



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté Science de technologie
Department de genie mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :

HAMIDI Chérifa

Le : dimanche 23 juin 2024

**Elaboration est caractérisation d'un
matériau biodégradable par impression
3D (projet de fin d'étude pour obtenir le
diplôme de master ainsi qu'un certificat
de start-up sous le cadre de la décision
1275)**

Jury :

Titre	BELHI Guerira,BELKAID Khmissi	Pr,MRA	Université de Biskra	Encadré
Titre	SDIRA Lakhdar	Grade	Université de Biskra	Président
Titre	HADEF Saddek	Grade	Université de Biskra	Examinteur

Année universitaire : 2023 - 2024

Dédicace

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

À mes chers parents que dieu les garde et les protégés

A mon merveilleux mari

À mes précieuses sœurs

À tous ceux qui m'ont soutenu et Encouragé

Remerciement

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

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

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

Que dieu me les protèges.

A mon adorable bébé **Safouane** la lumière de ma vie, la source infinie de joie et d'amour.

A mes chères sœurs que j'aime tellement

Je tiens à remercier mon directeur de mémoire chef département **M. Belli Guerira** pour m'avoir proposé un sujet intéressant et pour la confiance qu'il m'a accordée. Il m'a dirigé tout au long de cette étude.

Je remercie **M. Khmissi belkiad** et m'a donné les grands axes de recherche. Je le remercie aussi pour sa disponibilité.

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

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

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

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale2

Chapitre 1 : Généralité sur la fabrication additive

1. Introduction.....	4
2. Principe de la fabrication additive.....	4
3. Historique.....	6
4. Les étapes principales du procédé de fabrication additive.....	7
5. Intérêt de l'impression 3D	8
6. Description Structurelle de la Machine 3D.....	8
7. Définition.....	9
8. Principe de Fonctionnement.....	9
9. Les polymères en l'impression 3D	9
9.1.1 Thermodurcissables.....	10
9.2.1 Thermoplastiques.....	10
9.2.1 Exemples courants en fabrication additive.....	10
9.2.2 ABS (Acrylonitrile Butadiène Styène).....	10
9.2.3 PLA (Acide Polylactique).....	11

Chapitre II :

Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et Impression 3D des Éprouvettes

1. Introduction.....	15
----------------------	----

2. Conception du modèle 3D.....	15
3. Conception des échantillons.....	16
4. Exportation du fichier en format STL	17
5.Choix en introduction des paramètres d'impression	17
6.Logiciel de tranchage Ultimaker Cura	18
7.Paramètres d'impression	19
8.Exportation du fichier en G-code.....	22
9. Impression 3D.....	23
9.1.Description structurelle de la machine	23
9.2Filaments utilisés	23

Chapitre III : Étude expérimentale

1.Introduction	26
2.Préparation des éprouvettes	26
3.Essais de la traction mécaniques.....	27
4.Déroulement des essais.....	23
5.Analyse des Résultats	38
5.1.Rigidité (Module de Young).....	38
5.2.Coefficient de Poisson.....	39
5.3.Contrainte maximale.....	39
5.4.Déformation maximale.....	39
5.5.Module de cisaillement.....	40
5.6.Poids.....	40
5.7.Temps de fabrication.....	40
5.8.Rigidite (E)/Poids.....	41
6.La méthode des facteurs de pondération	41
7.Principes de la méthode des facteurs de pondération.....	41

8. Application	42
9. Attribuer des poids égaux à chaque critère des propriétés.....	42
10. Calcule le score pondéré des éprouvettes.....	43
11. Conclusion.....	44
Conclusion générale.....	46

Liste de tableaux :

Tableau 1 : les avantages et les conviennes de ABS.

Tableau 2 : les avantages et les conviennes de PLA.

Tableau 3 . Plan experience (**Experimental design**).

Tableau4 : paramètres constante d'impression 3D.

Tableau5 : Valeurs moyennes des propriétés mécaniques des éprouvettes.

Tableau 6 : Valeurs maximales et minimales.

Tableau 7 : Normalisation des critères.

Tableau 8 : Comparison des scores.

Liste de figure :

Figure1 : Principe du procédé de dépôt de filaments extrudés

Figure2: Modèle STL tranché par un trancheur CAO

Figure3: plan de l'implémentation de procédé de fabrication additive

Figure4 : Les étapes principales du procédé de fabrication additive

Figure5: Les principaux éléments de l'imprimante FDM [

Figure6 : Les thermoplastiques ABS et PLA

Figure7 ; Dessin technique de l'échantillon ISO 527-2 type 1B

Figure8 : Conception assistée par ordinateur de la pièce ISO 527-2 par SOLIDWORKS

Figure 9 : Exportation du fichier en format STL

Figure 10 : Présentation de modèle structure Cubic-subdivision dans Ultimaker cura

Figure 11 : Présentation de la configuration des parois dans Ultimaker cura

Figure 12 : Présentation de la configuration des couches supérieure et inférieure dans Ultimaker cura

Figure 13 : Principe de la méthode de dépôt de filament PLA fondu

Figure14 : Fabrication additive des éprouvettes ISO-527 par imprimante 3D trois axes.

Figure15 : Eprouvette fabriquée par imprimante 3D (FDM)

Figure16: Machine traction universelle INSTRON 5969

Figure18: Dispositif de fixation avant la rupture de l'essai de traction

Figure 19 : Courbe contrainte/déformation longitudinale et transversale de matériau PLA éprouvette 1

Figure 20 : Courbe contrainte / déformation longitudinale et transversale de matériau PLA éprouvette 2

Figure 21 : Courbe contrainte / déformation longitudinale et transversale de matériau PLA éprouvette 3

Figure22 : Rupture par traction des éprouvettes

Figure23 : Module de young des éprouvettes expérimentés

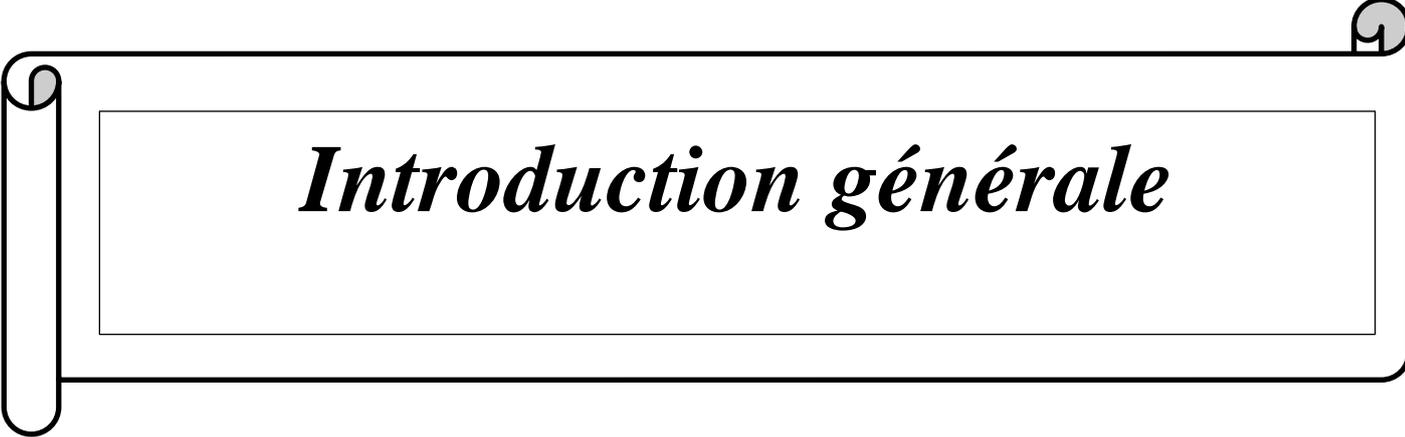
Figure24 : Coefficient de poisson des éprouvettes expérimenté

Figure25 : Contraintes maximales des éprouvettes expérimentées

Figure26 : Poids des éprouvettes expérimenté

Figure27 : Module de cisaillement des éprouvettes calcule

Figure28 : Mesure de temps de fabrication des éprouvettes.



Introduction générale

Introduction générale :

La fabrication additive des plastiques permet de produire rapidement et de manière automatisée un objet 3D, couche par couche, à partir d'un modèle conçu à l'aide de la CAO (Conception Assistée par Ordinateur). Initialement destinée à la création de prototypes et de maquettes, cette technologie répond désormais à des demandes de pièces fonctionnelles. Le processus d'impression 3D par dépôt de filament repose sur un ensemble de paramètres qui peuvent influencer la qualité de fabrication de la pièce. Pour les pièces en plastique, il est crucial d'étudier ces paramètres afin de produire des modèles performants et optimisés, capables de résister aux contraintes environnementales.

L'objectif principal de ce mémoire est de mener une étude expérimentale sur la traction des éprouvettes en plastique fabriquées par impression 3D. Cette étude vise à analyser l'effet de la variation des paramètres d'impression 3D, tels que l'épaisseur des couches de paroi et des couches supérieures et inférieures, sur les propriétés mécaniques des pièces.

