

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des matériaux

Présenté par :

SEGHIRI Wessal & DEBBOUCI Nour El Hoda

Thème

**Étude des propriétés mécaniques des
matériaux photopolymères et ses applications**

Devant le jury composé de:

NOM et Prénom	Grade	Qualité
ZERGANE Said	Prof	Président
MOUSSA Mohamed El Amine	MCB	Encadrant
GHADBANE Tahar	MAB	Encadrant
Moussaoui Nafissa	MCA	Examinatrice

Année Universitaire : 2024 / 2025

N° d'ordre : GM/...../2025

Remerciements

Il est difficile de trouver les mots justes pour exprimer toute la gratitude que nous ressentons aujourd'hui. Ce travail est l'aboutissement d'un parcours jalonné de doutes, d'efforts, mais surtout de belles rencontres et de soutiens inestimables.

À nos parents, vous qui avez toujours cru en nous, même lorsque la fatigue prenait le dessus. Merci pour votre amour inconditionnel, vos encouragements silencieux et vos sacrifices que nous mesurons un peu plus chaque jour. Votre présence a été notre plus grande force.

À Dr.MOUSSA Mohamed El Amine, nous tenons à exprimer notre profonde reconnaissance pour votre patience, votre écoute et vos conseils avisés. Votre accompagnement bienveillant a été essentiel dans la réalisation de ce travail et nous a permis de grandir tant sur le plan académique que personnel.

Nous remercions également nos familles et nos proches, pour leurs mots rassurants, leurs gestes réconfortants et leur soutien indéfectible dans les moments de doute. Vous avez su rendre ce parcours plus doux.

Enfin, une pensée sincère à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont croisé notre chemin au cours de cette aventure. Chacun d'entre vous a contribué, d'une manière ou d'une autre, à l'accomplissement de ce projet.

Ce mémoire n'est pas seulement le fruit d'un travail personnel et collectif, mais aussi le reflet de tout l'amour, de la confiance et de l'accompagnement que nous avons reçus.

Merci, du fond du cœur.

Résumé

Dans cette recherche, nous avons étudié l'effet du type de matériau et de la technique de fabrication sur les propriétés mécaniques des pièces imprimées en 3D, afin de guider le choix le plus approprié pour les applications d'ingénierie. Nous nous sommes concentrés sur deux matériaux courants dans ce domaine : l'ABS et le matériau de type ABS, chacun étant utilisé dans des applications différentes en fonction de ses propriétés physiques et mécaniques.

Pour atteindre cet objectif, nous avons imprimé des échantillons tests en utilisant deux techniques différentes : l'impression par dépôt de fil fondu (FDM) pour l'ABS et l'impression par stéréolithographie (SLA) pour l'ABS-Like, qui repose sur le durcissement d'une résine photosensible en fines couches. Après avoir préparé les échantillons selon les dimensions et les normes spécifiées, nous avons réalisé des essais mécaniques, notamment de traction et de flexion, afin d'analyser la réponse du matériau sous différentes forces et de comprendre le comportement de chaque matériau en fonction de la méthode de fabrication. Cette étude a démontré que le choix de la technique d'impression et du type de matériau influence directement les propriétés finales de la pièce, ce qui nous permet d'orienter le choix en fonction des exigences de l'application, que ce soit en termes de rigidité, de ductilité ou de précision.

Mots clés : Photopolymères – propriétés mécaniques – Impression 3D – Fabrication additive

Abstract

In this research, we investigated the impact of material type and manufacturing technique on the mechanical properties of 3D printed parts to guide the most appropriate choice for engineering applications. We focused on two common materials in this field: ABS and ABS-like material, each used in different applications based on its physical and mechanical properties. To achieve this goal, we printed test samples using two different techniques: fused deposition modeling (FDM) for ABS and stereolithography (SLA) for ABS-like material, which relies on curing a photosensitive resin in thin layers. After preparing the samples according to the specified dimensions and standards, we performed mechanical tests, including tensile and bending, to analyze the material's response to various forces and understand the behavior of each material depending on the manufacturing method. This study demonstrated that the choice of printing technique and material type directly influences the final properties of the part, allowing us to guide the choice according to the application requirements, whether in terms of rigidity, ductility or precision.

Keywords: Photopolymers - mechanical properties - 3D Printing – Additive manufacturing

ملخص

في هذا البحث، قمنا بدراسة تأثير نوع المادة وتقنية التصنيع على الخصائص الميكانيكية للقطع المطبوعة بتقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، وذلك بهدف توجيه الاختيار الأنسب للتطبيقات الهندسية. تم التركيز على مادتين شائعتين في هذا المجال، هما ABS وABS-like، حيث تُستخدم كل واحدة منهما في تطبيقات مختلفة بناءً على خصائصها الفيزيائية والميكانيكية. لتحقيق هذا الهدف، قمنا بطباعة عينات اختبار باستعمال تقنيتين مختلفتين: الطباعة بتقنية التصنيع بالترسيب المنصهر (FDM) بالنسبة لمادة ABS، والطباعة باستخدام تقنية الستيروليثوغرافيا (SLA) بالنسبة لمادة ABS-like، والتي تعتمد على تصلب الراتنج الضوئي بطبقات دقيقة. بعد إعداد العينات وفق الأبعاد والمعايير المحددة، قمنا بإجراء اختبارات ميكانيكية تمثلت في اختبار الشد واختبار الانحناء، وذلك لتحليل استجابة المواد تحت تأثير قوى مختلفة، ومحاولة فهم سلوك كل مادة حسب طريقة التصنيع. تبين من خلال هذه الدراسة أن اختيار تقنية الطباعة ونوع المادة يؤثران بشكل مباشر على الخصائص النهائية للقطعة، ما يتيح توجيه الاختيار حسب متطلبات التطبيق، سواء من حيث الصلابة أو الليونة أو الدقة.

الكلمات المفتاحية: فوتوبوليمار - خواص ميكانيكية - طباعة ثلاثية الأبعاد - التصنيع الإضافي

Table des matières

Introduction générale.....	1
.I Chapitre 1 : Généralités sur les polymères.....	3
I.1. Introduction.....	3
I.2. Les polymères :.....	3

I.2.1.	Définition d'un polymère.....	3
I.2.2.	Historique	4
I.2.3.	Classification des polymères.....	4
I.2.4.	Les applications des polymères :	6
I.2.5.	Polymérisation.....	11
I.3.	Les photopolymères.....	12
I.3.1.	Définition :	12
I.3.2.	Historique	13
I.3.3.	Classification des photopolymères.....	13
I.3.4.	Les applications des photopolymères	17
I.3.5.	Photopolymérisation :	21
I.4.	Bibliographie.....	22
II.	Chapitre 2 : Impression 3D	26
II.1.	Définition impression 3D:.....	26
II.1.1.	Principe et historique:	26
II.2	Principe de Fonctionnement de l'impression 3D :	27
II.3.	Types d'impression 3D :	28
II.3.1.	Impression 3D SLA :	28
II.3.2.	Frittage sélectif par laser (SLS) :	30
II.3.3.	Fabrication par Dépôt de Filament Fondue (FFF) :	31
II.3.4Fabrication des objets laminés (LOM) :	33
II.3.5Dépôt d'énergie dirigée (DED) :	34
II.3.6.	La fabrication additive par fusion laser sur lit de poudres LPBF :	36
II.3.7.	Impression 3D avec la technologie DLP :	37
II.3.8.	Impression 3D par technologie LCD :	38
II.4	Matériaux pour fabrication additive:	41
II.4.1.	Les composites polymères :	42
II.4.2.	PLA:	43
II.4.3.	ABS :	43
II.4.4.	PEEK :	44
II.4.5.	Céramique :	45
II.4.6.	Fibre de carbone:	47
II.5.	Avantage de l'impression 3D :	49
II.6	Spécificité d'impression 3d par photopolymères :	51
II.6.1.	Précision d'impression :	51
II.6.2.	Impression rapide :	52

II.6.3.	Disponibilité de matériaux variés :	52
II.6.4.	Impression biologique :	52
II.6.5.	Faible coût et facilité d'utilisation :	52
II.6.6.	Impression de formes complexes avec précision :	52
II.7.	Spécifications du processus d'impression 3D avec des polymères photopolymérisables :	53
II.7.1.	Le processus :	53
II.7.2.	Configurations géométriques :	53
II.7.3.	Avantages et inconvénients :	53
II.7.4.	Évolutions technologiques :	53
II.7.5.	Matériaux utilisés :	53
II.7.6.	Systèmes d'initiation de la polymérisation :	53
II.8.	Applications d'impression 3D :	54
II.9.	Bibliographie :	59
III.	Chapitre 3 : conception 3D et réalisation des éprouvettes	67
III.1.	Introduction:	67
III.2.	Conception 3D :	67
III.2.1.	Définition SolidWorks :	67
III.2.2.	Préparation des fichiers pour l'impression des éprouvettes :	69
III.3.	Impression 3D des éprouvettes pour les essais:	74
III.3.1.	Impression SLA des éprouvettes en ABS-LIKE + :	74
III.4.	Impression FDM des éprouvettes en ABS :	80
III.4.1.	Définition du logiciel CURA :	80
III.4.2.	Paramètres de découpage (slicing) utilisés :	81
III.4.3.	Préparation de filament ABS pour l'impression FDM :	81
III.4.4.	Temps d'impression 3D :	82
III.4.5.	Résultat de l'impression :	83
III.5.	Différences d'aspect visuel entre les pièces imprimées en SLA (ABS-Like+) et FDM (ABS) 84	
IV.	Chapitre 4 : Expérimentations et validation (exemple)	86
IV.1.	Caractérisation mécanique des échantillons imprimés :	86
IV.1.1.	Machine d'essai mécanique:	86
IV.2.	Essais mécaniques standards:	87
IV.2.1.	Essai de flexion 3 points:	87
IV.2.2.	Essai de traction:	91
V.	Chapitre 5 : Résultats et Discussions	97
V.1.	Résultats de test de flexion :	97
V.2.	Discussion:	98

V.3. Résultats de test de traction :	98
V.4. Discussion:	98
V.5. Conclusion :	99
VII. Conclusion générale.....	100

Liste des tableaux

Tableau I.1. Propriétés et applications de certains polymères	6
Tableau I.2. Classification des photopolymères selon les mécanismes des photopolymérisations.....	15
Tableau II.1. Méthodes de fabrication additive et leur principe, applications et résolution	40
Tableau III.1. Données techniques de matériau ABS-Like+ fournies par le fabricant.....	76
Tableau III.2. Données techniques de matériau ABS fournies par le fabricant	82

Liste des figures

Fig. I.1. Monomères forment un polymère	3
Fig. I.2. Production mondiale de plastique primaire par polymère, 1990 à 2019	4
Fig. I.3. Structure des polymères - Dimensionnalité.....	5
Fig. I.4. Utilisation du polypropylène dans la fabrication de pièces automobiles	7
Fig. I.5. Utilisation du polycarbonate dans la fabrication de pare-brise d'avion	8
Fig. I.6. Utilisation du PVC dans la fabrication des câbles à fibres optiques.....	8
Fig. I.7. Poudre de Téflon aux sutures vasculaires : les applications du Téflon.....	9
Fig. I.8. Hydrogel pour l'agriculture en poudre : des cristaux d'eau pour améliorer la croissance des plantes.....	9
Fig. I.9. Utilisation du polyéthylène dans l'industrie de l'emballage alimentaire.....	10
Fig. I.10. Ballon de football fabriqué à partir de la matière polyuréthane	10
Fig. I.11. Représentation schématique du réseau polymère réticulé obtenu lors d'une réaction de polymérisation radicalaire entre des oligomères (violet), des monomères (orange) et des photo-initiateurs (bleu).....	14
Fig. I.12. Mécanisme de polymérisation cationique	14
Fig. I.13. Cétone d'Hydroxycyclohexylphényl et Acrylates.....	16
Fig. I.14. Photoinitiateur du Titanocène.....	16
Fig. I.15. Polyimide auto-sensible, soluble et entièrement imidisé	16
Fig. I.16. Cartes de câblage imprimées	17
Fig. I.17. Plaque d'impression photopolymère Flexo Aolide de haute qualité.....	18
Fig. I.18. Dispositif d'affichage d'images ou de données alphanumériques ou graphiques qui utilise le reflet de la lumière sur des cristaux liquides	19
Fig. I.19. Dentisterie numérique et impression 3D de résine dentaire	19
Fig. I.20. Adhésifs Sensibles à la pression.....	20
Fig. I.21. Sols Antistatiques : Revêtements en Résine	21

Fig. I.22.Représentation schématique de la réaction de photopolymérisation dans la cellule unitaire du matériau.....	22
Fig. II.1.Imprimante 3D en résine.....	27
Fig. II.2.Hauteur de couche pour les pièces imprimées en 3D	27
Fig. II.3.Découpage et impression 3D.....	28
Fig. II.4.Représentation schématique de la stéréo lithographie (SLA)	29
Fig. II.5.Imprimante stéréo lithographique (SLA).....	30
Fig. II.6.Frittage sélectif par laser (SLS).....	31
Fig. II.7. Fabrication par Dépôt de Filament Fondu (FFF).....	32
Fig. II.8.Fabrication par stratification (laminated objecte manufacturing): schéma de principe	34
Fig. II.9.Classification des systèmes DED	35
Fig. II.10.Principe de fonctionnement du procédé LPFD	37
Fig. II.11.Un schéma illustrant la configuration DLP	38
Fig. II.12.Différences of SLA et DLP et LCD.....	39
Fig. II.13.Schéma d'une imprimante 3D de type LCD.....	39
Fig. II.14.Distribution des matériaux en impression 3D	41
Fig. II.15.Différentes pièces composites en PLA renforcé.....	42
Fig. II.16.Matériau ABS (acrylonitrile butadiène styrène).....	44
Fig. II.17.Plastique polyether ketone (peek).....	45
Fig. II.18.Principe du dispositif d'extrusion pour la fabrication [14a]	45
Fig. II.19.Configuration de l'impression 3D LITA (b) Fonctionnement de l'impression 3D LITA	47
Fig. II.20.fibre continue	48
Fig. II.21.Fibre de carbone hachée	48
Fig. II.22.Échafaudages construits à partir de poudres métalliques et fabriqués par impression 3D SLM	56
Fig. II.23.Impression 3D construction.....	58
Fig. II.24.Matériau ABS (acrylonitrile butadiène styrène) https://firstmold.com/ar/guides/peek-plastic/	65
Fig. II.25.Plastique polyether ketone (peek).....	65
Fig. III.1.Interface du logiciel SolidWorks.....	68
Fig. III.2.Mise en plan de l'éprouvette de traction -Iso 37 type 1 - matériaux ABS Like +	69
Fig. III.3.Mise en plan de l'éprouvette de traction -Iso 37 type 1 - matériaux ABS	70
Fig. III.4.Présentation plus lisible de l'éprouvette – matériaux ABS Like +	71
Fig. III.5.Présentation plus lisible de l'éprouvette – matériaux ABS.....	71
Fig. III.6.Mise en plan de l'éprouvette de flexion -Iso 178 - matériaux ABS Like +	72
Fig. III.7.Mise en plan de l'éprouvette de flexion -Iso 178 - matériaux ABS.....	73
Fig. III.8.Présentation plus lisible de l'éprouvette de flexion - matériaux ABS Like +.....	74
Fig. III.9.Présentation plus lisible de l'éprouvette de flexion - matériaux ABS	74
Fig. III.10.Paramètres de la résine et d'impression - Interface CHITUBOX.....	75
Fig. III.11.Paramètres de mouvement - Interface CHITUBOX.....	75
Fig. III.12.Bouteille de résine photopolymère ABS-Like+ utilisée pour l'impression SLA....	76
Fig. III.13.Une éponge de nettoyage des pièces imprimées.	77

Fig. III.14.Un panier de lavage.	78
Fig. III.15.Machine de photopolymérisation UV (Cure machine)	79
Fig. III.16.Résultat des éprouvettes de traction imprimés par SLA.....	79
Fig. III.17.Résultat des éprouvettes de flexion imprimés par SLA.....	80
Fig. III.18.Paramètres d'impression FDM - Interface CURA.....	81
Fig. III.19.Filament ABS noir utilisé pour l'impression FDM	82
Fig. III.20.Résultat des éprouvettes de traction imprimés par FDM	83
Fig. III.21..Résultat des éprouvettes de flexion imprimés par FDM	84
Fig. IV.1.Machine d'essai mécanique TesT 112	86
Fig. IV.2.Comportement des éprouvettes en ABS-LIKE+ lors de l'essai de flexion	87
Fig. IV.3.Comportement des éprouvettes en ABS lors de l'essai de flexion	88
Fig. IV.4.Schéma d'essai de flexion 3 points	88
Fig. IV.5.Courbes contrainte-déformation en flexion – ABS-Like+	90
Fig. IV.6. Courbes contrainte-déformation en flexion – ABS.....	91
Fig. IV.7.Comportement des éprouvettes en ABS-LIKE+ lors de l'essai de traction	92
Fig. IV.8.Comportement des éprouvettes en ABS lors de l'essai de traction	93
Fig. IV.9.Schéma d'essai de traction.....	93
Fig. IV.10.Courbes contrainte-déformation en traction – ABS-LIKE+.....	94
Fig. IV.11.Courbes contrainte-déformation en traction – ABS.....	95
Fig. V.1..Effet de la flexion sur ABS et ABS-Like.....	97

LISTE DES ABRÉVIATIONS

3D:	Tridimensionnel.
PP:	Polypropylène.
PS:	Polystyrène.
PVC:	Polychlorure de vinyle.
PA:	Polyamide.
PET:	Polyéthylène téréphtalate
PTFE:	Polytétrafluoroéthylène (Téflon).
UV:	Ultraviolets.
+EM:	Effet Mésonère positif.
CI:	Circuits intégrés.
PWB:	Printed Wiring Board (Carte de câblage imprimé).
LCD:	Liquid Crystal Display (Affichage à cristaux liquides)
LC:	Liquid Crystal (Cristal liquide)
PI:	Photo-initiateur
4D:	quatre dimensions (Les 3 dimensions + le temps (ou une dimension supplémentaire abstraite)
AM:	Additive manufacturing (Fabrication additive)
SLA:	Stereolithography Apparatus.
DLP:	Digital Light Pressing
FDM:	Fused Deposition Modeling (Dépôt de matière fondue).
ABS:	Acrylonitrile Butadiene Styrene.
PLA:	Polylactic Acid
PC:	Polycarbonate
CNC:	Computer Numerical Control
SLS:	Selective Laser Sintering (Frittage sélectif par laser).
FFF:	Fabrication par dépôt de filament fondue (Fused filament fabrication).
FFM:	Fused Filament Modeling

LOM:	Laminated Object Manufacturing
DED:	Dépôt d'énergie dirigée
SLM:	Selective Laser Melting
LPBF:	Laser Powder Bed Fusion
CAO:	Conception Assistée par Ordinateur.
STL:	STereo-Lithography.
PEEK:	Polyether Ether Ketone
PVA:	Polyvinyl Alcohol
FDA:	Food and Drug Administration
Y-TZP:	Yttria-stabilized Tetragonal Zirconia Polycrystal
σ_f :	La contrainte
F :	La charge en
b :	Le largeur de l'éprouvette
L :	La distance entre appuis
h :	L'épaisseur de l'éprouvette
Ef :	Le module d'élasticité en flexion
m :	La pente linéaire de la courbe charge-déflexion
ε_f :	Déformation en flexion
L :	La distance entre appuis
D :	Fleche maximale

Introduction générale

Avec le développement rapide de l'impression 3D, cette technologie s'est imposée comme un outil innovant dans de nombreux secteurs industriels, notamment dans le domaine des matériaux polymères. Parmi ces matériaux, on retrouve les photopolymères, qui, grâce à leur capacité à se solidifier sous l'effet de la lumière, permettent la fabrication de pièces de haute précision à l'aide de procédés tels que la stéréolithographie (SLA).

Partant de ce constat, notre projet vise à étudier les propriétés mécaniques des matériaux photopolymères utilisés en fabrication additive, en comparant deux techniques d'impression 3D : le dépôt de fil fondu (FDM) avec le matériau ABS, et la stéréolithographie (SLA) utilisant un photopolymère de type ABS.

À cette fin, notre travail a été divisé en quatre chapitres intégrés :

Le premier chapitre présente les généralités théoriques sur les polymères : leur définition, leurs classifications, les mécanismes de polymérisation, ainsi qu'un aperçu des photopolymères, de leur fonctionnement et de leurs domaines d'application.

Dans le deuxième chapitre, nous abordons les technologies d'impression 3D les plus courantes dans ce domaine, ainsi que les avantages et les caractéristiques de chaque technique, les matériaux polymères et photopolymères utilisés, et les bénéfices de leurs applications pratiques dans l'industrie.

Le troisième chapitre traite de la modélisation 3D des éprouvettes de traction et de flexion, conçues à l'aide du logiciel SOLIDWORKS, puis imprimées selon les deux procédés étudiés. Enfin, dans le quatrième chapitre, nous présentons les essais mécaniques (traction et flexion) réalisés sur les échantillons imprimés. Les résultats ont été analysés à l'aide du logiciel OriginLab, permettant le calcul des contraintes et des modules d'élasticité. Une comparaison détaillée entre les deux matériaux a ensuite été effectuée afin d'évaluer leurs performances mécaniques.

En conclusion, nous présentons une synthèse des résultats obtenus, accompagnée d'une discussion sur les avantages, les limites et les perspectives d'utilisation des matériaux photopolymères dans le domaine de l'impression 3D.

Chapitre 1:
Généralités sur
les polymères

I. Chapitre 1 : Généralités sur les polymères

I.1. Introduction

Les polymères se caractérisent par la place capitale qu'ils occupent dans de nombreux domaines industriels de par leurs propriétés uniques et leur grande diversité. Leur classification et leurs différentes applications permettent d'en établir leur rôle dans le développement de matériaux innovants. C'est le cas des Photopolymères, qui par leur sensibilité à la lumière sont essentiels à l'impression 3D. En tant que polymères photo-polymérisables, ils permettent la fabrication rapide à façon de prototypes, d'implants médicaux, ou de composants aux formes complexes contribuant ainsi encore à l'avènement de techniques nouvelles.

I.2. Les polymères :

I.2.1. Définition d'un polymère

Le nom de polymère vient du grec polus – plusieurs et meros – pièce. Les polymères sont des matériaux composés de macromolécules, qui sont le résultat de l'interaction de nombreuses petites molécules appelées monomères. Du point de vue chimique, ces polymères constituent un groupe de substances qui se caractérisent par une masse moléculaire élevée, est en règle générale organique ou semi-organique et est un condensé. Les polymères sont caractérisés par de longues chaînes moléculaires répétitives [1].

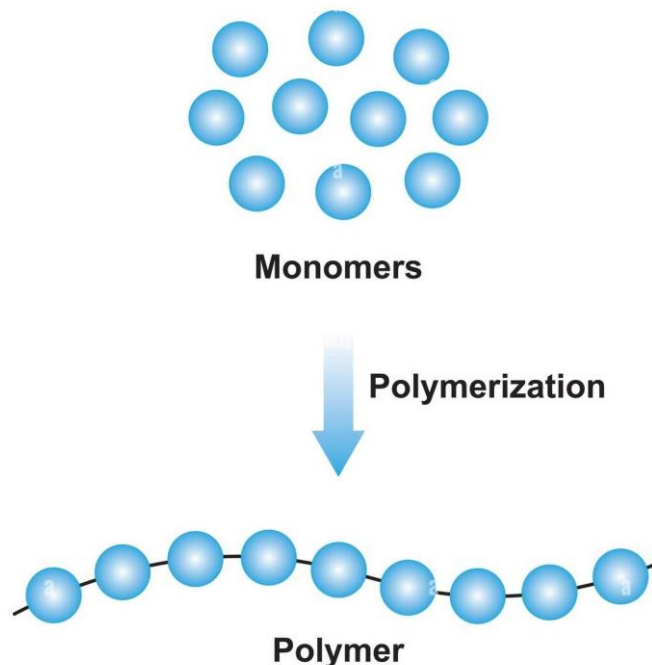


Fig. I.1. Monomères forment un polymère

I.2.2. Historique

L'industrie des polymères doit en partie ses origines à la synthèse de la nitrocellulose par Braconnot à Nancy en 1833, qui a conduit à l'invention des plastiques et des premiers textiles synthétiques. À cette époque, d'importantes inventions, telles que le celluloïd par John Wesley Hayatt en 1869, et la rayonne, un textile multicolore inventé par Louis Marie Hilaire Pernigaud, comte de Chardonnay, en 1884, ont marqué le début de cette nouvelle industrie, connue sous le nom d'industrie moléculaire organique ou polymère. La France a longtemps été un bénéficiaire majeur de l'industrie chimique mondiale ; l'essor de l'Allemagne, puis la domination des États-Unis, n'ont rien changé à cette situation. Après la fin de la Seconde Guerre mondiale, l'industrie des plastiques a connu un développement remarquable, principalement basé sur la chimie du carbone. Au fil du temps, le rôle des plastiques s'est progressivement étendu à de nombreux secteurs, dépassant finalement le cadre des industries traditionnelles. Cette expansion a culminé avec une production mondiale atteignant 149 millions de tonnes en 2003, reflétant la croissance massive de l'industrie et son interconnexion avec de nombreux aspects de la vie moderne [2].

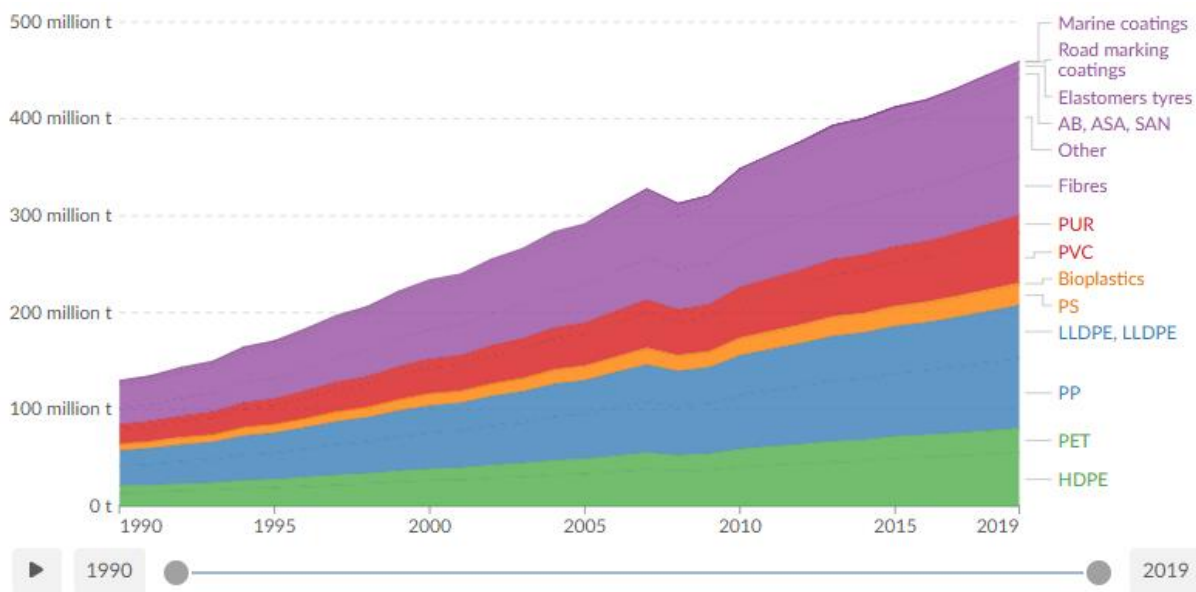


Fig. I.2. Production mondiale de plastique primaire par polymère, 1990 à 2019

I.2.3. Classification des polymères

I.2.3.1. Classification selon l'origine :

Cette classification permet d'identifier les polymères en fonction de leur source et de leur mode de production. On distingue :

- Polymères naturels (**Polysaccharides, Caoutchouc naturel ...**)
- Polymères synthétiques (**Élastomères synthétiques, Polyesters ...**)

- Polymères artificiels (Caoutchouc vulcanisé ...)

I.2.3.2. Classification selon la structure chimique et la microstructure :

État physique : amorphe, semi-cristallin.

Organisation des structures (État physique) : amorphe, semi-cristallin.

Constitution : Polymères à chaîne carbonée ou non , classés en homopolymères et copolymères.

Dimensionnalité : [3]

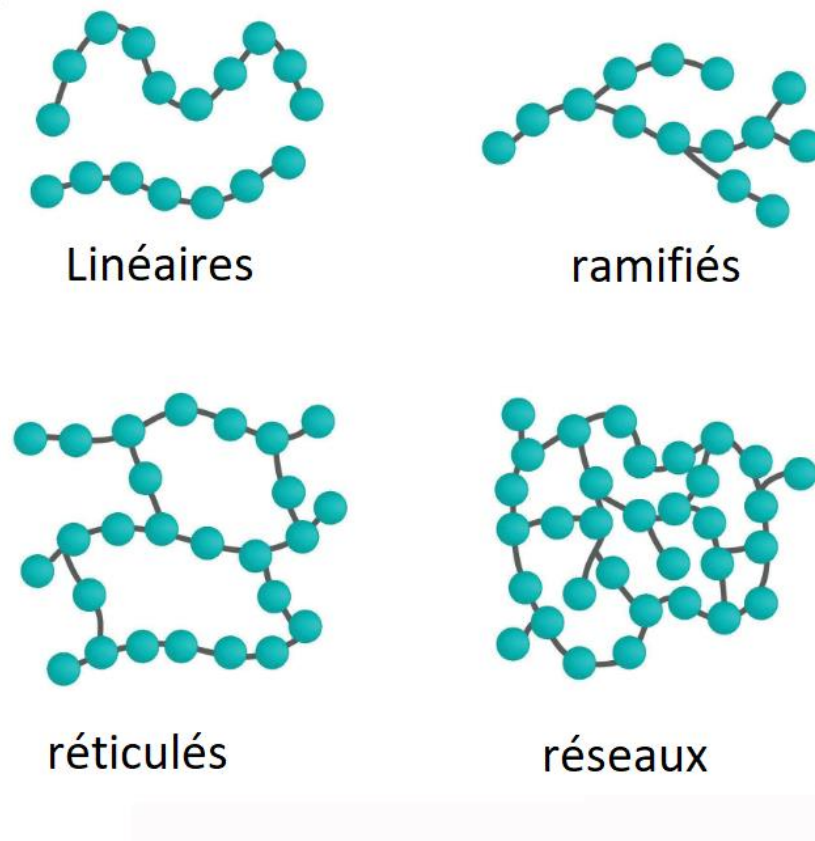


Fig. I.3. Structure des polymères - Dimensionnalité

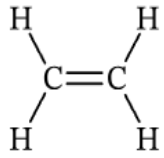
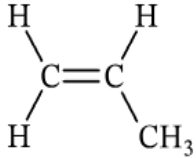
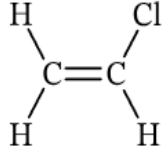
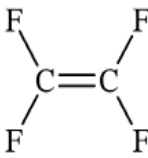
I.2.3.3. Classification selon les propriétés :

Les thermoplastiques : sont des polymères malléables quand ils sont chauffés, Puis durcissent à température ambiante " Réversibles ". Ils conservent toujours de manière réversible leur thermoplasticité initiale, à condition qu'ils ne soient pas dégradés thermiquement. Parmi les thermoplastiques les plus courants : le PP, le PS, le PVC, les polyamides et le PET.

Les thermodurcissables : sont des polymères qui durcissent de façon irréversible par chauffage ou réaction chimique. La réaction de durcissement repose sur la formation d'un système de liaisons transversales entre les molécules. Les matériaux thermodurcissables forment, lors de la fonte du polymère, un mélange hétérogène et non homogène.

Les élastomères (Caoutchoutiques) : sont des polymères dotés d'excellentes propriétés élastiques, capables de résister à de grandes déformations réversibles grâce à leur structure légèrement réticulée. Composé d'un polymère amorphe qui reprend sa forme initiale après étirement.

Tableau I.1. Propriétés et applications de certains polymères

Polymère <i>Autres noms</i>	Monomère	Utilisations du polymère	Propriété utile
Poly(éthène) <i>Polyéthylène, polythène,</i> <i>PE</i>		Sacs plastiques Bouteilles en plastique Gants jetables	Souple et résistant aux produits chimiques
Poly(propène) <i>Polypropylène, PP</i>		Contenants alimentaires Emballages Tissus Jouets	Fort et dur
Poly(chloroéthène) <i>Chlorure de polyvinyle, vinyle,</i> <i>PVC</i>		Tuyaux de plomberie Isolation de câbles électriques Cadres de fenêtres	Fort mais souple
Poly(tétrafluoroéthène) <i>Polytétrafluoroéthylène,</i> <i>PTFE</i>		Revêtements antiadhésifs Joints mécaniques Isolation électrique	Résistant à la chaleur, isolant électrique antiadhésif, et inerte

I.2.4. Les applications des polymères :

Les polymères jouent un rôle principal dans le développement de matériaux innovants et performants, notamment dans le domaine de la mécanique où ils remplacent de plus en plus les métaux grâce à leur résistance, leur durabilité et leur légèreté, les polymères sont utilisés dans de nombreux domaines :

- L'industrie mécanique et automobile : Les polymères sont utilisés dans la fabrication de composants automobiles tels que les pièces de moteur, les pare-chocs, les réservoirs de carburant, les tableaux de bord et les systèmes d'isolation. Ils offrent une excellente résistance mécanique tout en réduisant le poids du véhicule, augmentant ainsi l'efficacité énergétique [4].

