications.

III.2.2 Fibres de renforcement

Pour améliorer les propriétés mécaniques et fonctionnelles des filaments, nous avons choisi d'intégrer des fibres naturelles de type fibres de bois. Plusieurs études ont été élaborées sur l'intérêt de ces renforts [46][47][48].

Les fibres de bois sont reconnues pour leur légèreté, leur résistance et leur biodégradabilité. Elles offrent une alternative écologique aux fibres synthétiques, et leur incorporation dans les composites permet de réduire le poids tout en maintenant une résistance structurelle élevée.



Figure III.3 : Farine de bois

III.3 Paramètres de fabrication des filaments

III.3.1 Processus d'extrusion

Le processus de fabrication des filaments comprend plusieurs étapes distinctes et soigneusement contrôlées pour garantir une qualité optimale des filaments produits.

a) Préparation des formulations

Pour chaque type de filament, la première étape consiste à peser précisément 100 g de matière première. Cette quantité est utilisée pour chaque type de filament, en respectant les formulations spécifiques suivantes :

- **Formulation 1** : 100% Polyéthylène Haute Densité (PEHD).
- **Formulation 2** : 100% Polyéthylène Basse Densité (PEBD).
- **Formulation 3** : 50% PEHD et 50% PEBD.
- **Formulation 4** : 80% PEHD et 20% poudre de bois.
- **Formulation 5** : 95% PEHD et 5% poudre de bois.
- **Formulation 6** : 98% PEHD et 2% poudre de bois.

Cette étape de préparation est cruciale, car la précision du dosage garantit la conformité aux spécifications techniques du filament, notamment en termes de résistance mécanique, de flexibilité et de propriétés d'impression



Figure III.4 : La préparation du dosage 95% PEHD et 5% poudre de bois. Pour 30g de métiers premiers

Une fois les matériaux sont pesés, on les mélange pour garantir une répartition uniforme des particules dans la matrice polymère.

Pour les filaments composites, cette étape est particulièrement importante afin d'éviter la formation d'agrégats de fibres ou de poudre, ce qui pourrait altérer les propriétés mécaniques et la qualité d'impression du filament.

b) Chargement et alimentation dans la machine d'extrusion

Après le mélange, les matériaux sont introduits dans la trémie d'alimentation de la machine d'extrusion. Ce système d'alimentation transporte le mélange vers la vis d'extrusion, où commence le processus de plastification.

L'extrusion se déroule à une température globale de 180°C, bien que cette température soit adaptée en fonction des zones spécifiques de la machine (détails dans la section E). **Figure III.5** représente les différentes formulations dans la trémie.