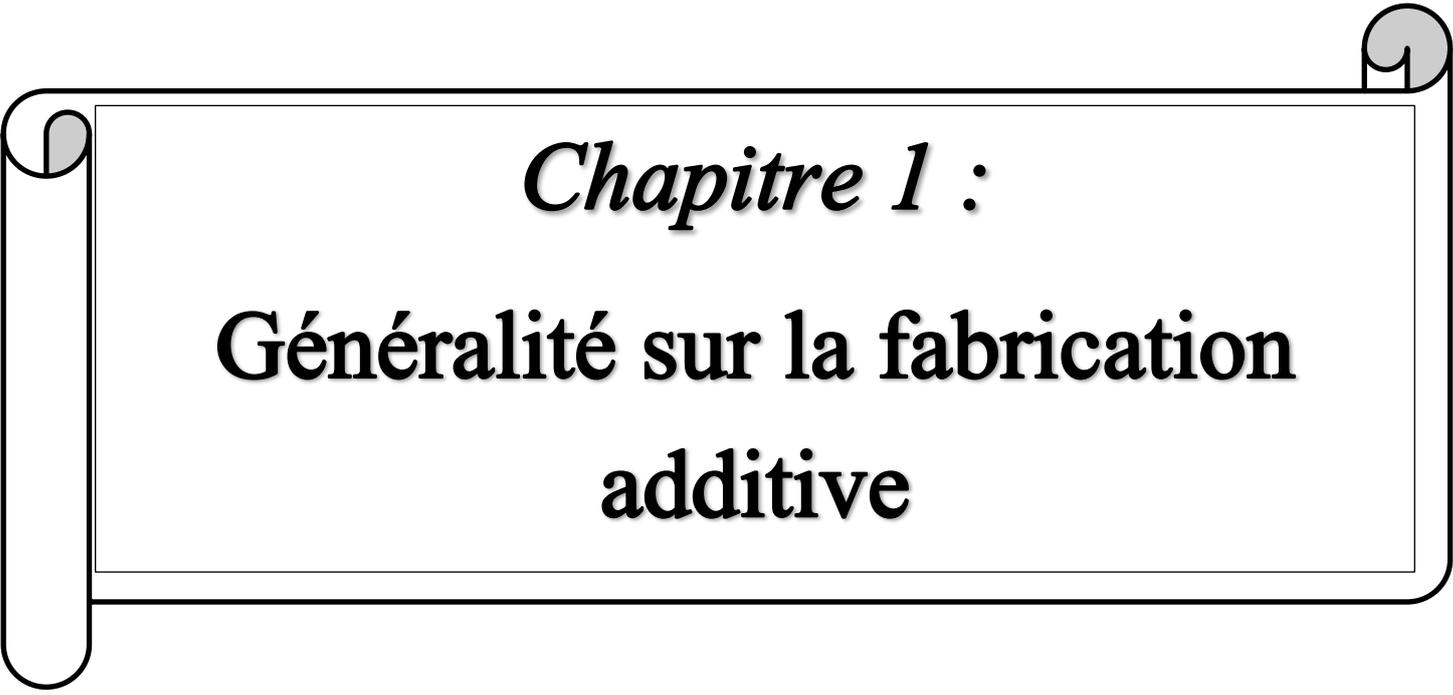
Cette étude comprend trois chapitres ;

Le premier chapitre introduit les concepts de base de la fabrication additive, également connue sous le nom d'impression 3D. Il présente l'historique, les principes de fonctionnement, les différentes technologies d'impression 3D disponibles, et les matériaux couramment utilisés.

Le second chapitre se concentre sur la conception et la fabrication des éprouvettes normalisées ISO 527 en plastique PLA (Acide Polylactique). Il détaille le processus de création des modèles 3D à l'aide de logiciels de CAO, les différentes configurations d'impression (comme l'épaisseur des couches, les motifs de remplissage, la vitesse d'impression), et les paramètres spécifiques utilisés pour chaque configuration. Ce chapitre vise à préparer des échantillons qui seront utilisés pour des tests de traction, en expliquant les choix technologiques et les ajustements faits pour optimiser les impressions.

Le dernier chapitre présente l'étude expérimentale des propriétés mécaniques des éprouvettes imprimées, avec un focus sur les essais de traction. Il décrit les méthodes et équipements utilisés pour les tests de traction, analyse les résultats obtenus, et discute l'impact des différentes configurations d'impression sur les propriétés mécaniques des pièces, telles que la résistance à la traction et le module de Young. Ce chapitre vise à établir des corrélations entre les paramètres d'impression 3D et les performances mécaniques des matériaux.

Et finalement une conclusion générale et perspective.



Chapitre 1 :
**Généralité sur la fabrication
additive**

1. Introduction :

La fabrication additive est un procédé innovant permettant de créer des objets en trois dimensions par addition de matière. Cette technique, qui consiste à superposer des couches successives à partir d'un modèle 3D conçu avec un logiciel de CAO, était à l'origine utilisée pour le prototypage et la réalisation de maquettes. Aujourd'hui, elle est également employée pour produire des pièces fonctionnelles. Cependant, la variété des matériaux disponibles est encore restreinte, bien que ce procédé soit particulièrement utilisé dans les industries automobiles, aéronautique et médicale. L'impression 3D est une méthode de fabrication additive qui crée des objets couche par couche à partir de modèles numériques tridimensionnels. Elle offre une grande flexibilité de conception et la possibilité de produire des objets complexes avec une grande précision, tout en réduisant les déchets de matériau par rapport aux méthodes de fabrication traditionnelles. Ainsi, l'élaboration d'un matériau plastiques avec impression 3D" se réfère à la mise au point d'un matériau spécifiquement adapté à être utilisé dans des procédés d'impression 3D, tout en garantissant sa dégradabilité après son utilisation, ce qui contribue à la réduction des déchets plastiques et à la promotion de pratiques de fabrication plus durables [1].

L'impression 3 D, également connue sous le nom de fabrication additive, est un processus de création d'objets solides en trois dimensions à partir de données numériques. Cette technique fonctionne en superposant des couches de matériau les unes sur les autres, chaque couche représentant une tranche horizontale mince de l'objet en cours de fabrication. Conformément à la norme ASTM, la fabrication additive implique l'assemblage de matériaux pour construire des objets en suivant un modèle 3D, généralement de manière progressive, par opposition aux méthodes de fabrication soustractives, telles que le fraisage ou le tournage.

2. Principe de la fabrication additive :

Avant de procéder à la fabrication additive, il est essentiel de traiter informatiquement le fichier CAO. La conception assistée par ordinateur (CAO) permet de créer un modèle 3D virtuel d'une pièce ou d'un système. Ce modèle graphique est ensuite stocké dans un fichier intermédiaire en utilisant divers standards d'échange, tels que IGES (Initial Graphics Exchange Standard), STEP (STandard for the Exchange of Product) ou STL (Stereolithography Tessellation Language). Le format STL, créé par 3D Systems pour la stéréolithographie, est aujourd'hui largement utilisé dans la fabrication additive.

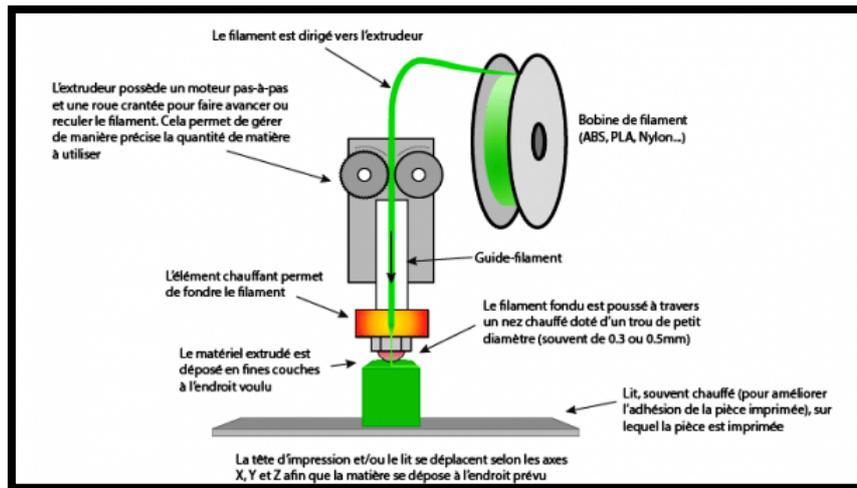


Figure 1 : Principe du procédé de dépôt de filaments extrudés [2]

Les logiciels de conception assistée par ordinateur (CAO) tels que SolidWorks [3] sont souvent utilisés pour créer les modèles numériques nécessaires à la fabrication additive. Ces modèles sont ensuite convertis en instructions spécifiques pour la machine d'impression 3D, qui les utilise pour créer la pièce STL couche par couche par des logiciels de tranchage spécialisé tel que Ultimaker cura [4] (**Figure** ci-dessous).

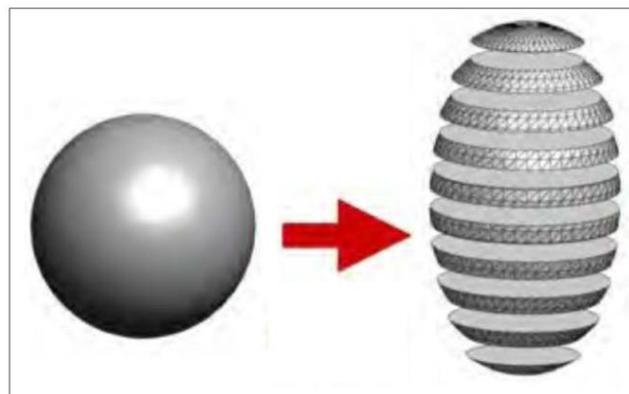


Figure 2: Modèle STL tranché par un trancheur CAO [5]

Un fichier STL représente la géométrie d'un objet en 3D sous forme de maillage de triangles. Concrètement, chaque surface de l'objet est approximée par de petits triangles. Les fichiers STL ne contiennent généralement pas d'informations sur la couleur, la texture ou d'autres propriétés visuelles de l'objet, se concentrant uniquement sur la géométrie. Les fichiers STL sont largement pris en charge par les logiciels de modélisation 3D et les logiciels de tranchage utilisés dans le processus d'impression 3D. Ils peuvent être facilement exportés depuis la plupart des logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur) et importés dans les logiciels de tranchage pour préparer les modèles à l'impression [6]. Bien que la fabrication additive offre de nombreux avantages, y compris la possibilité de créer des formes complexes et des pièces personnalisées, la gamme des matériaux disponibles reste encore relativement limitée. Cependant, des progrès continus sont réalisés dans le développement de nouveaux matériaux adaptés à la fabrication additive, ce qui élargit constamment les possibilités d'application de cette technologie.

En résumé, la fabrication additive se décompose en deux étapes : d'abord, la création d'un fichier de fabrication à partir d'un modèle CAO, puis la production de la pièce par ajout successif de couches (voir **Figure**).

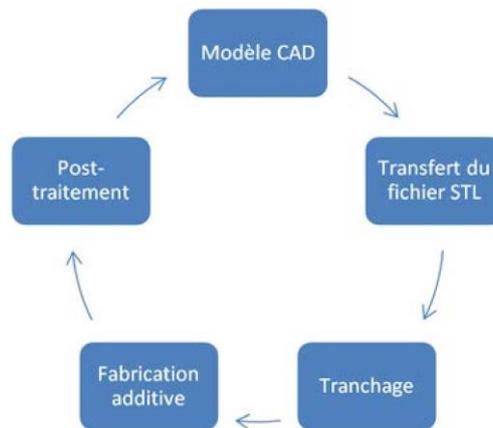


Figure3: plan de l'implémentation de procédé de fabrication additive [5]

3. Historique :

L'émergence de l'impression 3D trouve ses racines dans les années 90, marquées par une accélération significative des recherches dans ce domaine. Plusieurs dates clés ont jalonné l'histoire de l'impression 3D [7]:

En 1981, Kodama présente trois méthodes de solidification holographique.

En 1968, Swainson dépose un brevet aux États-Unis pour un système de durcissement de résine utilisant des rayons lumineux doubles.

En 1986, C. Hull fonde 3D Systems, qui est aujourd'hui un leader mondial de l'impression 3D.