Exemple : Le polypropylène noir dans l'industrie automobile

Le polypropylène noir est couramment utilisé dans l'industrie automobile pour produire des éléments intérieurs et extérieurs tels que les garnitures de portes, les enjoliveurs et certaines pièces du moteur. Ce polymère se caractérise par sa légèreté, sa résistance à la chaleur et aux produits chimiques, ainsi que sa facilité de moulage. Sa teinte noire lui confère une meilleure protection contre les rayons UV, prolongeant ainsi la durée de vie des composants exposés au soleil [5].

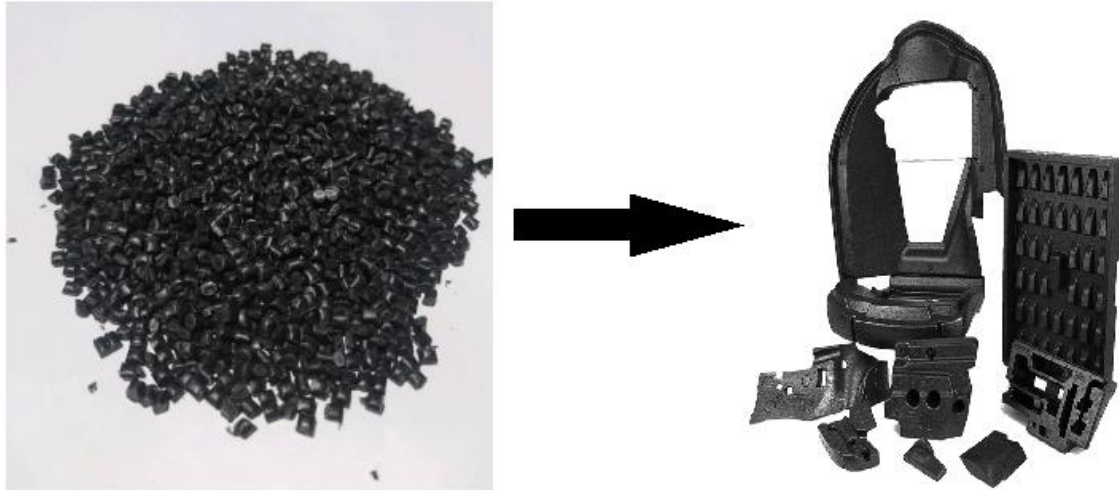


Fig. I.4. Utilisation du polypropylène dans la fabrication de pièces automobiles

- **L'aéronautique :** Dans le secteur aérospatial, les polymères renforcés sont utilisés pour fabriquer des pare-brises d'avions de chasse, des composites de fuselage et des pièces légères et résistantes aux hautes températures [4].

Exemple : Le polycarbonate dans la fabrication des pare-brises d'avion :

Le polycarbonate est un polymère transparent, léger et extrêmement résistant aux chocs, ce qui en fait un matériau idéal pour les pare-brises des avions. Il offre une excellente visibilité tout en résistant aux conditions extrêmes de haute altitude. En raison de son poids léger, il contribue également à réduire le poids global de l'appareil, augmentant ainsi son efficacité énergétique [6].

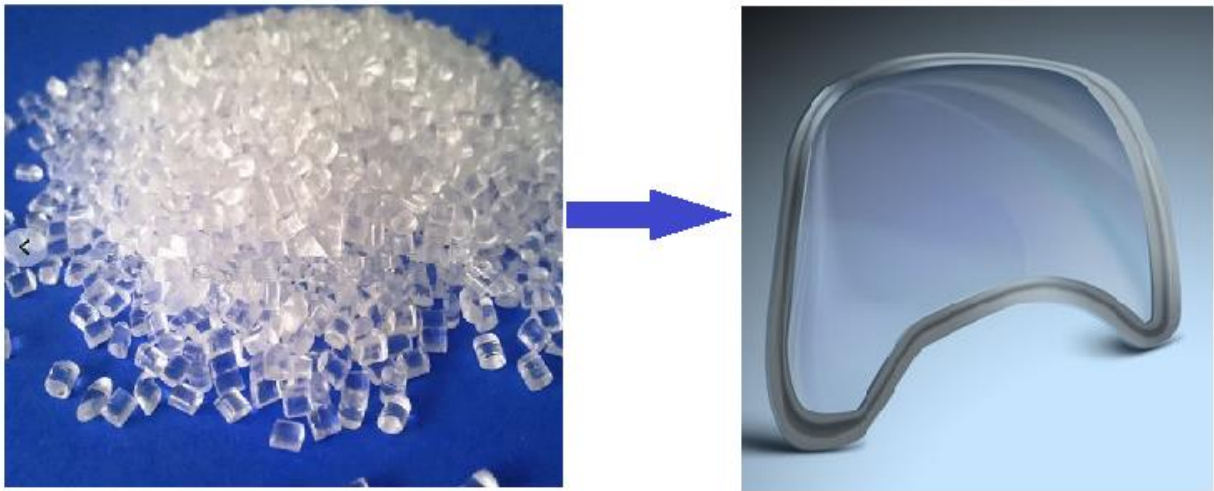


Fig. I.5. Utilisation du polycarbonate dans la fabrication de pare-brise d'avion

- **Électronique et optique** : Les polymères jouent un rôle crucial dans la fabrication de fibres optiques, d'écrans transparents, de matériaux réfléchissants, ainsi que de composants électroniques. Parmi eux, les polymères conducteurs ont véritablement transformé le paysage de l'électronique flexible [4].

Exemple : Le PVC (Polyvinylchloride) dans la fabrication des câbles à fibres optiques :

Le PVC est utilisé dans la gaine extérieure des câbles à fibres optiques en raison de sa flexibilité, jouant un rôle essentiel dans la protection des fibres de verre délicates contre les dommages mécaniques et environnementaux. Le PVC est l'un des matériaux de gaine de fibre optique les plus utilisés dans les réseaux de télécommunication en raison de sa durabilité et de son faible coût [7].



Fig. I.6. Utilisation du PVC dans la fabrication des câbles à fibres optiques

- **Médecine et biomatériaux** : Des polymères tels que le Dacron, le Téflon et le polyuréthane sont largement utilisés dans la création d'implants médicaux, notamment pour les valves cardiaques et les vaisseaux sanguins artificiels [4].

Exemple : Le Téflon (polytétrafluoroéthylène « PTFE ») dans la fabrication des sutures chirurgicales pour les maladies vasculaires :

Le PTFE est totalement inerte et hautement biocompatible. Il ne provoque pas de rejet par le corps humain, n'a pas d'effets secondaires physiologiques, peut être stérilisé de diverses manières et possède une structure microscopique. Ils conviennent donc à diverses solutions de rééducation, notamment les vaisseaux sanguins artificiels et les patches pour la régénération des tissus mous, ainsi que les sutures chirurgicales en chirurgie vasculaire et cardiaque [8].



Fig. I.7. Poudre de Téflon aux sutures vasculaires : les applications du Téflon

- **Agriculture :** Dans le domaine agricole, les polymères contribuent à améliorer l'aération des sols, à retenir l'humidité et à protéger les cultures des aléas climatiques [4].

Exemple : Utilisation du polymère hydrogel dans l'aération des sols

L'hydrogel est utilisé en agriculture pour améliorer la rétention d'humidité du sol. C'est un polymère absorbant l'eau qui peut retenir et libérer l'eau au fil du temps. Ces propriétés aident à réduire la consommation d'eau et favorisent la croissance des plantes [9].



Fig. I.8. Hydrogel pour l'agriculture en poudre : des cristaux d'eau pour améliorer la croissance des plantes

- **Consommation et emballage** : Les polymères sont omniprésents dans l'industrie de l'emballage, que ce soit pour les aliments, les bouteilles en plastique, les sacs ou encore les films de protection [4].

Exemple : Le polyéthylène utilisé dans la fabrication des emballages alimentaires.

Le polyéthylène (PE) se caractérise par une faible viscosité à l'état fondu, une légèreté, une facilité de conversion, une résistance élevée aux produits chimiques et de faibles coûts de production. C'est ce qui en fait un matériau utilisé dans de nombreux domaines, notamment : l'emballage, les emballages alimentaires, les contenants, etc [10].

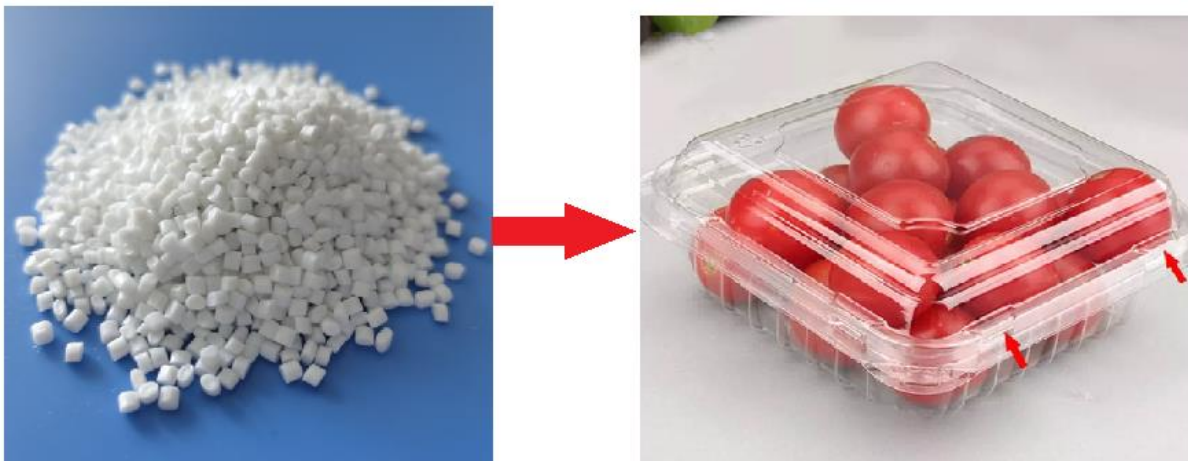


Fig. I.9.Utilisation du polyéthylène dans l'industrie de l'emballage alimentaire

- **Sports et loisirs** : De nombreux équipements sportifs, tels que les casques de protection, les balles, les clubs de golf et même les piscines, sont fabriqués à partir de polymères, appréciés pour leur légèreté et leur résistance aux chocs [4].

Exemple : Transformation de la matière première de polyuréthane en produits sportifs

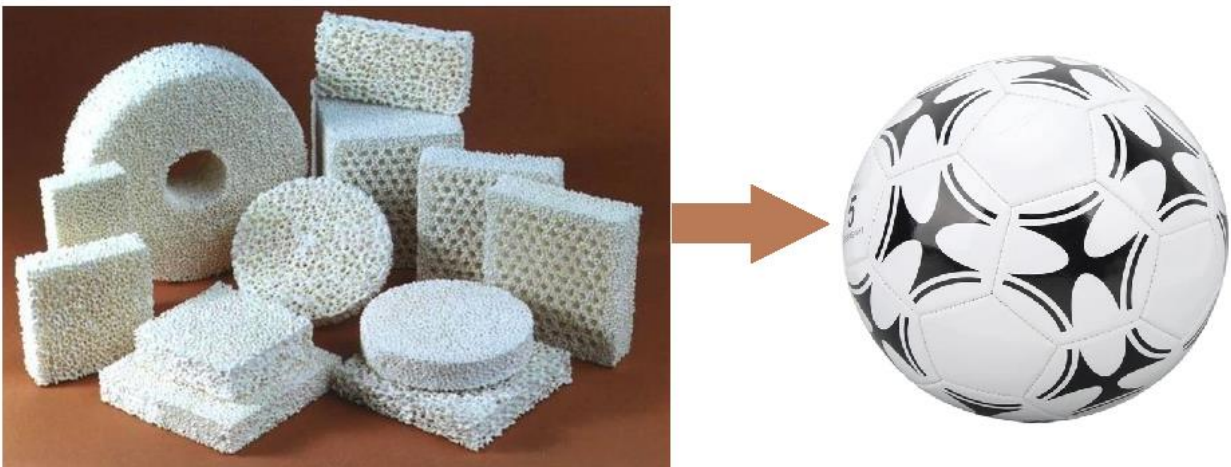


Fig. I.10.Ballon de football fabriqué à partir de la matière polyuréthane

I.2.5. Polymérisation

La polymérisation est le processus de formation de petites molécules « monomères », qui sont le composant de base de cette monnaie. Des molécules très longues et des chaînes linéaires ou des réseaux tridimensionnels de chaînes polymères se forment. Le processus de polymérisation commence par une activation ou une stimulation par la lumière, la chaleur ou tout autre catalyseur. Les monomères commencent à croître progressivement et se terminent lorsque les molécules cessent de réagir [11].

Il existe 4 types de polymérisation qu'il est bon de distinguer :

I.2.5.1. Polymérisation radicalaire

La polymérisation radicalaire est un processus chimique qui commence par la formation d'un radical libre possédant un électron et capable de réagir avec un monomère insaturé. Le processus se déroule en trois étapes : l'étape d'initiation, où le radical libre attaque le monomère et forme la chaîne polymère ; la deuxième étape, l'étape de propagation, au cours de laquelle le radical réagit successivement avec d'autres monomères, entraînant un allongement de la chaîne ; Enfin, l'étape de terminaison, où la réaction est arrêtée soit par la combinaison de deux radicaux libres, soit par réaction avec des impuretés, ce qui entraîne la croissance en fin de chaîne. [12]

I.2.5.2. Polymérisation cationique :

La polymérisation cationique est l'un des types de polymérisation les plus courants et se produit via le mécanisme de croissance de chaîne. La réaction est initiée par un réactif cationique, souvent un acide de Lewis chargé positivement, activé par un donneur d'électrons tel qu'un composé +EM, qui contribue au démarrage de la réaction en chaîne.

La propagation de la chaîne se produit par la réaction du réactif cationique avec le premier monomère, puis cette réaction est transmise aux monomères suivants de manière séquentielle. Ces monomères sont divisés selon la nature de leur réactivité en : Monomères éthyliques et monomères d'ions aluminium.

Remarque : un solvant est nécessaire pour toutes les réactions de polymérisation cationique. [13]

I.2.5.3. Polymérisation anionique :

La polymérisation ionique est un procédé qui présente des similitudes avec la polymérisation cationique, notamment au niveau du mécanisme de réaction. Elle peut être initiée soit par un ion positif, soit par un ion négatif. Toutefois, contrairement à la polymérisation cationique, l'initiation et la propagation dans ce cas sont déclenchées par un ion négatif. La réaction se

poursuit tant qu'aucune impureté n'intervient pour l'interrompre, ou en l'absence d'agents de terminaison efficaces. Ce type de polymérisation se distingue par une vitesse de réaction élevée, une grande capacité de production et la possibilité de contrôler avec précision la structure moléculaire du polymère formé. Cependant, elle présente certains inconvénients, dont le plus notable est la nécessité de conditions expérimentales rigoureuses pour garantir son succès, ainsi que l'absence d'arrêt spontané du processus réactionnel [12].

I.2.5.4. Polymérisation de coordination :

La polymérisation de coordination est un autre type de processus de polymérisation, dans lequel les monomères se fixent aux groupes latéraux de la chaîne polymère en croissance dans un arrangement spatial précisément défini pour former un stéréorégulière. Cette polymérisation se caractérise par la capacité à diriger précisément les monomères, ce qui confère au polymère des propriétés structurelles très précises. Elle est connue pour sa capacité à insérer des monomères entre le métal et l'atome de carbone à chaque étape, c'est pourquoi on l'appelle aussi polymérisation par insertion [12].

I.3. Les photopolymères

I.3.1. Définition :

Le mot photopolymère remonte aux origines grecques, les Grecs utilisaient le mot « Photo » qui signifie lumière et le combinaient avec le mot « Polymère » en référence aux propriétés de ce matériau, qui sont affectées par l'exposition à la lumière, qu'il s'agisse de lumière visible, de rayons infrarouges ou de rayons ultraviolets (UV). Ce polymère se présente et est stocké sous forme liquide, et ce qui le rend spécial lorsqu'il est exposé à la lumière est que ses propriétés chimiques et physiques changent. Parmi les propriétés chimiques qui changent, il y a la composition chimique. Les photopolymères ont une composition chimique avancée composée de plusieurs éléments de base tels que des initiateurs de lumière, des monomères et des oligomères (polyamide (PA), epoxies, polyvinyle cinnamate, polyamides, polyisoprene ...) ainsi que des additifs qui agissent pour modifier les propriétés finales[13]. Ces composants sont composés de systèmes, de systèmes à deux composants et de systèmes à un composant. Quant aux propriétés physiques, il passe de son état liquide à son état solide lorsqu'il est exposé à la lumière, et cette transformation peut être observée à l'œil nu.

De plus, les parties de la substance liquide qui ne sont pas exposées à la lumière ne durcit pas. Seule la partie exposée durcit. L'expansion de ces photopolymères est due à leurs propriétés uniques, à leurs larges applications et à leurs avantages que l'on ne retrouve pas dans la plupart des matériaux : ils sont non toxiques, respectueux de l'environnement et recyclables[14].

I.3.2. Historique

La technologie des photopolymères est l'un des domaines les plus récents des polymères avancés. Elle a évolué de simples fondements chimiques à des technologies et applications industrielles avancées. Au début du XXe siècle, l'idée des photopolymères est née d'observations scientifiques de l'effet de la lumière et des rayons ultraviolets (UV) sur certains polymères. Le développement de cette technologie a débuté dans les années 1950[15], avec le dépôt du premier brevet pour un photopolymère synthétique en 1952, pour une résine photosensible, « Photosensibilisation des esters d'acide cinnamique polymères », par Louis Minsk et d'autres. La première plaque d'impression photopolymère a été créée en 1957, développée par Time Inc. et baptisée Tilon en raison de son utilisation de la chimie du nylon. Les plaques Dycril ont également été développées en 1960, Nyloprint en 1968, etc. Au fil du temps, le champ de recherche et les brevets se sont élargis et continuent de l'être aujourd'hui, tant sur le plan théorique que pratique [16].

I.3.3. Classification des photopolymères

La classification des photopolymères est importante à prendre en compte car elle affecte les propriétés physiques et chimiques, les applications et le coût du matériau. Les photopolymères comprennent une large gamme de matériaux qui peuvent être durcis sous la lumière. Selon les différentes conditions expérimentales, plusieurs classifications différentes et distinctes ont résulté les unes des autres, Leur classification dépend :

I.3.3.1. Classification selon leur origine :

Il est divisé en deux sections en fonction de la source des matières premières « monomères », nous avons donc :

- Les photopolymères naturelles : généralement extraites des plantes et des arbres.
- Les photopolymères synthétiques : sont fabriquées à partir de matériaux synthétiques et de composés chimiques tels que le pétrole[17].

I.3.3.2. Classification selon la composition chimique et les mécanismes de photopolymérisation :

Les matériaux photopolymères sont basés dans leur composition chimique sur le prépolymère (le matériau de base) et sur les mécanismes de photopolymérisation, qui sont divisés en deux parties :

I.3.3.2.1. Photopolymérisation radicalaire :

Un type de photopolymérisation qui commence par des radicaux libres qui réagissent avec les doubles liaisons des monomères pour initier la réaction de photopolymérisation, qui se déroule

en trois étapes l'amorçage, la propagation et la terminaison. Cette section contient plusieurs catégories de base de résines, notamment : les résines acryliques et méthacryliques, les résines polyester insaturé-styrène, les résines thiol-polyènes etc. ... [18].

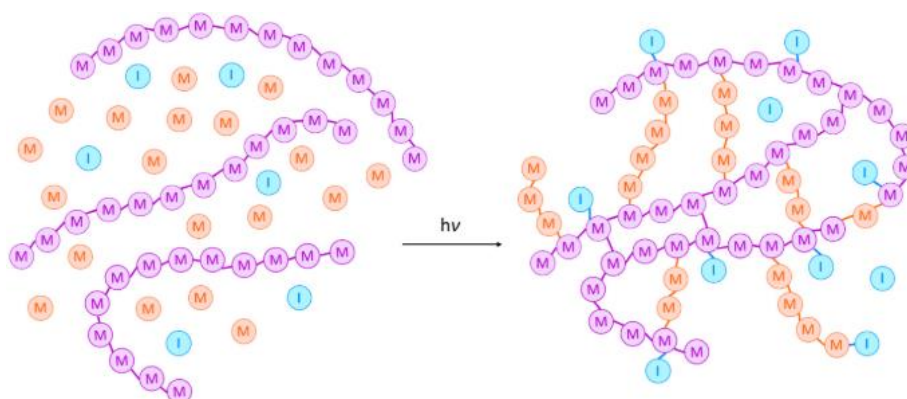


Fig. I.11. Représentation schématique du réseau polymère réticulé obtenu lors d'une réaction de polymérisation radicalaire entre des oligomères (violet), des monomères (orange) et des photo-initiateurs (bleu).

I.3.3.2.2. Photopolymérisation cationique :

Un type de photopolymérisation dans lequel des cations (charges positives) sont formés. Contrairement à la photopolymérisation radicalaire, la réaction est initiée par une lumière stimulante telle que les rayons ultraviolets (UV). L'une des caractéristiques de ce mécanisme est qu'il n'est pas sensible à l'oxygène atmosphérique. Cette section contient plusieurs catégories de base des résines suivantes : les époxydes, les éthers vinyliques[19].

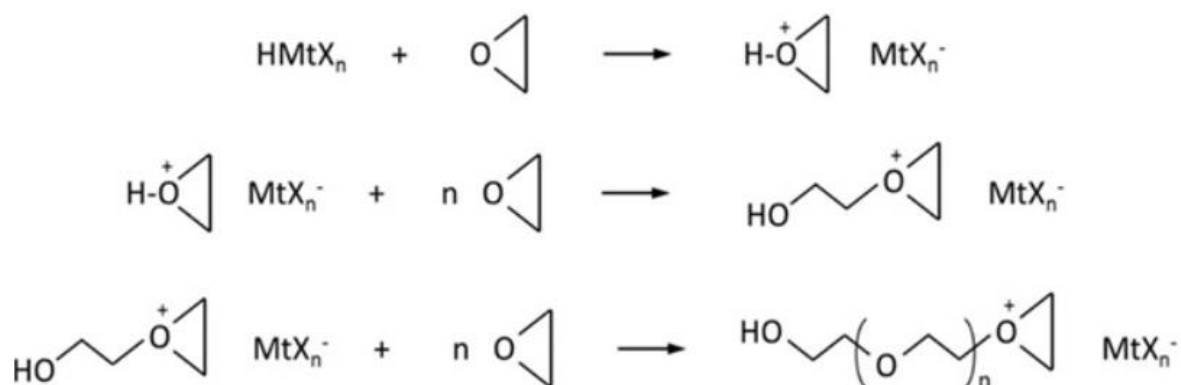


Fig. I.12. Mécanisme de polymérisation cationique

Tableau I.2. Classification des photopolymères selon les mécanismes des photopolymérisations

Type		Prépolymère	Initiateur
Type de photopolymérisation radicalaire	Polyester insaturé	Résine polyester insaturée	Éther benzoïne-alcyle
	Ester acrylique	Acrylate de polyester Acrylate de polyéther Acrylate de polyuréthane Acrylate d'époxy, etc.	Éther benzoïne-alcyle Benzophénone Acétylbenzène Cétone de Michler
Type de photopolymérisation cationique		Résine époxy	Sel de diazonium d'un acide de Lewis Super acide (iodure de diphenyliodonium) Triphényl sulfure Sel de ferrocenium
		Monomère polycyclique	
		Éther de vinyle	

I.3.3.3. Classification selon leur système :

I.3.3.3.1. Photopolymères classiques

Polymères qui acquièrent les propriétés de « sensibilité à la lumière et de facilité de traitement » après avoir été polymérisés. Voici un exemple de deux composés de base où Hydroxycyclohexylphényl (a) est le catalyseur qui active la réaction lors de l'exposition à la lumière et Acrylates (b) est le substrat qui se transforme en polymère solide.

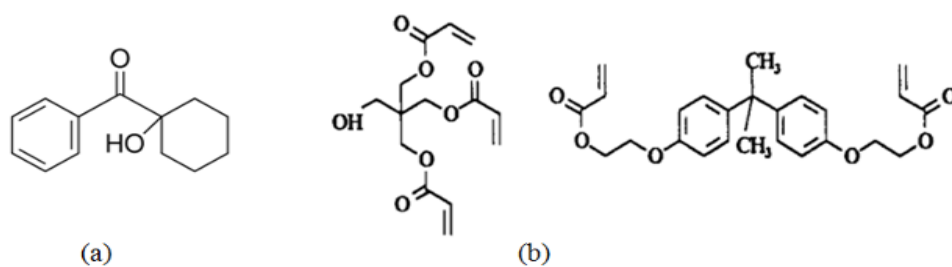
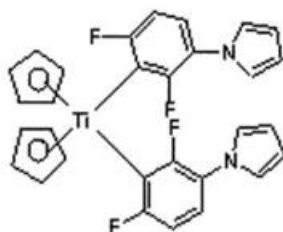


Fig. I.13. Cétone d'Hydroxycyclohexylphényl et Acrylates

I.3.3.2. Système combiné

Les photopolymères classiques ont été développés pour produire des résines pures utilisées dans la fabrication de dispositifs microélectroniques en raison de leur résistance aux températures élevées et de leur forte sensibilité à la lumière.



Initiateur Titanocène

Fig. I.14. Photoinitiateur du Titanocène

I.3.3.3. Nouvelle photopolymérisation :

Photopolymères à grande structure moléculaire qui combinent certaines proportions de composants de base, comme le polyimide auto-photosensible, qui contient des proportions de Benzophénone, Polyamide, Groupe Kil [20].

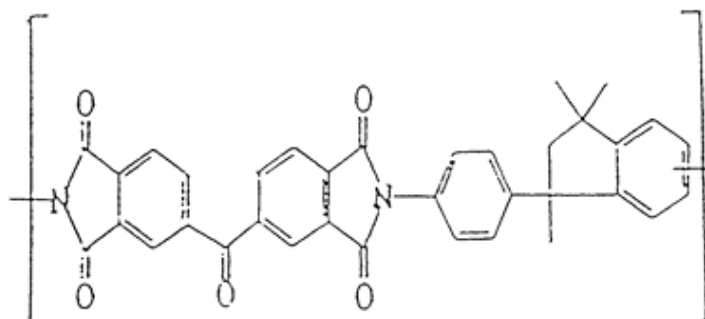


Fig. I.15. Polyimide auto-sensible, soluble et entièrement imidisé

I.3.4. Les applications des photopolymères

Depuis le milieu du XXe siècle, les matériaux photopolymères sont en développement continu et ont été largement appliqués dans divers domaines. Aujourd'hui, les photopolymères font partie intégrante de notre vie quotidienne. Parmi les domaines dans lesquels les photopolymères ont été appliqués [21], on trouve :

Matériaux électroniques :

Utilisés dans la production de circuits intégrés (CI) et de cartes de câblage imprimées (PWB) comme le montre l'image ci-dessous, ces produits électroniques font partie des catégories d'imagerie les plus populaires en termes de ventes, de nombre total de publications et de brevets.

Exemple :

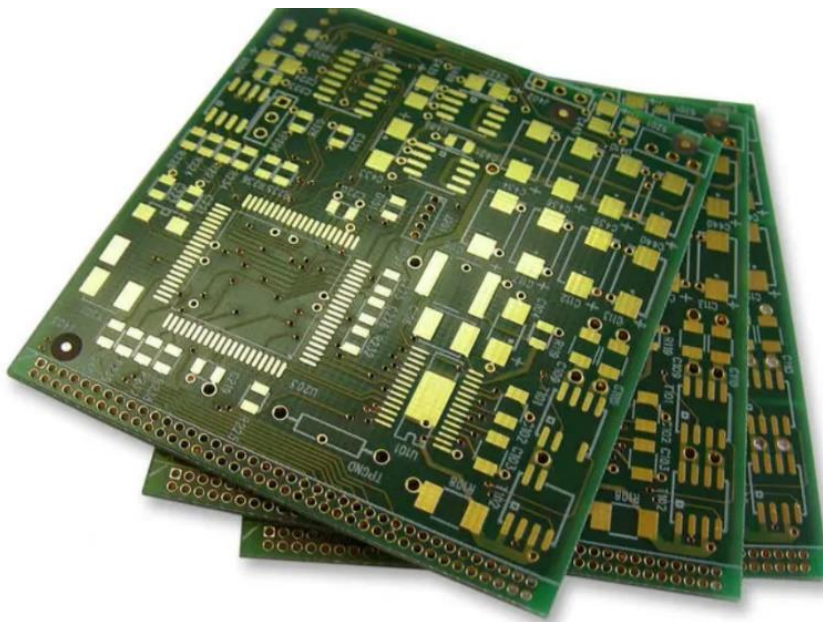


Fig. I.16. Cartes de câblage imprimées

Matériaux d'impression :

La technologie photopolymère comprend de nombreuses applications importantes de matériaux d'impression, notamment : les plaques d'impression telles que les plaques d'impression photo de haute qualité, les systèmes d'épreuves prépresse tels que l'impression ponctuelle monochrome, les encres d'impression telles que l'impression UV et d'autres applications d'impression à faible volume telles que la production d'images tactiles, etc.

Exemple :

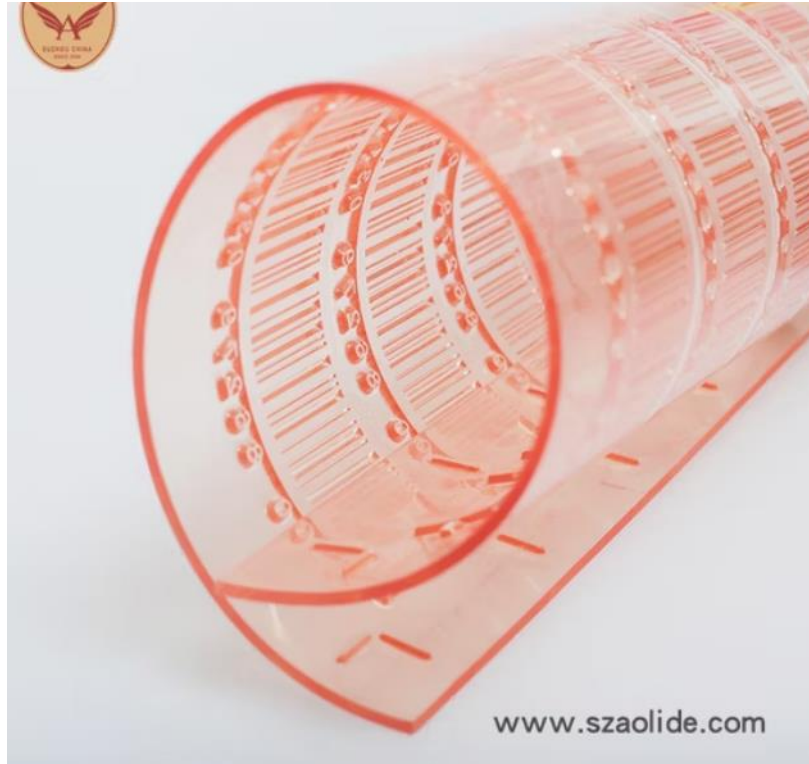


Fig. I.17.Plaque d'impression photopolymère Flexo Aolide de haute qualité

Matériaux optiques et électro-optiques

Les photopolymères ont des propriétés uniques, d'excellentes propriétés d'imagerie spatiale, la capacité de durcir et de fournir des structures moléculaires cohérentes, ce qui les rend utilisés dans les dernières applications à haute « valeur d'usage » dans le domaine des matériaux optiques, tels que : les écrans à cristaux liquides (LCD), qui utilisent des photopolymères pour aligner les éléments à cristaux liquides (LC), les matériaux optiques non linéaires tels que les guides d'ondes optiques, et les matériaux holographiques dont l'une des applications est les hologrammes réversibles. Les photopolymères sont également utilisés dans l'imagerie visuelle et l'enregistrement permanent d'informations grâce à des procédés laser.

Exemple :

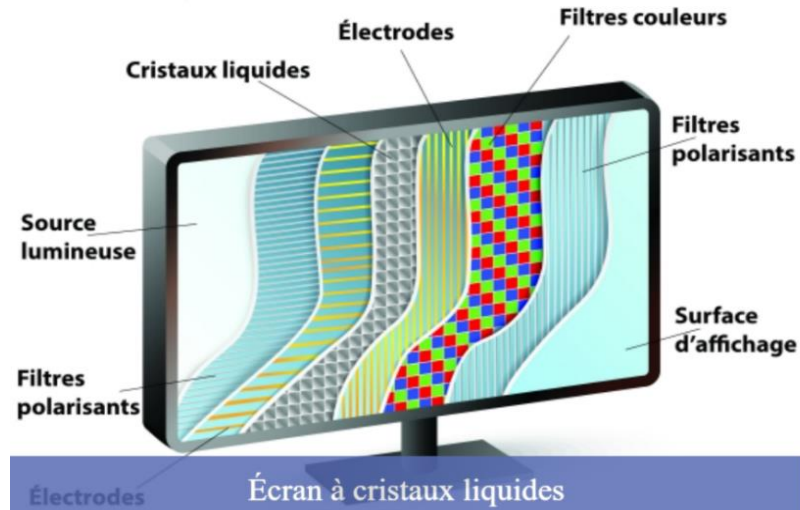


Fig. I.18. Dispositif d'affichage d'images ou de données alphanumériques ou graphiques qui utilise le reflet de la lumière sur des cristaux liquides

Fabrication de dispositifs et de matériaux :

La technologie des photopolymères est de plus en plus utilisée pour fabriquer directement les éléments finaux des produits. Il permet la création rapide de pièces 3D par stéréolithographie pour les obturations, les revêtements et les empreintes en dentisterie, ainsi que les prothèses, les implants, les lentilles de contact, les hydrogels et autres applications biologiques en médecine. Elle implique également la fabrication ou la modification de membranes spécialisées (filtration, osmose inverse, etc.), ainsi que la production de matériaux polymères tels que des fibres réticulées, des films, des gels microporeux, des microparticules et des électrodes.