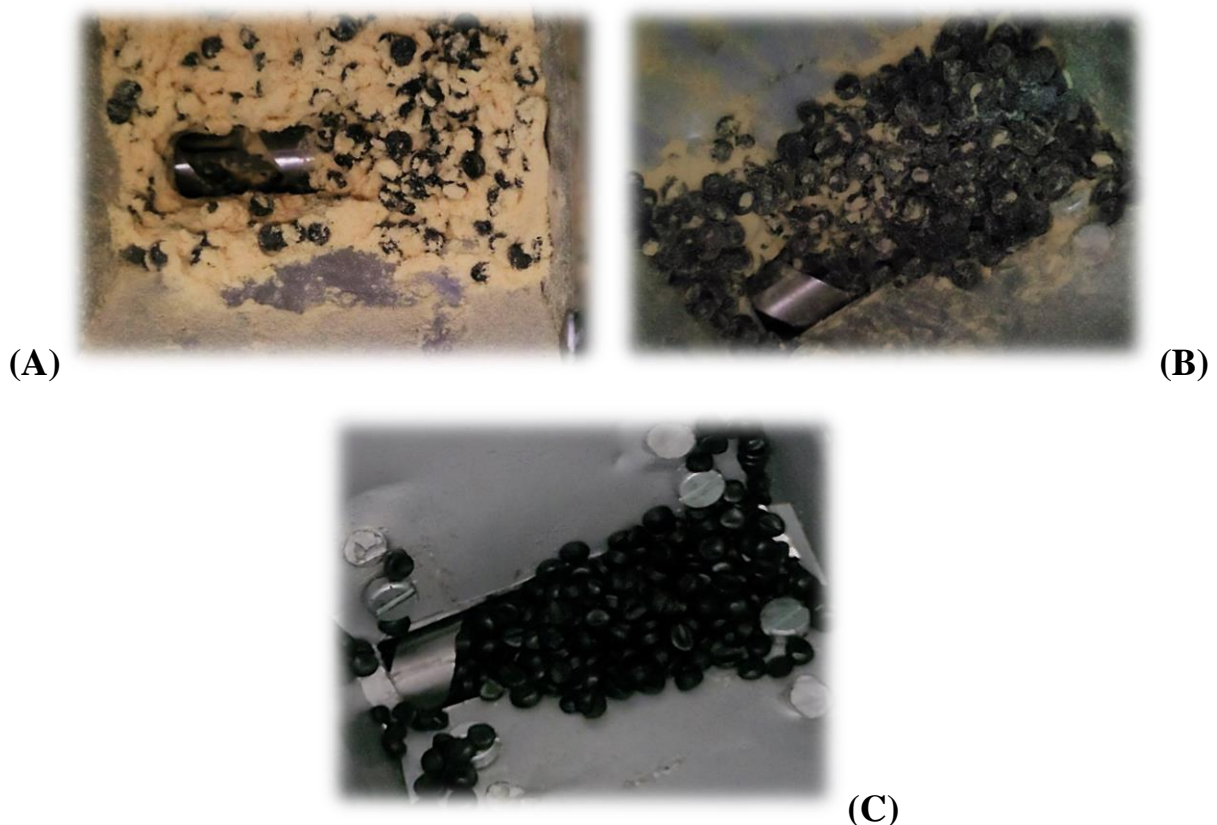


Figure III.5 : Les mélanges dans la machine extrudeuse : (a) 80% PEHD/ 20% poudre de bois, (b) 95% PEHD /5% poudre de bois, (c) 100% PEHD.

Tableau III.1 : Les paramètres de l'extrusion

Température °C	
Zone1 : Alimentation	160°C
Zone 2 : Plastification	180°C
Zone 3 : injection	178°C
Vitesse de rotation de la vis (rpm)	
5-9	

c) Refroidissement contrôlé des filaments extrudés

A la sortie de l'extrudeuse, les filaments encore à l'état fondu sont immédiatement dirigés vers un système de refroidissement. Ce refroidissement dans une chambre fermée équipée de ventilateurs.

Un refroidissement trop rapide pourrait entraîner des déformations, tandis qu'un refroidissement trop lent risque de nuire à la régularité dimensionnelle des filaments.



Figure III.6 : Système de refroidissement des filaments extrudés

d) Enroulage et stockage des filaments

Après refroidissement, les filaments passent par un système d'enroulement, où ils sont soigneusement enroulés sur des bobines de taille standard. La vitesse d'enroulement est contrôlée pour correspondre à la vitesse d'extrusion et éviter toute tension excessive sur les filaments.

Les filaments sont ensuite stockés sur des bobines pour être utilisés dans des applications d'impression 3D ou pour des tests supplémentaires.



Figure III.7 : Bobinage des filaments extrudés

e) Les réglages spécifiques de la machine d'extrusion

Sont essentiels pour produire des filaments adaptés aux caractéristiques de chaque matériau.

1. Températures par Zone

- **Zone d'alimentation** : Chauffée à environ 160°C, cette zone ramollit les polymères sans les fondre, facilitant leur transport le long de la vis.
- **Zone de plastification** : À 180°C, le polymère fond complètement sous la pression de la vis, formant une masse homogène prête pour l'extrusion.
- **Zone de tête d'extrusion** : Maintenue entre 175°C et 180°C, elle assure une extrusion stable sans surchauffe. Pour des filaments comme le PEHD et le PEBD purs, ces réglages sont ajustés : par exemple, une température plus élevée pour le PEHD pur et plus modérée pour les composites pour éviter la dégradation des fibres.