En 1995, Z Corporations obtient l'exclusivité des recherches du MIT et lance les premières imprimantes 3DP.

En 2000, la fabrication additive est utilisée pour le développement de pièces de production.

De plus, La fabrication additive possède de nombreux avantages et en particulier la création de pièces complexes monobloc sans assemblage ni soudure et sans avoir recours à des outillages de fabrication. Mais elle a également des contraintes à ne pas sous-estimer.

Connue aussi sous le nom d'impression 3D, cette méthode de fabrication a commencé à se développer dans les années 80. Elle désigne l'ensemble des procédés permettant de fabriquer une pièce par ajouts successifs de matière, d'où l'adjectif additif. Un modèle numérique est ainsi reproduit par des imprimantes qui réalisent une fabrication couche par couche de la pièce réelle.

Le 1er brevet sur la fabrication additive est déposé le 16 juillet 1984 par trois Français:

J C André, O de Witte et A le Méhauté, pour le compte de l'entreprise Cilas Alcatel. Deux semaines plus tard, Chuck Hull a déposé un brevet sur la technique de stéréolithographie (SLA) StéreoLithographie Apparatus). Ce brevet est à l'origine de l'extension du fichier d'impression (STL), et de l'entreprise 3D Systems, le géant de la fabrication des imprimantes 3D. Cette dernière lance, fin 1988, la première imprimante 3D, baptisée SLA-250 .

L'année 2006 marque la naissance du projet RepRap, premier projet open source d'imprimante 3D, fondé par le Dr Adrian Browyer, professeur en génie mécanique à l'Université de Bath. C'est ainsi que le concept des imprimantes domestiques est né. L'idée consiste à pouvoir construire par soi-même une imprimante 3D en technologie de dépôt de fil fondu.

En 2005, le projet Reprap.org est lancé, un effort collaboratif visant à développer une imprimante auto-répliquante en open source.

En 2007, Shapeways est créé, le premier service d'impression 3D à la demande pour le grand public.

En 2008, la plateforme de partage de fichiers 3D en accès libre Thingiverse.com est lancée.

En 2010, le Dr Gabor Forgacs et la société Organovo impriment le premier vaisseau sanguin, marquant ainsi le début de la bio-impression.

En 2014, la première pièce en 3D est imprimée dans l'espace à bord de la station internationale.

4. Les étapes principales du procédé de fabrication additive :

Le processus de fabrication additive comprend quatre étapes principales, comme présenté dans la Figure 4 [8] :

1. Création des données numériques : Cette étape consiste à concevoir un modèle 3D à l'aide d'un logiciel de CAO (Conception Assistée par Ordinateur) et à l'enregistrer dans un format STL.
2. Préparation des fichiers : Dans cette étape, les fichiers STL sont préparés pour la fabrication. Cela comprend la correction éventuelle du modèle, la définition de son orientation et de l'emplacement des supports, ainsi que le tranchage de la pièce en couches.
3. Fabrication de la pièce : La troisième étape consiste à fabriquer physiquement la pièce en utilisant une technique de fabrication additive, où le matériau est ajouté couche par couche pour construire l'objet selon les spécifications du modèle numérique.
4. Finition de la pièce : Enfin, l'étape de finition implique le nettoyage de la pièce, l'enlèvement des supports utilisés pendant la fabrication, et éventuellement, l'usinage des surfaces fonctionnelles pour obtenir les spécifications finales de la pièce.

En résumé, le processus de fabrication additive comprend la création du modèle, la préparation des fichiers, la fabrication de la pièce et la finition de celle-ci pour obtenir le produit final désiré.

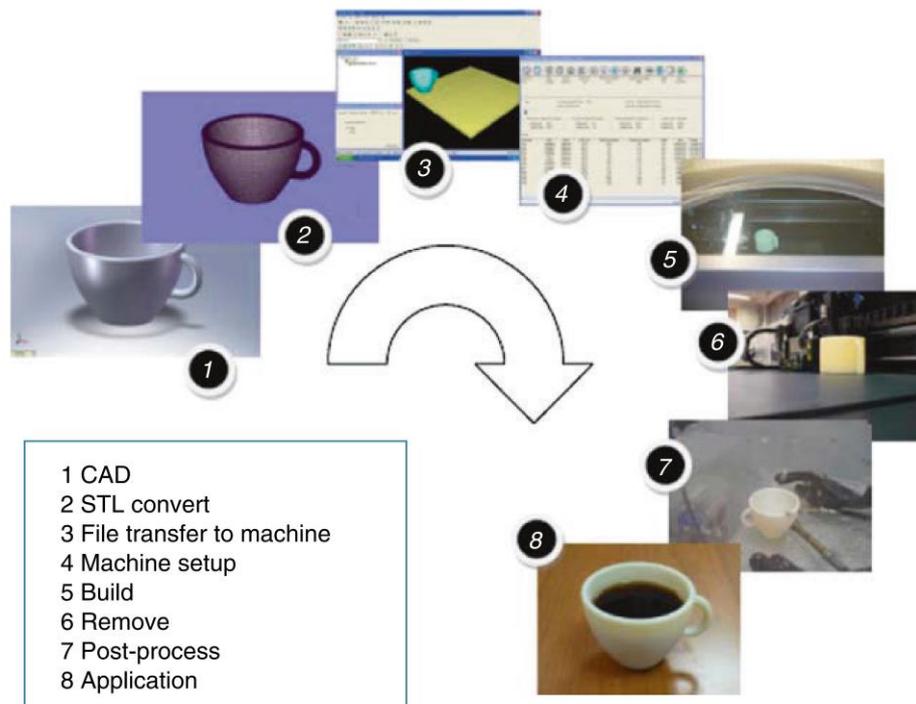


Figure 4 : Les étapes principales du procédé de fabrication additive [8]

5. Intérêt de l'impression 3D :

L'impression 3D présente de nombreux avantages, dont voici quelques-uns [9] :

- **Rapidité** : Évite le processus coûteux et chronophage de création de moules pour l'injection de plastique ou de pièces métalliques.
- **Maîtrise des coûts** : Réduit considérablement la perte de matière par rapport aux méthodes traditionnelles de fabrication soustractive.
- **Personnalisation** : Permet des modifications et des personnalisations faciles sans avoir besoin de créer de nouveaux moules, car les ajustements se font au niveau du fichier 3D.
- **Précision et haute résolution** : La technologie d'impression 3D peut offrir une qualité de haute résolution, notamment grâce aux techniques de laser, permettant des détails jusqu'à l'échelle microscopique.
- **Gestion de stock** : Introduit la notion de "Pièce de rechange à la demande", réduisant les besoins de stockage de pièces et les coûts associés.
- **Réponse économique et rapide** : Fournit une solution rentable et rapide pour la production de pièces imprimées

6. Description Structurale de la Machine 3D

Généralement l'imprimante 3D se base sur le principe FDM (fused deposition modeling). Cette machine se distingue par son grand volume d'impression et son système d'extrusion à entraînement direct. Elle est également équipée d'un système de chauffage rapide, permettant une mise en température rapide pour l'impression [8].

7. Définition:

La machine 3D FDM (Fused Deposition Modeling) est une imprimante 3D qui fabrique des objets en ajoutant couche par couche du matériau thermoplastique fondu. Le terme "FDM" a été breveté par Stratasys Inc., mais une technologie similaire est également connue sous le nom de "FFF" (Fused Filament Fabrication).

8. Principe de Fonctionnement:

- **Extrusion de Filament:** La machine utilise un filament thermoplastique (souvent ABS ou PLA) enroulé sur une bobine. Ce filament est chauffé et fondu dans une tête d'extrusion.
- **Déposition par Couche:** Le matériau fondu est extrudé à travers une buse et déposé couche par couche sur une plateforme d'impression. La plateforme se déplace selon les axes X et Y, tandis que la tête d'extrusion monte ou descend selon l'axe Z pour ajouter de nouvelles couches.
- **Solidification:** Chaque couche déposée se solidifie rapidement après l'extrusion, permettant de construire des structures complexes de bas en haut.

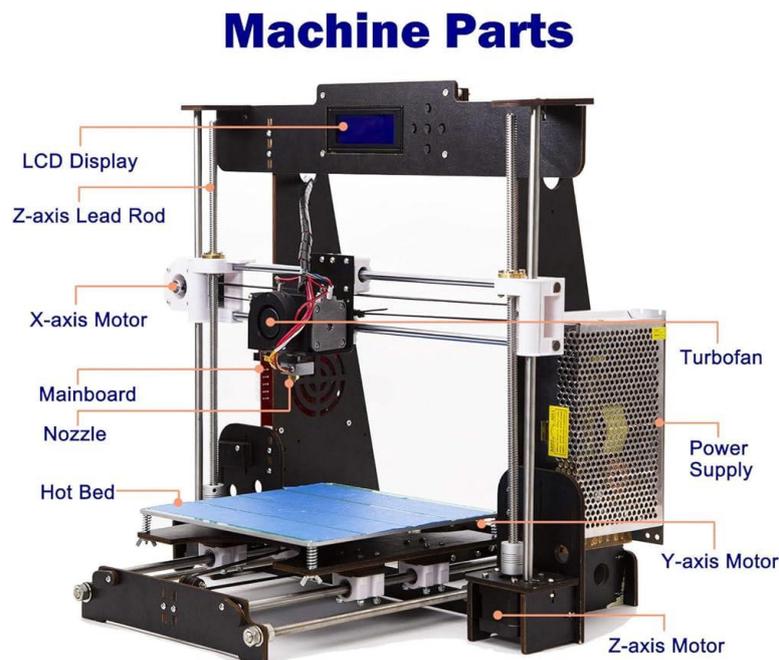


Figure5: Les principaux éléments de l'imprimante FDM [10].

9. Les polymères en l'impression 3D :

Les polymères jouent un rôle crucial dans le domaine de l'impression 3D, en particulier avec les technologies FDM (Fused Deposition Modeling). Les polymères utilisés en impression 3D sont des matériaux qui, lorsqu'ils sont chauffés, fondent et peuvent être extrudés à travers une buse pour créer des objets couche par couche. Ces matériaux sont essentiels pour la fabrication additive en raison de leur versatilité et de leurs propriétés physiques spécifiques.

Contrairement, les polymères présentent une variété très étendue de caractéristiques, permettant de les classer selon des critères tels que la transparence, la couleur, la résistance à la traction, la rigidité, la biocompatibilité, la résistance à l'humidité, la possibilité de stérilisation, et les émissions de fumée [8].