Exemple :



Fig. I.19. Dentisterie numérique et impression 3D de résine dentaire

Adhésifs et mastics:

La chimie des photopolymères est utilisée dans les adhésifs et les produits d'étanchéité sensibles à la lumière qui durcissent ou changent de texture lorsqu'ils sont exposés aux rayonnements. Utilisé dans la fabrication de stratifiés de verre, de composites de fibres, de composites organiques/inorganiques, d'interconnexions optiques, d'adhésifs sensibles à la pression, d'adhésifs hémostatiques, d'adhésifs résistants aux hautes températures, etc.

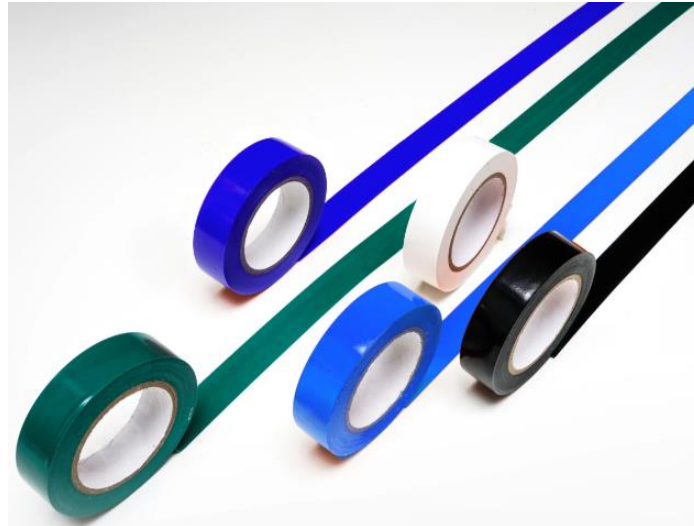
Exemple :

Fig. I.20. Adhésifs Sensibles à la pression

Revêtements et modifications de surface :

Les photopolymères sont largement utilisés, notamment dans les panneaux de bois, les meubles bon marché et les revêtements durcis aux UV et aux faisceaux d'électrons pour les finitions décoratives et protectrices. Il est également utilisé pour modifier les surfaces des textiles, des films polyester, etc. Les applications comprennent les revêtements pigmentés ou transparents, les finitions de meubles et de sols, les revêtements de biocapteurs, les électrodes, les fibres optiques, s, l'isolation thermique et les gels isolants pour fenêtres. Il est également utilisé pour modifier les surfaces afin d'améliorer l'adhérence, la résistance aux taches et la rétention de la couleur [16].



Fig. I.21.Sols Antistatiques : Revêtements en Résine

I.3.5. Photopolymérisation :

La photopolymérisation est un processus chimique qui transforme l'état liquide des monomères et des oligomères en matériaux solides en les exposant à des stimuli lumineux, souvent des rayons ultraviolets (UV) ou infrarouges. Ce processus se produit en présence des composants de base : monomère, oligomère et photo-initiateur (PI). Lorsque le polymère dans son état initial est exposé à la lumière, les électrons passent à un état excité. Des espèces actives telles que des radicaux libres et des ions sont générées et peuvent réagir avec des monomères et des oligomères, déclenchant une chaîne de réactions conduisant à la formation de photopolymères hautement réticulés [21] avec un poids moléculaire plus élevé. Parmi les monomères les plus couramment utilisés figurent les acrylates, le méthacrylate de faible poids moléculaire, l'époxy et l'éther vinylique... [16].

La photopolymérisation comporte différents modes tels que la polymérisation radicalaire et cationique (qui sont les modes les plus courants) en plus de la polymérisation anionique, de la polymérisation cationique contrôlée/vivante photoinduite, de la polymérisation cationique promue par les radicaux libres et de la polymérisation par étapes photoinduite... [21].

La photopolymérisation se caractérise par son efficacité, sa simplicité et sa rapidité de production de matériaux, et possède des propriétés importantes, notamment : une formulation sans solvant, une faible consommation d'énergie et la capacité de traiter dans des conditions de température ambiante. La température est le facteur qui contrôle le plus les propriétés mécaniques des polymères... Cela a permis son utilisation dans une large gamme d'applications

telles que la photolithographie, la fabrication de dispositifs micro fluidiques, le revêtement de tissus, la bio-impression 4D, etc. [10]

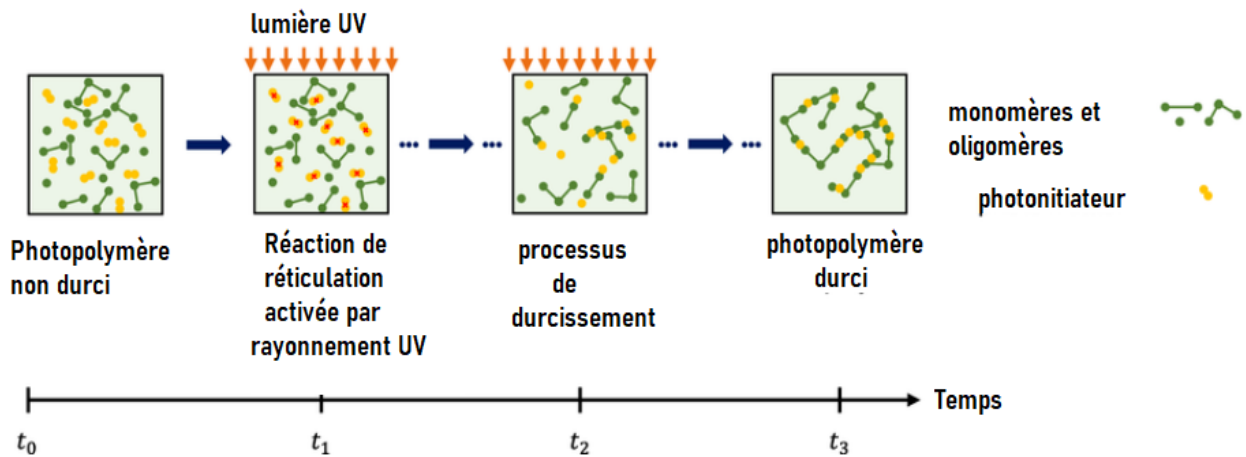


Fig. I.22. Représentation schématique de la réaction de photopolymérisation dans la cellule unitaire du matériau

I.4. Bibliographie

- [1] P. K. R. F. T. S. a. U. W. S. A. D. Jenkins, "Glossary of basic terms in polymer science (IUPAC Recommendations 1996)," *Pure and Applied Chemistry*, vol. 68, no. 12, p. 2299–2302, 1992.
- [2] J.-M. Michel, "Histoire industrielle des polymères," *L'actualité chimique*, no. 300, pp. 7-15, 2006.
- [3] H. J.-M, "Chapitre IV: Élaboration des polymères," 2006.
- [4] S. P, "Polymers used in everyday life," *International Journal of Trend in Scientific Research and Development*, vol. 6, no. 1, p. 1337–1347, 2021.
- [5] M. C. Group, "Proteus Homopolymer PP Black polypropylene," [Online]. Available: <https://www.mcam.com/fr/products/shapes/standard/proteus-sanalite/proteus-homopolymer-pp-black>.
- [6] "L'avionnaire," [Online]. Available: <https://www.lavionnaire.fr/CelluleGlaceHub.php>.
- [7] [Online]. Available: <https://www.elandcables.com/fr/the-cable-lab/faqs/faq-what-are-the-benefits-of-pvc-insulated-cables>.

- [8] [Online]. Available: <https://ptfe-machinery.com/applications-of-ptfe/>.
- [9] [Online]. Available: <https://gelsap.com/fr/cristaux-deau-hydrogel-pour-lagriculture-en-poudre-pour-une-meilleure-croissance-des-plantes-et-une-meilleure-retention-de-lhumidite-du-sol/>.
- [10] [Online]. Available: <https://www.hirschfeld-emballages.fr/avantages-des-emballages-plastique-polyethylene/>.
- [11] J. E. McGrath, "Chain reaction polymerization," *Chemical Education*, vol. 58, no. 11, p. 844–848, 1981.
- [12] „ M. M. M. „, H. A. O. G. H. F. Saad, "Polymers and Polymerization Mechanisms for Textile Industry," *Egyptian Journal of Chemistry*, vol. 67, pp. 103-105, 2024.
- [13] S. H. „, F. W. a. P. F. Margit Lang 1, "A Review on Modeling Cure Kinetics and Mechanisms of Photopolymerization," *Polymers*, vol. 14, no. 2074, p. 8, 2022.
- [15] P. K. (. R. R. F. T. S. (. A. U. W. S. (. A. D. JENKINS (UK), "Glossary of basic terms in polymer science (IUPAC Recommendations 1996)," *Pure and Applied Chemistry*, pp. 2299-2302, 1996.
- [16] R. W. Peiffer, «Applications of Photopolymer Technology,» chez *Photopolymerization Fundamentals and applications*, A. B. C. e. P. R. Scranton, Éd., Washington, DC, American Chemical Society, 2009, pp. 1-10.
- [17] R. Pandey, «Photopolymers in 3D Printing Applications,» Arcada University of Applied Sciences, Finland, 2014.
- [18] M. Savla, «History and Technology of Photopolymer Printing Plates,» Savla Associates, Manalapan, NJ, USA.
- [19] R. W. Peiffer, «Applications of Photopolymer Technology,» chez *Photopolymerization*, Washington, DC, P. R. Scranton, A. B. C, 2009, pp. 1-2.
- [20] «<https://www.bridgewaterstudio.net/blog/types-of-resins-for-3d-printing-which-is-best,>» [En ligne].
- [21] C. Decker, «Polymérisation sous rayonnement UV,» Techniques de l'Ingénieur, Paris, 2000.
- [22] R. Pandey, «Photopolymers in 3D printing applications,» 2014.

- [23] X. H. L. Z. Y. X. Y. Zou, «An overview of photopolymerization and its diverse applications,» *Applied Research*, vol. 2, n° 16, pp. 1-2, 2023.
- [24] X. H. L. Z. Y. X. Y. Zou, «an overview of photopolymerization and it's diverse applications,» *Applied Research*, vol. 2, n° 16, pp. 1-2, 2023.
- [25] S. H. ., F. W. a. P. F. 1. Margit Lang, «AReviewonModelingCure Kinetics and Mechanisms,» *Polymers*, vol. 14, n° 12074, pp. 1-2, 2022.
- [26] e. C. N. B. e. R. W. P. e. .. Alec B. Scranton, *Photopolymerization : Fundamentals and Applications*, Washington, DC: American Chemical Society, 1996 .

Liste des références des figures :

Fig .2.1.Représentation schématique du réseau polymère réticulé obtenu lors d'une réaction de polymérisation radicalaire entre des oligomères (violet), des monomères (orange) et des photo-initiateurs (bleu)

[Polymers 2022, 14, 2856. https://doi.org/10.3390/polym14142856](https://doi.org/10.3390/polym14142856)

Fig.2.2.Mécanisme de polymérisation cationique

[G. Jeffrey UV Curing Part Five: Cationic Photopolymerization ,2016 https://polymerinnovationblog.com/uv-curing-part-five-cationic-photopolymerization/](https://polymerinnovationblog.com/uv-curing-part-five-cationic-photopolymerization/)

Fig.2.3. Cétonne d'Hydroxycyclohexylphényl et Acrylates

Fig.2.4. Photoinitiateur du Titanocène

Fig.2.5. Polyimide auto-sensible, soluble et entièrement imidisé

[R. Pandey, «Photopolymers in 3D printing applications,» 2014.](#)

Fig.2.6. Cartes de câblage imprimées <https://www.multi-circuit-boards.eu/en/printed-wiring-board.html>

Fig2.7. Plaque d'impression photopolymère Flexo Aolide de haute qualité https://fr.made-in-china.com/co_szaolide/product_High-Quality-Aolide-Flexo-Photopolymer-Printing-Plate_uogniornhg.html

Fig.2.8. Dispositif d'affichage d'images ou de données alphanumériques ou graphiques qui utilise le reflet de la lumière sur des cristaux liquides

https://www.larousse.fr/encyclopedie/divers/%C3%A9cran_LCD/65333

Fig.2.9. Dentisterie numérique et impression 3D de résine dentaire

<https://www.liqcreate.com/fr/articles-de-support/dentisterie-num%C3%A9rique-et-impression-3d-de-r%C3%A9sine-dentaire/>

Fig.2.10. Adhésifs Sensibles à la pression <https://www.arkema.com/global/fr/markets-solutions/adhesives/pressure-sensitive-adhesives/>

Fig.2.11. Sols Antistatiques : Revêtements en Résine

https://www.himfloor.com/sols_antistatiques/

Fig.2.12. Représentation schématique de la réaction de photopolymérisation dans la cellule unitaire du matériau https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representation-of-the-photopolymerization-reaction-in-the-material-unit-cell_fig1_362779853

Chapitre 2:
Impression
3D

II. Chapitre 2 : Impression 3D

II.1. Définition impression 3D:

II.1.1. Principe et historique:

La fabrication additive, également connue sous le nom d'impression 3D, est un processus innovant de création d'objets par superposition de couches de matériaux à partir d'un modèle numérique. Il ne s'agit pas d'une technique unique, mais d'un ensemble de méthodes basées sur des principes de base [1].

Le premier brevet relatif à la fabrication additive a été déposé par Jean-Claude André et ses collègues le 16 juillet 1984 [2]. L'Américain Charles Chuck Hull a également déposé un brevet pour la technologie de stéréolithographie (SLA) le 08 août 1984 [3].

L'impression 3D diffère de la fabrication soustractive par la manière dont les produits sont fabriqués. La fabrication soustractive, les matériaux sont coupés ou usinés à la forme souhaitée. En revanche, dans l'impression 3D, le produit est construit en ajoutant progressivement des couches de matériau jusqu'à atteindre la forme finale.

Les imprimantes 3D utilisent une variété de matériaux. Par exemple, les imprimantes à résine (SLA ou DLP) utilisent des photopolymères liquides, tandis que les imprimantes à dépôt de fil fondu (FDM) utilisent des matériaux comme l'ABS, PLA.

De nombreuses entreprises spécialisées dans l'impression 3D produisent leurs propres matériaux, spécifiquement adaptés à leurs machines. Outre les polymères, les imprimantes 3D peuvent également utiliser des matériaux tels que les céramiques [4], les métaux [5] et le verre [6]. Cette technologie est devenue largement utilisée dans divers secteurs, notamment les écoles, les laboratoires et l'industrie. De plus, les progrès en matière de développement et de production de masse ont considérablement réduit les coûts, rendant les imprimantes 3D disponibles pour un usage personnel.

Les experts en technologie estiment qu'il y a une forte probabilité que nous trouvions une imprimante 3D dans chaque foyer à l'avenir **Fig 1**. Certaines entreprises spécialisées disposent déjà d'imprimante 3D FDM capable de produire des pièces à partir de divers polymères tels que l'ABS, le PLA, le PC et le PA, offrant ainsi une large gamme d'applications d'impression FDM [7].

La démocratisation de l'impression 3D est relativement récente car la première machine a été introduite dans les années 1980, pour un coût de plus de 100 000 dollars, alors grâce aux progrès technologiques, les coûts ont considérablement baissé et le prix des imprimantes sont désormais disponibles pour environ 500 \$ [8].



Fig. II.1.Imprimante 3D en résine

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

Les techniques d'impression 3D reposent sur la conception d'un modèle virtuel divisé en couches bidimensionnelles de très faible épaisseur. Ces fines couches sont superposées les unes sur les autres et fusionnées avec les couches précédentes, recréant ainsi le modèle original.

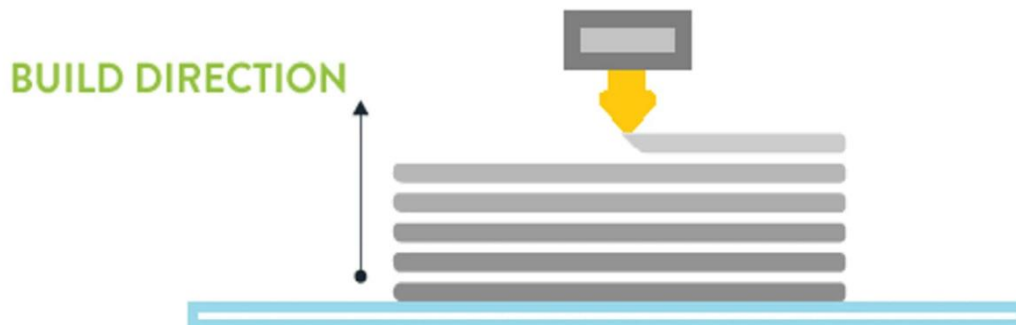


Fig. II.2.Hauteur de couche pour les pièces imprimées en 3D

Le contrôle des axes dans les imprimantes 3D est similaire à celui des machines-outils CNC (qui ont été introduites dans les années 1960) [9]. Le procédé est très similaire, mais dans l'impression 3D, la pièce est fabriquée par ajout de matière, et non par retrait.

Les têtes de l'imprimante se déplacent généralement selon trois axes (3 mouvements spatiaux : largeur (X+), profondeur (Y+), hauteur (Z+)). Certaines imprimantes 3D plus avancées ajoutent deux mouvements supplémentaires à la tête d'impression (A+ et B+), ce qui facilite la création des supports nécessaires pour certaines pièces.

Pour imprimer un modèle 3D [8], il est nécessaire de découper l'objet en de très petites pièces, pouvant atteindre des milliers de couches fines qui le composent, à l'aide d'un logiciel spécialisé appelé "slicer" [10]. Ensuite, il est exporté au format G-code, qui est un langage d'impression permettant de déterminer où et quand déposer les matériaux.

Chaque couche correspond à la forme bidimensionnelle **Fig.3**

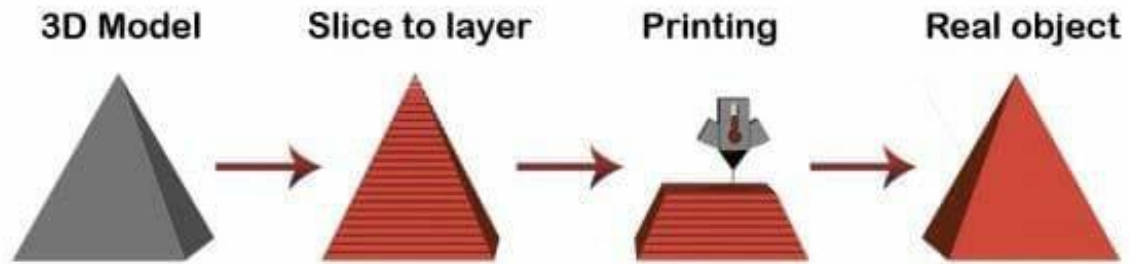


Fig. II.3.Découpage et impression 3D

précise de l'objet à différentes hauteurs. Par exemple, lors de l'impression d'une pyramide en 3D, la première couche (représentant la base de la pyramide) sera un carré plat, tandis que la dernière couche (représentant le sommet) sera un point. Les couches sont imprimées successivement jusqu'à ce que l'objet soit entièrement formé [11].

II.3. Types d'impression 3D :

La fabrication additive (AM) est utilisée dans de nombreuses industries différentes, allant des produits quotidiens tels que les ustensiles domestiques, jusqu'aux machines complexes et aux dispositifs médicaux. Cette technologie est devenue populaire car elle permet de fabriquer des matériaux variés, tels que des polymères, des métaux et des fibres naturelles, ce qui contribue à étendre son utilisation dans divers domaines [12].

Il existe différentes techniques AM telles que :

II.3.1. Impression 3D SLA :

L'impression 3D SLA (Stéréolithographie) est un procédé de fabrication additive permettant l'impression rapide de petites pièces 3D à l'aide d'un laser à haute énergie. Cette technique fonctionne en renforçant le fluide dans le réservoir pour créer la forme 3D, couche par couche. La résine liquide utilisée dans ce procédé se transforme progressivement en un matériau solide, et les pièces obtenues doivent être durcies à la lumière ultraviolette pour assurer leur solidité **Fig. 4.** Des recherches dans ce domaine ont été menées dans les années 1970, mais c'est Chuck

Hull qui a inventé le terme "Stéréo Lithographie" en 1984, lorsqu'il a déposé un brevet pour le procédé, brevet qui lui a été accordé en 1986 [13].

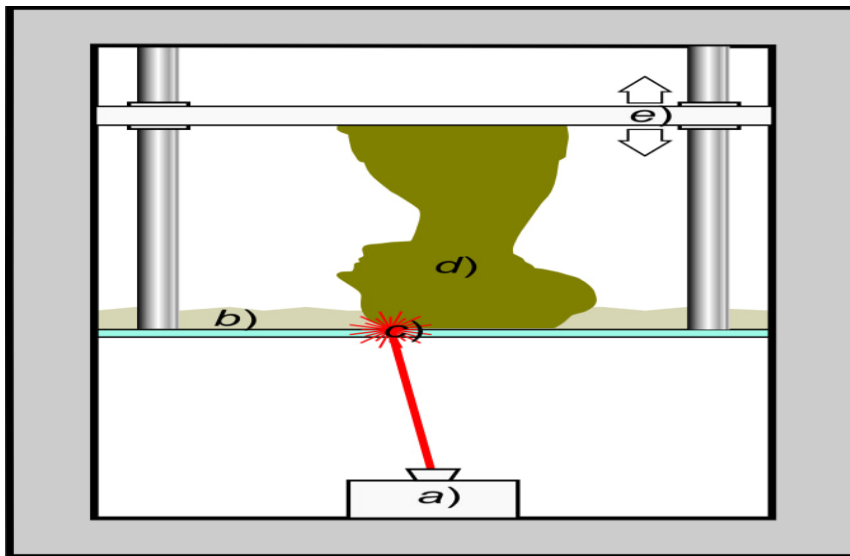


Fig. II.4. Représentation schématique de la stéréolithographie (SLA)

Un laser (a) est projeté à travers le fond transparent (c) d'une cuve remplie de résine liquide photopolymère (b). La résine solidifiée (d) est progressivement tirée vers le haut (e)

Avantages et caractéristiques :

La technologie SLA (stéréolithographie) est largement reconnue pour ses performances élevées dans le domaine de l'impression 3D. Elle présente plusieurs avantages notables qui la rendent particulièrement adaptée à la production de pièces précises et de haute qualité. Parmi ces avantages, on peut citer :

Bonne finition de surface : Cette fonctionnalité du SLA peut offrir plusieurs avantages, notamment une finition de surface de haute qualité pour les pièces imprimées. Cela permet de produire des objets avec des détails fins **Fig.5.**

Fabrication sans prétraitement : Les pièces sont fabriquées sans nécessiter de prétraitement préalable, ce qui simplifie le processus de production [14].

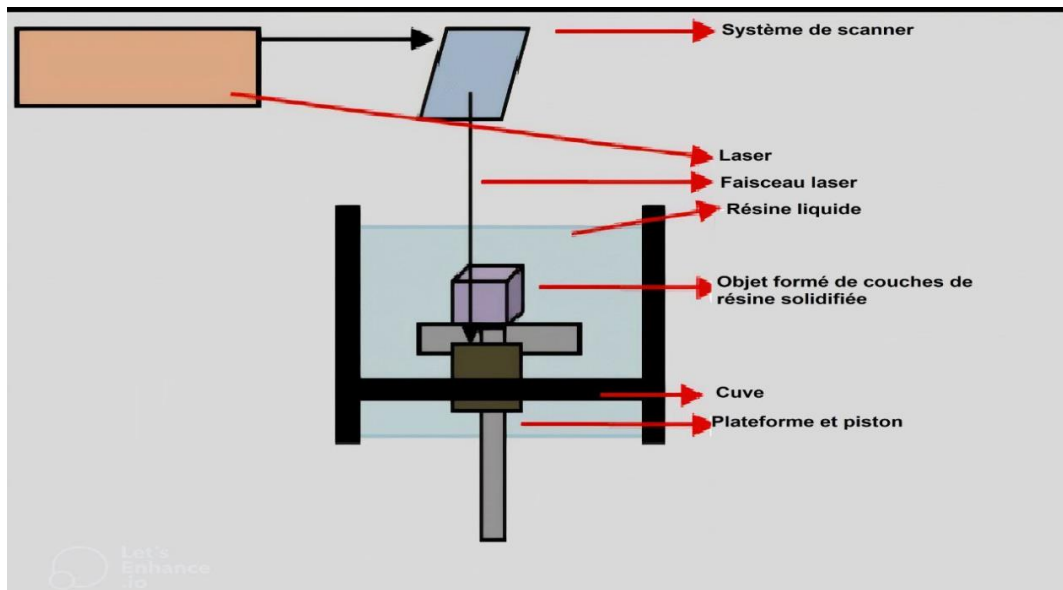


Fig. II.5.Imprimante stéréo lithographique (SLA)

II.3.2. Frittage sélectif par laser (SLS) :

Le frittage sélectif par laser (SLS) est une technologie d'impression 3D qui utilise un laser haute puissance pour fusionner des couches de matériau et lier tous ses composants en une pièce finale solide. Cette méthode utilise un laser CO₂ pour fripper la poudre, formant ainsi la première couche de la structure solide. Ensuite, un rouleau est utilisé pour déposer une nouvelle couche de poudre, augmentant l'épaisseur de la couche suivante, et ce processus continue jusqu'à ce que la pièce soit terminée. L'un des avantages principaux de cette technologie est que le produit est construit sur un lit de poudre sans nécessiter de supports structurels supplémentaires, car il est autoportant [15].

Cependant, l'utilisation de cette technique présente des défis particuliers pour la production de biocéramiques, car il est difficile de contrôler les variations rapides de température causées par le laser à haute intensité, ce qui rend difficile l'obtention de résultats précis pour des matériaux sensibles [16]. De plus, le SLS est la seule méthode utilisée par les dentistes pour produire des armatures métalliques pour les implants dentaires [17].

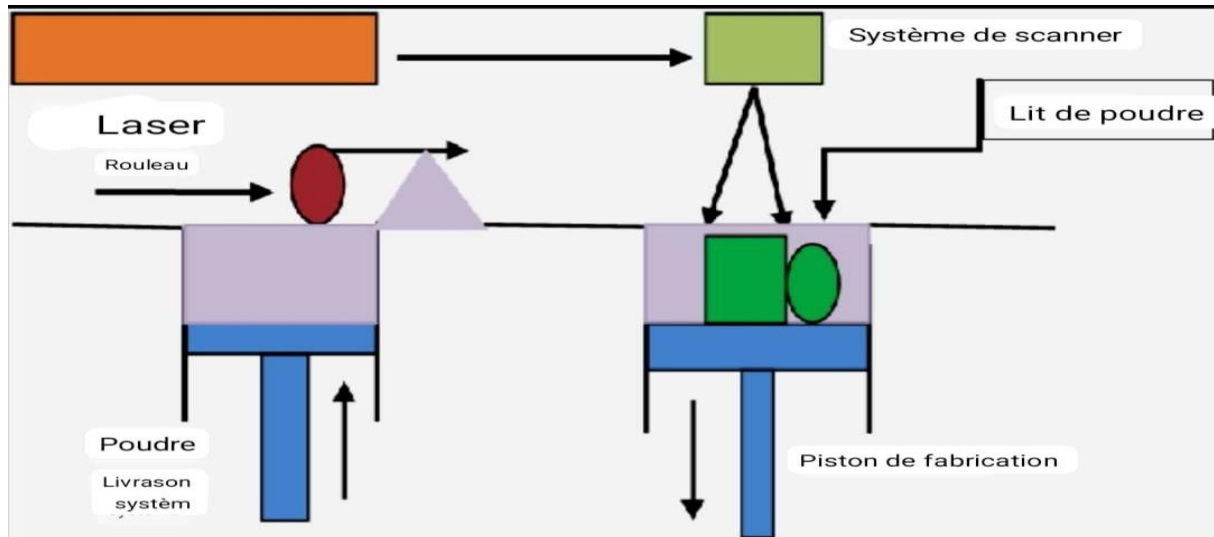


Fig. II.6. Frittage sélectif par laser (SLS)

II.3.3. Fabrication par Dépôt de Filament Fondue (FFF) :

La technologie (FDM) (Fused Deposition Modeling), également connue sous le nom de Fabrication par Filament Fondu (FFF) **Fig. 7**, est actuellement la méthode d'impression 3D la plus répandue en raison de sa rapidité, de sa précision, de son coût compétitif et de la diversité de ses matériaux, qui se présentent sous forme de filaments. Cette technologie ne nécessite pas de post-traitement et permet de fabriquer une large gamme de matériaux tels que l'ABS, le PLA, le TPU et le PC, ainsi que des matériaux renforcés par des fibres. Elle est considérée comme une solution économique en termes d'équipements et de matériaux, mais il est essentiel de contrôler la température dans la zone de travail [18].

La modélisation par dépôt de filament fondu (FFM) est une impression 3D basée sur l'extrusion, où des fils polymères thermiques sont utilisés pour imprimer des objets tridimensionnels. Le processus FFM se compose de quatre composants principaux : le matériau d'alimentation, la tête d'impression, la plateforme et la surface de construction [19].

Le FDM repose sur le principe de l'ajout, où le matériau est déposé sur la surface couche par couche. L'impression 3D avec FFM se fait en alimentant un filament plastique ou des câbles dans un orifice d'extrusion qui contrôle le flux du matériau [20]. Lors de l'utilisation de fils thermoplastiques dans le FFM, ils fondent dans la partie thermique de l'extrudeuse et sont poussés à travers une buse vers la surface de construction.

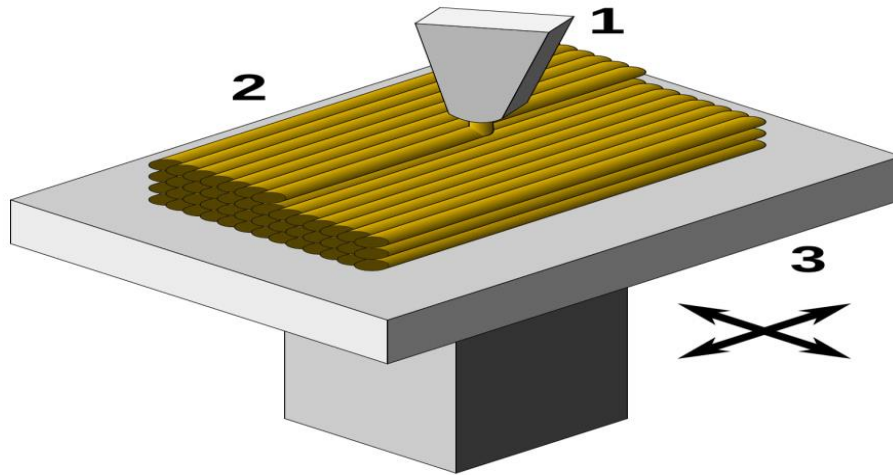


Fig. II.7. Fabrication par Dépôt de Filament Fondu (FFF)

1 - buse éjectant la matière fondue (plastique), 2 - matière déposée (pièce modélisée), 3 - table mobile contrôlée.

Parmi les principaux avantages de la technologie FFM figurent la garantie d'une conception de haute qualité, des caractéristiques mécaniques améliorées, une meilleure adhésion et une excellente liaison mécanique. La force d'adhésion dans la technologie FFM est déterminée par le motif de découpe du matériau collé, ainsi que par la densité des couches sous la surface voisine [21].

Les matériaux thermoplastiques et flexibles pouvant être utilisés dans la Fabrication par dépôt de Filament Fondu (FFM), certains sont plus couramment employés.

Le matériau ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrene) est un polymère thermoplastique largement utilisé dans l'impression 3D par fabrication par filament fondu (FFM), en raison de ses bonnes propriétés mécaniques, notamment sa résistance aux chocs, sa robustesse et sa tenue à la chaleur. Il est couramment employé pour la réalisation de prototypes fonctionnels et de pièces nécessitant une certaine durabilité. Toutefois, son impression exige des conditions particulières, telles qu'un plateau chauffant et une ventilation adéquate, afin d'éviter les déformations et les émissions générées lors de l'extrusion. L'ABS présente également une bonne aptitude au post-traitement, permettant d'améliorer la qualité de surface des pièces imprimées par des techniques chimiques ou mécaniques, comme le lissage à l'acétone ou le ponçage fin [22].