2. Vitesse de Rotation de la Vis

La rotation de la vis varie entre 5 et 9 tours par minute (**rpm**), selon le type de filament :

- **PEHD pur** : Entre 6 et 7 **rpm** pour une extrusion stable.
- **PEBD** : Rotation entre 8 et 9 **rpm** pour maintenir une bonne fluidité.

- **Composites PEHD/poudre de bois** : Vitesse réduite 5-6 rpm pour préserver les fibres naturelles et garantir une bonne dispersion.

3. Vitesse de Bobinage

Enfin, la vitesse d'enroulement est réglée en fonction du type de filament pour garantir une qualité optimale :




- **Polymères purs (PEHD, PEBD)** : Enroulement rapide pour une meilleure cadence.
- **Composites** : Enroulement lent, essentiel pour limiter la tension et maintenir l'intégrité des fibres.




Ces réglages minutieux assurent la production de filaments homogènes et adaptés aux spécificités des matériaux utilisés.

III.3.2 Les filaments extrudés

Les filaments extrudés sont représentés dans le tableau suivant.

Tableau III.2 : Les types des filaments extrudés.

Filaments	Composition	Résultat
Filament 1	100% Polyéthylène Haute Densité (PEHD).	
Filament 2	100% Polyéthylène Basse Densité (PEBD).	
Filament 3	50% PEHD et 50% PEBD.	

Filament 4	80% PEHD et 20% poudre de bois.	
Filament 5	95% PEHD et 5% poudre de bois.	
Filament 6	98% PEHD et 2% poudre de bois.	

III.3.3 Innovations techniques appliquées

III. 3.3.1 Le systèmes innovants intégrés dans notre processus d'extrusion

a) Mélangeur pour fibres courtes

- Pour les filaments composites renforcés avec des fibres courtes (comme la poudre de bois), un système de mélange spécifique a été développé pour garantir une répartition homogène des fibres dans la matrice polymère.
- Ce mélangeur fonctionne en utilisant un agitateur à lames ou un système de vis double. Composé de deux trémières pour brasser simultanément les fibres courtes dans le polymère fondu. Ce dispositif est installé avant la phase d'extrusion, dans la zone de plastification, où les fibres sont mélangées sans être cassées. Cela permet de limiter les risques d'agrégation de fibres qui pourraient affecter les propriétés mécaniques du filament.
- Le mélange constant garantit une répartition homogène des fibres dans le filament, ce qui améliore la qualité et les performances mécaniques des filaments composites, en particulier les points faibles potentiels dans la structure.

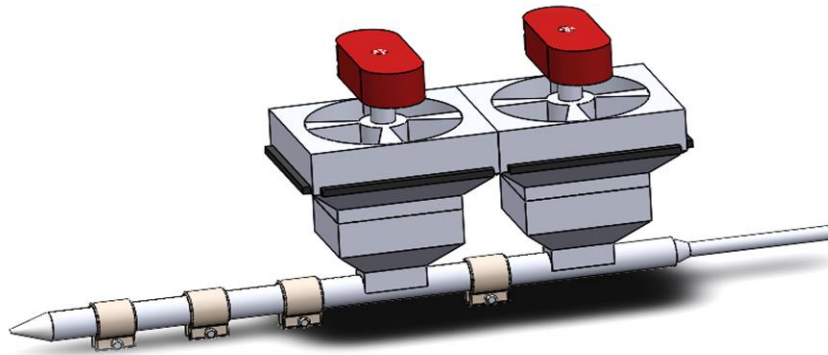


Figure III.8: Système du mélangeur pour fibres courtes

b) Dispositif de bobinage

- L'un des principaux défis du bobinage est que plus le filament est enroulé, plus le diamètre de la bobine augmente. Cela provoque une augmentation de la surface sur laquelle le filament est enroulé, ce qui peut entraîner des déformations ou une tension excessive sur le filament si la vitesse d'enroulement reste constante.
- Pour remédier à cela, un système de variateur de vitesse a été intégré au moteur de bobinage. Ce dispositif ajuste automatiquement la vitesse d'enroulement en fonction du diamètre de la bobine. Plus la bobine grossit, plus la vitesse d'enroulement est réduite pour maintenir une tension constante sur le filament. Cela permet d'éviter les distorsions et de garantir un enroulement uniforme, sans écrasement du filament.
- Ce variateur de vitesse a considérablement amélioré le contrôle de la tension du filament pendant le processus de bobinage, optimisant ainsi la régularité de la production et considérablement les pertes de matériau dues aux défauts d'enroulement.