On peut diviser les polymères en deux catégories principales dans le domaine de l'impression 3D :

9.1.1 Thermodurcissables :

- **Caractéristiques** : Ces polymères durcissent de façon permanente lorsqu'ils sont mis en forme sous l'effet d'un catalyseur (chaleur, rayonnement UV, agent durcisseur). Une fois durcis, ils ne peuvent plus être remodelés.

9.1.2 Thermoplastiques :

- **Caractéristiques** : Les thermoplastiques peuvent être fondus et remodelés plusieurs fois. Ils deviennent malléables lorsqu'ils sont chauffés et durcissent en refroidissant.
- **9.2.1 Exemples courants en fabrication additive** : L'ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène) et le PLA (Acide Polylactique) sont les plus utilisés, notamment dans les imprimantes 3D domestiques.

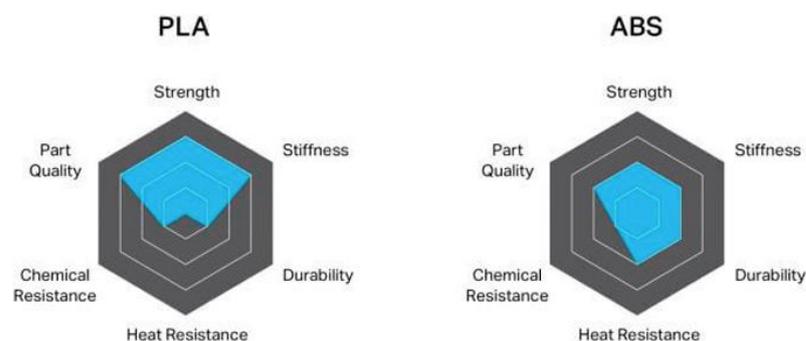


Figure 6 : Les thermoplastiques ABS et PLA [11]

• 9.2.2 ABS (Acrylonitrile Butadiène Styrène):

L'acrylonitrile butadiène styrène, ou ABS, est un polymère thermoplastique reconnu pour sa bonne résistance aux chocs. Il est relativement rigide, léger, et peut être facilement moulé. L'ABS appartient à la famille des polymères styréniques [12], [13].

- **1 Propriétés** : Fond à des températures entre 200 et 250°C, et peut supporter des variations de température de -20°C à +80°C. Non biodégradable, Nécessite une température de buse élevée et un plateau chauffant pour éviter le warping. Émet des particules et des fumées potentiellement nocives, nécessitant une bonne ventilation. **Applications** : Utilisé dans de nombreux objets du quotidien comme les ordinateurs, les téléphones et les LEGO.
- **2 Avantages** : Robustesse et Durabilité, Résistance à la Chaleur, Facilité de Post-Traitement, Propriétés Mécaniques Équilibrées.

3. Propriétés mécaniques :

- **Résistance à la Traction** : Environ 43 MPa
- **Module de Traction** : Environ 2.28 GPa

- **Coefficient de poisson** : Environ 0.35
- **Allongement à la Rupture** : Environ 5-10%
- **Résistance à la flexion** : 77 MPa
- **Module de flexion** : 2.48 GPa
- **Température de Fusion** : Entre 200 et 250°C
- **Résistance Thermique** : Peut supporter des températures allant de -20°C à +80°C
- **Masse volumique** : 1,03-1,08 g cm⁻³

Avantages de l'ABS	Inconvénients de l'ABS
Haute Résistance aux Chocs	Émet des fumées potentiellement nocives lors de l'impression
Durabilité et Robustesse	Nécessite un plateau chauffant pour éviter le warping
Bonne Stabilité Thermique	Non biodégradable
Facilité de Post-Traitement (polissage à l'acétone)	Dégage une odeur désagréable lors de l'impression
Bonne Résistance aux Températures (jusqu'à 80°C)	Sensible aux variations de température lors de l'impression, pouvant entraîner des fissures et des déformations
Large Gamme d'Applications	Moins écologique que certains autres matériaux comme le PLA)
Rigidité et Solidité	Plus difficile à imprimer que le PLA, nécessite des réglages précis
Bonne Résistance Chimique	Nécessite une ventilation adéquate pour évacuer les fumées
Léger et Facile à Moulurer	Plus coûteux que certains autres matériaux
Avantages de l'ABS	Inconvénients de l'ABS
Haute Résistance aux Chocs	Émet des fumées potentiellement nocives lors de l'impression

Tableau 1 : les avantages et les conviennes de ABS

- 9.2.3 PLA (Acide Polylactique) [14]:

L'acide polylactique (PLA) est un polymère biodégradable dans des conditions de compostage industriel, nécessitant une température supérieure à 60°C. En tant qu'homopolymère biosourcé, le PLA est principalement obtenu à partir de l'amidon de maïs, ce qui en fait la première alternative naturelle au polyéthylène, souvent qualifié de bioplastique. La production de PLA résulte de la fermentation des sucres ou de l'amidon par des bactéries qui synthétisent l'acide lactique.

- **1.Propriétés** : Fond à des températures entre 160 et 220°C. Plus facile à imprimer que l'ABS, car il est moins sensible aux variations de température, réduisant ainsi les risques de déformation (warping). Biodégradable et fabriqué à partir d'amidon.
- **2.Post-traitement** : Peut-être lissé à l'acétone pour obtenir une surface lisse.
- **3.Applications** : Utilisé pour des impressions 3D nécessitant une bonne qualité de surface et une mise en œuvre facile.
- **4.Avantages** : Résistance à la traction, qualité de surface, facilité de mise en œuvre à des vitesses élevées, et commodité pour une impression à domicile ou au bureau.

5. Propriétés mécaniques:

- **Résistance à la Traction :** Environ 50-70 MPa
- **Module de Traction :** Environ 3- 3.5 GPa
- **Coefficient de poisson :** Environ 0.36 à 0.40
- **Allongement à la Rupture :** Environ 2-10%
- **Résistance à la flexion :** 1 000 MPa
- **Module de flexion :** 4 000 à 5 000 MPa
- **Température de Fusion :** Entre 160 et 220°C
- **Résistance Thermique :** Plus sensible aux hautes températures et moins résistante à la chaleur que l'ABS, ce qui peut entraîner une déformation à des températures élevées.
- **Masse volumique :** 1,25 g cm⁻³.

Avantages du PLA	Inconvénients du PLA
Biodégradable et Compostable	Se dégrade lentement en conditions non industrielles
Biosourcé	Sensible à l'humidité
Facile à Imprimer	Moins résistant à la chaleur (déformation possible)
Faible Odeur lors de l'Impression	Moins résistant aux chocs par rapport à l'ABS
Bonne Qualité de Surface	Tendance au warping (déformation lors du refroidissement)
Utilisation Répandue dans l'Impression 3D	Moins flexible que certains autres thermoplastiques
Non Toxique et Sans Fumées Nocives	Peut nécessiter des conditions spécifiques de stockage (éviter l'humidité)
Variété de Couleurs et de Transparents	Moins durable pour des applications mécaniques exigeantes
Recyclable dans certaines conditions	Température de transition vitreuse relativement basse (environ 60-65°C)

Tableau 2 : les avantages et les inconvénients de PLA

Chapitre II

Conception Assistée par Ordinateur (CAO) et Impression 3D des Éprouvettes

1.Introduction :

Ce chapitre se concentre sur la conception géométrique 3D assistée par ordinateur (CAO) des éprouvettes conformes à la norme ISO 527, en vue de leur fabrication par impression 3D dans divers models à l'aide du logiciel de tranchage Ultimaker cura. Le tranchage, ou "slicing", est une étape essentielle pour garantir la qualité de l'impression finale.

L'objectif est d'évaluer l'impact des paramètres d'impression sur les caractéristiques des pièces produites, notamment le temps de fabrication, le poids, le nombre de paroi, ainsi que les couches supérieure et inférieure, ainsi que le choix du modèle de la structure. Ce processus de sélection géométrique s'inscrit dans une étude visant à explorer l'influence des paramètres structurels et de fabrication sur les propriétés mécaniques des pièces obtenues par impression 3D.

Ce chapitre se base sur les étapes de fabrication additive suivante :

- ❖ Etape 1 : conception du modèle 3D
- ❖ Etape 2 : exportation du fichier en format STL
- ❖ Etape 3 : choix en introduction des paramètres d'impression
- ❖ Etape 4 : conversion du fichier en G-code
- ❖ Etape 5 : Fabrication des échantillons.

2.Conception du modèle 3D :

Avant d'entamer la conception 3D, on fait un dessin technique représente (**Figure**) des dimensions des échantillons haltère Type **1B** à étudier conformes à la norme (ISO-527-2) pour la détermination des propriétés des plastique en traction. Cette spécification standard conforme pour les plastiques à moulage ou en extrusion.

La norme est sélectivement adaptée à l'utilisation avec la gamme suivante de matériaux :

-les thermoplastiques et thermodurcissables rigides et semi-rigides moulés, extrudés et coulés, y compris les composés remplis et renforcés par exemple de fibres courtes, de petites tiges, de plaques ou de granules mais à l'exclusion des fibres textiles.

-les polymères cristallins liquides thermotropes [15].

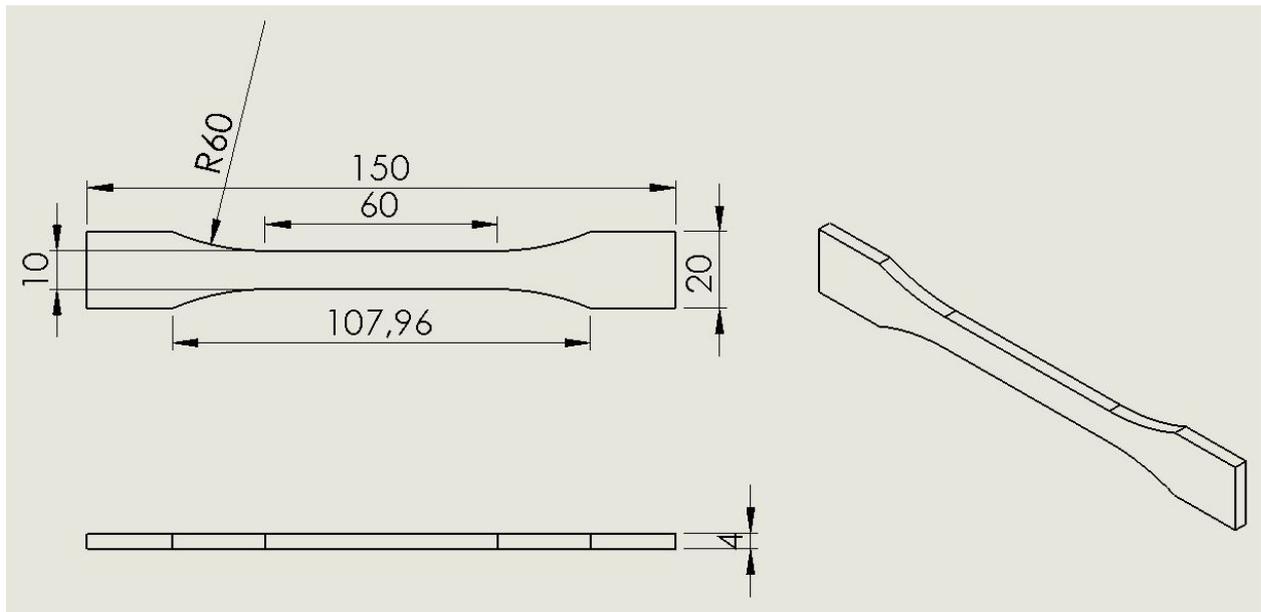


Figure7 ; Dessin technique de l'échantillons ISO 527-2 type 1B

3.Conception des échantillons :

Ensuite on fait la conception 3D le model 3D de l'échantillons de forme haltère (type 1B conformes à la norme ISO-527-2) en utilisant le logiciel CAO informatique SOLIDWORKS.