II.3.4. Fabrication des objets laminés (LOM) :

Cette méthode est l'une des techniques de fabrication additive les plus anciennes disponibles commercialement. Des feuilles minces de matériaux tels que le métal, le plastique ou le papier sont formées pour imiter les sections transversales du produit cible à l'aide de lasers ou de coupeurs mécaniques. Ces couches sont assemblées de manière séquentielle jusqu'à ce que le produit final soit terminé. Le processus LOM est une technique qui consiste à découper et empiler des couches de matériaux tels que le métal, le plastique ou le papier, une par une. Ces couches sont découpées avec précision, puis assemblées à l'aide d'un découpeur mécanique ou d'un laser comme source d'énergie.

Il existe deux méthodes pour relier les matériaux dans LOM :

- La liaison d'abord, puis la formation.
- La formation d'abord, puis la liaison.

La méthode de formation puis de liaison est adaptée à la liaison thermique des matériaux tels que la céramique et les métaux, et aide à former les propriétés internes en éliminant le matériau excédentaire avant l'intégration. Le matériau excédentaire est utilisé comme support lors du traitement automatisé, et peut être retiré et réutilisé une fois le processus terminé [23].

La précision de la technique LOM dépend de l'épaisseur des feuilles, et elle est généralement d'environ 50 micromètres [24]. Cependant, ce niveau de précision est suffisant pour de nombreuses applications, bien qu'il puisse ne pas être assez élevé pour certaines industries nécessitant une précision extrême. Le principal inconvénient de cette méthode est qu'elle entraîne un important rétrécissement, allant de 12 % à 18 %, dû au traitement thermique ultérieur, ce qui peut provoquer des erreurs dimensionnelles. Toutefois, cet effet de rétrécissement peut être considérablement réduit grâce à un contrôle rigoureux du processus thermique et à un choix minutieux des matériaux, ce qui rend le LOM une option pratique et efficace dans de nombreux cas. La technique LOM peut être utilisée avec une variété de matériaux, tels que la céramique, les polymères, les composites et le papier. Le système LOM utilise un faisceau laser pour découper les contours externes prévus à partir d'un rouleau de papier connecté, ce qui permet de créer les couches des pièces finales, comme illustré dans la **fig. 8**. Ces couches sont collées à l'aide d'une couche plastique activée thermiquement sur l'un des côtés du papier et du composant souhaité [25].

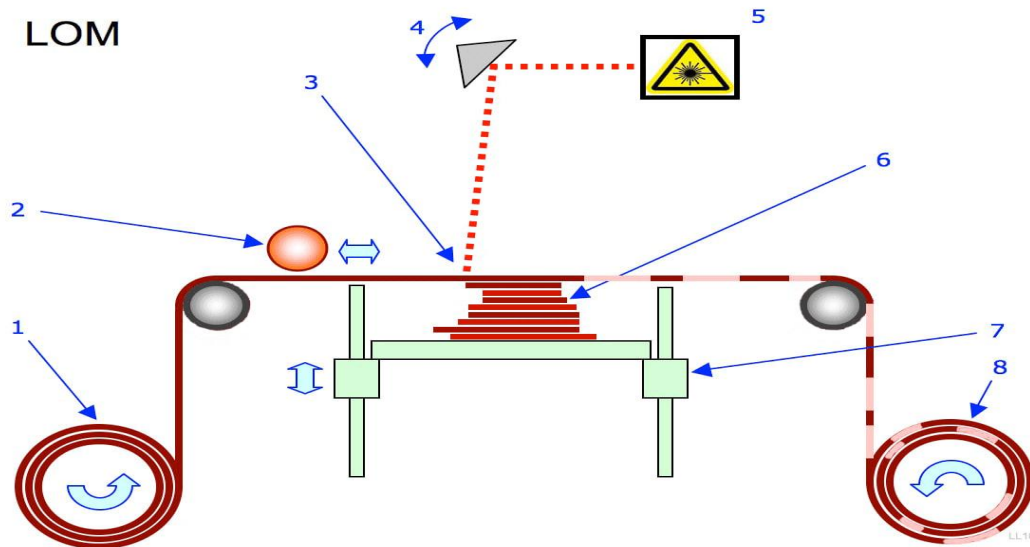


Fig. II.8. Fabrication par stratification (laminated object manufacturing): schéma de principe

1. Rouleau d'alimentation
2. Rouleau stratifié chauffé
3. Faisceau laser de découpe
4. Dispositif de guidage prismatique
5. Laser
6. Forme stratifiée
7. Table mobile
8. Rouleau de déchets (avec formes découpées)

II.3.5. Dépôt d'énergie dirigée (DED) :

Le dépôt d'énergie dirigée est une technique de traitement non équilibrée caractérisée par des taux de refroidissement extrêmement rapides, généralement compris entre 10^3 et 10^5 [Kelvin/seconde].

Des alliages hauts performance ont été fabriqués par dépôt d'énergie dirigée (DED). Dans ce processus, une source d'énergie, telle qu'un faisceau laser ou un faisceau d'électrons, est concentrée sur une petite zone du substrat, ce qui entraîne la fusion du matériau d'apport (sous forme de poudre ou de fil). Après le déplacement du faisceau, le matériau fondu est déposé et intégré à la zone fondue du substrat, ce qui conduit à son durcissement et à la formation des couches souhaitées [26].

Il existe plusieurs types de systèmes de dépôt d'énergie dirigée, comme illustré dans la figure 8. La méthode de dépôt d'énergie dirigée basée sur la poudre est l'une des techniques les plus

couramment utilisées pour le dépôt direct d'énergie métallique, et elle a fait l'objet de nombreuses études scientifiques approfondies, démontrant son efficacité dans diverses applications industrielles. Cette technique repose principalement sur un faisceau laser comme source de chaleur, qui permet de faire fondre les matériaux avec une grande précision. En comparaison avec les techniques DED basées sur le faisceau laser et les poudres, les techniques DED utilisant des fils offrent une précision moindre mais un taux de dépôt plus élevé, ce qui les rend idéales pour la production de pièces de grande taille à un rythme plus rapide. Bien que cette méthode puisse ne pas atteindre le même niveau de précision dans certaines applications exigeantes, elle présente un avantage majeur en termes de réduction du temps de production, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications nécessitant des pièces plus grandes et moins complexes [27] [28].

Parmi les variables importantes utilisées fréquemment dans les expériences DED, on trouve l'épaisseur de la couche, la puissance du laser, la taille du spot du faisceau laser, le taux d'alimentation en matériau, la vitesse de balayage et l'angle de recouvrement [29]. Comparée à SLS ou SLM, la technologie DED présente une précision plus faible de 0,25 mm, une finition de surface moins lisse, et est généralement utilisée pour produire des composants moins complexes.

En conséquence, DED est fréquemment utilisée pour la fabrication de pièces grandes et simples, offrant d'excellentes propriétés mécaniques et contribuant à réduire les délais de production ainsi que les coûts [8].

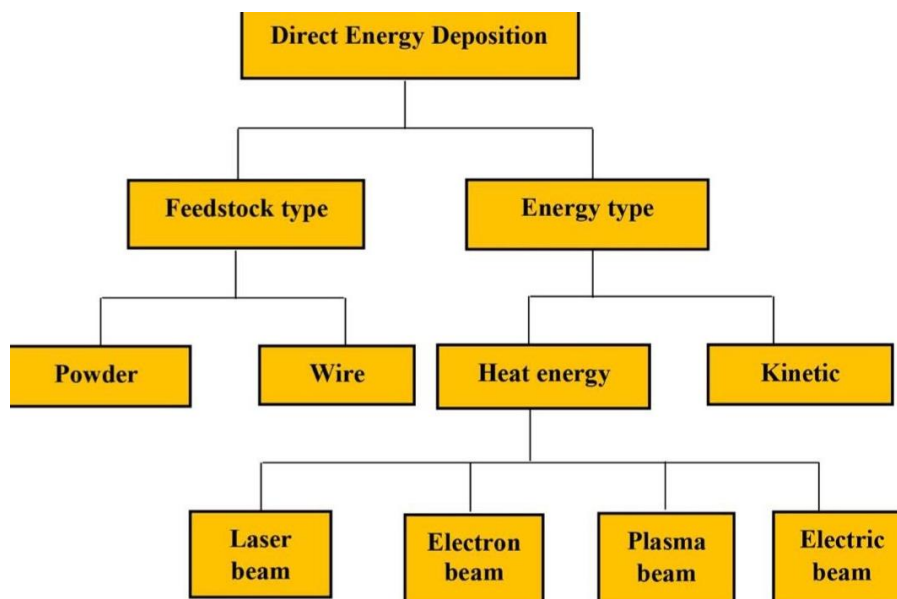


Fig. II.9.Classification des systèmes DED

II.3.6. La fabrication additive par fusion laser sur lit de poudres LPBF :

Au cours de ce processus, les matériaux ajoutés sont fabriqués par fusion laser sur une poudre éclairée, également appelée fusion sélective par laser (SLM) ou fusion de la poudre par laser (LPBF). Cette technique a été développée initialement dans les années 1990 par M. Fockele et D. Schwarz de l'entreprise F&S Stereolithographietechnik, ainsi que par W. Meiners, K. Wissenbach et G. Andres de l'institut Fraunhofer ILT [30].

Le principe de fonctionnement de la technologie LPBF est illustré dans **fig. .10**.

Tout d'abord, la pièce à imprimer est conçue à l'aide d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO), où le modèle 3D est enregistré au format STL (par la technologie Stéréo Lithographie). Ensuite, un autre programme est utilisé pour découper le volume de la pièce en couches, ce qui empêche l'agglutination de la poudre lors de la formation des couches. Les informations relatives à ces couches sont ensuite envoyées à la machine d'impression pour démarrer le processus de fabrication.

Le processus commence par le dépôt d'une couche de poudre sur la plateforme de fabrication à l'aide d'un dispositif spécial. Un faisceau laser est dirigé par un scanner composé de miroirs doubles, permettant de contrôler la trajectoire du faisceau sur la surface de la poudre. Le laser fusionne la poudre nécessaire pour former la couche souhaitée. Après la formation de chaque couche, le processus de fabrication est temporairement interrompu, la couche précédente est retirée et une nouvelle couche de poudre est appliquée. Ce cycle se répète jusqu'à ce que l'impression de la pièce soit complète.

Des gaz tels que l'argon ou l'azote sont utilisés pour fournir une protection pendant l'impression, afin de réduire les risques d'oxydation. Une fois l'impression terminée, l'excédent de poudre non fondue est fermé dans la chambre de fabrication, puis la pièce imprimée est extraite [31].

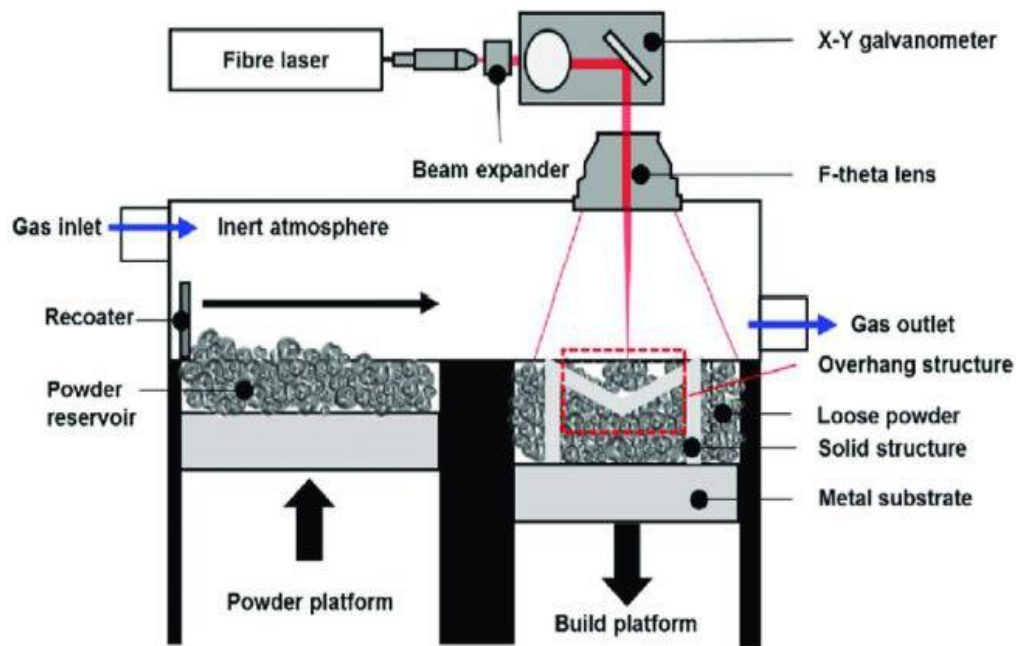


Fig. II.10. Principe de fonctionnement du procédé LPFD

II.3.7. Impression 3D avec la technologie DLP :

L'impression 3D avec la technologie DLP (abréviation de Digital Light Pressing) est une méthode de fabrication d'objets en trois dimensions à l'aide d'une résine liquide. Cette résine se solidifie lorsqu'elle est exposée à la lumière.

Contrairement à certaines imprimantes qui utilisent un laser pour durcir la résine point par point, les imprimantes DLP utilisent un projecteur lumineux (comme un vidéoprojecteur) pour durcir une couche entière de l'objet en une seule fois. Cela rend le processus plus rapide et souvent plus efficace que d'autres méthodes.

Principe de fonctionnement :

À l'intérieur de l'imprimante, il y a une puce contenant un grand nombre de micromiroirs. Chaque miroir bouge pour refléter la lumière sur une zone spécifique de la résine. Chaque miroir représente un petit point de l'objet à fabriquer. Le nombre de miroirs détermine la précision de l'impression : plus il y en a, plus le résultat est détaillé.

Chaque couche de l'objet est exposée à la lumière en une seule fois, ce qui permet une solidification rapide. Ensuite, l'imprimante passe à la couche suivante. Ainsi, l'objet est construit couche par couche.

Avantages de la technologie DLP dans l'impression 3D :

- Une grande rapidité d'impression.
- Une bonne précision des détails.
- Une utilisation facile, grâce à des modèles compacts adaptés à un usage de bureau
- Un coût réduit par rapport aux versions précédentes, ce qui la rend accessible aux amateurs, aux designers, et même à certaines applications médicales et industrielles.

En résumé, la technologie DLP est une manière intelligente de créer des objets 3D rapidement et avec une haute qualité, en utilisant la lumière au lieu des méthodes traditionnelles [32].

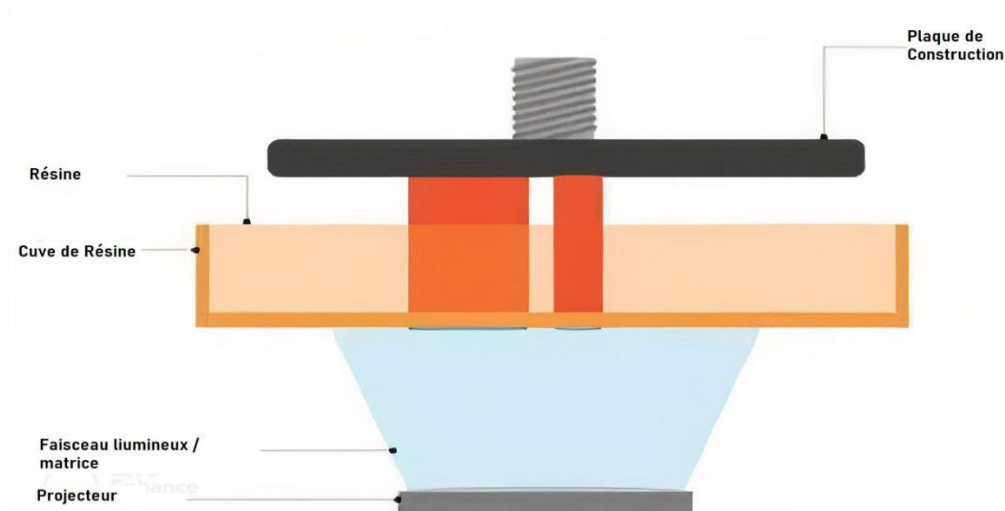


Fig. II.11. Un schéma illustrant la configuration DLP

II.3.8. Impression 3D par technologie LCD :

Les imprimantes 3D LCD utilisent un écran à cristaux liquides pour afficher l'image de chaque couche du modèle. Cette image est ensuite durcie à l'aide de la lumière ultraviolette (UV) qui solidifie la résine liquide uniquement aux endroits exposés. Contrairement aux imprimantes qui construisent les objets point par point ou ligne par ligne, les imprimantes LCD traitent une couche entière en une seule fois, ce qui leur confère une grande rapidité et une précision élevée.

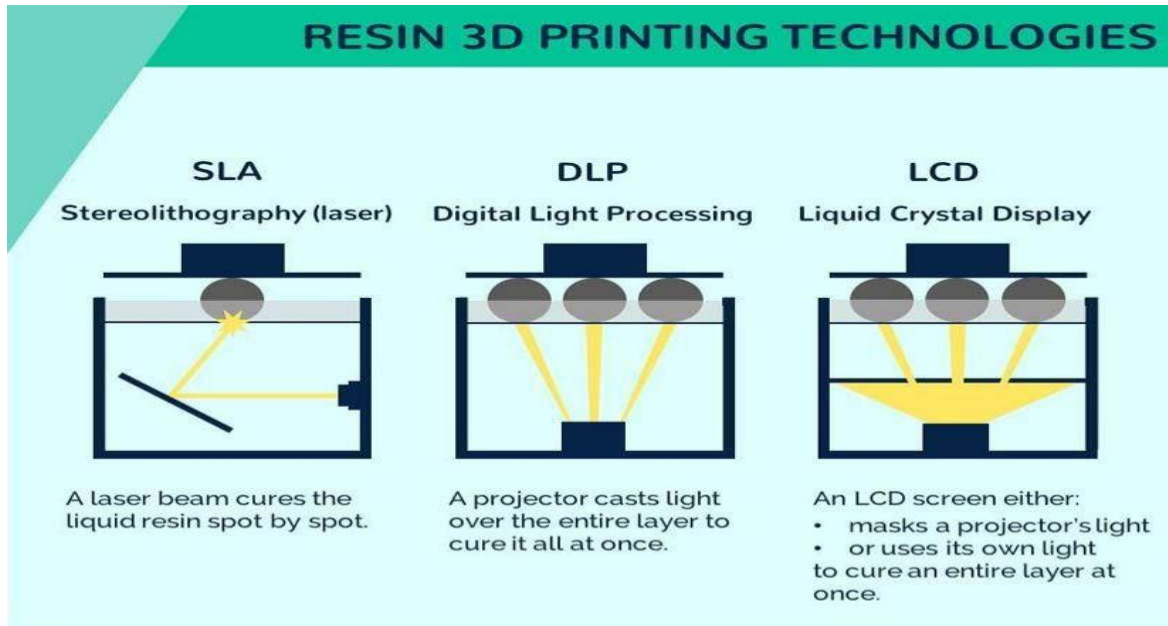


Fig. II.12. Différences of SLA et DLP et LCD

Elles sont particulièrement adaptées à la fabrication de pièces complexes comme les bijoux ou les dispositifs médicaux [33].

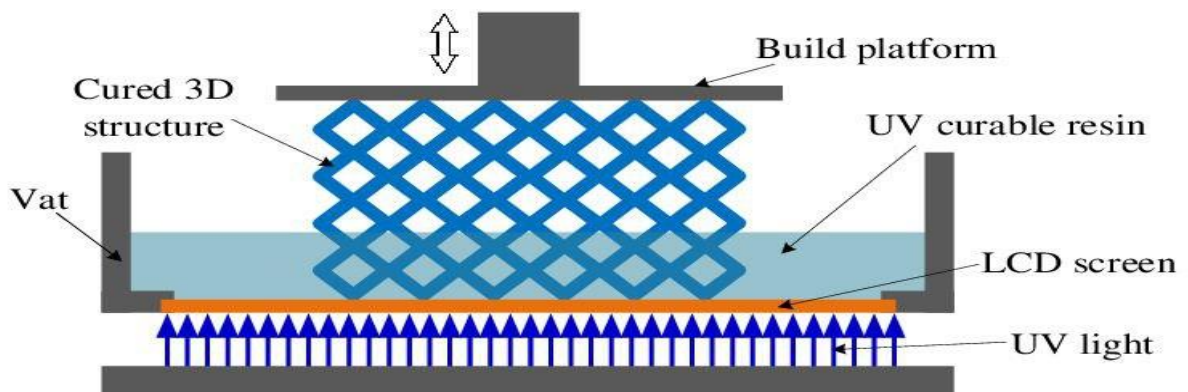


Fig. II.13. Schéma d'une imprimante 3D de type LCD

Tableau II.1.Méthodes de fabrication additive et leur principe, applications et résolution

N°	Méthode de fabrication additive	Principe	Importance (quand l'utiliser)	Applications spécifiques	Résolution
1	Modélisation par dépôt de filament fondu	Extrusion de matériaux	Modèles de validation de principe et prototypage simple	Échafaudages, prothèses, automobiles, dispositifs d'administration de médicaments	50–200 µm
2	Stéréolithographie	Cuve Photo polymérisation	Sélection polyvalente de matériaux et prototypage fonctionnel	Modèles maîtres pour la coulée sous vide, modèles sacrificiels pour la coulée de métaux, outils, moules, moulage sous pression, moulage de pièces d'assemblage, moulage spécifique à la bijouterie, production de modèles dentaires	10 µm
3	Fabrication d'objets laminés	Laminage de feuilles	Matériaux polyvalents Sélection et accompagnement Matériaux réutilisés	Modèles architecturaux en papier et modèles à usage unique pour moulage au sable	Cela dépend de l'épaisseur du stratifié, mais elle est généralement de 50 µm.
4	Frittage sélectif par laser	Fusion sur lit de poudre	Plusieurs composants fabriqués	Conduits, pièces ignifuges, gabarits, montages, outils,	80–250 µm

			simultanément	modèles de moulage, pièces à emboîtement /charnières intégrées, conception automobile, pièces aérospatiales, joints, joints et flexibles	
5	Dépôt direct d'énergie	Fusion par faisceau laser ou électronique	Composants volumineux et peu complexes	Pièces d'avion, composants métalliques réfractaires, réparation et reconditionnement d'outillages pour matériaux balistiques et propulsion marine	250 µm

II.4. Matériaux pour fabrication additive:

Les matériaux jouent un rôle important dans la fabrication additive, en particulier les matériaux d'ingénierie. Les matériaux doivent être transformés en matières premières spécifiques, avoir des propriétés appropriées et des caractéristiques de service acceptables pour obtenir des pièces de rechange saines et de bonne qualité [34]. La conception et l'optimisation libres sont souvent utilisées pour permettre le réglage des performances et créer des applications innovantes [35].

La **figure14** montre la répartition des matériaux utilisés dans la fabrication additive.

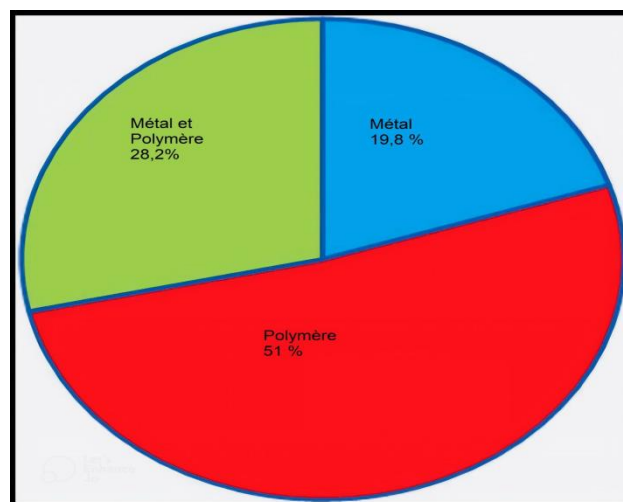


Fig. II.14.Distribution des matériaux en impression 3D

II.4.1. Les composites polymères :

En raison du faible coût de fabrication, les différents types de polymères, qu'ils soient sous forme de filaments, de résine ou de poudre, gagnent en popularité dans le domaine de la fabrication additive [36]. Récemment, des avantages tels que des matériaux économes en énergie et des systèmes d'impression nécessitant peu d'entretien en ont fait une option idéale. D'un autre côté, certains systèmes de fabrication additive peuvent rencontrer des problèmes de stabilité, nécessitant un étalonnage régulier.

Les thermoplastiques sont généralement utilisés dans les procédés d'extrusion de matière en fabrication additive. Les thermoplastiques amorphes sont principalement utilisés dans les procédés d'extrusion de matière, comme c'est le cas dans la technologie FDM.

En revanche, le frittage de couche de poudre utilise des polymères semi-cristallins. En raison de leurs propriétés de fusion, les thermoplastiques amorphes sont choisis pour l'extrusion de matière. Ces polymères, qui incluent l'ABS (acrylonitrile butadiène styrène) et le PLA (acide poly lactique), se ramollissent sur une large plage de températures, produisant un matériau souple et visqueux adapté à l'extrusion à travers une buse de 0,2 à 0,5 mm de diamètre, comme dans la technologie FDM. Les polymères thermoplastiques tels que l'ABS, le PLA, le PEEK, le PVA (alcool polyvinylique) [37], le TPU (polyuréthane thermoplastique) [38] et le nylon [39], sont parmi les principaux polymères utilisés en fabrication additive.

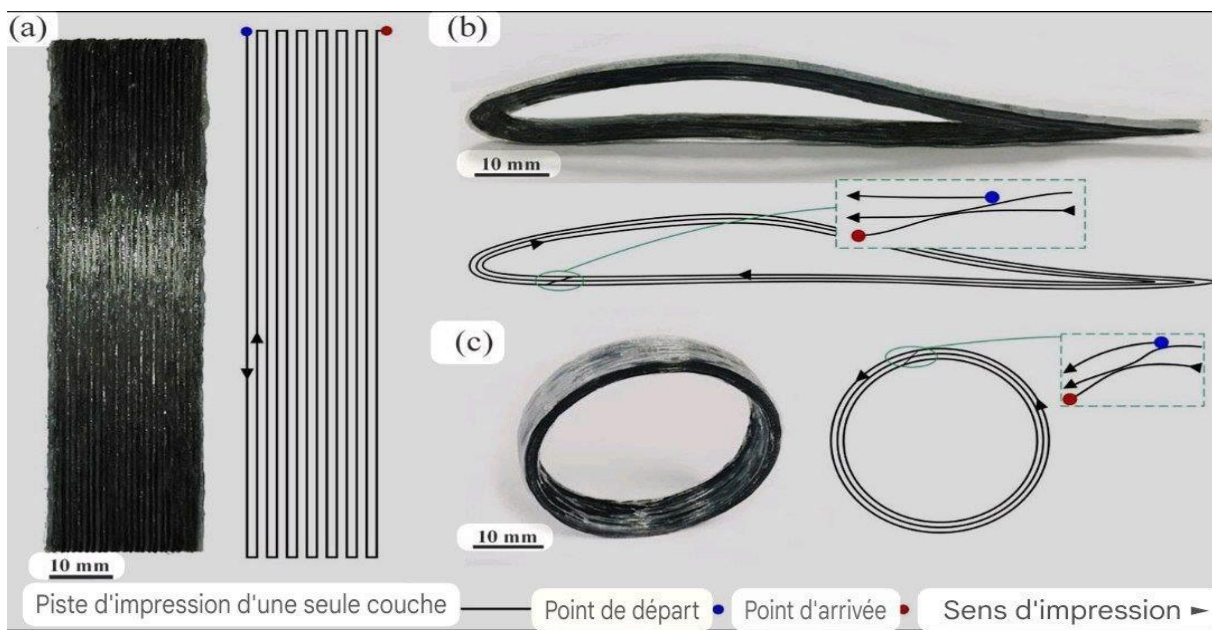


Fig. II.15. Différentes pièces composites en PLA renforcé

II.4.2. PLA:

L'acide poly lactique (PLA) est un polymère biologique bien connu parmi les polymères biodégradables existants, et peut être utilisé comme stabilisant. Les produits à base de PLA ont été approuvés en tant que polymère biologique à usage médical par la Food and Drug Administration (FDA) des États-Unis, grâce à leur biocompatibilité, leur biodégradabilité, leurs bonnes propriétés mécaniques et leur aptitude à la fabrication [40]. Le PLA est un matériau thermoplastique biodégradable, largement étudié pour des applications de biodégradation. Les produits de sa dégradation (dioxyde de carbone et H₂O) ne sont pas toxiques, et sa biodégradation ne surcharge pas l'organisme ni ne produit de substances étrangères [41]. Les effets de plusieurs facteurs de production (entrées) sur les propriétés mécaniques (sorties) des pièces PLA FDM ont été étudiés [42]. La résistance maximale à la flexion des échantillons de PLA s'est améliorée en utilisant des variables de procédé : l'épaisseur de couche, le taux de remplissage et l'angle de dépôt [43]. Les effets de plusieurs autres entrées, telles que la direction de construction, l'épaisseur de couche et la vitesse d'alimentation, sur les propriétés mécaniques des échantillons de PLA ont également été analysés [44].

II.4.3. ABS :

Le matériau ABS est un acteur majeur dans le domaine de l'impression 3D. Il s'agit de l'un des polymères les plus anciens utilisés dans les imprimantes 3D disponibles sur le marché. Il jouit d'une grande popularité en raison de son faible coût et de ses bonnes propriétés mécaniques. L'ABS se distingue par sa rigidité et sa résistance aux chocs, ce qui le rend adapté à l'impression de pièces en 3D destinées à des environnements exigeant une résistance à l'usure et aux dommages. De plus, l'ABS peut supporter des températures élevées avant de se déformer, grâce à une large plage de transition vitreuse ; c'est pourquoi il est privilégié pour les projets extérieurs ou les applications exposées à des températures élevées [45].



Fig. II.16.Matériau ABS (acrylonitrile butadiène styrène)

II.4.4. PEEK :

Le matériau PEEK se caractérise par un point de fusion plus élevé que le PLA et l'ABS, ce qui entraîne une augmentation des contraintes et des fissures thermiques. Pour cette raison, il est nécessaire de régler les paramètres avec soin afin que le PEEK puisse offrir les meilleures performances [46]. En utilisant différents paramètres d'impression dans la technologie FDM, les forces mécaniques et la déformation thermique du PEEK ont été étudiées [47]. Le PEEK peut être transformé en filaments, et des modèles peuvent être fabriqués en utilisant différentes orientations de construction et divers parcours d'extrusion. Les propriétés mécaniques des composants poreux en PEEK fabriqués par extrusion ont été étudiées [48]. La résistance à la flexion d'échantillons de PEEK a été analysée sous différents angles de balayage, et il a été constaté qu'elle est optimale à un angle de 00° [49]. Les propriétés de



Fig. II.17. Plastique polyether ketone (peek)

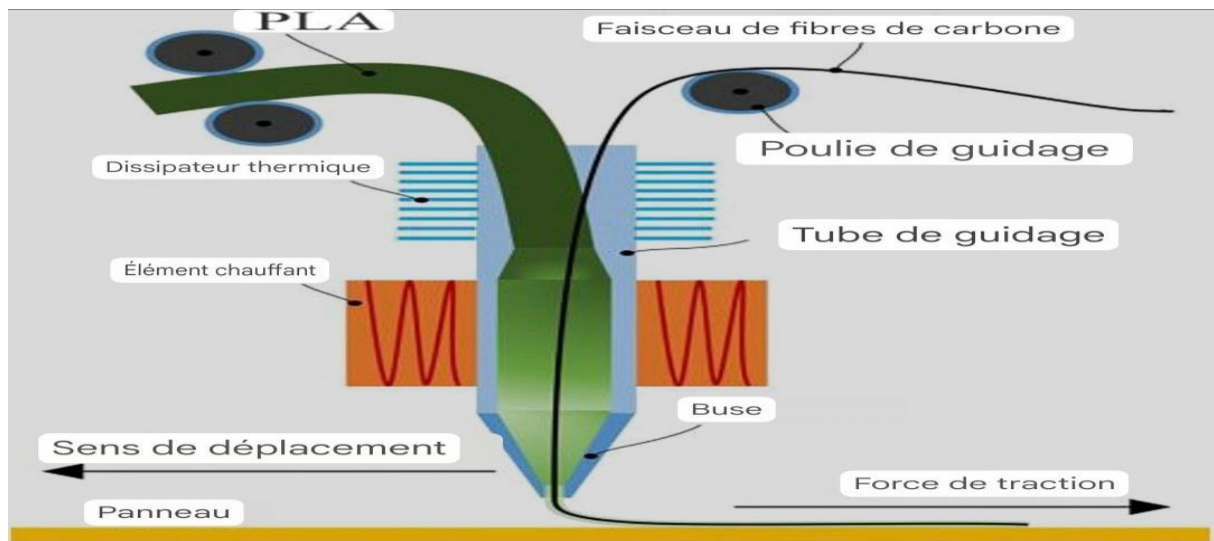


Fig. II.18. Principe du dispositif d'extrusion pour la fabrication [14a]

II.4.5. Céramique :

La plupart des méthodes de fabrication, ainsi que le façonnage des céramiques, reposent sur des processus en plusieurs étapes (indirects), dans lesquels la poudre céramique est formée à l'aide d'un liant amovible. En général, le liant est éliminé par un traitement ultérieur de « délainage » au four. Le compactage en couche de poudre et la technique de dépôt d'énergie dirigée (DED) sont les deux seules méthodes permettant de former des céramiques en une seule étape. Les techniques de fabrication additive en plusieurs étapes (indirectes) sont les plus appropriées pour

façonner une grande variété de céramiques, mais les méthodes de fabrication additive en une seule étape (directes) peuvent produire des composants dans un délai plus court. De plus, les composants céramiques exempts de défauts ou de porosités importantes présentent des propriétés mécaniques similaires à celles des céramiques fabriquées par des méthodes conventionnelles.