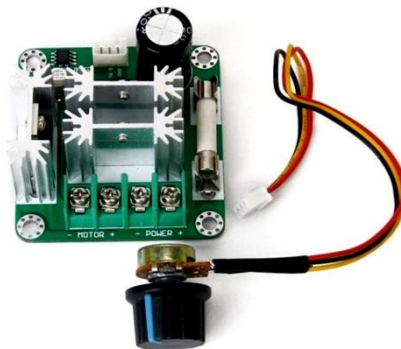


Figure III.9 : Contrôleur de système (Variateur de vitesse)

c) Refroidissement contrôlé

- Un système de refroidissement par air forcé a été intégré dans une chambre spécialement conçue pour optimiser le refroidissement des filaments extrudés. Des ventilateurs sont placés stratégiquement pour souffler de l'air frais sur les filaments sortant de la filière, assurant ainsi un refroidissement progressif et uniforme.
- Ce refroidissement à l'air est particulièrement adapté aux composites contenant des fibres naturelles, car il permet d'éviter un refroidissement trop rapide qui pourrait entraîner des fissures ou une délamination des fibres dans la matrice polymère.
- L'utilisation de ce système a permis de réduire les risques de distorsion thermique et de mieux stabiliser la structure des filaments. De plus, en maintenant un flux d'air constant dans une chambre fermée, le processus est plus contrôlé, ce qui améliore la qualité de surface des filaments produits, avec une texture plus régulière et lisse.

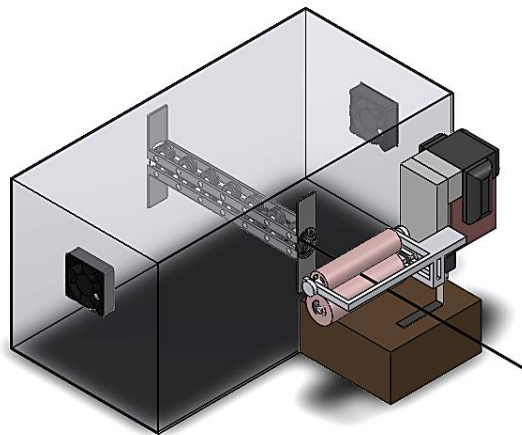


Figure III.10 : Un système de refroidissement par air forcé

III. 3.3.2 Les Améliorations de la qualité des filaments produits

a) Homogénéité des fibres courtes dans les composites

- Grâce au système de mélangeur, une meilleure homogénéité des fibres courtes a été présente dans les filaments composites. Pour un pourcentage de 5% de poudre de bois, bien que le filament soit extrudé, il présente une surface non régulière, ce qui a été attribué à une concentration de fibres légèrement inégale dans certaines sections. À 20%, le filament était trop fragile et se cassait, rendant impossible son enroulement.

- Avec un dosage de 2% de farine de bois, le filament a montré des performances quasi optimales, avec une très bonne dispersion des fibres, une surface régulière, et un enroulement facile. Cependant, cela se fait au détriment de la biodégradabilité, car la quantité de fibre naturelle (poudre de bois) est plus faible.

b) Impact du refroidissement contrôlé sur la qualité des filaments

- Le refroidissement contrôlé par air dans une chambre ventilée a permis d'éviter plusieurs défauts de courants de surface, tels que des ondulations ou des bulles provoquées par un refroidissement inégal. En assurant un refroidissement progressif, les filaments ont montré une texture plus régulière, sans fissures ni déformations.
- Ce système a également permis d'améliorer la précision dimensionnelle des filaments, garantissant un diamètre plus constant, ce qui est crucial pour les applications en impression 3D, où la précision du filament joue un rôle clé dans la qualité de l'impression finale.