SolidWorks est un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) largement utilisé dans l'industrie manufacturière pour la modélisation 3D, la conception de pièces et d'assemblages, ainsi que la création de dessins techniques. Développé par Dassault Systèmes, SolidWorks est reconnu pour sa convivialité, sa puissance et sa polyvalence [16].

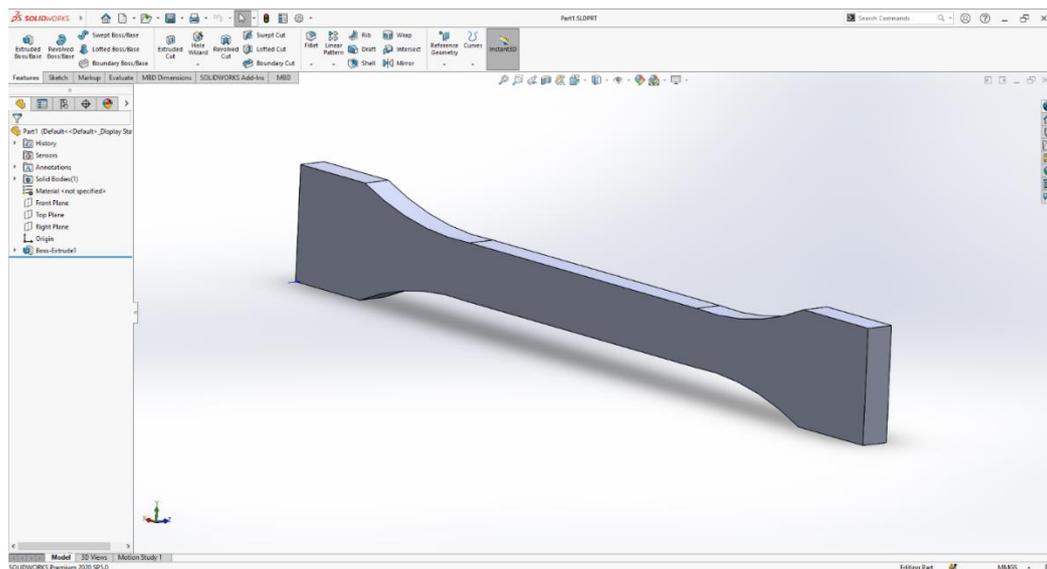


Figure8 : Conception assisté par ordinateur de la pièce ISO 527-2 par SOLIDWORKS

Chapitre II Conception Assisté par Ordinateur (CAO) et impression 3D des éprouvettes

4. Exportation du fichier en format STL :

Ensuite SOLIDWORK le logiciel exporte des modèles 3D sous forme de fichiers de format STL pour des imprimantes en 3D.

STL signifie "STereoLithography" ou "Standard Tessellation Language". Il est largement utilisé pour représenter des modèles 3D destinés à être imprimés en trois dimensions.

Un fichier STL représente la géométrie d'un objet en 3D sous forme de maillage de triangles. Concrètement, chaque surface de l'objet est approximée par de petits triangles (Figure ci-dessous). Les fichiers STL ne contiennent généralement pas d'informations sur la couleur, la texture ou d'autres propriétés visuelles de l'objet ; ils se concentrent uniquement sur la géométrie.

Les fichiers STL sont largement pris en charge par les logiciels de modélisation 3D et les logiciels de tranchage (slicing software) utilisés dans le processus d'impression 3D. Ils sont faciles à exporter depuis la plupart des logiciels de CAO (conception assistée par ordinateur) et peuvent être facilement importés dans les logiciels de tranchage pour préparer les modèles pour l'impression [17].

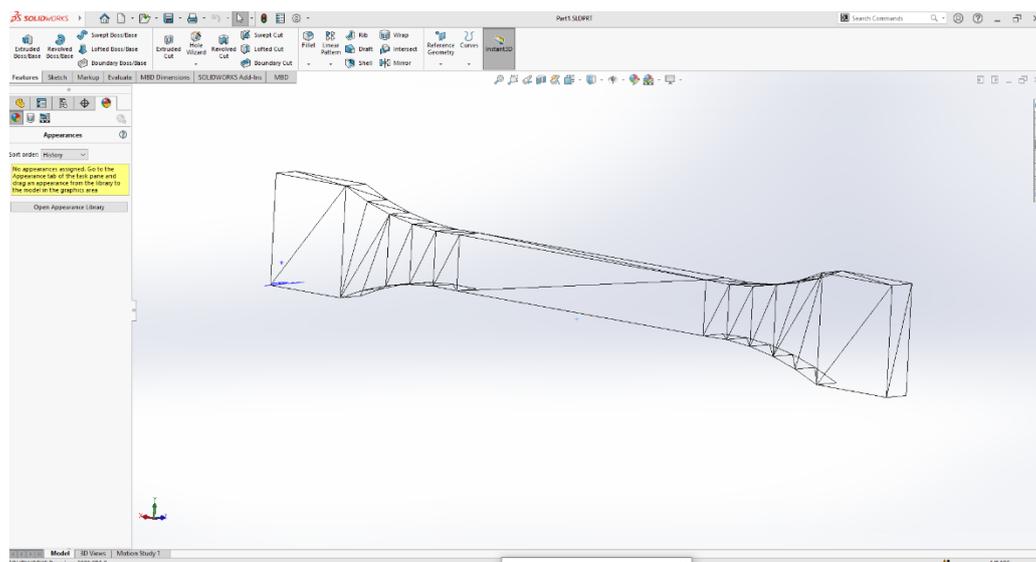


Figure 9 : Exportation du fichier en format STL

5. Choix en introduction des paramètres d'impression :

Le fichier .STL est lu par un logiciel spécialisé d'impression 3D fourni pour lire le G-code par l'imprimante. Dans cette étude on a utilisé le trancheur logiciel ultimaker-cura. Le logiciel d'impression 3D découpe en tranches le fichier du modèle 3D sous forme de centaines de coupes transverses numériques.

6. Logiciel de tranchage Ultimaker Cura :

Ultimaker Cura est un logiciel de tranchage très utilisé dans l'impression 3D. Cura permet aux utilisateurs de préparer des modèles 3D pour l'impression en les découpant en couches et en générant les instructions G-code que l'imprimante 3D comprend. Il prend en charge une large gamme d'imprimantes 3D et propose diverses fonctionnalités pour optimiser la qualité et l'efficacité de l'impression, telles que des réglages d'impression personnalisables, la génération de structures de support et des algorithmes de découpe avancés [18].

Ultimaker Cura offre une multitude de paramètres d'impression qui permettent aux utilisateurs de personnaliser chaque aspect de leur processus d'impression. On mentionne quelques paramètres les plus couramment utilisés et leurs fonctions :

Épaisseur de la couche (Layer Height) : Ce paramètre détermine l'épaisseur de chaque couche de matériau déposée par l'imprimante. Une couche plus fine produit généralement des surfaces plus lisses et des détails plus précis, mais elle peut augmenter le temps d'impression.

Remplissage (Infill) : Le remplissage contrôle la densité de l'intérieur de votre modèle. Un pourcentage plus élevé de remplissage signifie un intérieur plus solide, tandis qu'un pourcentage plus faible économise du matériau et réduit le temps d'impression.

Modèle (Pattern) : Ce paramètre contrôle le modèle de remplissage à utiliser à l'intérieur de votre impression. Ultimaker Cura offre plusieurs modèles de remplissage, tels que le remplissage en grille (Grid), en lignes diagonales (Line), etc. Chaque modèle a ses propres caractéristiques en termes de solidité et de consommation de matériau.

Paroi (Wall) : Ce paramètre contrôle le nombre de coques ou de parois extérieures de votre modèle. Les parois sont les couches externes de votre impression, qui définissent la surface visible et contribuent à la solidité de l'objet.

Couches supérieure (Top) : Ce paramètre contrôle le nombre de couches supérieures du modèle. Les couches supérieures forment la surface supérieure de l'impression. Un nombre plus élevé de couches supérieures peut renforcer la solidité de l'objet et améliorer sa finition de surface.

Couches inférieure (Bottom) : Ce paramètre également contrôle le nombre de couches inférieures du modèle. Les couches inférieures forment la base de l'impression. Un nombre plus élevé de couches inférieures peut améliorer l'adhérence de l'objet au plateau et réduire les risques de gauchissement.

Vitesse d'impression (Print Speed) : Ce paramètre contrôle la vitesse à laquelle la tête d'impression se déplace lors de l'impression. Une vitesse plus élevée peut réduire le temps d'impression, mais elle peut également compromettre la qualité des détails et la précision.

Chapitre II Conception Assisté par Ordinateur (CAO) et impression 3D des éprouvettes

Température de la buse (Nozzle Temperature) : La température de la buse contrôle la température à laquelle le matériau est extrudé. Cela dépend du type de matériau que vous utilisez, chaque matériau ayant une plage de température optimale.

Température du plateau chauffant (Build Plate Temperature) : Si votre imprimante est équipée d'un plateau chauffant, vous pouvez contrôler sa température ici. Cela aide à adhérer le matériau à la surface du plateau et à prévenir le gauchissement.

Ventilateur de refroidissement (Fan Cooling) : Ce paramètre contrôle le fonctionnement du ventilateur de refroidissement de votre imprimante 3D. Pendant l'impression, le filament fondu est déposé sur la couche précédente. le filament peut ne pas avoir assez de temps pour refroidir et se solidifier correctement avant que la prochaine couche ne soit ajoutée. Cela peut entraîner des déformations ou des irrégularités dans l'impression. En activant le ventilateur de refroidissement, en augmentant le refroidissement des couches précédentes pendant l'impression de couches supérieures, ce qui aide à améliorer la qualité de l'impression en réduisant les déformations et les bavures.