Ces pièces issues de la fabrication additive peuvent être produites en optimisant les paramètres du procédé ou en ajoutant des étapes de finition après la fabrication additive. L'utilisation des méthodes de traitement colloïdal dans le processus de fabrication additive est fortement recommandée pour obtenir des pièces céramiques sans fissures ni porosités [51]. L'utilisation de cristaux de zircone tétragonale stabilisée à l'yttrium (Y-TZP) pour la fabrication d'implants médicaux présente plusieurs avantages : par exemple, les cristaux d'Y-TZP possèdent d'excellentes propriétés mécaniques, ainsi qu'une meilleure résistance à l'usure, ce qui les rend idéaux pour les implants dentaires [52]. En même temps, ils peuvent également répondre aux attentes esthétiques croissantes de nombreux patients dentaires, ainsi qu'à leurs exigences sans métal. La fabrication additive a été utilisée pour produire une prothèse dentaire, dans laquelle Al₂O₃ ou Y-TZP a été mélangé dans du polyacrylate d'ammonium aqueux à 0,8 % dans un rapport solide/liquide de 1:1 [53]. Certains chercheurs ont montré que l'impression directe par jet d'encre a un fort potentiel pour produire des céramiques en nitrure de silicium haute performance, ainsi que pour évaluer les propriétés structurelles et mécaniques, telles que le module de Young, le module de Weibull, et la résistance à la flexion 4 points.

L'objectif est de produire un grand nombre d'échantillons d'essai par impression directe par jet d'encre [54]. Les céramiques de carbure dérivées du papier ont été utilisées dans les technologies nucléaires, car les matériaux utilisés peuvent offrir une résistance appropriée aux rayonnements gamma, aux fragments de fission nucléaire à grande vitesse et aux neutrons [55].

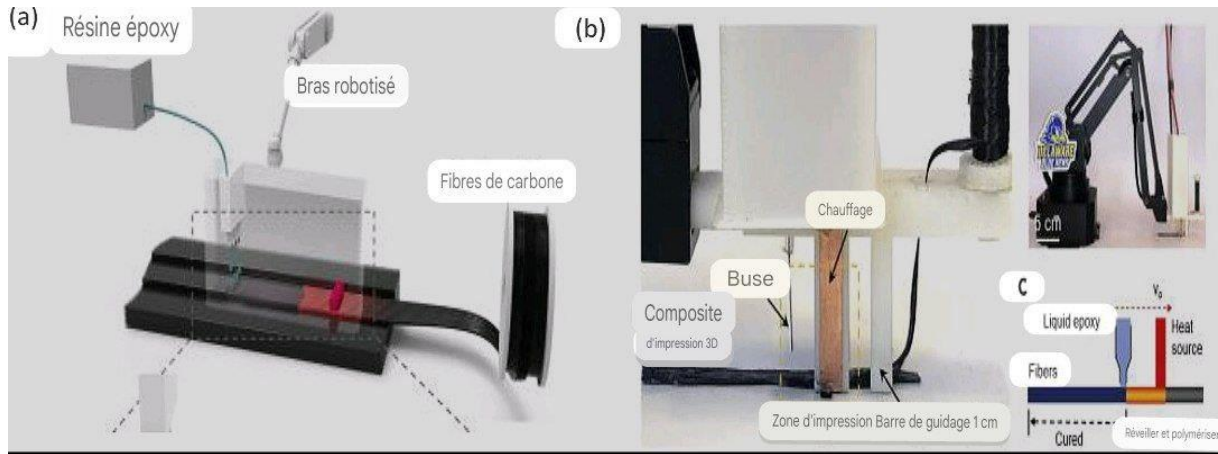


Fig. II.19. Configuration de l'impression 3D LITA (b) Fonctionnement de l'impression 3D LITA

II.4.6. Fibre de carbone:

La fibre de carbone hachée est un matériau composite à base de plastique utilisé dans l'impression 3D, contenant de petites particules de fibre de carbone intégrées dans une matrice polymère. Ces fibres apportent une rigidité supplémentaire au matériau, et peuvent se présenter sous forme de filaments utilisés dans la technologie FDM (Fused Déposition Modeling) ou sous forme de poudre de nylon dans la technologie SLS (frittage sélectif par laser).

Il existe deux principales méthodes d'impression 3D utilisant la fibre de carbone :

Impression avec fibres de carbone continues :

Cette technique est l'une des plus avancées dans le domaine de la fabrication additive. Elle consiste à intégrer des filaments longs et continus de fibre de carbone dans la matière plastique pendant le processus d'impression. Cela revient à insérer un renfort rigide dans une matière souple, conférant à la pièce des propriétés mécaniques remarquables, notamment en termes de rigidité et de résistance aux contraintes. Cette méthode est largement utilisée dans les secteurs exigeants tels que l'aéronautique et l'automobile, où la légèreté et la solidité sont essentielles [56].



Fig. II.20. fibre continue

Impression avec fibres de carbone hachées :

Dans ce cas, de très courtes fibres de carbone sont préalablement mélangées au filament plastique utilisé pour l'impression. Cela améliore les propriétés mécaniques du matériau par rapport au plastique pur, mais restent nettement moins performantes que les fibres continues. Cette technique est principalement utilisée pour la fabrication de prototypes.



Fig. II.21. Fibre de carbone hachée

-De manière générale, l'impression 3d avec fibre de carbone se distingue par sa robustesse, sa légèreté et sa résistance thermique, en faisant un matériau de choix pour applications industrielles et techniques exigeantes [57].

II.5. Avantage de l'impression 3D :

L'impression 3D est l'une des technologies modernes qui a provoqué une révolution importante dans de nombreux domaines industriels et techniques. Au départ limitée à la création de prototypes, cette technologie est désormais un élément essentiel dans les processus de fabrication et de production à grande échelle. Elle se distingue par sa capacité à offrir des solutions innovantes aux problèmes traditionnels de fabrication, tels que la réduction des coûts, l'accélération des délais de production, et la possibilité de créer des conceptions complexes qui étaient autrefois impossibles avec les méthodes traditionnelles.

De plus, l'impression 3D contribue à améliorer l'efficacité environnementale en réduisant le gaspillage de matériaux et en permettant la fabrication de produits à la demande, ce qui diminue le besoin de stockage et de transport. À travers ce mémoire, je vais explorer les principaux avantages de cette technologie et son impact positif sur divers secteurs, en mettant l'accent sur son rôle dans le renforcement de l'innovation, l'accélération du prototypage et la réalisation de conceptions complexes.

En comprenant ces avantages, nous pouvons saisir l'importance croissante de l'impression 3D dans un avenir proche et comment elle peut être utilisée de manière optimale pour répondre aux besoins d'un marché en constante évolution, tout en contribuant à un développement de production durable.

Production à la demande :

L'impression 3D a révolutionné le modèle de fabrication traditionnel en permettant la production à la demande, c'est-à-dire uniquement lorsque cela est nécessaire. Cette approche réduit considérablement les coûts de stockage et évite la surproduction. Elle permet également aux entreprises de s'adapter rapidement aux fluctuations du marché en ajustant les volumes de production avec souplesse. De plus, cette technologie favorise la personnalisation sans compromettre la rapidité ni l'efficacité, marquant ainsi le passage vers une production plus intelligente et réactive.

Accélération du prototypage :

L'impression 3D joue un rôle essentiel dans la réduction des délais de développement de produits, notamment lors de la phase de prototypage. Elle permet aux ingénieurs et designers de matérialiser rapidement leurs concepts et d'apporter des modifications immédiates en fonction des tests. Cela accélère le cycle de développement et offre un avantage concurrentiel indéniable dans des marchés en constante évolution.

Respect de l'environnement :

Grâce à son processus additif, l'impression 3D minimise le gaspillage de matière, contrairement aux méthodes traditionnelles souvent basées sur le retrait de matériau. De plus, elle favorise la production locale, ce qui réduit l'empreinte carbone liée au transport. Cette technologie s'inscrit ainsi dans une démarche durable, répondant aux exigences croissantes en matière de responsabilité environnementale.

Rapidité de conception et de production :

L'impression 3D permet une transition rapide entre le design numérique et la fabrication physique. Les idées peuvent être transformées en objets concrets en quelques heures, facilitant les tests rapides et la mise sur le marché accélérée. Cette rapidité favorise l'innovation continue et répond à une demande croissante de réactivité dans le développement de produits.

Adaptée aux géométries complexes :

L'une des plus grandes forces de l'impression 3D réside dans sa capacité à produire des formes complexes difficilement réalisables par les méthodes traditionnelles. Grâce à une construction couche par couche, elle permet la fabrication de structures détaillées et de formes organiques, devenues indispensables dans des domaines comme l'aéronautique, l'architecture et la médecine.

Processus de fabrication économique :

L'impression 3D réduit les coûts liés à la production, en particulier pour les petites séries ou les prototypes. Elle élimine le besoin de moules coûteux et limite les pertes de matière. Cela en fait une solution idéale pour les entreprises cherchant à innover sans engager de dépenses importantes.

Production de pièces solides et légères :

L'impression 3D permet de fabriquer des pièces à la fois robustes et légères, grâce à des structures internes optimisées comme les formes alvéolaires. Ces pièces sont particulièrement utiles dans les secteurs exigeant une performance élevée avec un poids réduit, tels que l'aéronautique ou l'automobile. La diversité des matériaux disponibles augmente également la flexibilité du design.

Favorise la créativité et l'innovation :

En supprimant de nombreuses contraintes de fabrication, l'impression 3D libère le potentiel créatif des concepteurs. Elle permet de tester, modifier et personnaliser rapidement les créations, ce qui encourage l'expérimentation et l'innovation dans des domaines variés, de l'art à l'industrie.

Outil pédagogique efficace :

Dans le domaine de l'enseignement, l'impression 3D permet une approche plus interactive de l'apprentissage. Elle aide les étudiants à visualiser des concepts abstraits et à développer leurs compétences en conception et en résolution de problèmes. Elle constitue ainsi un atout précieux dans les filières techniques et scientifiques.

Moins de déchets que les méthodes traditionnelles :

Contrairement aux techniques soustractives, l'impression 3D n'utilise que la quantité de matière nécessaire, réduisant ainsi significativement le gaspillage. Elle permet également l'utilisation de matériaux recyclables ou biodégradables, renforçant son rôle dans une production plus respectueuse de l'environnement [58].

II.6. Spécificité d'impression 3d par photopolymères :

L'impression 3D par photopolymères (souvent appelée impression 3D SLA ou DLP) repose sur l'utilisation de résines photosensibles qui durcissent lorsqu'elles sont exposées à une source de lumière UV ou à un laser.

Impression 3D avec la technologie de traitement numérique de la lumière (DLP) :

L'impression 3D utilisant la technologie DLP offre plusieurs caractéristiques et avantages qui en font un choix idéal pour de nombreuses applications, qu'il s'agisse de la fabrication, de l'impression biologique ou même des modèles géométriques complexes. Voici une analyse des avantages et des caractéristiques :

II.6.1. Précision d'impression :

Description : La technologie DLP offre une très haute précision, atteignant des résolutions de quelques microns au niveau de l'impression. Un projecteur DLP est utilisé pour afficher des images précises sur des couches fines de résine liquide, permettant d'obtenir des détails très fins dans les modèles imprimés.

Application : Cette précision la rend idéale pour l'impression de pièces complexes, telles que les prothèses ou des modèles détaillés de composants mécaniques.

II.6.2. Impression rapide :

Description : La méthode DLP repose sur la projection d'un masque de lumière complet sur chaque couche, ce qui permet d'obtenir des impressions beaucoup plus rapides par rapport aux technologies comme le laser, qui nécessitent un balayage progressif de la couche (comme les techniques SLA).

Application : Cette rapidité rend la technologie DLP adaptée aux systèmes nécessitant une production rapide ou lorsque le temps est un facteur clé.

II.6.3. Disponibilité de matériaux variés :

Description : Une large gamme de matériaux peut être utilisée pour l'impression 3D avec DLP, y compris des résines adaptées à l'impression biologique, des matériaux capables de résister à des températures élevées, et bien d'autres.

Application : Cette capacité d'adaptation à différents matériaux en fait un choix adapté pour une variété d'applications, allant des prototypes aux pièces finies.

II.6.4. Impression biologique :

Description : Grâce à la faible consommation d'énergie du projecteur DLP, des matériaux biologiques peuvent être utilisés pour des impressions, notamment dans le domaine médical pour la fabrication de prothèses et d'organes artificiels.

Application : Cette fonctionnalité est cruciale pour les applications de bioprinting, où des matériaux biologiques sont utilisés pour créer des prothèses ou des tissus artificiels.

II.6.5. Faible coût et facilité d'utilisation :

Description : Les imprimantes utilisant la technologie DLP sont généralement moins chères que celles basées sur d'autres technologies comme SLA ou SLS. De plus, leur facilité d'utilisation les rend accessibles même aux utilisateurs non expérimentés.

Application : Ces avantages rendent DLP particulièrement attrayant pour les petites entreprises ou les particuliers débutant dans l'impression 3D.

II.6.6. Impression de formes complexes avec précision :

Description : DLP permet de créer des formes géométriques complexes avec une grande précision. Les imprimantes DLP peuvent traiter des détails fins et produire des résultats impeccables pour des dimensions petites et complexes.

Application : Cette précision la rend idéale pour les industries nécessitant des conceptions complexes, telles que la bijouterie ou les dispositifs médicaux.

II.7. Spécifications du processus d'impression 3D avec des polymères photopolymérisables :

II.7.1. Le processus :

Explication : Des images du projecteur DLP sont affichées sur des couches fines de résine liquide dans un réservoir fermé, ce qui provoque une polymérisation localisée de la résine. Cela permet de former les pièces imprimées couche après couche.

II.7.2. Configurations géométriques :

De bas en haut : Dans cette configuration, la tête de fabrication est immergée dans le réservoir de résine, et la pièce est imprimée de bas en haut en utilisant la lumière pour durcir les couches.

De haut en bas : La source de lumière est placée au sommet du réservoir, et les couches sont imprimées de haut en bas. Cette méthode nécessite davantage de résine mais facilite le processus de séparation des pièces imprimées.

II.7.3. Avantages et inconvénients :

De bas en haut : Utilisation réduite de la résine et séparation plus facile entre les couches durcies et le réservoir.

De haut en bas : Nécessite plus de résine, mais résout le problème de l'adhérence entre la couche et la base.

II.7.4. Évolutions technologiques :

Technologies telles que CLIP et HARP : Ces technologies permettent d'améliorer la vitesse d'impression et d'éviter les problèmes d'adhérence entre les couches et le réservoir.

II.7.5. Matériaux utilisés :

Il existe une variété de matériaux, allant des résines pures aux suspensions contenant des charges comme la céramique et les métaux, qui améliorent les propriétés mécaniques et chimiques des pièces imprimées.

II.7.6. Systèmes d'initiation de la polymérisation :

Le système de polymérisation est choisi en fonction des caractéristiques nécessaires du produit final. Ces systèmes varient entre les radicaux libres (pour les acryliques) et les systèmes ioniques (pour les époxydes).

Ces caractéristiques et avantages font de la technologie DLP l'une des technologies les plus flexibles et efficaces dans des domaines variés tels que la fabrication rapide, la bio printing et la production de modèles Complexes [59].

II.8. Applications d'impression 3D :

La technologie d'impression 3D représente une véritable révolution dans de nombreuses industries, car elle offre des possibilités infinies pour concevoir et créer des produits avec un niveau de précision et d'efficacité élevé. Alors que de nombreux secteurs font face à des défis croissants liés aux coûts et aux délais, l'impression 3D offre une solution idéale pour accélérer la production et réduire le gaspillage. En exploitant cette technologie, les entreprises sont désormais capables de s'adapter rapidement aux besoins changeants du marché, ce qui leur permet de proposer des produits personnalisés qui répondent plus précisément aux besoins des clients. À l'avenir, on s'attend à ce que l'impression 3D joue un rôle encore plus important dans la réalisation de la durabilité de la production et l'amélioration des performances dans des domaines variés tels que l'aérospatiale, l'automobile, l'alimentation et les soins de santé.

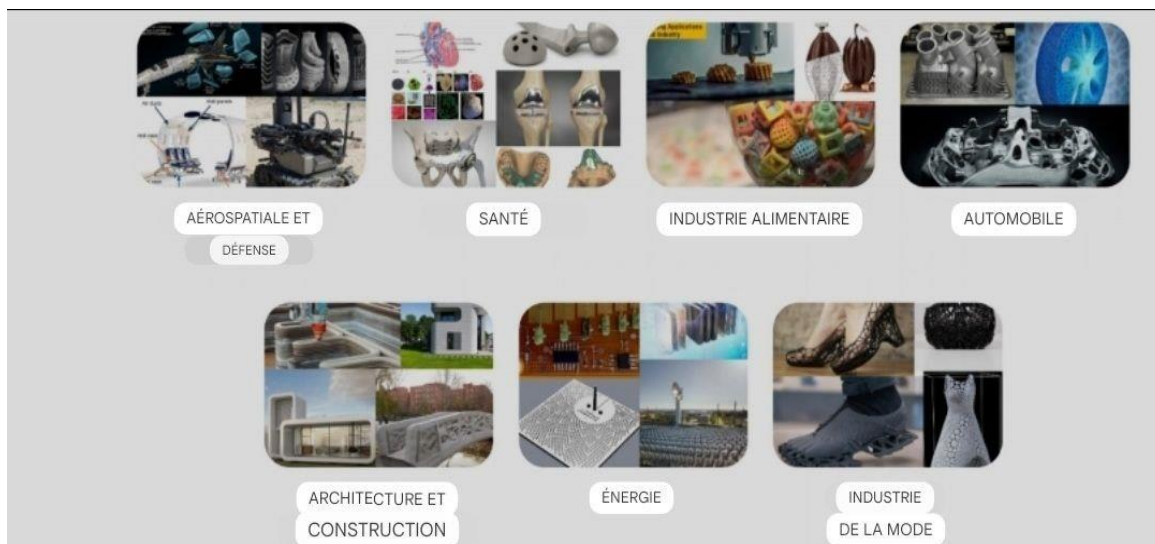


Fig.22 : Principales applications de l'impression 3D

Industrie aérospatiale :

La technologie d'impression 3D offre une grande liberté de conception pour les composants et la production. Dans l'industrie aérospatiale, cette technologie permet de fabriquer des pièces légères, des géométries améliorées et complexes, ce qui peut réduire la consommation d'énergie et de ressources. En même temps, l'utilisation de la technologie d'impression 3D peut entraîner des économies de carburant, car elle réduit la quantité de matériau utilisée pour produire les pièces aérospatiales. De plus, la technologie d'impression 3D a été largement utilisée pour produire des pièces de rechange pour certains composants aérospatiaux, comme les moteurs, qui sont facilement endommagés et nécessitent un remplacement régulier. Par conséquent, cette technologie constitue une solution efficace pour l'approvisionnement en pièces de rechange.

Dans l'industrie aérospatiale, les alliages à base de nickel sont préférés en raison de leurs propriétés uniques en matière de résistance à la traction, de résistance à l'oxydation/corrosion et de tolérance aux dommages [60].

Fabrication des aliments :

La technologie de l'impression 3D a ouvert de nouvelles perspectives, non seulement dans l'industrie aérospatiale, mais aussi dans la production alimentaire. Il y a aujourd'hui une demande croissante pour le développement d'aliments personnalisés destinés à répondre à des besoins diététiques spécifiques, tels que ceux des athlètes, des enfants, des femmes enceintes, des patients, etc. Cela nécessite de fournir des quantités variables de nutriments en réduisant les ingrédients non nécessaires et en augmentant la présence d'ingrédients sains [61]. Par conséquent, le développement d'aliments personnalisés doit se faire de manière précise et innovante, et c'est ici qu'intervient l'impression 3D alimentaire.

La fabrication des couches alimentaires, ou ce que l'on appelle « impression 3D des aliments », se fait par dépôt successif de couches basées sur des données de conception assistée par ordinateur [62]. En utilisant la technologie d'impression 3D, il est possible de mélanger et de traiter des matériaux spécifiques pour créer des structures et des formes complexes et innovantes. Des ingrédients tels que le sucre, le chocolat, les aliments en purée et les aliments plats tels que les pâtes, les pizzas et les biscuits peuvent être utilisés pour créer de nouveaux produits alimentaires aux conceptions et formes complexes et attrayantes. [63]

Le domaine médical et les soins de santé :

La technologie d'impression 3D a provoqué une transformation majeure dans le secteur médical. Elle est largement utilisée, notamment pour l'impression de peau artificielle, la production de médicaments, la fabrication d'os et de cartilages, ainsi que pour l'impression de tissus et d'organes de remplacement. Cette technologie se distingue par sa capacité à reproduire avec une grande précision les structures biologiques, ce qui en fait un outil efficace pour le traitement des blessures et des maladies chroniques. Elle est également utilisée dans la recherche scientifique et la modélisation de cas médicaux [64].



Fig. II.22.Échafaudages construits à partir de poudres métalliques et fabriqués par impression 3D SLM

Le domaine de la mode et du design :

L'impression 3D a également révolutionné le monde de la mode et du design, étant désormais utilisée dans la conception et la fabrication de vêtements, d'accessoires, de chaussures et de bijoux. Cette technologie offre une liberté créative illimitée aux designers, leur permettant de produire des pièces personnalisées et complexes qui seraient difficiles à fabriquer par les méthodes traditionnelles. Elle contribue également à réduire le gaspillage de matériaux et à favoriser la durabilité dans l'industrie de la mode [64] .

Le domaine de l'industrie électrique et électronique :

L'impression 3D joue un rôle de plus en plus important dans les industries électriques et électroniques, étant désormais utilisée dans la fabrication de dispositifs électroniques divers tels que les matériaux électroniques actifs, les électrodes et les appareils nécessitant une personnalisation de masse et un design adaptatif. Par exemple, la production d'électrodes en utilisant la technologie d'impression 3D offre une méthode à faible coût et efficace en termes de temps pour fabriquer les matériaux utilisés pour les électrodes [65].

Le domaine de la construction et du bâtiment :

La technologie d'impression 3D a révolutionné l'industrie de la construction et du bâtiment, permettant l'impression de bâtiments entiers ou la production de composants de construction complexes. L'émergence de la modélisation de l'information du bâtiment (BIM) a facilité l'utilisation de l'impression 3D dans ce domaine, permettant la création de conceptions précises et efficaces pour la construction tout en réduisant le temps et les coûts. L'impression 3D est également utilisée pour développer des conceptions flexibles pour la construction, contribuant ainsi à améliorer la performance environnementale et à réduire les déchets [66].

L'industrie électronique et électrique :

La technologie d'impression 3D est devenue un élément clé de l'industrie électronique et électrique, utilisée pour produire des composants électroniques complexes et sur mesure, tels que des dispositifs électriques, des composants actifs et des capteurs. L'impression 3D offre une grande flexibilité de conception et peut être utilisée pour fabriquer des composants spécifiques répondant à des besoins particuliers. Elle est également utilisée pour le développement d'électroniques écologiques, offrant une fabrication à faible coût et une grande efficacité. Cette technologie permet d'améliorer les performances des appareils électroniques et de fournir des solutions innovantes dans ce domaine [67].

L'industrie de l'impression 3D dans le secteur de la construction :

Dans le secteur de la construction, la technologie de l'impression 3D joue un rôle croissant dans la conception et la construction de bâtiments. L'impression 3D peut être utilisée pour construire des structures complètes ou pour créer des composants de construction complexes. L'utilisation de cette technologie permet de réduire les coûts et le temps, tout en offrant la possibilité de créer des structures avec des spécifications architecturales innovantes et respectueuses de l'environnement. Elle est également utilisée pour construire des maisons et des infrastructures dans des zones manquant de ressources, contribuant ainsi à répondre aux besoins en logement dans des régions à ressources limitées. L'impression 3D améliore également l'efficacité des processus de construction en offrant des solutions plus précises et flexibles [68].

Applications de l'impression 3D dans l'éducation :

L'impression 3D représente une révolution dans le domaine de l'éducation, car cette technologie permet désormais de créer des modèles éducatifs réalistes et pratiques. Les étudiants peuvent utiliser des imprimantes 3D pour concevoir et assembler des modèles expérimentaux, que ce soit dans les domaines des sciences, de l'ingénierie ou de l'art. Cette technologie aide à renforcer la compréhension visuelle et pratique des matières étudiées, ce qui permet aux étudiants de mieux assimiler les informations. Elle peut également être utilisée pour créer des outils pédagogiques personnalisés adaptés aux besoins de chaque étudiant, offrant ainsi une plus grande interactivité dans le processus éducatif [69].

Applications de l'impression 3D dans l'industrie de la construction :

L'impression 3D est l'une des technologies les plus avancées dans l'industrie de la construction, utilisée pour la fabrication de structures architecturales et de bâtiments à des coûts réduits et dans des délais plus courts. Les imprimantes 3D peuvent fabriquer des pièces de construction complexes avec une grande précision, en utilisant des matériaux variés tels que le béton et les métaux. Cette technologie aide également à réduire le gaspillage de matériaux et à diminuer les impacts environnementaux liés à la construction traditionnelle. De plus, l'impression 3D permet d'accélérer le processus de construction, ce qui contribue à répondre aux besoins de logements rapides dans différentes régions [66].



Fig. II.23. Impression 3D construction

II.9. Bibliographie :

- [1] Erasmus+, Guide Technique de l'Impression 3D - Résumé, Erasmus+, 2017.
- [2] e. a. Jean-Claude André, «Procédé de fabrication d'un objet quelconque par solidification de fines couches d'un matériau fluide sensible à un faisceau de rayonnement». Brevet FR2575399, 1984.
- [3] C. W. Hull, «Apparatus for production of three-dimensional objects by stereolithography». Brevet US4575330A, 1984.
- [4] "Engineering", "Additive manufacturing of ceramic-based materials," A. T. e. al. .2014 'Materials', vol. 16, no. 6, pp. 729–754,
- [5] Markforged, «Metal 3D Printing Materials Guide,» *Metal 3D Printing Materials Explained*.
- [6] e. a. T. D. Ngo, «"Additive manufacturing (3D printing): A review of materials, methods, applications and challenges,"» *Composites Part B: Engineering*, vol. 143, pp. 196-172, 2018.
- [7] Protolabs, «"FDM 3D printing materials compared,"» [En ligne]. Available: <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>.
- [8] D. W. R. a. B. S. I. Gibson, «"Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing",» *2nd ed., New York, NY*, 2015.
- [9] ». «History of CNC Technology, «EngineeringTechnology.org,» [En ligne]. Available: <https://engineeringtechnology.org/computer-numerical-control-cnc/history-of-cnc-technology/>.
- [10] B. D. Kuhn and T. J. Langrana, «"Slicing algorithms for layered manufacturing techniques,"» **Computer-Aided Design**, Vols. %1 sur %2vol. 25, no. 6, pp. 413–421,, Jul. 1993.
- [11] Dassault Systèmes, «"Impression 3D - Procédé additif,"» **3DEXPERIENCE Make**, [En ligne]. Available: <https://make.3dexperience.3ds.com/fr/processus/impression-3d>.
- [12] C.schwaar, «Complete Overview of the Types of 3D Printers,» 2024. [En ligne]. Available: <https://all3dp.com/1/types-of-3d-printers-3d-printing-technology/>.
- [13] C. W. Hull, «Apparatus for Production of Three-Dimensional Objects by Stereolithography». United States Brevet 4575330, Washington, D.C.1986.

- [14] E. M.-S. a. L. T. J. A. Estefani, «Anisotropic and hyperplasia mechanical response of 3D printed TPU parts,» *Progress in Additive Manufacturing*, vol. 9, pp. 1-10, 2024.
- [15] D. M. K. H. Budharaju, «Ceramic materials for 3D printing of biomimetic bone scaffolds – Current state-of-the-art & future perspectives,» *Materials & Design*, vol. 231, n° %1112064, 2023.
- [16] E. P. a. L. F. Lupone, «Optimization of selective laser sintering process conditions using stable sintering region approach,» *Express Polymer Letters*, vol. 15, pp. 177-192, 2021.
- [17] Z. a. song, «Performance optimization of complicated structural SiC/Si composite ceramics prepared by selective laser sintering,» *ceramic international*, vol. 46, pp. 586-575, 2020.
- [18] e. a. Rajan K, «Fused deposition modeling: process, materials, param-eters, properties, and applications».
- [19] S. C. Daminabo et e. al., «Fused deposition modeling-based additive manufacturing (3D printing): techniques for polymer material systems,» *Materials Today Chemistry*, vol. 16, p. Article 100248, 2020.
- [20] P. K. P. e. al., «A critical review on the fused deposition modeling of thermoplastic polymer composites,» *Composites Part B: Engineering*, vol. 201, p. Article 108336, 2020.
- [21] H. e. a. Md Akil, «Recent developments in fused deposition modeling-based 3D printing of polymers and their composites,» *Polymer Reviews*, vol. 59, p. 589–624, 2019.
- [22] M. D. e. al., «Experimental investigation of FDM process for improvement of mechanical properties and production cost,» *Rapid Prototyping Journal*, vol. 20, pp. 228-235, 2014.
- [23] Y. Tao, Q. Yin et P. Li, «An additive manufacturing method using large-scale wood inspired by laminated object manufacturing and plywood technology,» *Polymers*, vol. 13, n° %11, p. 144, 2021.
- [24] I. Gibson, D. Rosen et B. Stucker, Sheet lamination processes, New York, NY: Springer, 2015, p. 219–244.
- [25] e. a. M. Vaezi, «A review on 3D micro-additive manufacturing technologies,» vol. 67, pp. 1721-1754, 2013.

- [26] A. D. a. A. Moridi, State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design, vol. 9, 2019, p. 418.
- [27] e. a. C. Greer, Introduction to the design rules for metal big area additive manufacturing, vol. 27, Additive Manufacturing, 2019, pp. 159-166.
- [28] e. a. A. Heralic, «Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, 2012.
- [29] e. a. A. Heralic, «Height control of laser metal-wire deposition based on iterative learning control and 3D scanning,» *Optics and Lasers in Engineering*, vol. 50, p. 1230–1241, 2012.
- [30] W.Meiners, «Direktes Selektives Laser Sintern einkomponentiger metallischer Werkstoffe,» Ph.D. dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen), Aachen, Germany, 1999.
- [31] Q.Saby, «Fusion laser sur lit de poudres et optimisation par traitements thermiques d'aciers martensitiques : Application aux moules d'injection plastique, Thèse de doctorat, INSA Lyon, Université de Lyon».
- [32] «Formlabs: Guide to Resin 3D Printer,» [En ligne]. Available: <https://formlabs.com/blog/resin-3d-printer-comparison-sla-vs-dlp/>.
- [33] Phrozen, « What is an LCD 3D Printer?,» [En ligne]. Available: <https://phrozen3d.com/blogs/guides/what-is-a-lcd-3d-printer>.
- [34] e. a. D. Bourell, «Materials for additive manufacturing,» chez *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 66, 2017, p. 659–681.
- [35] e. a. J. Lee, «Fundamentals and applications of 3D printing for novel materials,» *Applied Materials Today*, vol. 7, p. 120–133, 2017.
- [36] S. a. S.Nilufar, «An Overview of Additive Manufacturing of Polymers and Associated Composites,» *Journal of Polymers*, 2020; 12: 2719..
- [37] W. G. Z. H. Ni F, «Fabrication of water-soluble poly (vinyl alcohol)-based composites with improved thermal behavior for potential three-dimensional printing application,» *Journal of Applied Polymer Science* 2017; 134.
- [38] K. J. Han Y, «A study on the mechanical prop-erties of knit fabric using 3D printing- Focused on PLA, TPU Filament.,» *Journal of Fashion Business*, 2018; 22: 93–105.
- [39] G. Y. Xiao J, « The manufacture of 3D printing of medical-grade TPU.,» *Journal of Progress in Additive Manufacturing*, 2017; 2: 117–123..