c) Améliorations apportées par le dispositif de bobinage

- Le dispositif de variateur de vitesse sur le moteur de bobinage a eu un impact direct sur la précision et la continuité de la production. En ajustant la vitesse d'enroulement en fonction de l'augmentation du diamètre de la bobine, ce système a permis de maintenir une tension constante sur le filament tout au long du processus de bobinage.
- Cela a non seulement réduit les risques de rupture du filament, mais a également amélioré la qualité finale des bobines, rendant le filament plus facile à utiliser lors des étapes ultérieures, notamment pour l'impression 3D. Le contrôle précis de la tension a également permis d'augmenter légèrement la vitesse de production, tout en maintenant une haute qualité.



Figure III.11: Les ruptures sur le filament 4 (Composite de 80% PEHD et 20% poudre de bois).



Figure III.12 : Les ruptures sur le filament 5 (Composite de 95% PEHD et 5% poudre de bois)



Figure III.13: Les ruptures sur le filament 6 (Composite de 98% PEHD et 2% poudre de bois)

d) Écarts et surprises

Des écarts notables ont été observés lors de l'expérimentation. Initialement, nous avons anticipé une utilisation de 20 % de fibres naturelles dans la formulation, mais les tests préliminaires ont révélé une agglomération à ce niveau, entraînant des problèmes d'adhésion et de dispersion dans le mélange. Ce constat a conduit à l'ajustement à 2 % de fibres naturelles, comme précisé dans la partie précédant. Cette expérience souligne l'importance de l'optimisation de la formulation et la nécessité de mener des tests supplémentaires pour identifier la proportion optimale de chaque composant afin de maximiser les performances des filaments.

e) Ajustements nécessaires

Pour améliorer les résultats obtenus, plusieurs ajustements techniques pourraient être envisagés :

- 1. Réduction du pourcentage de poudre de bois :** Diminuer la quantité de poudre de bois pourrait conduire à une meilleure homogénéité du filament et une augmentation de ses propriétés mécaniques.
- 2. Choix optimal de la température d'extrusion :** Des tests pour identifier la température d'extrusion idéale, qui pourrait se situer entre 180 et 220 °C pour le PEHD, permettront d'assurer une meilleure fusion des matériaux et, par conséquent, d'améliorer les propriétés mécaniques.
- 3. Contrôle de la vitesse d'extrusion :** Un ajustement fin de la vitesse d'extrusion, idéalement entre 5 et 10 mm/s, pourrait améliorer la qualité du filament tout en minimisant les défauts de surface, essentiels pour les applications industrielles.

III.4 Conclusion et Perspectives

La réalisation et l'analyse des performances des filaments spécifiques, composés principalement de polyéthylène haute densité (PEHD) et de fibres naturelles, ont été menées dans le cadre de ce projet. Les résultats préliminaires indiquent une conformité avec les objectifs initiaux, notamment en termes de biodégradabilité et de respect des spécifications mécaniques et thermiques. Les formulations optimales ont permis d'améliorer la biodégradabilité du PEHD, bien que des tests de caractérisation approfondis soient nécessaires pour quantifier les performances mécaniques, telles que la résistance à la traction et la flexibilité. L'optimisation des formulations, en ajustant des paramètres comme le pourcentage de poudre de bois et les conditions d'extrusion, a été identifiée comme une étape cruciale pour améliorer les résultats.

Les performances écologiques des filaments, grâce à l'incorporation de matériaux biodégradables, les positionnent comme une alternative viable face aux filaments traditionnels non biodégradables. Néanmoins, l'absence de tests quantitatifs limite actuellement notre capacité à établir une comparaison robuste avec les filaments standards disponibles sur le marché, tels que le PLA et le PETG.