Connect Infill (Infill Connecté) : Ce paramètre permet de relier l'infrastructure du remplissage à la coque externe de l'objet. En activant cette fonction, Ultimaker Cura ajoutera des ponts de matériau entre les sections du remplissage et les parois externes de l'objet. Cela renforce la structure de l'objet et réduit les risques de délaminage ou de faiblesse structurelle. Le remplissage connecté est particulièrement utile pour les objets de grande taille ou ceux sujets à des forces de cisaillement élevées.

Diamètre de la buse (Nozzle Diameter) : Ce paramètre indique à Cura la taille de la buse de votre imprimante. Utiliser le mauvais diamètre de buse peut entraîner des problèmes d'extrusion et de résolution.

Brim/Skirt/Raft : Ce sont des options pour ajouter des supports supplémentaires autour de votre modèle pour améliorer l'adhérence au plateau, faciliter l'impression ou fournir une surface de démarrage pour votre impression.

7.Paramètres d'impression :

Les échantillons conçus pour l'étude mécanique sont adaptés à quelques paramètres variables de structure d'impression dans le logiciel Ultimaker Cura version 5.4.0. Trois motifs différents sont proposés, comme indiqué dans le tableau. Nous avons choisi le modèle de remplissage 'Cubic Subdivision' comme infrastructure (Figure), et nous avons ensuite varié les paramètres de paroi (Figure) ainsi que les couches supérieure et inférieure (Figure).

Tableau 3 . Plan experience (Experimental design)

N° test	Modèle (Pattern)	Paroi (Wall)	Supérieur (Top) et inférieur (bottom)

Chapitre II Conception Assisté par Ordinateur (CAO) et impression 3D des éprouvettes

Model 1	Cubic subdivision	2	2
Model 2	Cubic subdivision	4	4
Model 3	Cubic subdivision	6	6

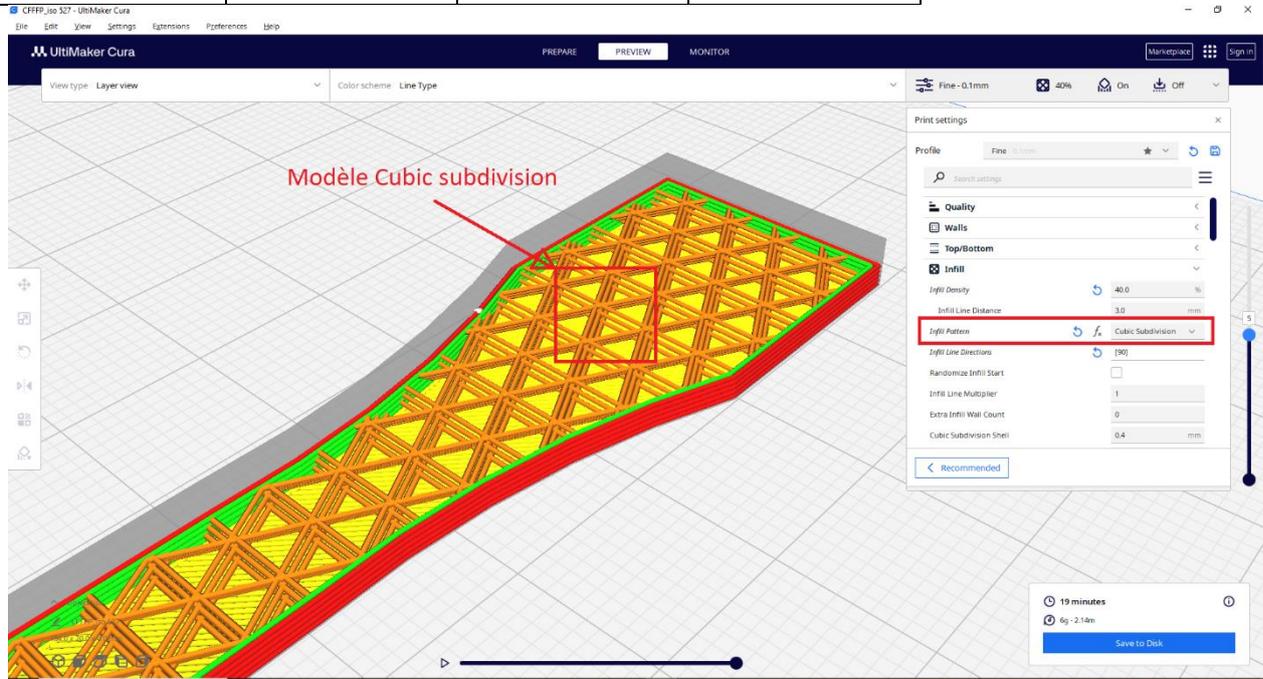
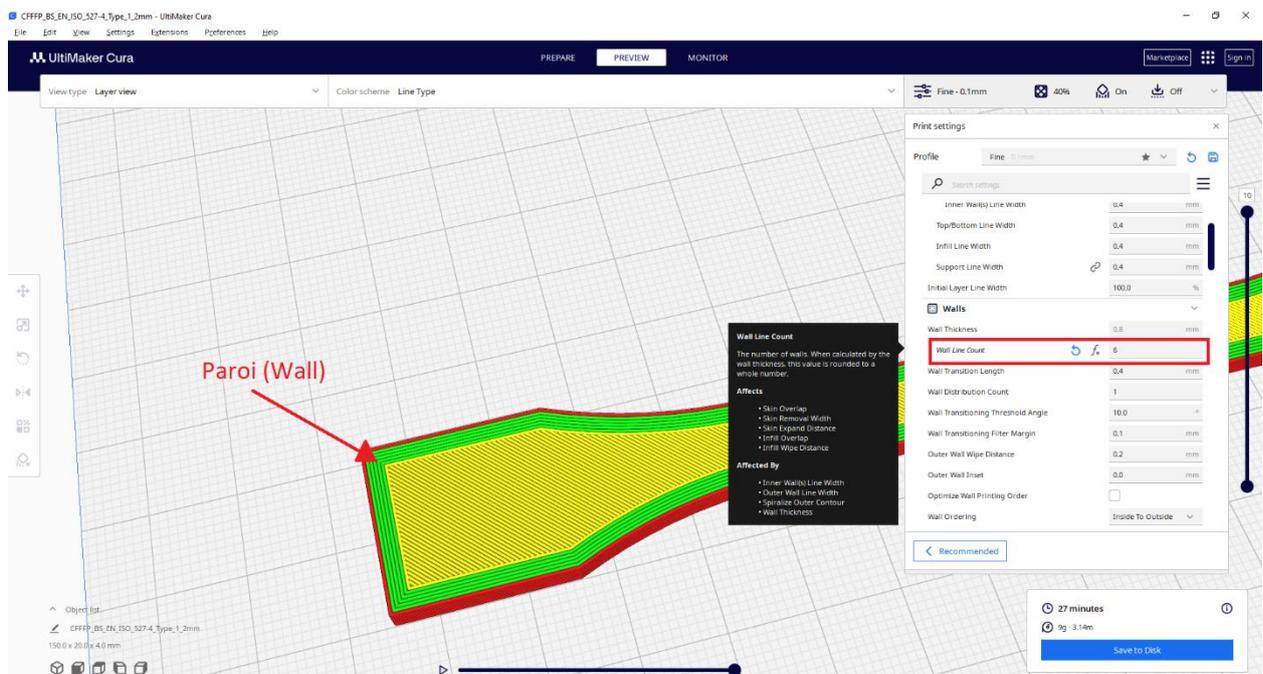


Figure 10 : Présentation de modèle structure Cubic-subdivision dans Utimakera cura



Chapitre II Conception Assisté par Ordinateur (CAO) et impression 3D des éprouvettes

Figure 11 : Présentation de la configuration des parois dans Utimaked cura

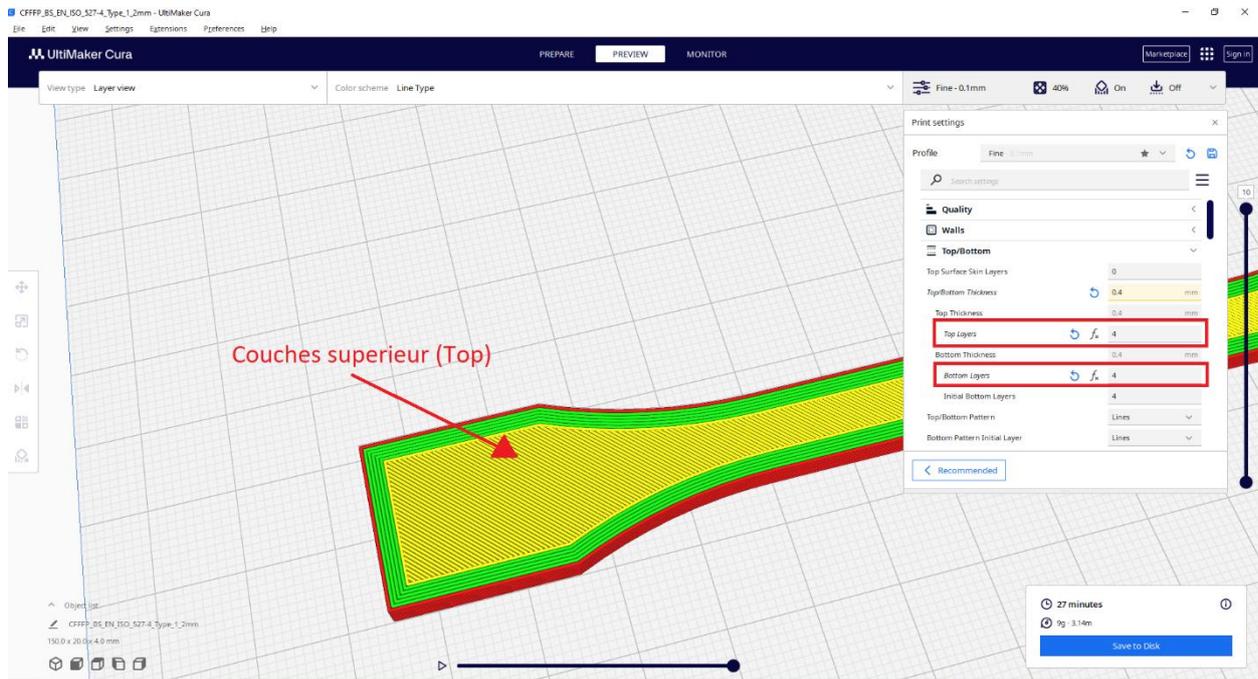


Figure 12 : Présentation de la configuration des couches supérieur et inférieur dans Utimaked cura

Ainsi que, dans le tableau () on mentionne les paramètres constants d'impression dans le logiciel Ultimaker Cura.