- [40] B. W. e. a. L. Xiao, «Poly(lactic acid)-based biomaterials: synthesis, modification and applications,» 247–282, 2006.
- [41] e. a. A. Aworinde, «Biodegradation profiles of chitin, chitosan and titanium-reinforced polylactide biocomposites as scaffolds in bone tissue engineering,» *Arab Journal of Basic and Applied Sciences*, vol. 28, p. 351–359, 2021.
- [42] e. a. A. P. Gordon, «An approach for mechanical property optimization of fused deposition modeling with polylactic acid via design of experiments,» vol. 22, p. 1–18, 2016.
- [43] e. a. T. Pfeifer, «Optimization of the FDM additive manufacturing process,» in Proc. SPE ANTEC, Indianapolis, IN, USA,, May 22–25, 2016.
- [44] e. a. J. M. Chacón, «Additive manufacturing of PLA structures using fused deposition modelling: Effect of process parameters on mechanical properties and their optimal selection,» vol. 124, 2017.
- [45] e. a. P. Žur, «Optimization of ABS 3D-printing method and parameters,» *European Journal of Engineering Science and Technology*, vol. 3, p. 44–51, 2020..
- [46] A. S. B. e. al, «Elements and materials improve the FDM products: A review,» *Adv. Eng. Forum*, vol. 16, p. 33–51, 2016.
- [47] e. a. W. Wu, «Manufacture and thermal deformation analysis of semicrystalline polymer polyether ether ketone by 3D printing,» *J. Mater. Res. Innov.*, vol. 18, p. 5–12, 2014.
- [48] V. M. a. S. Yang, «Extrusion-based additive manufacturing of PEEK for biomedical applications,» *Journal of Virtual Physical Prototyping*, vol. 10, p. 1–13, 2015.
- [49] e. a. K. Rahman, «Mechanical properties of additively manufactured PEEK components using fused filament fabrication,» in Proc. ASME Int. Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE), 2015..
- [50] e. a. G. Cicala, « "Engineering thermoplastics for additive manufacturing: A critical perspective with experimental evidence to support functional applications," ,» *Journal of Applied Biomaterials and Fundamental Materials*, vol. 15, p. 10–18, 2017..
- [51] e. a. X. Zhang, « "Additive manufacturing of zirconia ceramics: a state-of-the-art review," ,» *Journal of Materials Research and Technology*, vol. 9, p. 9029–9048, 2020.
- [52] e. a. N. R. Silva, «"Additive CAD/CAM process for dental prostheses," ,» *Journal of Prosthodontics*, vol. 20, p. 93–96, 2011.

- [53] e. a. B. Cappi, « "Direct inkjet printing of Si₃N₄: Characterization of ink, green bodies and microstructure," » *Journal of the European Ceramic Society*, vol. 28, pp. 2625–2628,, 2008.
- [54] B. Dermeik and N. Travitzky, «"Laminated object manufacturing of ceramic-based materials," » *Advanced Engineering Materials*, vol. 22, 2020.
- [55] e. a. H. Wu, «"Experimental study of the process failure diagnosis in additive manufacturing based on acoustic emission," » *Measurement*, vol. 136, p. 445–453, 2019.
- [56] e. a. Y. Chen, «"Adjustment of Mechanical Properties of 3D Printed Continuous Carbon Fiber Reinforced Thermoset Composites," » vol. 16, *Polymers*, 2024, p. 2996.
- [57] e. a. M. Rossi, «"Carbon Fiber 3D Printing: Technologies and Performance—A Brief Review," » *Materials*, vol. 16, p. 7311, 2023.
- [58] J. Ghisays, «"What are the Benefits of 3D Printing?," » , Sep. 22, 2023. [En ligne]. Available: <https://www.allprintheads.com/blogs/news/what-are-the-benefits-of-3d-printing>.
- [59] P. F. e. a. R. Chaudhary, «"Additive manufacturing by digital light processing: a review," » *Progress in Additive Manufacturing*,, vol. 8, p. 331–351, 2023.
- [60] S. C. J. a. A. A. Sheikh, «"3D printing in aerospace and its long-term sustainability," » *Virtual and Physical Prototyping*, 2015.
- [61] I. D. e. al, «"Impact of mechanical and microstructural properties of potato puree–food additive complexes on extrusion-based 3D printing," » *Food and Bioprocess Technology*,, vol. 11, p. 2021–2031, 2018..
- [62] L. L. e. al, «"3D printing complex egg white protein objects: Properties and optimization," » *Journal of Food Engineering*, Vols. %1 sur %2232,, p. 29–36, 2018.
- [63] Z. L. a. Y. Zhang, « "3D printing: Printing precision and application in food sector," » *Trends in Food Science & Technology*, 2017.
- [64] M. S. K. e. al, «« Advances and Innovations of 3D Bioprinting Skin »,» *Biomolecules*, vol. 13, p. 55, janvier 2023.
- [65] S. R. e. A. S. Kumawat, «« Integrating additive manufacturing approaches in electrochemistry for enhanced systems — a mini review »,» *Ionics* ,2024.

- [66] A. V. P. e. al., «“The application of 3D printing technology in the fashion industry,”» *International Journal of Fashion Design, Technology and Education*, vol. 10, p. 276–283, 2017..
- [67] M. S. a. Y. Kiroglu, «“3D printing of buildings: Construction of the sustainable houses of the future by BIM,”» vol. 134, p. 702–711.
- [68] e. a. J. Lee, «“A review on 3D printed smart devices for 4D printing,”» *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*, vol. 4, p. 373–383, Jul. 2017.
- [69] e. a. I. Hager, «“3D printing of buildings and building components as the future of sustainable construction?,”» *Procedia Engineering*, vol. 151, pp. 292–299,, 2016.

Liste de reference des tableaux :

Tableau 4.1 : Méthodes de fabrication additive et leur principe, applications et résolution
S. Gade, S. Vagge, and M. Rathod, "A Review on Additive Manufacturing – Methods, Materials, and its Associated Failures," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 17, no. 3, pp. 40–63, Jun. 2023, doi: 10.12913/22998624/163001.

Liste de references des figures:

Fig.4.1. Imprimante 3D en résine <https://images.app.goo.gl/atmDD9mPnEiB2Uhg8>

Fig.4.2. Hauteur de couche pour les pièces imprimés en 3D <https://3dpros.com/guides/settings-layer-height>

Fig.4.3. Découpage et impression 3D <https://images.app.goo.gl/Z9CdrPvK38m4fzVUA>

Fig.4.4. Représentation schématique de la stéréo lithographie (SLA) R. Scopigno et al. « Digital Fabrication Techniques for Cultural Heritage », *Comput. Graph. Forum*, vol. 36, no. 1, pp. 6–21, 2017.

Fig.4.5. Imprimante stéréo lithographique (SLA) R. T. Ponni et al., « 3D Printing in Pharmaceutical Technology – A Review », *ResearchGate*, mars 2020. [En ligne]. Disponible : <https://www.researchgate.net/publication/340205522>

Fig.4.6. Frittage sélectif par laser (SLS) Gringer, « Fused Deposition Modelling (FDM), a Method of Rapid Prototyping », *travail personnel*, 15 oct. 2018.

Fig.4.7. Fabrication par Dépôt de Filament Fondu (FFF) L. van Lieshout, "Laminated object manufacturing: principle drawing," *Own work*, 15-Feb-2010.

Fig.4.8. Fabrication par stratification (laminated objecte manufacturing): schéma de principe

A. Dass and A. Moridi, "State of the art in directed energy deposition: From additive manufacturing to materials design," Coatings, vol. 9, no. 7, p. 418, 2019. doi: 10.3390/coatings9070418.

Fig.4.9. Classification des systèmes DED

<https://3dprint.com/258519/critical-parameter-inconel-studying-effects-inconel-719-during-laser-powder-bed-fusion/>

Fig.4.10. Principe de fonctionnement du procédé LPFD

PCBWay, "Online Digital Light Processing (DLP) 3D printing service", pcbway.com, <https://www.pcbway.com/rapid-prototyping/3d-printing/dlp.html>.

Fig. 4.11. Un schéma illustrant la configuration DLP

<https://www.creality3dofficial.com/blogs/news/what-are-sla-dlp-and-lcd-resin-3d-printers-what-are-their-molding-principles-and-differences>

Fig. 4.12. Différences of SLA et DLP et LCD

<https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagram-of-LCD-type-3D-printer-fig1-372325634>

Fig. 4.13. Schéma d'une imprimante 3D de type LCD

Dizon J., Espera Jr.A., Chen Q., Advincula R. Mechanical characterization of 3D-printed polymers. Journal of Additive Manufacturing 2018; 20: 44–67.

Fig. 4.14. Distribution des matériaux en impression 3D

S. Gade, S. Vagge, and M. Rathod, "A review on additive manufacturing – Methods, materials, and its associated failures," Adv. Sci. Technol. Res. J., vol. 17, no. 3, pp. 40–63, Jun. 2023. doi: 10.12913/22998624/163001.

Fig. 4.15. Différentes pièces composites en PLA renforcé

Plasticmold.net, « Moulage ABS - Moulage par injection plastique ABS sur mesure », [En ligne]. Disponible sur: <https://www.plasticmold.net/ar/العلامة-صب/>.

Fig. II.24. Matériau ABS (acrylonitrile butadiène styrène)

<https://firstmold.com/ar/guides/peek-plastic/>

Fig. II.25. Plastique polyether ketone (peek)

<https://markforged.com/fr/materials/continuous-fibers/continuous-carbon-fiber-fr>

Fig. 4.18. Principe du dispositif d'extrusion pour la fabrication

<https://www.boutique-resine-epoxy.fr/tissus-de-carbone/606-fibrette-carbone-hachee-6mm.html>

Fig. 4.19. Configuration de l'impression 3D LITA (b) Fonctionnement de l'impression 3D LITA

<https://createdigital.org.au/tag/3d-printing/>

Chapitre 3:
Modélisation
et conception
3D

III.Chapitre 3 : conception 3D et réalisation des éprouvettes

III.1. Introduction:

Après avoir étudié les différents types d'impression 3D et leur impact sur les propriétés des matériaux photopolymères, nous aborderons plusieurs étapes importantes pour réaliser une série de pièces. Cela commence par la détermination précise des dimensions pour les essais de traction et de flexion, et leur conception dans SolidWorks afin de permettre la visualisation du modèle avant sa fabrication finale. Nous passerons ensuite à l'impression avec deux matériaux et imprimantes différents : un photopolymère ABS Like+ avec une imprimante SLA, et un polymère ABS avec une imprimante FDM. Ces impressions ont été réalisées en dehors de l'université, auprès de professionnels spécialisés dans l'impression 3D, afin de garantir la qualité et la précision des pièces.

III.2. Conception 3D :

Pour notre projet, nous avons sélectionné la norme ISO 37 pour les essais de traction et la norme ISO 178 pour les essais de flexion en raison de leur utilisation courante dans la caractérisation des matériaux photopolymères. Et avons choisi SolidWorks pour la conception des pièces, car il combine facilité d'utilisation, avancées en conception mécanique et haute performance.

III.2.1. Définition SolidWorks :

SolidWorks est un logiciel de modélisation 3D avancé basé sur le concept de conception paramétrique. Ce logiciel permet une gestion intégrée des pièces, des assemblages et des mises en plan, facilitant ainsi la conception et le développement de produits.

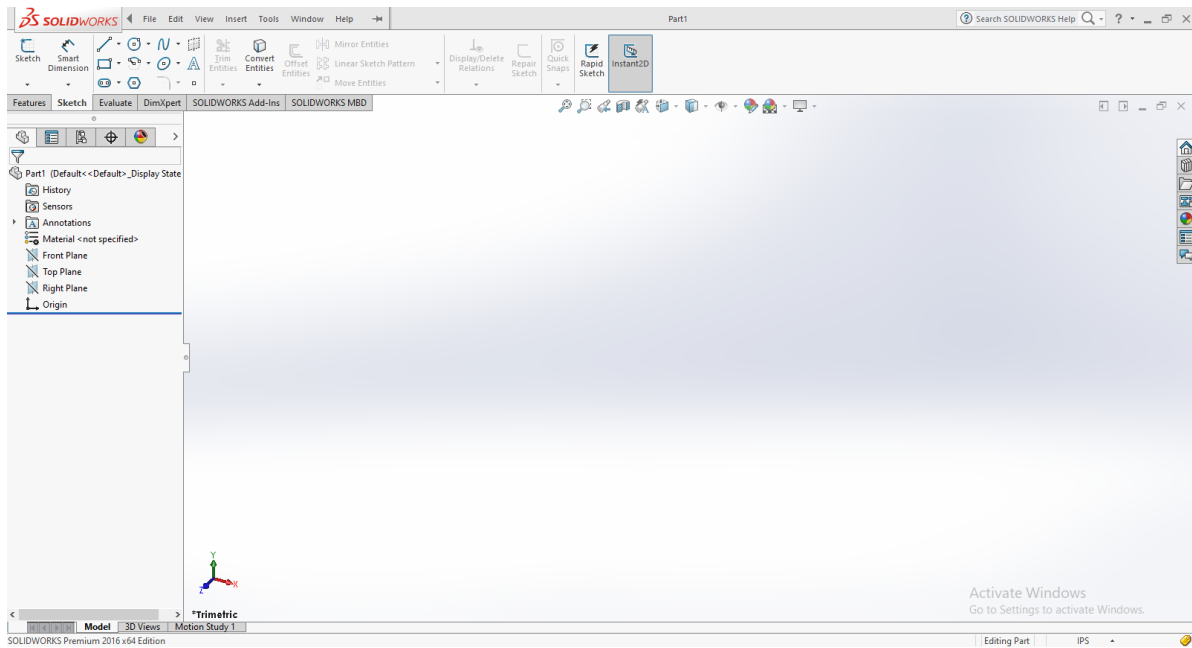


Fig. III.1. Interface du logiciel SolidWorks

III.2.2. Préparation des fichiers pour l'impression des éprouvettes :

III.2.2.1. Modèles des éprouvettes de traction :

Pour matériaux ABS Like+ :

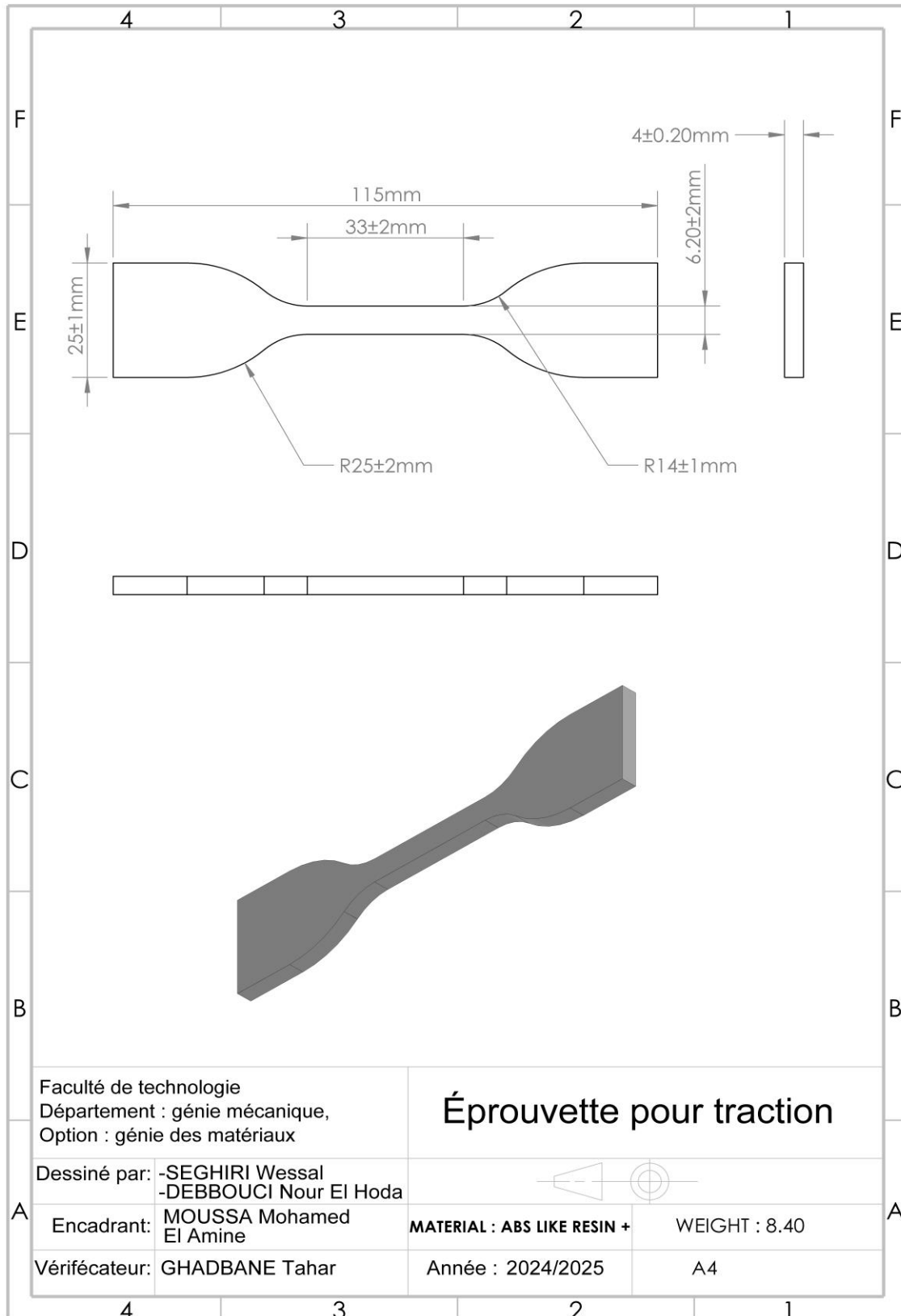


Fig. III.2. Mise en plan de l'éprouvette de traction -Iso 37 type 1 - matériaux ABS Like +

Pour matériaux ABS:

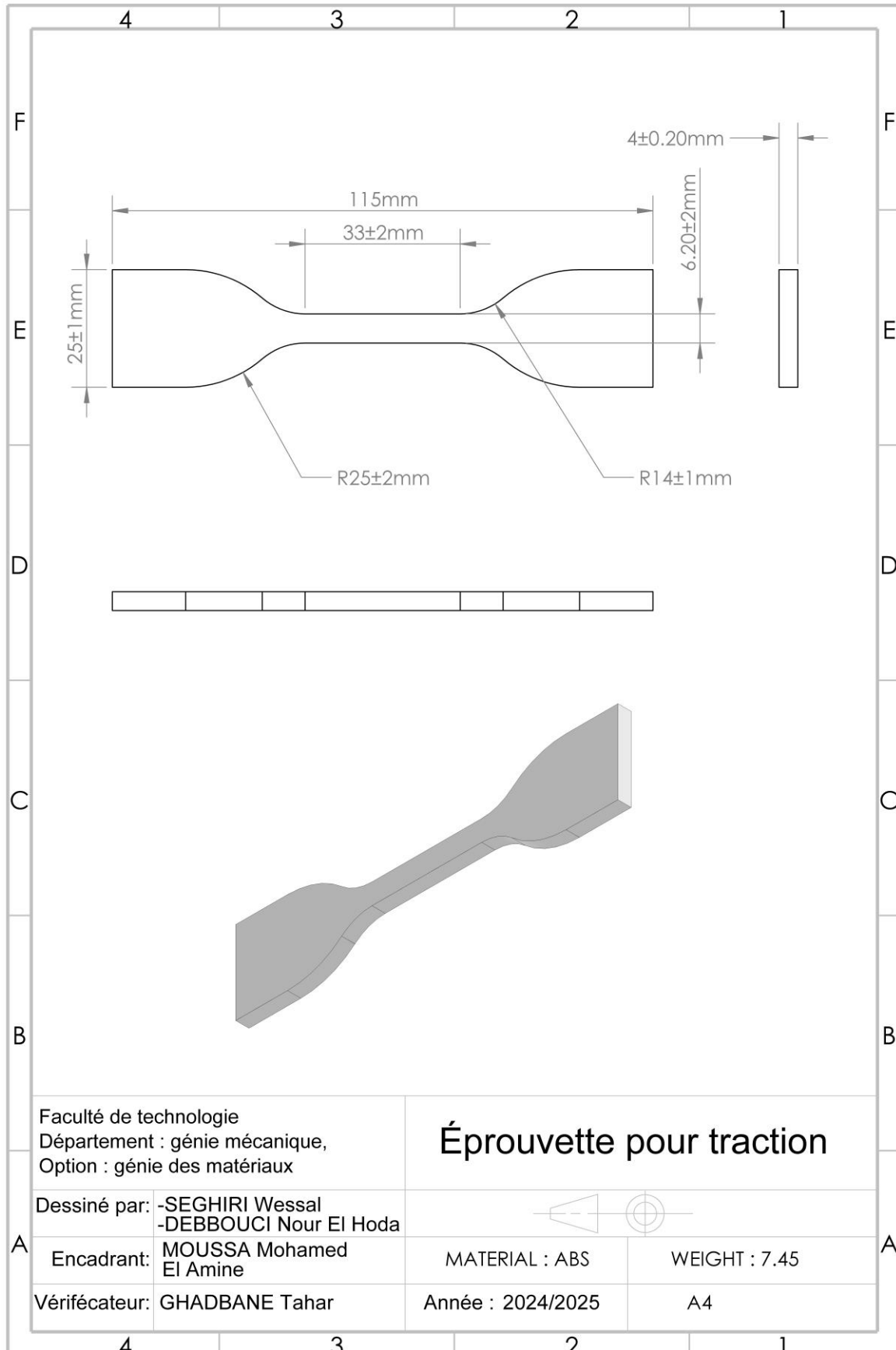


Fig. III.3. Mise en plan de l'éprouvette de traction -Iso 37 type 1 - matériaux ABS

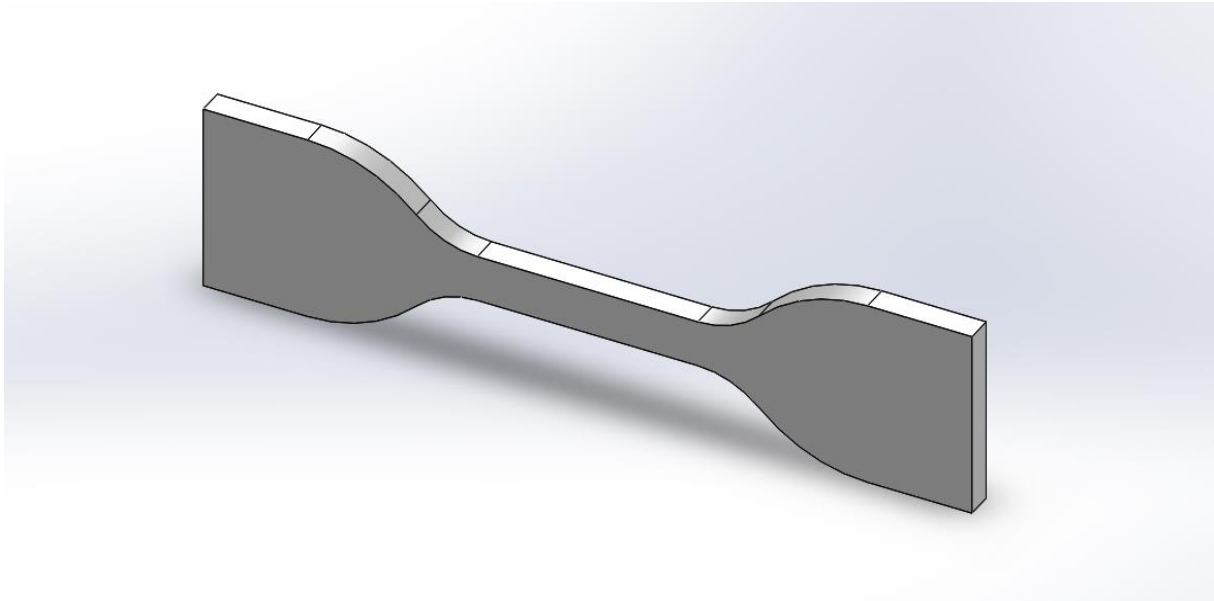


Fig. III.4.Présentation plus lisible de l'éprouvette – matériaux ABS Like +

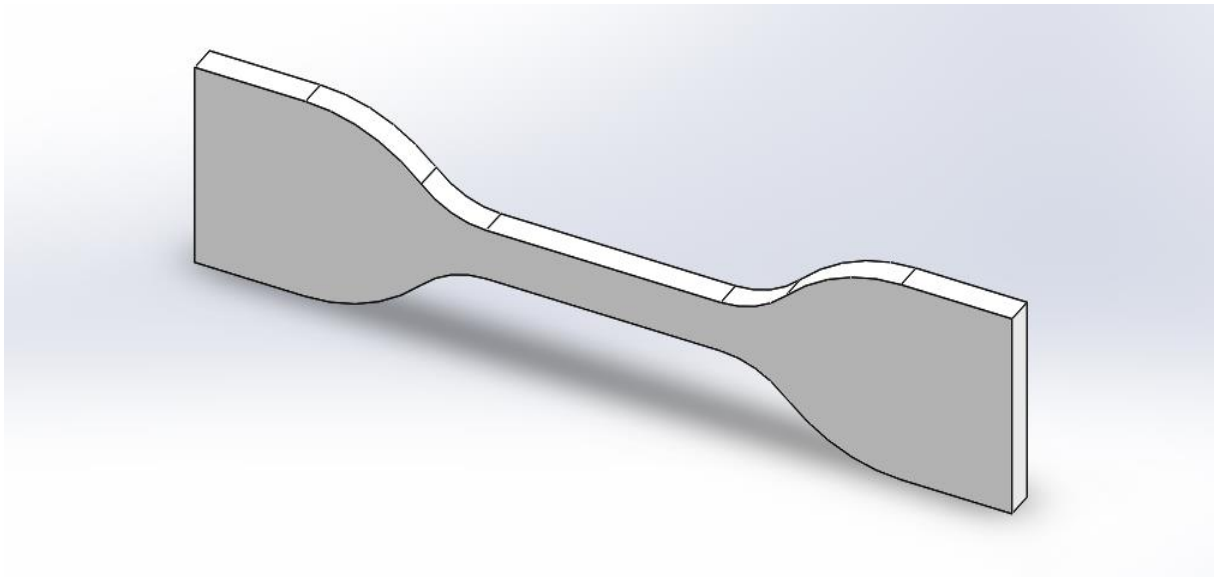


Fig. III.5.Présentation plus lisible de l'éprouvette – matériaux ABS

III.2.2.2. Modèles des éprouvettes de flexion :

Pour matériaux ABS Like+ :

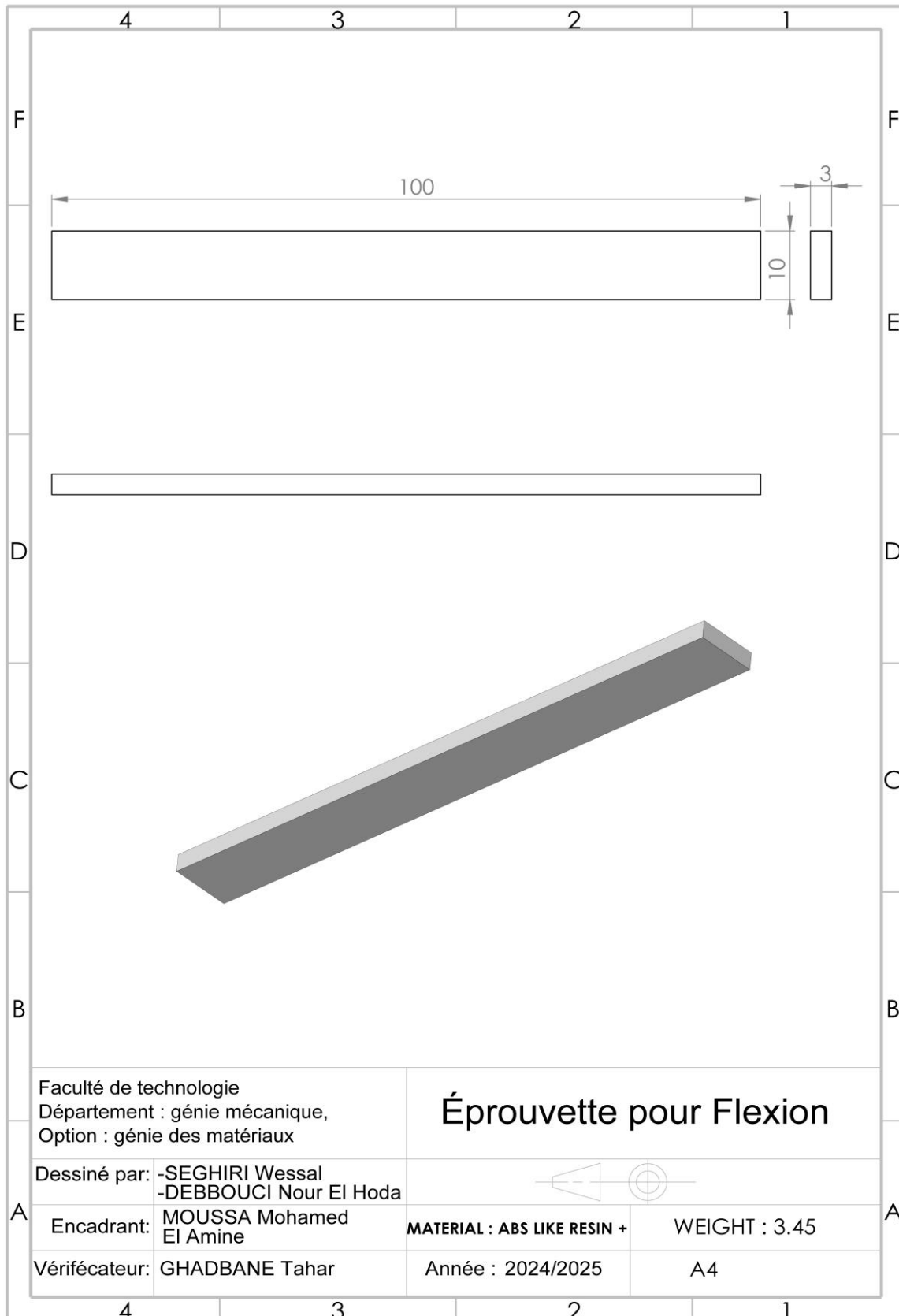


Fig. III.6. Mise en plan de l'éprouvette de flexion -Iso 178 - matériaux ABS Like +

Pour matériaux ABS :

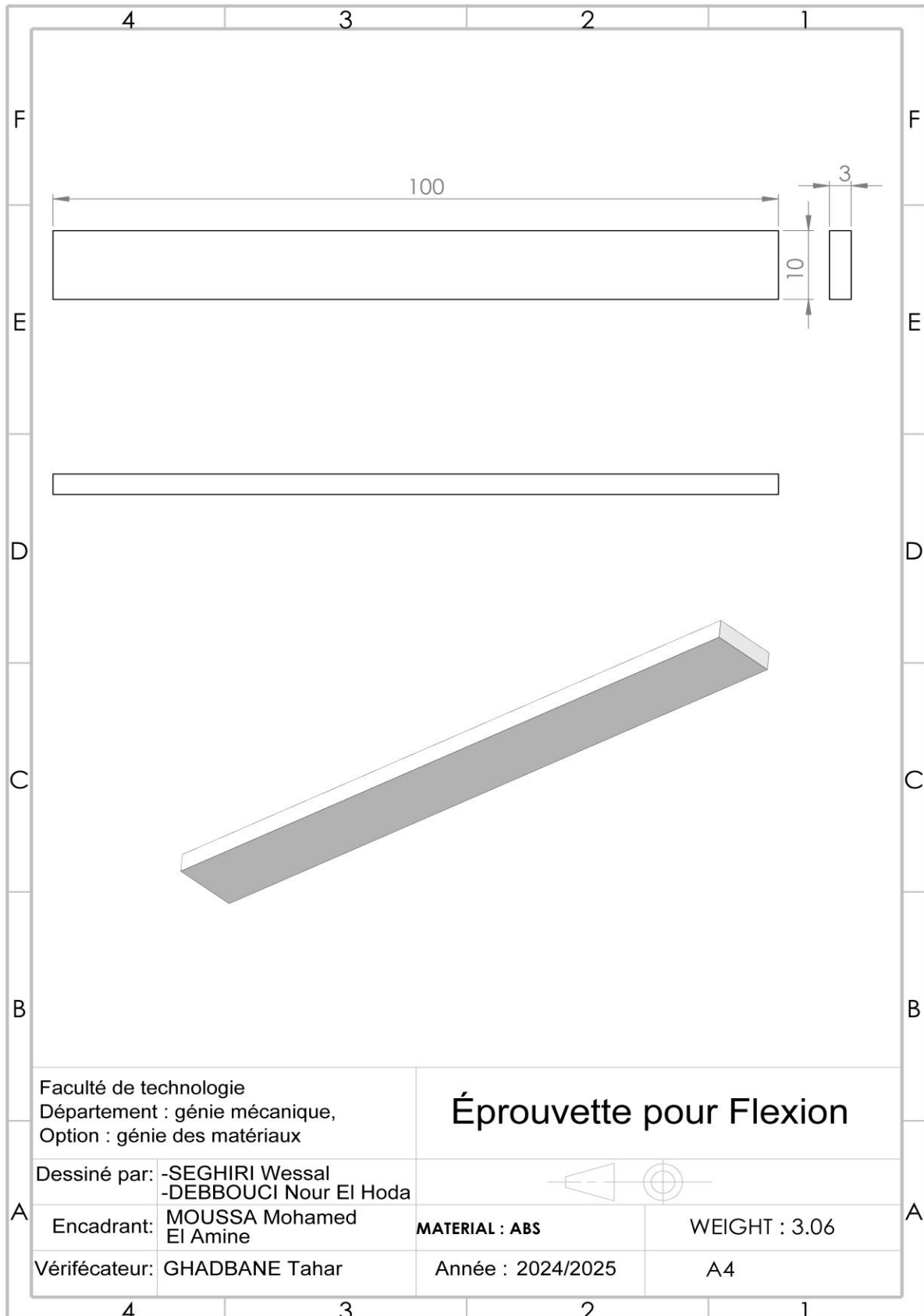


Fig. III.7. Mise en plan de l'éprouvette de flexion -Iso 178 - matériaux ABS

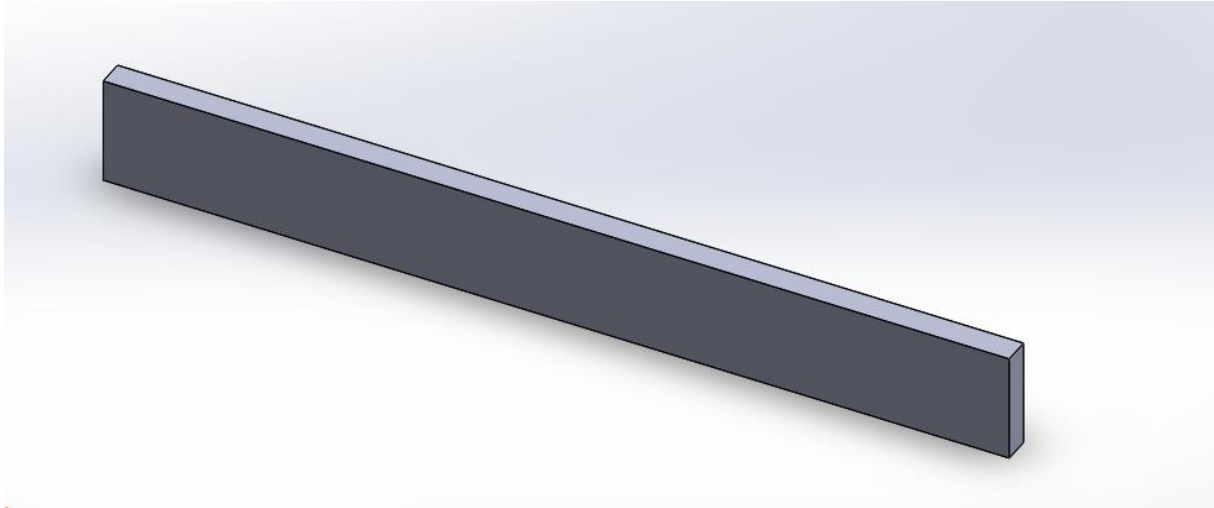


Fig. III.8.Présentation plus lisible de l'éprouvette de flexion - matériaux ABS Like +

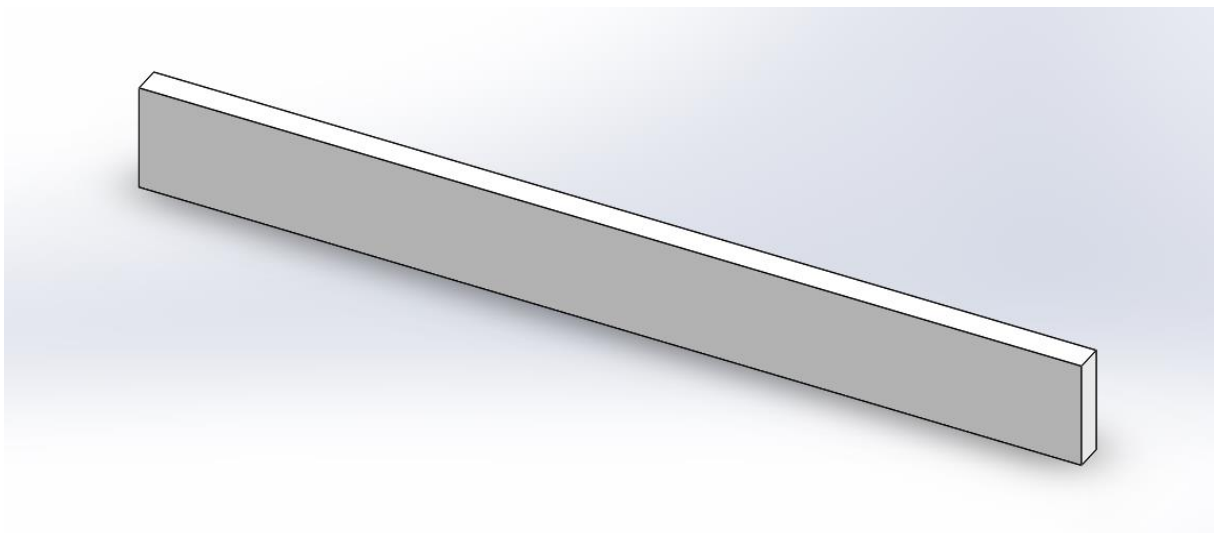


Fig. III.9.Présentation plus lisible de l'éprouvette de flexion - matériaux ABS

III.3. Impression 3D des éprouvettes pour les essais:

III.3.1. Impression SLA des éprouvettes en ABS-LIKE + :

Après la conception du modèle et son export au format STL, celui-ci est ouvert dans un logiciel appelé CHITUBOX afin de le préparer pour l'impression avec une résine ABS-like sur une imprimante SLA.