Perspectives pour les améliorations futures et les applications industrielles potentielles

Pour maximiser le potentiel de ces filaments, plusieurs améliorations sont envisagées :

- 1. Tests de caractérisation :** La priorité doit être accordée à la réalisation des tests mécaniques et thermiques pour valider les propriétés des filaments. Ces données seront essentielles pour évaluer leur viabilité pour des applications spécifiques.
- 2. Optimisation de la formulation :** Des recherches supplémentaires sur l'optimisation du mélange de PEHD et de fibres naturelles sont nécessaires. L'identification de proportions optimales et l'évaluation de nouveaux additifs pourraient renforcer les performances des filaments.
- 3. Exploration de nouvelles applications :** Bien que les filaments développés n'aient pas encore démontré des propriétés conductrices, l'exploration de formulations alternatives pourrait ouvrir la voie à des applications spécifiques nécessitant une conductivité, notamment dans le domaine de l'électronique.

4. **Évaluation de la production industrielle** : Une étude approfondie des coûts de production, de la facilité de mise en œuvre des processus d'extrusion, et de l'évaluation des propriétés finales des filaments est nécessaire pour envisager une industrialisation à grande échelle.
5. **Engagement envers la durabilité** : Le positionnement sur le marché de ces filaments comme une solution durable et écologique nécessite une communication claire sur les avantages écologiques et une sensibilisation accrue auprès des consommateurs.

En conclusion, bien que des défis subsistent, les résultats préliminaires sont prometteurs, offrant des perspectives intéressantes pour le développement futur de filaments biodégradables adaptés à des applications industrielles. La poursuite des recherches et l'optimisation des formulations seront essentielles pour réaliser pleinement le potentiel de ces matériaux innovants sur le marché de l'impression 3D.

Conclusion Générale

Ce mémoire a exploré un domaine innovant et en pleine expansion : **la fabrication de filaments spécifiques pour l'impression 3D par extrusion**, avec une approche mêlant conception technique, expérimentation, et stratégie entrepreneuriale.

Dans le **premier chapitre**, nous avons posé les bases théoriques nécessaires pour comprendre les technologies d'impression 3D et les divers types de filaments, mettant en évidence leurs propriétés, leurs applications et leurs contraintes. Ces connaissances ont servi de socle pour le développement de solutions adaptées aux besoins émergents du secteur.

Le **deuxième chapitre** s'est focalisé sur la **conception d'une machine extrudeuse innovante**, intégrant des systèmes avancés de refroidissement et de bobinage. Cette étape nécessite une étude approfondie des composants mécaniques et thermoélectriques, ainsi qu'une modélisation minutieuse des plans et de l'assemblage des pièces.

Dans le **troisième chapitre**, nous avons réalisé et testé des **filaments spécifiques**, notamment des composites renforcés par des fibres naturelles. Les résultats ont démontré une significative des propriétés mécaniques et thermiques, grâce aux innovations introduites dans le processus d'extrusion.

Les contributions de ce travail sont multiples : une meilleure compréhension des exigences des filaments composites, la conception d'une machine adaptée à leur production, et la structuration d'un projet entrepreneurial innovant. Ce mémoire ouvre également des perspectives pour :

- L'optimisation continue des procédés d'extrusion.
- L'élargissement des gammes de matériaux biodégradables et fonctionnels.
- La démocratisation de ces solutions à un niveau industriel.

En conclusion, ce projet représente une synergie entre innovation technologique et vision entrepreneuriale, positionnant l'impression 3D comme un levier clé pour les industries modernes et durables.

References et bibliographies

- [1] **Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B.** (2015). Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing (2nd ed.). Springer.
- [2] **Mohamed, O. A., Masood, S. H., & Bhowmik, J. L.** (2015). "Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects." *Avances in Manufacturing*, 3(1), 42-53.
- [3] **Ahn, S.-H., Montero, M., Odell, D., Roundy, S., & Wright, P. K.** (2002). "Anisotropic material properties of fused deposition modeling ABS." *Rapid Prototyping Journal*, 8(4), 248-257.
- [4] **ASTM International.** (2012). ASTM F2792-12a: Standard Terminology for Additive Manufacturing Technologies.
- [5] **Hull, C. W.** (1986). Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography. US Patent 4575330A.
- [6] **Crump, S. S.** (1992). Apparatus and method for creating three-dimensional objects. US Patent 5121329A.
- [7] **Lipson, H., & Kurman, M.** (2013). *Fabricated: The New World of 3D Printing*. John Wiley & Sons.
- [8] **Chua, C. K., & Leong, K. F.** (2015). *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications* (5th ed.). World Scientific.
- [9] **Ventola, C. L.** (2014). "Medical Applications for 3D Printing: Current and Projected Uses." *Pharmacy and Therapeutics*, 39(10), 704-711.
- [10] **Frazier, W. E.** (2014). "Metal Additive Manufacturing: A Review." *Journal of Materials Engineering and Performance*, 23(6), 1917-1928.
- [11] **Ford, S., & Despeisse, M.** (2016). "Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges." *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573-1587.
- [12] **Khoshnevis, B.** (2004). "Automated construction by contour crafting—related robotics and information technologies." *Automation in Construction*, 13(1), 5-19.