Tableau4 : paramètres constante d'impression 3D

Température de la buse (Nozzle temperature)	210 C
Densité de remplissage (Infill)	40%
La direction de remplissage (Infill line direction)	90°
Hauteur de la couche (Layer height)	0.4
Connect infill	Yes
Vitesse (Speed)	50 mm/s

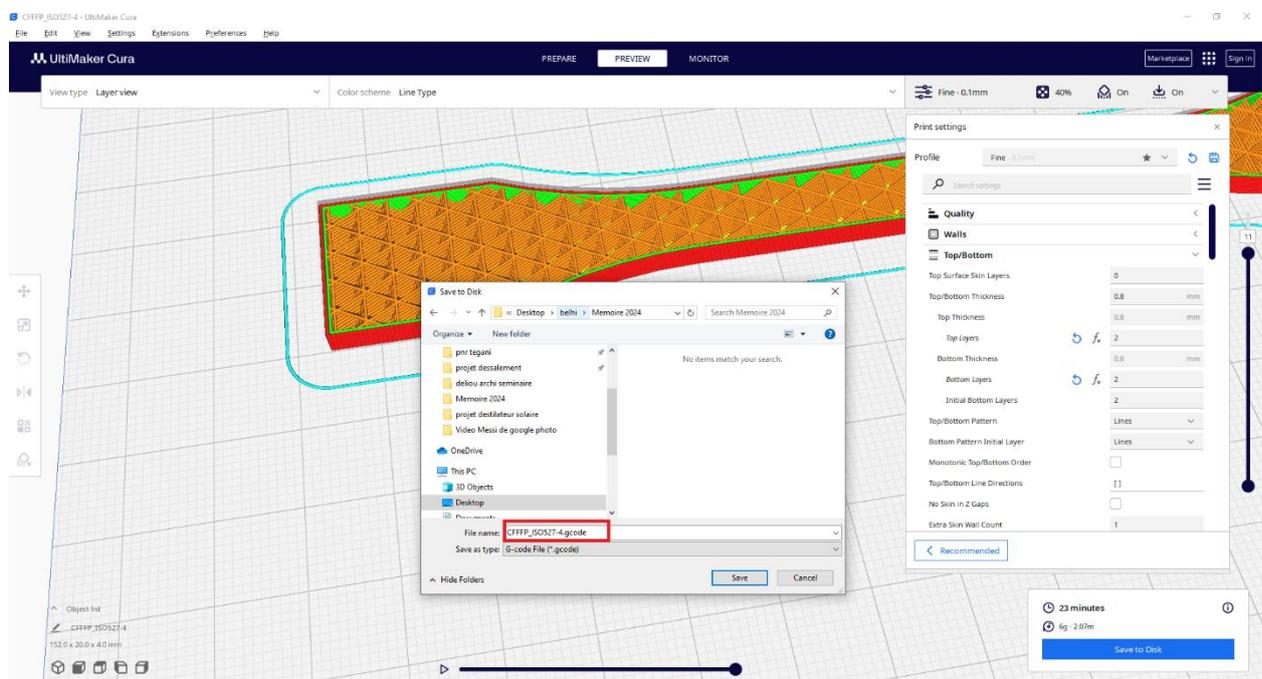
Chapitre II Conception Assisté par Ordinateur (CAO) et impression 3D des éprouvettes

Ventilateur de refroidissement	100%
Orientation Haut / bas (Top/bottom line direction)	45/-45
Température du plateau (Heated bed)	0
Usage de colle sur le plateau	Oui

8. Exportation du fichier en G-code :

Le G-code est un langage de programmation spécifique utilisé dans le domaine de la fabrication assistée par ordinateur (FAO), y compris pour les imprimantes 3D. Il s'agit d'un ensemble d'instructions textuelles qui définissent les mouvements et les actions que l'imprimante 3D doit effectuer pour fabriquer un objet à partir d'un modèle 3D.

Le fichier G-code est généré à partir d'un logiciel de tranchage (slicing software), tel que Ultimaker (Figure 13), qui prend le modèle 3D, divise celui-ci en couches (slices) et génère les instructions nécessaires pour chaque couche à partir imprimante 3D.



9. Impression 3D

9.1. Description structurelle de la machine :

La machine employée pour la fabrication des échantillons destinés à la traction mécanique, il s'agit d'une imprimante 3D construite sur la base « Pruca Printer 3D » à trois axes x,y,z qui utilise le principe de la FDM (dépôt de filament fondu). La machine offre un volume d'impression considérable de (22*22*25 cm³) couplé avec un système d'extrusion à entraînement direct (Figure).

9.2 Filaments utilisés :

Dans cette méthode de fabrication, un filament continu de polymère thermoplastique (PLA) est utilisé de 1.75 mm pour former des couches et construire le volume de la pièce désirée (Figure 13). Ce filament est chauffé par un élément chauffant avant d'atteindre la buse (Figure 14). L'objectif est d'obtenir un état semi-liquide qui facilite son extrusion. Cette propriété est cruciale dans ce domaine, permettant non seulement le dépôt du filament, mais également sa fusion pendant l'impression, suivie de sa solidification à température ambiante après dépôt.



Figure 13 : Principe de la méthode de dépôt de filament PLA fondu.

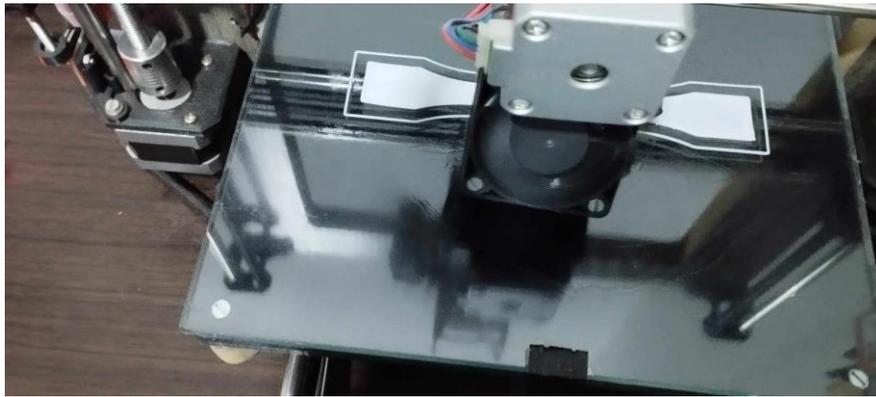
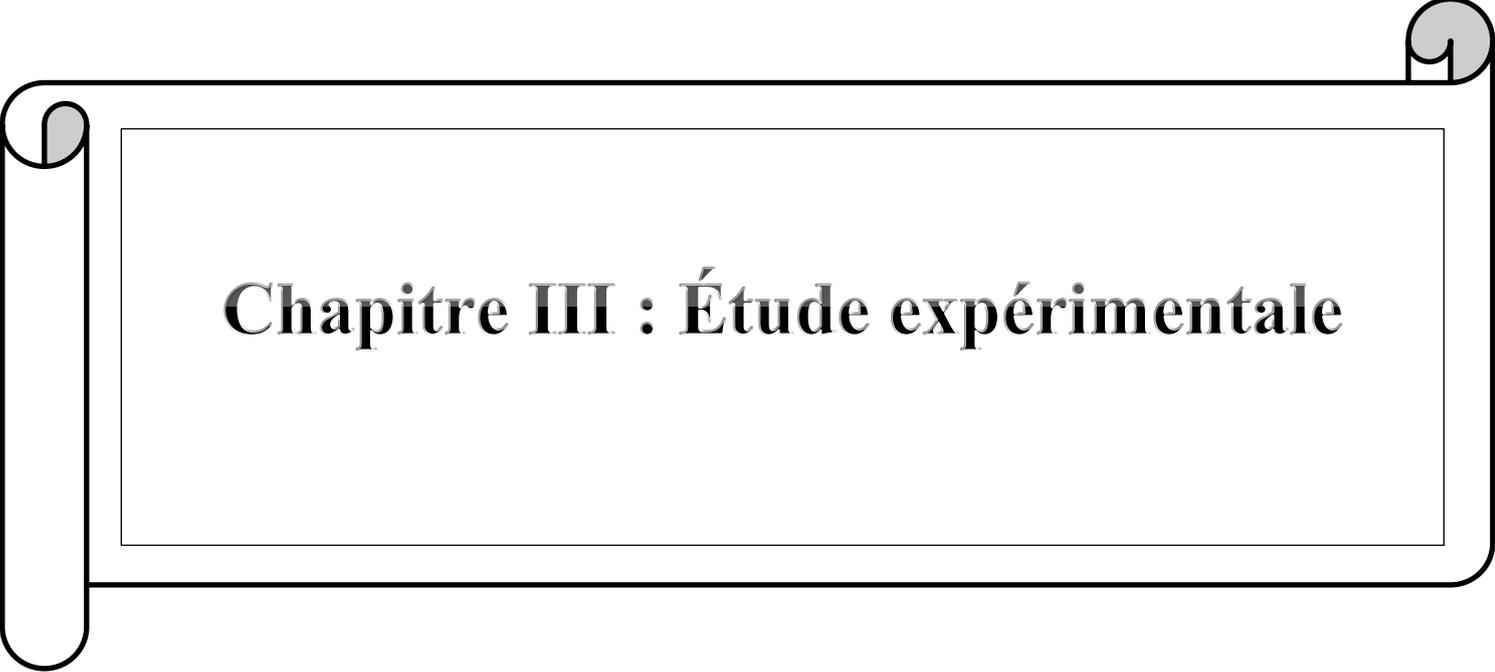


Figure14 : Fabrication additive des éprouvettes ISO-527 par imprimante 3D trois axes.



Chapitre III : Étude expérimentale

1.Introduction :

Dans le chapitre 3, une étude expérimentale est menée sur les essais mécaniques de traction des éprouvettes proposés en PLA, modélisée avec la structure "subdivision cubique". L'objectif est d'examiner l'effet de la variation des couches de paroi ainsi que des couches supérieure et inférieure sur les propriétés mécaniques telles que la rigidité, la légèreté, la résistance, le temps de fabrication, etc.