III.3.1.1. Définition du logiciel CHITUBOX :

CHITUBOX est un logiciel d'impression 3D gratuit utilisé pour découper un modèle en fines couches, générer des instructions d'impression pour chaque couche et produire un fichier final pouvant être lu par l'imprimante.

III.3.1.2. Paramètres de découpage (slicing) utilisés :

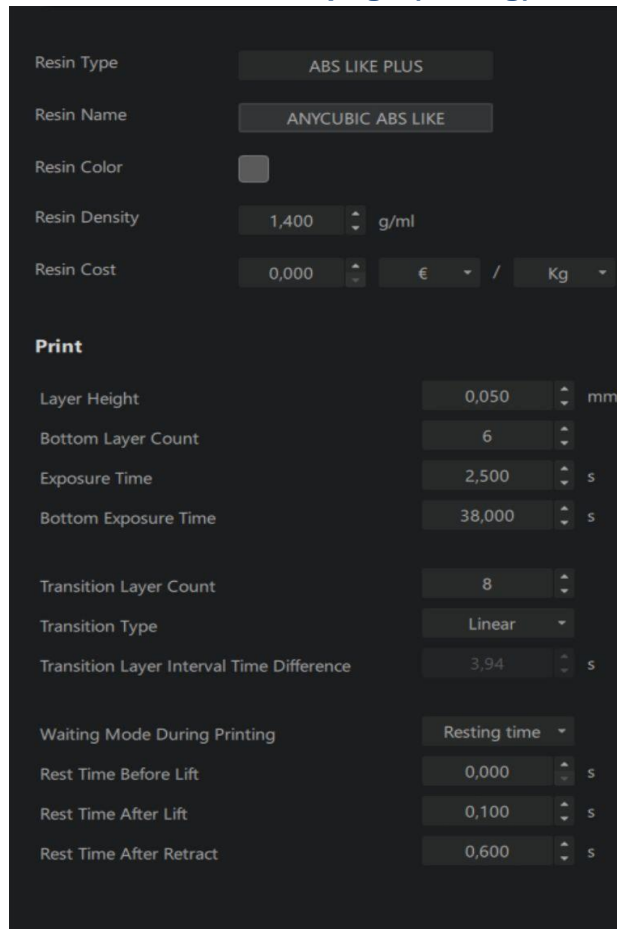


Fig. III.10. Paramètres de la résine et d'impression - Interface CHITUBOX

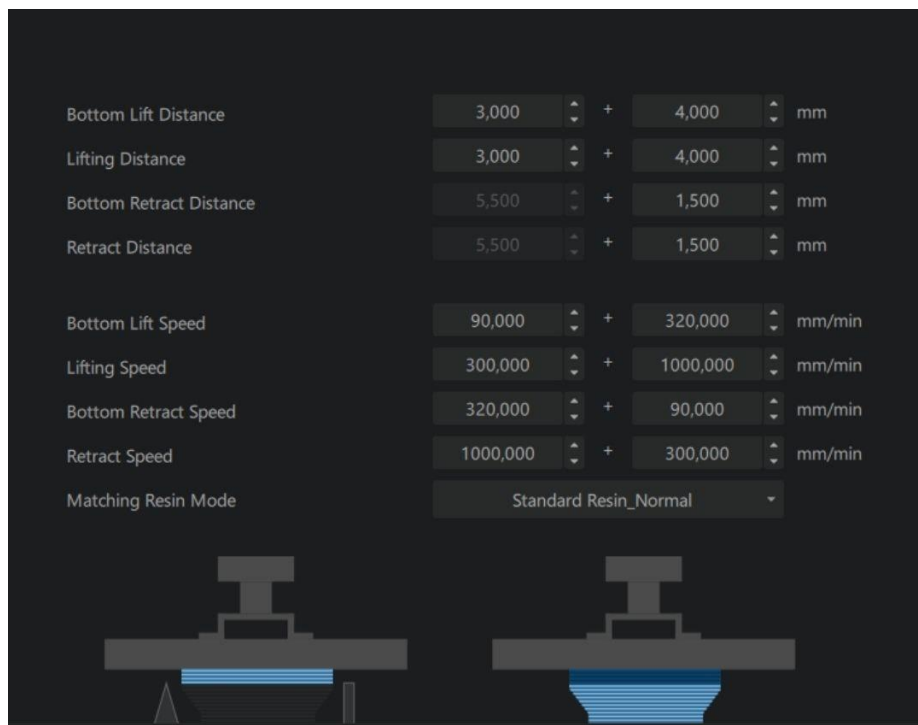


Fig. III.11. Paramètres de mouvement - Interface CHITUBOX

III.3.1.3. Préparation de la résine et lancement de l'impression

Avant de commencer l'impression, nous nettoyons soigneusement le bac de la machine SLA, puis le remplissons d'une quantité suffisante de résine photopolymère de type ABS+. Nous mélangeons la résine en agitant manuellement le flacon avant de la verser afin d'assurer l'homogénéité et d'éviter toute séparation des composants, Après avoir versé la résine dans le bac, le processus d'impression démarre dès que nous appuyons sur « Imprimer » dans le logiciel ou sur l'écran de l'imprimante.

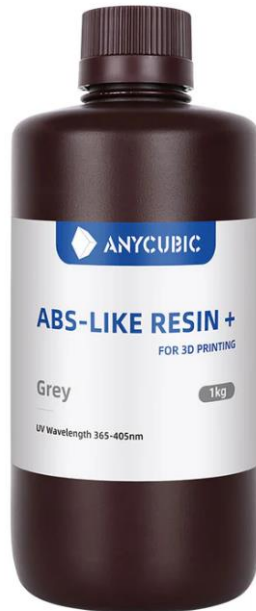


Fig. III.12. Bouteille de résine photopolymère ABS-Like+ utilisée pour l'impression SLA.

Tableau III.1. Données techniques de matériau ABS-Like+ fournies par le fabricant

Specifications	ABS Like Resin +
UV wavelength	365-405nm
Elongation at break	20-30%
Density	1.05-1.25g/cm ³
Molding shrinkage	3.72-4.24%
Viscosity	220-250 cP/mPa·s
Flexural strength	50-60 MPa
Flexural modulus	1400-1600 MPa
Tensile strength	35-55 MPa
Conservation period	18 months

III.3.1.4. Temps d'impression 3D (résine ABS-like en SLA):

Avec les paramètres de découpage définis (épaisseur de couche de 0,05 mm), le modèle est imprimé sur une imprimante SLA utilisant une résine de type ABS-like. Le temps d'exposition est de 2,5 secondes par couche standard, et de 38 secondes pour les couches de base. En prenant en compte les vitesses de levage, de rétractation et les temps de repos, la durée d'impression par couche est estimée à environ 3,9 secondes pour les couches standard, et à 39,4 secondes pour les couches de base. Pour une impression de 4 mm de hauteur, le temps d'impression total est estimé à environ 8 minutes et 45 secondes.

III.3.1.5. Étape de lavage (Wash) :

Après l'impression, l'échantillon est recouvert d'une couche de résine liquide non durcie. Il est donc essentiel de le nettoyer soigneusement pour garantir de bons résultats mécaniques et esthétiques.

Méthode de lavage :

Outils utilisés :

- Gants en nitrile et lunettes pour la protection.
- Un seau ou un récipient contenant de l'alcool isopropylique (Isopropylique Alcool - IPA) à une concentration de 95 % ou plus.
- Une éponge de nettoyage fixée à un manche (comme l'outil Super Clean montré sur la Fig. III.15).

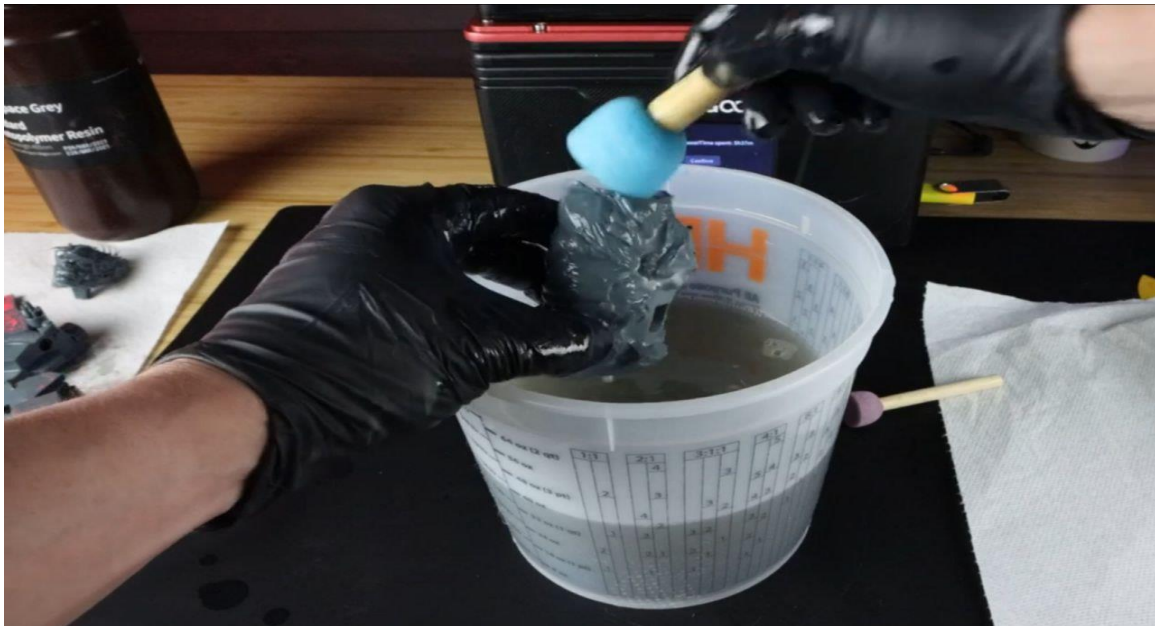


Fig. III.13. Une éponge de nettoyage des pièces imprimées.

- Un vaporisateur contenant de l'alcool (optionnel).
- Un panier de lavage dédié.

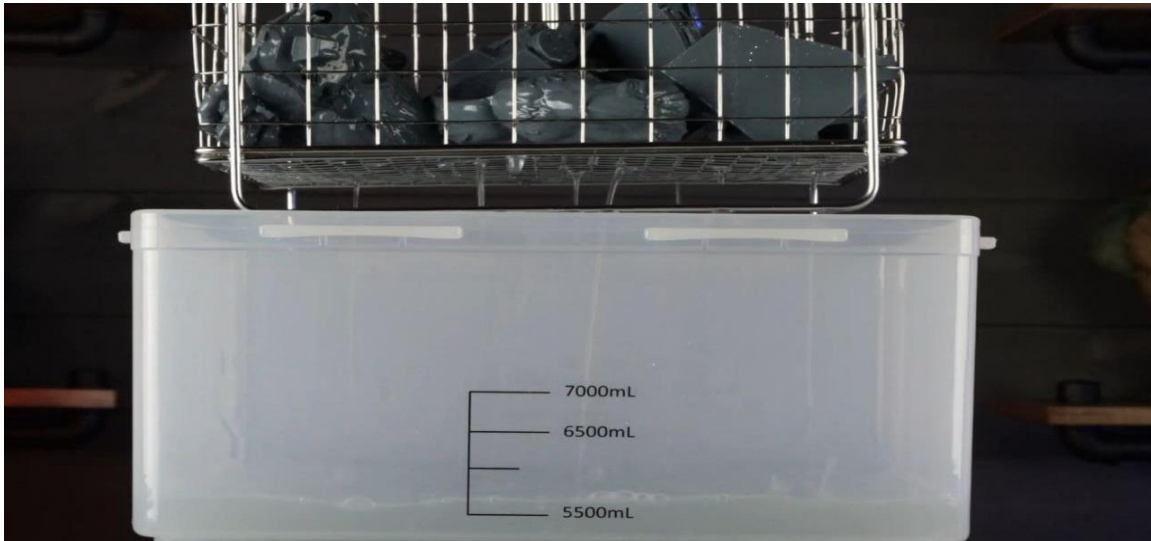


Fig. III.14. Un panier de lavage.

- Des essuie-tout pour le séchage temporaire.

Étapes de travail :

1. On place directement les échantillons dans un récipient rempli d'alcool IPA et on les laisse tremper pendant 5 à 10 minutes.
2. Après le trempage, on frotte délicatement les échantillons avec des éponges imbibées d'alcool afin d'éliminer les résidus de résine.
3. Ensuite, on peut utiliser une machine de lavage comme le Mercury X : on place les éprouvettes dans le panier de lavage, puis on l'immerge dans l'appareil où l'alcool circule continuellement pour atteindre les zones difficiles d'accès.
4. Une fois le cycle de lavage terminé, on déplace le panier de haut en bas et de gauche à droite afin de faciliter l'évacuation de l'excès d'alcool.
5. Enfin, on dépose les échantillons sur des essuie-tout propres et on les laisse sécher complètement (100 %) avant de passer à l'étape du durcissement aux UV.

III.3.1.6. Description du temps de post-polymérisation aux UV (Cure Time) :

Après avoir terminé les étapes de lavage et de séchage, vient l'étape de post-polymérisation par lumière ultraviolette (UV Curing), qui est essentielle pour durcir complètement la résine. Ce processus améliore les propriétés mécaniques de la pièce imprimée, renforce la qualité de surface, et augmente sa résistance chimique ainsi que sa durabilité.

Durée de post-polymérisation :

Elle varie généralement entre **5 et 30** minutes, selon plusieurs facteurs, notamment : Le type de résine utilisé , L'épaisseur et la taille de la pièce et l'efficacité de la machine de polymérisation et l'intensité des UV émis.

Source de lumière :

On utilise une machine de photopolymérisation UV (comme illustrée sur la figure), qui émet une lumière à une longueur d'onde adaptée souvent autour de 405 nm, assurant une photopolymérisation homogène de la résine.



Fig. III.15.Machine de photopolymérisation UV (Cure machine)

III.3.1.7. Résultat de l'impression :

Fig. III.16.Résultat des éprouvettes de traction imprimés par SLA



Fig. III.17. Résultat des éprouvettes de flexion imprimés par SLA

III.4. Impression FDM des éprouvettes en ABS :

Après la conception du modèle et son export au format STL, celui-ci est ouvert dans un logiciel de découpe Cura afin de le préparer pour l'impression en technologie FDM avec un filament en ABS.

III.4.1. Définition du logiciel CURA :

Il s'agit d'un logiciel de découpage compatible avec la plupart des imprimantes FDM et s'intègre à de nombreuses applications de conception assistée par ordinateur. Il permet de convertir des modèles 3D, tels que des fichiers STL, en G-code (instructions compréhensibles par une imprimante 3D).

III.4.2. Paramètres de découpage (slicing) utilisés :

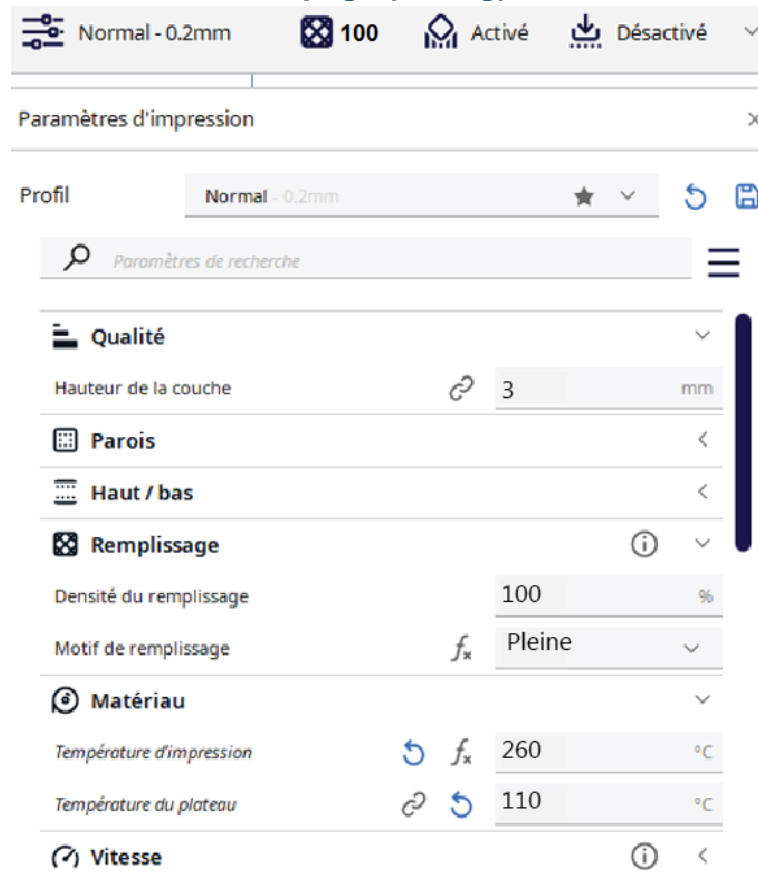


Fig. III.18. Paramètres d'impression FDM - Interface CURA

III.4.3. Préparation de filament ABS pour l'impression FDM :

Après avoir configuré les paramètres d'impression, nous insérons le filament ABS dans l'imprimante par l'entrée d'alimentation jusqu'à ce qu'il commence à sortir de la buse. Ensuite, nous appuyons sur « Démarrer » depuis l'écran de l'imprimante et surveillons les deux ou trois premières couches pour nous assurer d'une bonne adhérence et de l'absence de problèmes d'extrusion.



Fig. III.19.Filament ABS noir utilisé pour l'impression FDM

Tableau III.2.Données techniques de matériau ABS fournies par le fabricant

<u>Propriétés mécaniques (*)</u>	<u>Moulage par injection</u>		<u>Impression 3D</u>
	<u>Valeur type</u>	<u>Méthode d'essai</u>	<u>Valeur type</u>
Module en traction	2030 MPa	ISO 527 (1 mm/min)	1681,5 MPa
Limite d'élasticité à la traction	43,6 MPa	ISO 527 (50 mm/min)	39,0 MPa
Limite de rupture à la traction	-	-	33,9 MPa
Allongement à la limite d'élasticité	4,8 %	ISO 527 (50 mm/min)	3,5 %
Allongement à la rupture	34 %	ISO 527 (50 mm/min)	4,8 %
Résistance à la flexion	-	-	70,5 MPa
Module de flexion	-	-	2070,0 MPa
Résistance au choc Izod, éprouvette entaillée (à 23 °C)	-	-	10,5 kJ/m ²
Résistance au choc Charpy (à 23 °C)	58 kJ/m ²	ISO 179	-
Dureté	-	-	76 (Shore D)

III.4.4. Temps d'impression 3D :

L'impression a été effectuée à l'aide d'une imprimante FDM équipée d'un filament en ABS, Nous avons défini une hauteur de couche de 0,2 mm, La vitesse d'impression a été portée à 200 mm/s, et un taux de remplissage de 100 % a été sélectionné afin de garantir une rigidité et une

solidité optimales de la pièce. Au cours de l'impression, nous avons observé que la durée totale variait entre 45 minutes et une heure, en fonction de la géométrie de la pièce et des déplacements de la tête d'impression.

Remarques : En impression 3D par procédé FDM, particulièrement avec du filament ABS :

- il n'est généralement pas nécessaire de laver les pièces comme pour les résines en SLA, car le matériau est construit couche par couche par fusion et solidification directe du filament.
- il n'y a pas de phase de durcissement aux UV comme c'est le cas avec les résines.

Cependant, certaines étapes de post-traitement sont nécessaires pour améliorer les propriétés et l'aspect final de la pièce imprimée.

Les principales étapes sont :

- Refroidissement lent pour limiter les contraintes internes.
- Recuit thermique à 80–110 °C pendant 1 à 2 heures, suivi d'un refroidissement progressif.
- Ponçage et finition pour lisser la surface et améliorer l'apparence.

III.4.5. Résultat de l'impression :



Fig. III.20. Résultat des éprouvettes de traction imprimés par FDM



Fig. III.21...Résultat des éprouvettes de flexion imprimés par FDM

III.5. Différences d'aspect visuel entre les pièces imprimées en SLA (ABS-Like+) et FDM (ABS)

D'un point de vue esthétique, il est important de noter que la technique d'impression utilisée influence considérablement l'aspect final des pièces.

Les pièces imprimées par SLA, à l'aide de résine ABS-Like+, présentent une qualité de surface supérieure, avec des détails fins, des arêtes nettes et une finition lisse, sans stries visibles. Cette finition convient particulièrement aux pièces de présentation ou aux prototypes visuels.

En revanche, les pièces obtenues par FDM avec du filament ABS noir présentent une surface plus rugueuse, marquée par des stries visibles, notamment sur les courbes et les inclinaisons. Leur aspect est moins raffiné, mais reste adéquat pour des usages fonctionnels.

Chapitre 4 :
Expérimentations
et validation

IV. Chapitre 4 : Expérimentations et validation (exemple)

IV.1. Caractérisation mécanique des échantillons imprimés :

IV.1.1. Machine d'essai mécanique:

Les essais mécaniques ont été effectués au laboratoire de génie mécanique de l'Université de M'Sila, à l'aide de la machine Test 112, capable d'appliquer des forces jusqu'à 10 kN, cet appareil permet de réaliser des essais de traction, compression et flexion. Connecté à un ordinateur, il enregistre les données et génère les courbes d'analyse, sa conception modulaire permet une adaptation selon les besoins en hauteur ou surface de travail.

Grâce à sa précision et sa fiabilité, cette machine constitue un outil essentiel pour l'évaluation des performances mécaniques des matériaux testés.



Fig. IV.1. Machine d'essai mécanique Test 112

IV.2. Essais mécaniques standards:

Les propriétés mécaniques des éprouvettes imprimés ont été évaluées en utilisant deux matériaux distincts : l'ABS-Like pour l'impression SLA, et l'ABS pour l'impression FDM. Pour chaque type d'essai – flexion, traction – des éprouvettes ont été imprimés à partir de ces deux matériaux selon des géométries pleines standards. Des séries de tests ont été réalisées pour chaque configuration, avec trois exemplaires de chaque échantillon, afin de garantir la fiabilité et la reproductibilité des résultats.

IV.2.1. Essai de flexion 3 points:

L'essai de flexion trois points a été retenu dans le cadre de cette étude afin d'analyser le comportement mécanique des matériaux utilisés, à savoir l'ABS-Like (impression SLA) et l'ABS (impression FDM). Cette méthode permet de mettre en évidence les modes de rupture en flexion, dominée par les contraintes normales σ_x , conformément aux exigences normatives liées au rapport L/h.

Trois échantillons de chaque matériau seront soumis à ce test, Les résultats seront enregistrés par un ordinateur connecté à la machine d'essai, garantissant une collecte de données précise et fiable.

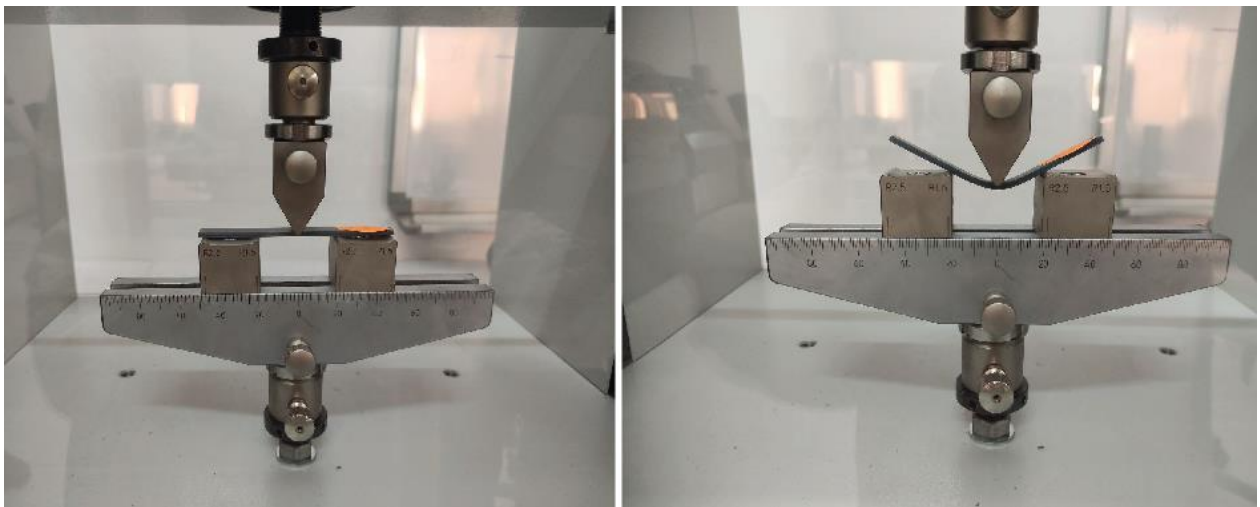


Fig. IV.2. Comportement des éprouvettes en ABS-LIKE+ lors de l'essai de flexion

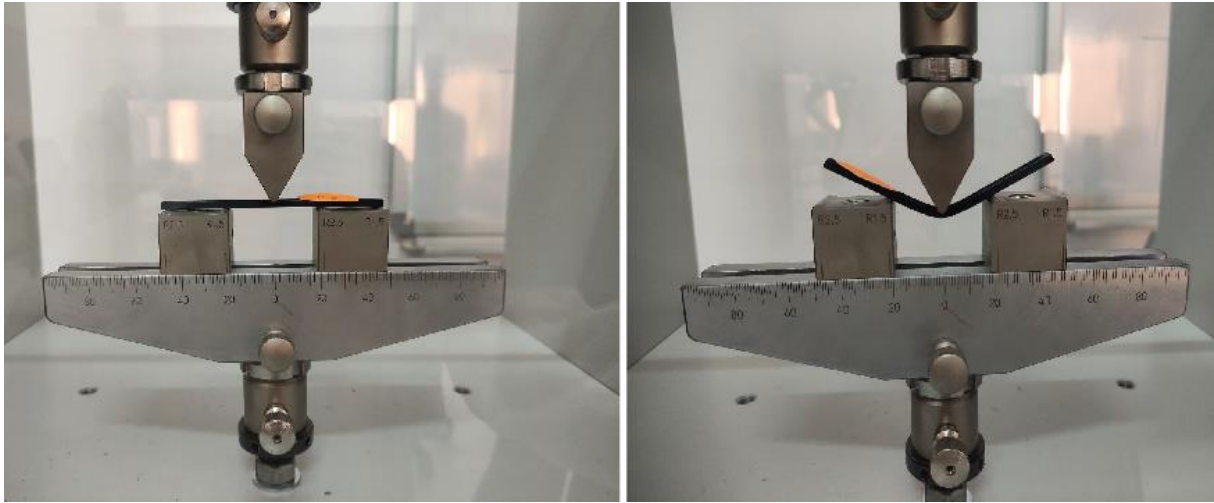


Fig. IV.3. Comportement des éprouvettes en ABS lors de l'essai de flexion

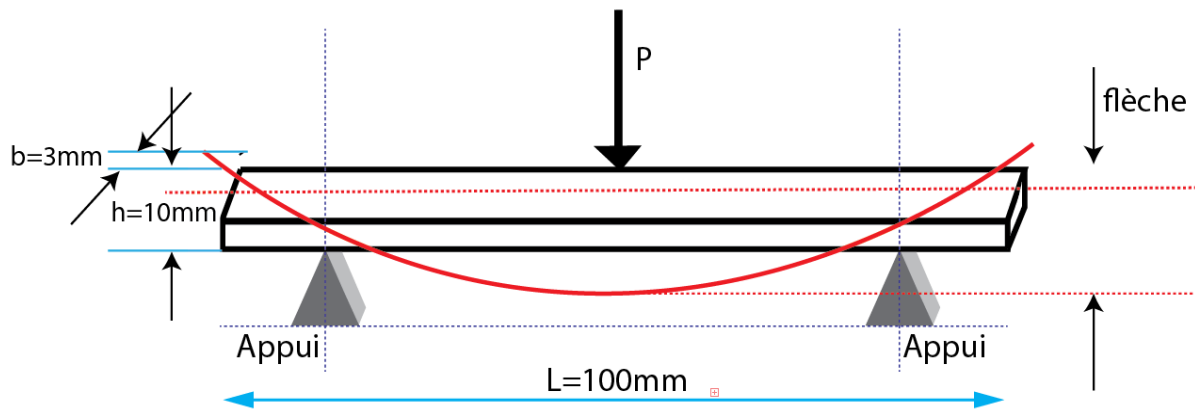


Fig. IV.4. Schéma d'essai de flexion 3 points

- **Calcul de contrainte en flexion :**

$$\sigma = \frac{3FL}{2bh^2} \quad \text{Ou } \sigma : \text{ la contrainte au milieu de l'éprouvette (MPa)}$$