- [13] Sun, J., Zhou, W., Huang, D., Fuh, J. Y. H., & Hong, G. S. (2015). "An overview of 3D printing technologies for food fabrication." *Food and Bioprocess Technology*, 8(8), 1605-1615.
- [14] Chua, C. K., & Leong, K. F. (2015). *3D Printing and Additive Manufacturing: Principles and Applications*. World Scientific.
- [15] Kalpakjian, S., & Schmid, S. R. (2010). *Manufacturing Engineering and Technology* (6th ed.). Pearson.
- [16] **Rémi Jacquet** Publié (le 24/10/14 à 13h00) Impression 3D : les différents procédés FDM, SLS, SLA... On vous explique tout lesnumeriques.com/imprimante-3d/impression-3d-differents-procedes-a1876.html
- [17] Wong & Hernandez, (2012). "FDM is one of the most widely used additive manufacturing technologies due to its low cost and versatility in using a variety of materials such as PLA and ABS."
- [18] Gibson et, David Rosen , et Brent Stucker, (2015). "The layer-by-layer approach of FDM allows for significant flexibility in design, making it suitable for rapid prototyping and even functional parts."
- [19] Lipson & Kurman, (2013). "Stereolithography (SLA) was the first 3D printing technology invented, allowing for the creation of high-resolution parts by curing liquid resin with a UV laser."
- [20] Chua, Leong, & Lim, (2010). "Although SLA offers superior accuracy, it often requires additional post-processing steps such as cleaning and UV curing to achieve final part quality."
- [21] Gibson et Gibson et, David Rosen, et Brent Stucker, (2015). "Selective Laser Sintering (SLS) is particularly useful for producing strong, durable parts without the need for support structures, which makes it ideal for industrial applications."
- [22] Wong & Hernandez, (2012). "SLS allows for the use of various materials, including polymers and metals, and is highly valued in industries such as aerospace for its ability to produce functional prototypes and parts."
- [23] Lipson & Kurman, (2013). "PolyJet technology enables the simultaneous printing of multiple materials, making it ideal for creating complex, multi-material parts with fine details and varying mechanical properties."

- [24] **Chua, Leong, & Lim**, (2010). "PolyJet's ability to mix different resins in one print job allows for the creation of objects with varying flexibility, which is beneficial in fields like medical device manufacturing."
- [25] **Gibson et Gibson et, David Rosen , et Brent Stucker**, (2015). "Digital Light Processing (DLP) offers significant advantages in terms of speed and precision, making it a preferred method for applications that require high accuracy, such as in the dental and jewelry industries."
- [26] **Wong & Hernandez**, (2012). "DLP is similar to SLA but utilizes a digital projector screen to flash each layer of the object onto the resin, speeding up the printing process."
- [27] **L'hachemi AZOUZ** « Etude des interactions de mélanges (polymères biodégradables/principe actif) obtenus par différentes méthodes de préparations » Université A/Mira-Bejaia - Magister 2010
- [28] **Laurent Kieffer** « Étude et optimisation de l'impression en FDM avec l'Ultimaker » Juillet 2015
- [29] **Josef Prusa** « Les bases de l'impression 3D » Première édition, Prague 2020
- [30] **Michael C. Faudree, Yoshitake Nishi** Improvement of low-temperature impact value of sandwich-structural (CFRP/ABS/CFRP) laminate plies by Homogeneous Low-Energy Electron Beam Irradiation (HLEBI) *Materials Transactions*, Vol. 57, No. 3 (2016) pp. 305 to 311. The Japan Institute of Metals and Materials
- [31] **Blum, G., M.d. Blois, and N. Tadjine** L'impression 3D : de l'émerveillement technique aux enjeux organisationnels, économiques et sociétaux. 2017
- [32] **Aslam Farooq, walid tawfik, zeyad Alahmed, Kaleem Ahmad** « Role of Purging Gases in the Analysis of Polycarbonate With Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, *Journal of Russian Laser Research* · May 2014
- [33] **Anis Bahar, Sofiane Belhabib, Sofiane Guessasma, Ferhat Benmahiddine, Ameer El Amine Hamami, et al.** Mechanical and Thermal Properties of 3D Printed Polycarbonate. *Energies*, 2022, 15 (10), pp.3686. 10.3390/en15103686. hal-03674958
- [34] **Leslie Howard Sperling**, *Introduction to Physical Polymer Science*, Hoboken, New Jersey, Wiley, 2006, 845 p.
- [35] **Ultimaker**, « Comment imprimer avec du filament en nylon »,
- [36] **LulzBot**, « Impression avec filament en polypropylène (PP) », disponible en ligne : [https ://www. Lulzbot .com](https://www.Lulzbot.com)

- [37] **MatterHackers**, « Qu'est-ce que le filament TPU et comment imprimer avec », disponible en ligne : <https://www.Matterhackers.com>
- [38] **Solutions d'impression 3D**, « Filament HIPS : propriétés et applications », disponible en ligne : <https://www.3dprintingsolutions.com.au>
- [39] **Hassen, A. et coll. (2021)**. "Fabrication additive de composites polymères renforcés de fibres : état de l'art, défis et orientations futures », dans *Composites Partie B : Ingénierie*.
- [40] **Tekinalp, HL et coll. (2014)**. « Composites fibre de carbone-polymère hautement orientés via la fabrication additive. » *Science et technologie des composites*, 105, 144-150.
- [41] **Tymrak, BM, Kreiger, M. et Pearce, JM (2014)**. « Propriétés mécaniques des composants fabriqués avec des imprimantes 3D open source dans des conditions environnementales réalistes. » *Matériaux et conception*, 58, 242-246.
- [42] **Sculptéo (2021)**. "Impression 3D en fibre de carbone : ce que vous devez savoir.
- [43] **Davis, M. (2019)**. « Comprendre les plastiques renforcés de fibres de verre ». *Magazine de fabrication de composites*.
- [44] **González, J. (2018)**. "Impression 3D avec du métal : les bases." *Industrie de l'impression 3D*.
- [45] **Filimprimante3d** « Choisir son filament : le guide ultime », disponible en ligne : <https://www.filimprimante3d.fr/pages/choisir-son-filament-le-guide-ultime-de-limprimeur-3d>
- [46] **B. Meghlaoui, M. Ould Ouali and S. Hocine**. Effect of chemical treatment of Alfa natural fibers on the mechanical properties of polyethylene matrix composites. *U.P.B. Sci. Bull., Series B (ISSN 1454-2331), Vol. 81(2), pp. 115-122, 2019.* https://www.scientificbulletin.upb.ro/rev_docs_arhiva/rez660_633231.pdf
- [47] **Arul Marcel Moshi A, Ravindran D, Venkatkumar D**. Mechanical characterization of natural fiber composites prepared with untreated and treated ficus religiosa root fibers. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*. 2024. doi:[10.1177/09544062241293300](https://doi.org/10.1177/09544062241293300)
- [48] **N. Talbi, A. Nekkouché, M. Ould Ouali, N. E. Hannachi and M. N. Farsi**. Modeling the contribution of tire-reclaimed and industrial steels fibers on the strength and ductility of RC-frames structures. *World Journal of Engineering*, Vol. 20(5), pp. 888-904, 2023. <https://doi.org/10.1108/WJE-12-2021-0696>