F : La charge en (N)

L : La distance entre appuis (mm)

b : La largeur de l'éprouvette (mm)

h : L'épaisseur de l'éprouvette (mm)

- **Calcul de module d'élasticité ou module en flexion:**

$$E = \frac{L^3 m}{4bh^3}$$

E_f : Le module d'élasticité en flexion (MPa)

L : La distance entre appuis (mm)

b : Le largeur de l'éprouvette (mm)

h : L'épaisseur de l'éprouvette (mm)

m : la pente linéaire de la courbe charge-déflexion $m = \frac{\Delta P}{\Delta f}$

- **Calcul de déformation en flexion :**

$$\epsilon_f = \frac{6Dh}{L^2}$$

ε_f : Déformation en flexion (MPa)

L : La distance entre appuis (mm)

h : L'épaisseur de l'éprouvette (mm)

D : Fleche maximale (mm)

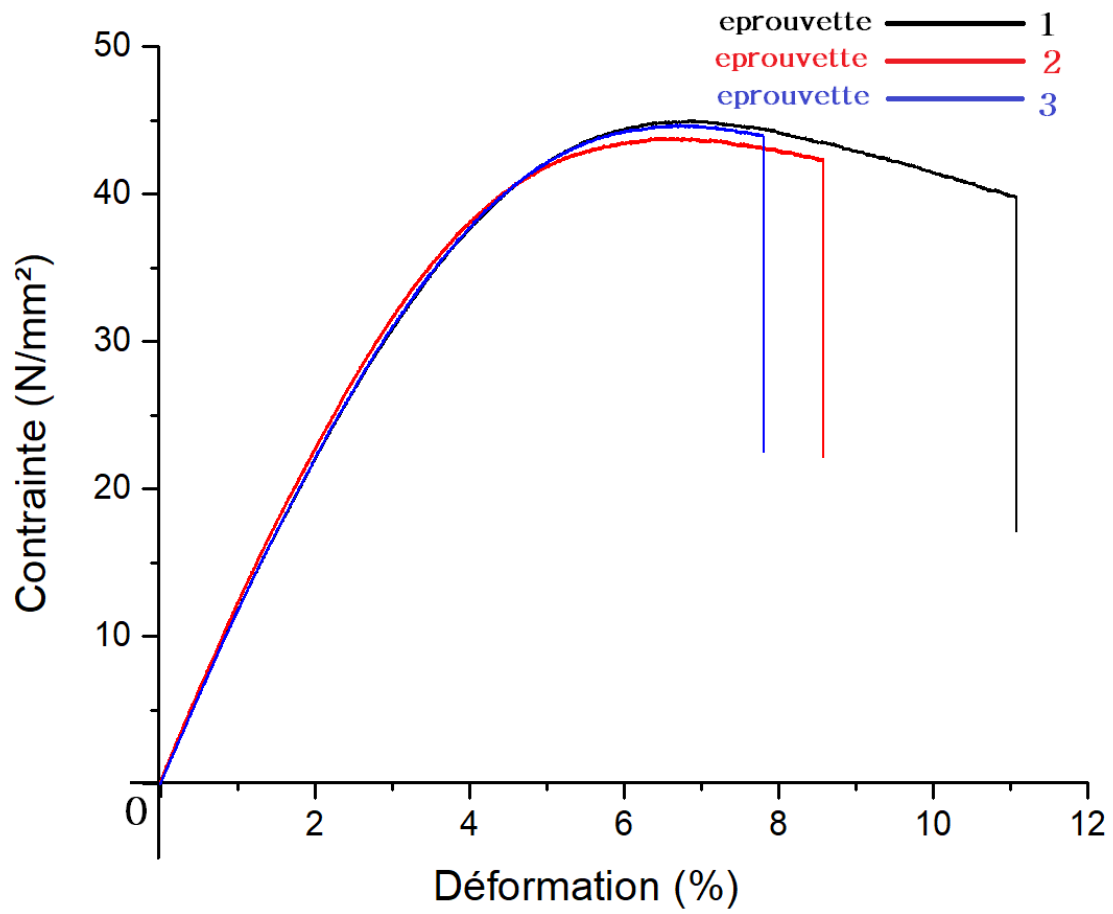


Fig. IV.5. Courbes contrainte-déformation en flexion – ABS-Like+

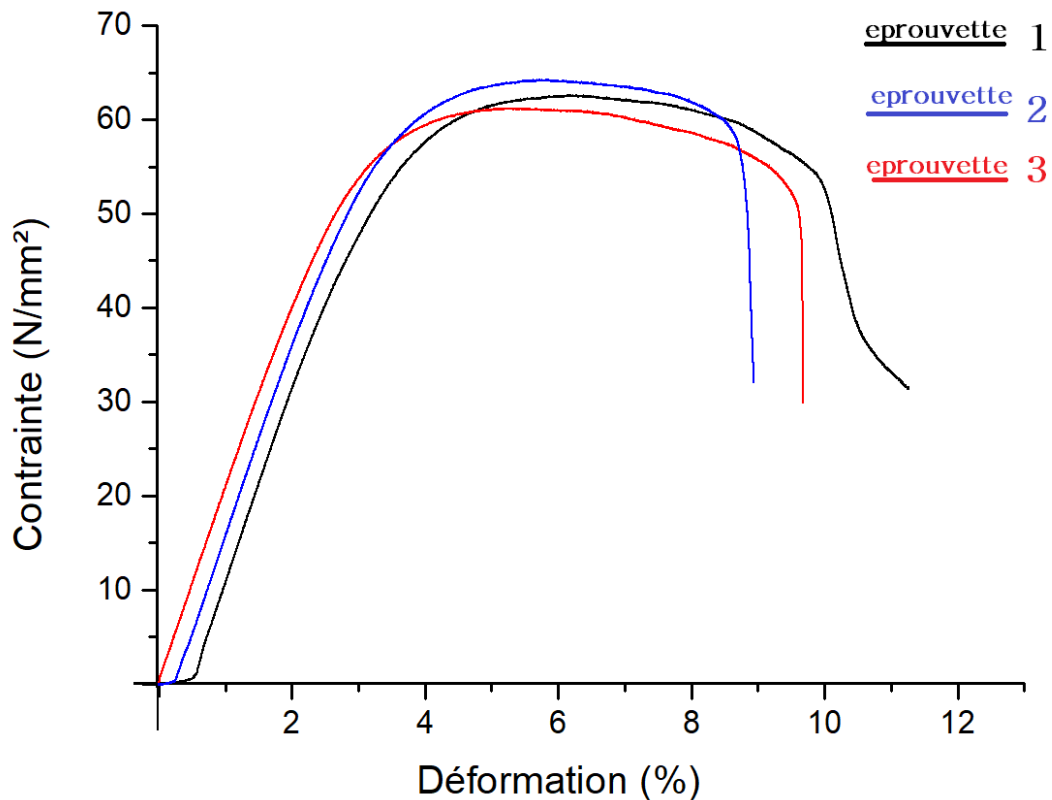


Fig. IV.6. Courbes contrainte-déformation en flexion – ABS

IV.2.2. Essai de traction:

Les essais de flexion représentent une méthode largement utilisée pour évaluer le comportement mécanique des matériaux soumis à une sollicitation en courbure, Ils permettent de mettre en évidence la résistance du matériau à la rupture ainsi que sa capacité à se déformer de manière élastique ou plastique. Ce type d'essai est particulièrement pertinent dans le contexte des matériaux polymères imprimés en 3D, car il permet d'observer les effets de la structure interne et des paramètres d'impression sur les propriétés mécaniques globales.

Dans notre procédure, nous testons trois exemplaires de chaque matériau, à savoir l'ABS-Like imprimé par SLA et l'ABS imprimé par FDM, Les échantillons sont positionnés sur deux appuis fixes de la machine d'essai, puis une charge est appliquée en leur centre selon le principe de la flexion trois points. Le programme de contrôle, lancé à partir de l'ordinateur connecté à la machine, permet de suivre en temps réel la déformation et d'enregistrer les données nécessaires à l'analyse.

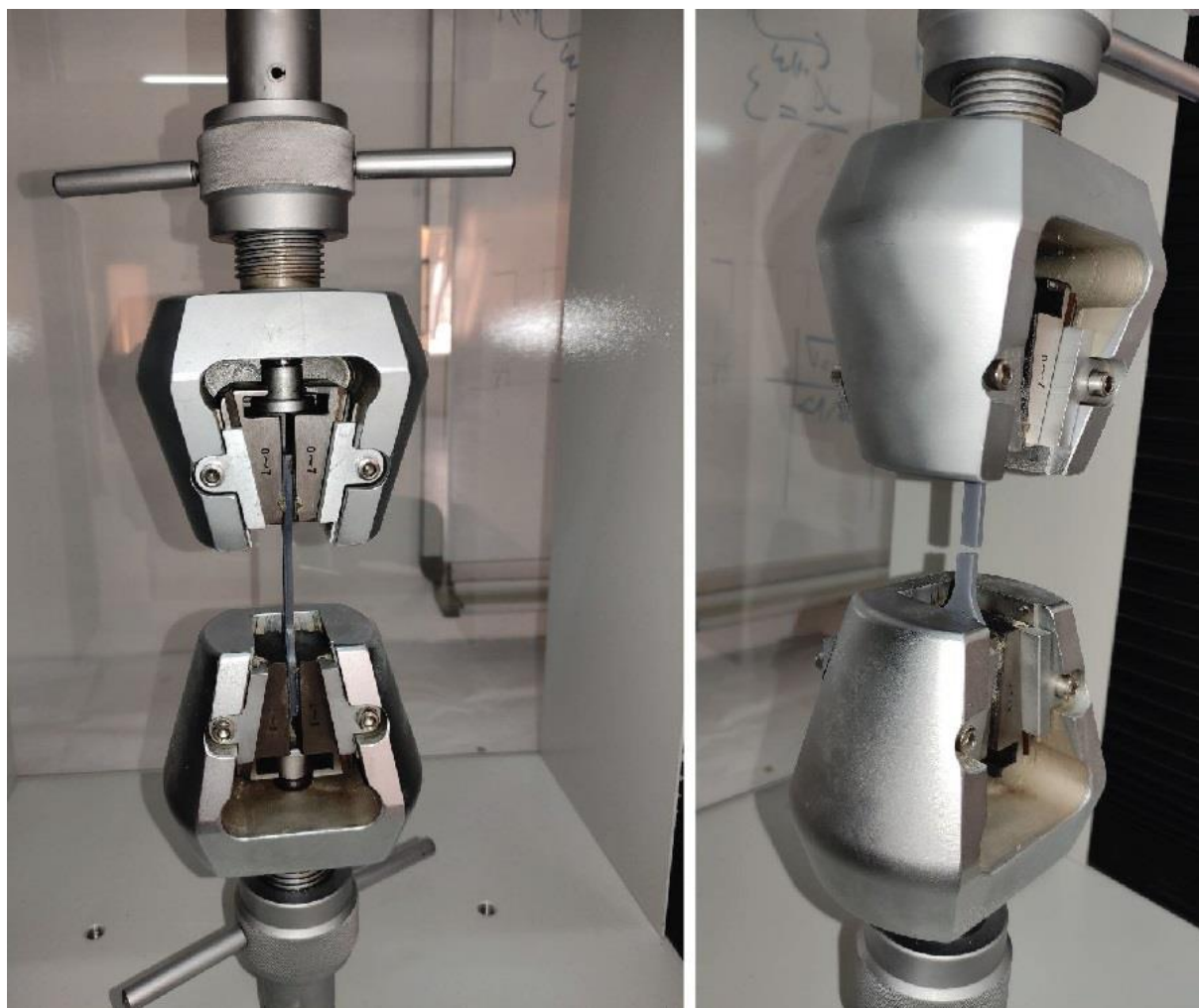


Fig. IV.7.Comportement des éprouvettes en ABS-LIKE+ lors de l'essai de traction

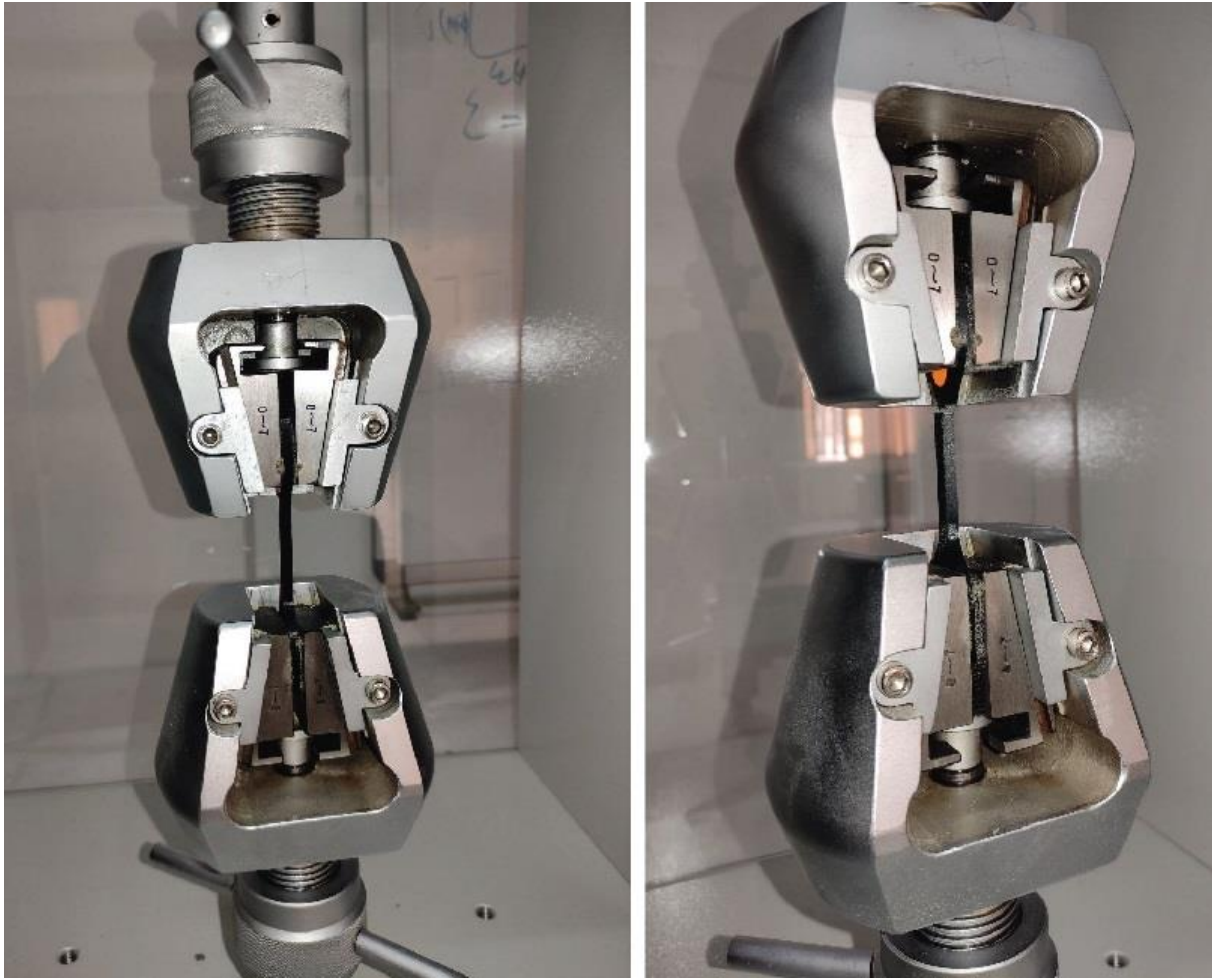


Fig. IV.8. Comportement des éprouvettes en ABS lors de l'essai de traction

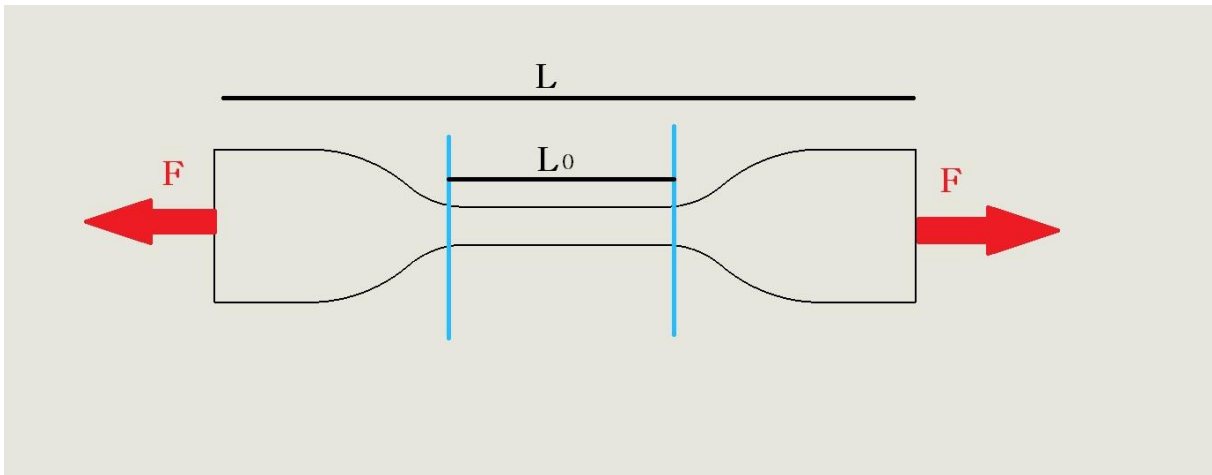


Fig. IV.9. Schéma d'essai de traction

- **Calcul de contrainte en Traction:**

$$\sigma = \frac{F}{S} \text{ d'où : contrainte de l'éprouvette en (MPa).}$$

F : La force appliquée (N).

S : La section de l'éprouvette (mm²).

- Calcule la déformation en Traction :

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \text{ d'où : la déformation de l'éprouvette.}$$

ΔL : la variation de la longueur de l'éprouvette en (mm).

L_0 : la longueur initial (mm).

- Calcule le module d'élasticité en traction :

$$\sigma = E \cdot \varepsilon \rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

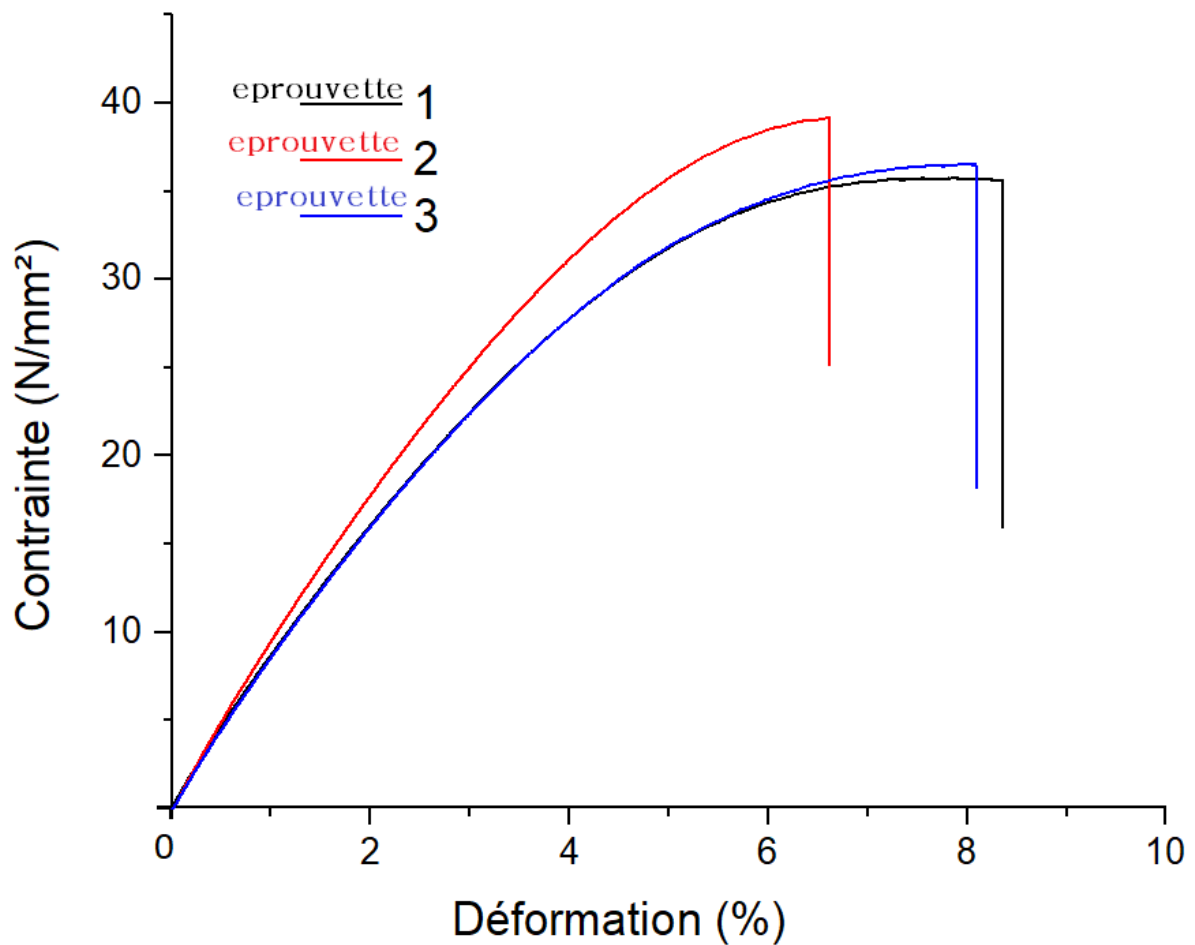


Fig. IV.10. Courbes contrainte-déformation en traction – ABS-LIKE+

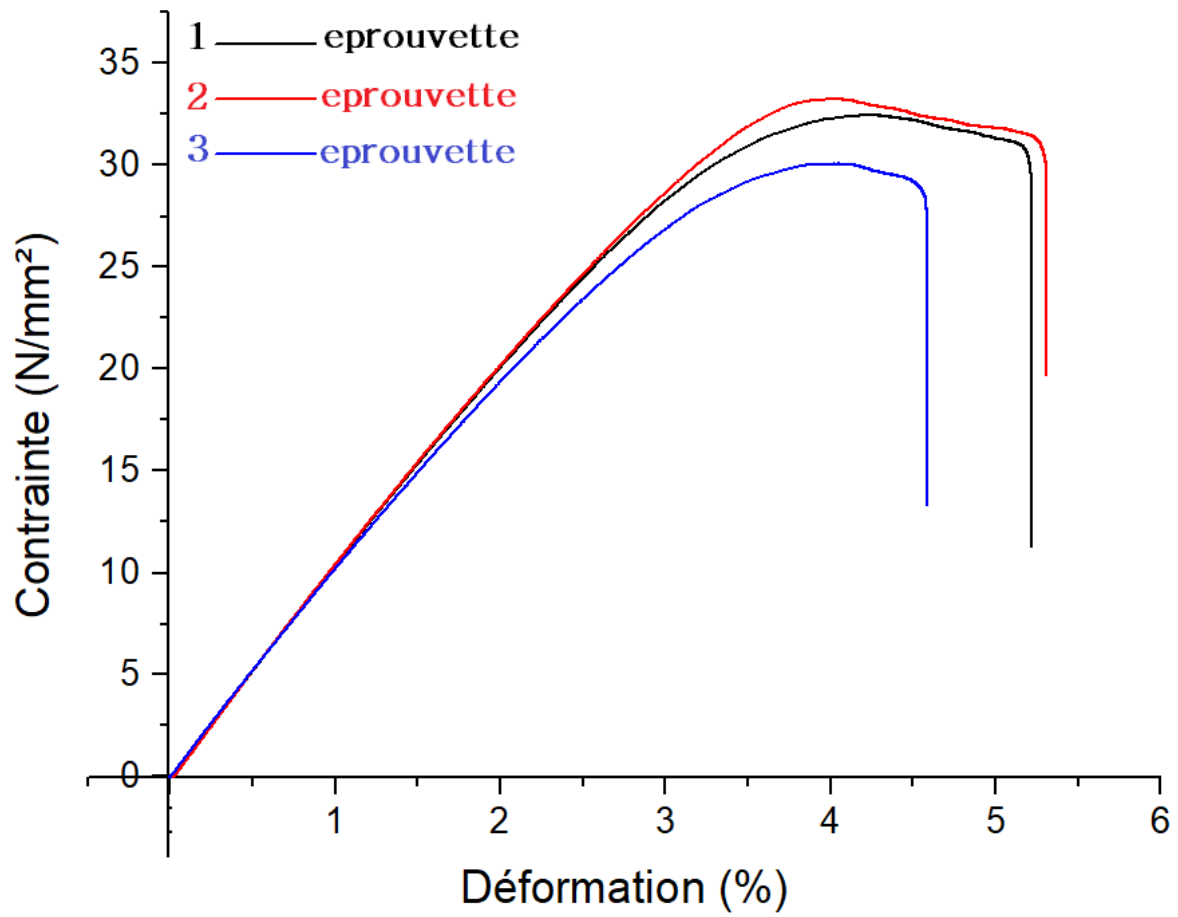


Fig. IV.11. Courbes contrainte-déformation en traction – ABS

Chapitre 5:
Résultats et
Discussion

V. Chapitre 5 : Résultats et Discussions

Dans le but de comparer les performances mécaniques des matériaux ABS et ABS-like+, des essais de traction et de flexion ont été effectués. Ces tests ont permis d'extraire des propriétés essentielles comme le module d'Young, la contrainte maximale et l'allongement à la rupture. Les résultats sont présentés et analysés ci-dessous.

V.1. Résultats de test de flexion :

Les essais de flexion ont été réalisés sur trois éprouvettes pour chaque matériau, en respectant les mêmes conditions de fabrication. Les valeurs mesurées ont permis de déterminer les propriétés mécaniques suivantes : module de flexion (E_f) et contrainte maximale en flexion (σ_f).

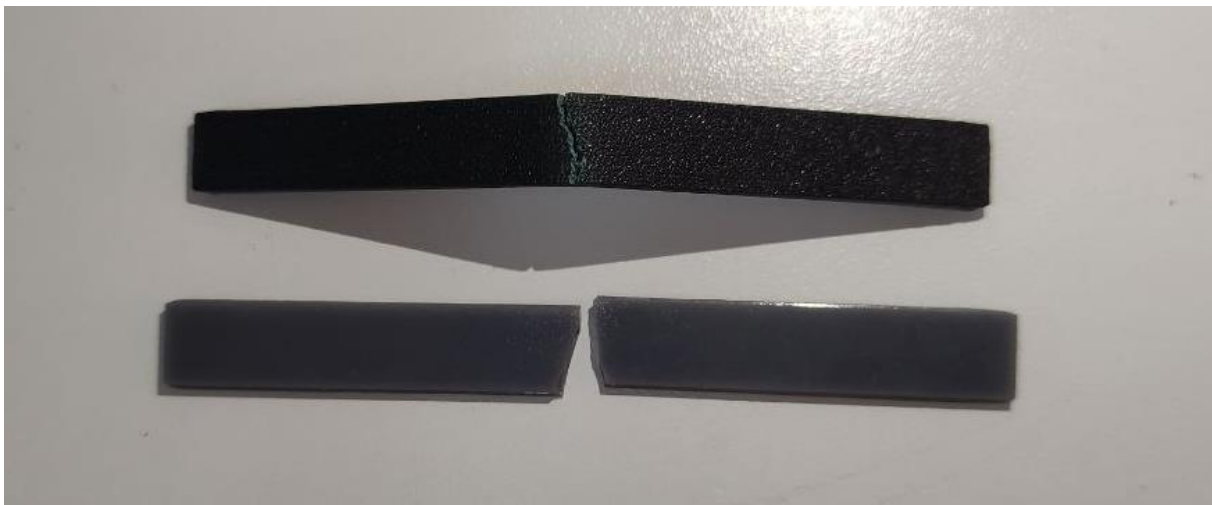


Fig. V.1...Effet de la flexion sur ABS et ABS-Like.

Les résultats moyens sont résumés dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2 : Résultats moyens des essais de flexion.

Matériau	Matériau Module de flexion E_f (MPa)	Contrainte maximale σ_f (MPa)
ABS	1700	52
ABS- like+	1200	45

Note : Les valeurs représentent la moyenne de trois essais réalisés pour chaque matériau.

À l'issue de l'essai de flexion, les échantillons en résine ABS-Like présentent une rupture nette au niveau de la zone sollicitée, tandis que les échantillons en ABS montrent une courbure marquée accompagnée d'une déformation visible, sans apparition de rupture

V.2.Discussion:

On observe que le matériau ABS- like+ affiche un module de flexion relativement faible (1200 MPa) ainsi qu'une contrainte maximale d'environ 45 MPa, traduisant une rigidité modérée.

En revanche, les éprouvettes en ABS présentent de meilleures performances mécaniques avec un module de flexion de 1700 MPa et une contrainte maximale atteignant 52 MPa, indiquant une meilleure résistance à la flexion.

Les courbes obtenues lors des trois essais montrent une bonne cohérence, confirmant la stabilité des paramètres d'impression. Ces résultats démontrent que le matériau ABS est plus rigide et plus résistant à la flexion que l'ABS -like+, qui reste toutefois plus souple.

V.3.Résultats de test de traction :

Les valeurs moyennes des propriétés mécaniques mesurées lors des essais de traction sont résumées dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Propriétés mécaniques moyennes obtenues à partir des essais de traction sur les matériaux ABS et ABS- like+.

Matériau	Module d'Young E(MPa)	Contrainte maximale (max)	Allongement à la rupture (ϵ_r) %
ABS	1550	44	6 .5
ABS -like+	1150	36	9 .2

Les Valeurs représentent la Moyenne de trois essais.

V.4.Discussion:

Les résultats montrent que le matériau ABS possède un module d'Young plus élevé (1550 MPa) que celui de l'ABS-like+ (1150 MPa), ce qui traduit une meilleure rigidité.

De plus, la contrainte maximale à la rupture pour l'ABS atteint 44 MPa, contre 36 MPa pour l'ABS -like+ : l'ABS résiste donc mieux aux efforts de traction.

En revanche, l'ABS- like+ présente un allongement à la rupture supérieur (9,2 % contre 6,5 %), ce qui révèle un comportement plus ductile. Ce matériau est donc plus apte à se déformer sans se rompre immédiatement.

Ces différences soulignent que l'ABS est plus rigide et résistant, tandis que l'ABS -like+ est plus flexible mais mécaniquement moins robuste.

V.5.Conclusion :

En conclusion, cette étude comparative entre les matériaux ABS et ABS-like+ a révélé des différences mécaniques notables, mettant en évidence l'influence de la composition chimique et du procédé de fabrication sur le comportement des matériaux. Les essais de flexion ont montré une supériorité de l'ABS en termes de rigidité et de résistance maximale, accompagnée d'un comportement ductile au-delà de la limite élastique, tandis que l'ABS-like+ a présenté une flexibilité apparente, mais également une fragilité marquée avec des ruptures soudaines, typiques des matériaux rigides et cassants. Les essais de traction ont confirmé la meilleure résistance à la rupture de l'ABS, alors que l'ABS-like+ a démontré une plus grande capacité de déformation avant rupture, traduisant une certaine élasticité, mais avec des performances mécaniques globalement moindres. Ainsi, l'ABS s'impose comme le choix le plus adapté pour les applications techniques ou structurelles nécessitant solidité et stabilité sous contrainte, tandis que l'ABS-like+ peut être privilégié dans les cas où la précision dimensionnelle et une certaine flexibilité sont requises, sans exigences mécaniques élevées. Ces résultats permettent une meilleure compréhension du comportement des photopolymères utilisés en impression 3D et ouvrent la voie à des recherches futures visant à optimiser le choix des matériaux selon les besoins spécifiques de chaque application.

VII. Conclusion générale

Ce travail représente une contribution significative dans le domaine de la caractérisation des matériaux polymères utilisés en fabrication additive, en s'intéressant particulièrement aux performances mécaniques des résines photopolymères de type ABS et ABS-like+, obtenues respectivement par impression FDM et SLA. L'objectif principal était de comparer leur comportement sous sollicitations mécaniques standardisées, dans le but d'orienter leur choix pour des applications techniques ou fonctionnelles spécifiques.

L'une des forces de cette étude réside dans l'analyse croisée des deux matériaux selon des protocoles normatifs (flexion et traction), révélant des différences notables. L'ABS, matériau thermoplastique couramment utilisé, a démontré une excellente combinaison de rigidité, de résistance aux chocs et de stabilité dimensionnelle sous charge, le rendant idéal pour des pièces fonctionnelles soumises à des contraintes mécaniques. En parallèle, la résine ABS-like+, bien que plus fragile, a présenté une grande précision dimensionnelle et une finition de surface supérieure, ce qui en fait un choix pertinent pour des prototypes ou des applications esthétiques où la résistance n'est pas critique.

Au-delà des résultats techniques, cette étude met en évidence l'importance du choix du matériau en fonction de la technologie d'impression utilisée, ainsi que les compromis nécessaires entre résistance, précision, flexibilité et facilité de fabrication. Ce travail ouvre ainsi des perspectives concrètes pour l'optimisation des matériaux polymères en fabrication additive, dans une logique d'amélioration continue de la performance et d'adaptation aux besoins industriels contemporains.