2.Préparation des éprouvettes :

Dans cette étude expérimentale des essais mécaniques de traction, cinq échantillons seront soumis à la traction pour chaque éprouvette pour la validation des résultats conformément à la norme ISO-527-1 [19] (Figure). Ainsi, toutes les éprouvettes ont été pesées pour déterminer leur propre poids a travers une balance électronique de précision de 0.001g (voir Figure).



Figure15 : Epreuve fabrique par imprimant 3D (FDM)



Figure: La balance utilisé pour peser les échantillons

3.Essais de la traction mécaniques:

Les tests de traction sont réalisés en utilisant une machine de traction universelle INSTRON 5969 avec une capacité maximale de 50 KN. Cette machine comprend un système de traction, un dispositif de mesure des allongements et un système pour mesurer les forces générées. Elle est équipée d'une caméra (l'extensomètre à vidéo [20]) qui permet la mesure et l'enregistrement des déformations longitudinales et transversales afin de déterminer le coefficient de Poisson. La vitesse de déplacement des mâchoires de la machine est réglée à 1 mm/s pour les matériaux polymère, conformément à la norme ISO 527-1 . De plus, la machine d'essai est connectée à un ordinateur qui permet le calcul direct de la contrainte appliquée en fonction des dimensions de l'éprouvette préalablement enregistrées. (Figure)

La machine est située au niveau du laboratoire des essais mécaniques du département de mécanique de l'université de Mohamed kheder biskra. Les caractéristiques principales sont :

- Cadre de charge électromécanique
- Famille : INSTRON
- Model : Z050
- Capacité de force : 50 KN

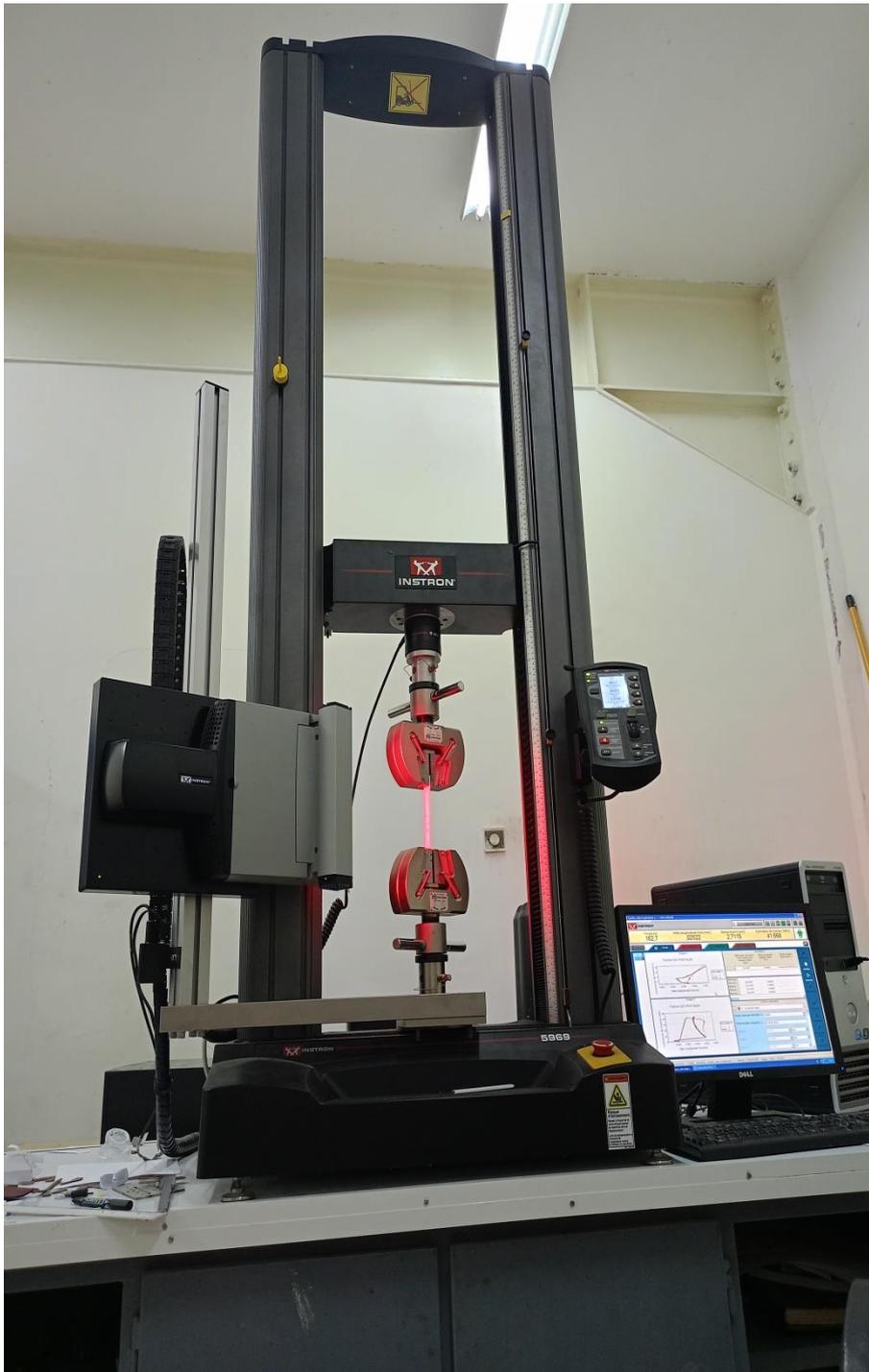


Figure 16: Machine traction universelle INSTRON 5969

La machine se compose principalement des éléments suivants (Figure 17) :

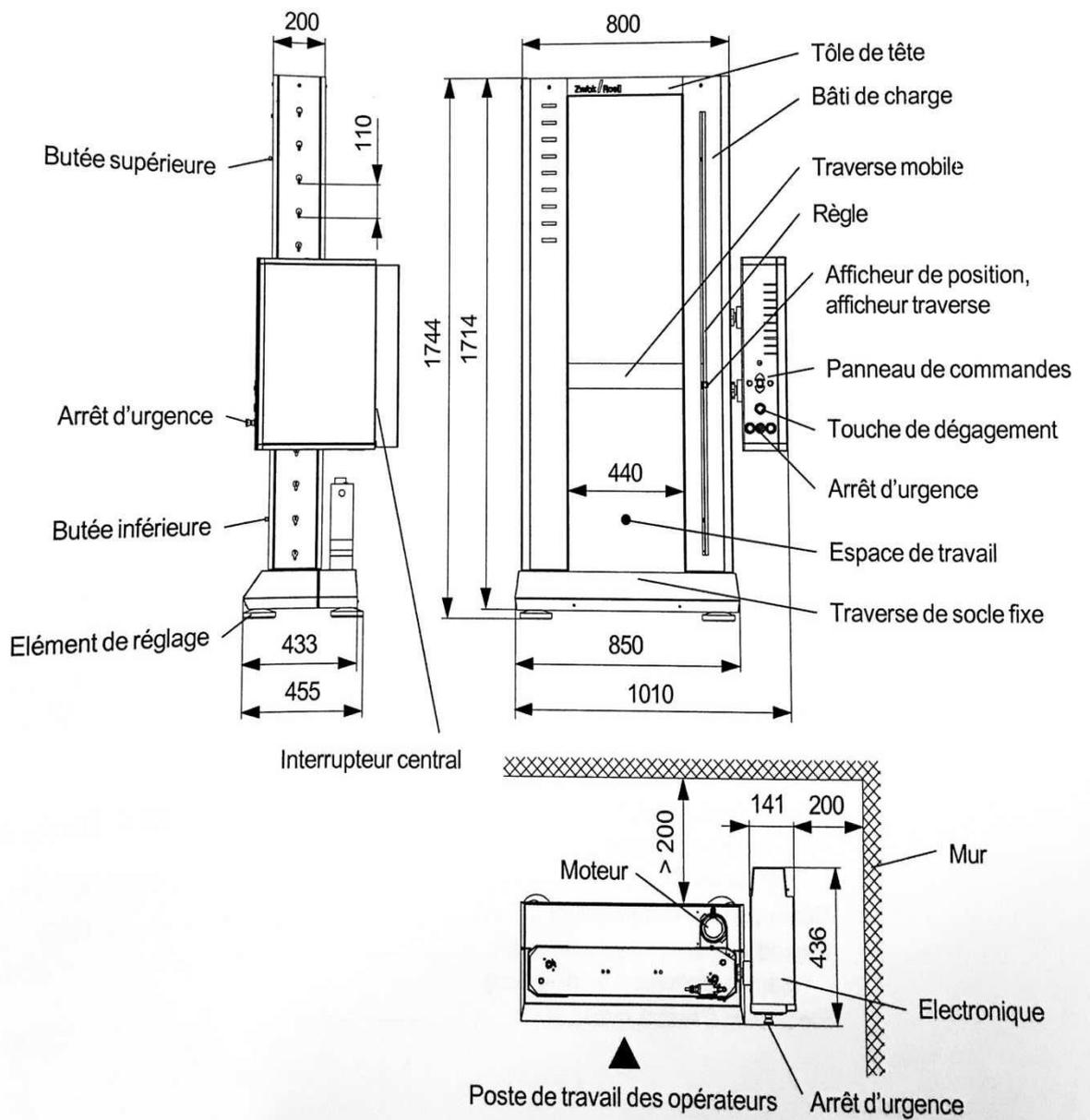


Figure 17 : Composants de la machine de traction universelle INSTRON 5969

Les étapes d'essai :

1. Mise en marche la machine
2. Lancement de logiciel

3. Paramétrage de l'essai (vitesse ; charge appliqué ...)
4. Placer l'éprouvette dans la machine
5. Lancer l'essai
6. Exécuter l'essai jusqu'à la rupture de l'éprouvette (séparation total de l'éprouvette en deux)

4. Déroulement des essais :

L'éprouvette est fixée entre les mors de la machine d'essai de traction, qui servent de dispositif de fixation. Ensuite, une charge est appliquée en éloignant la traverse mobile jusqu'à ce que l'éprouvette se rompe. Ce processus est continu jusqu'à ce que toutes les données nécessaires soient collectées ou que la rupture de l'éprouvette survienne.



Figure 18: Dispositif de fixation avant la rupture de l'essai de la traction

La caractérisation des essais de traction est réalisée sur cinq éprouvettes préparées selon les trois éprouvettes proposés. Les figures illustrent la relation entre la contrainte de traction et la déformation longitudinale et transversale des éprouvettes en matériaux PLA. On observe que pour tous les cas des éprouvettes proposés, les courbes de contrainte en fonction de la déformation présentent une zone linéaire élastique suivie d'une zone non linéaire de déformation plastique après la rupture. La figure montre les échantillons qui se sont fracturés en deux parties suite au test de traction.

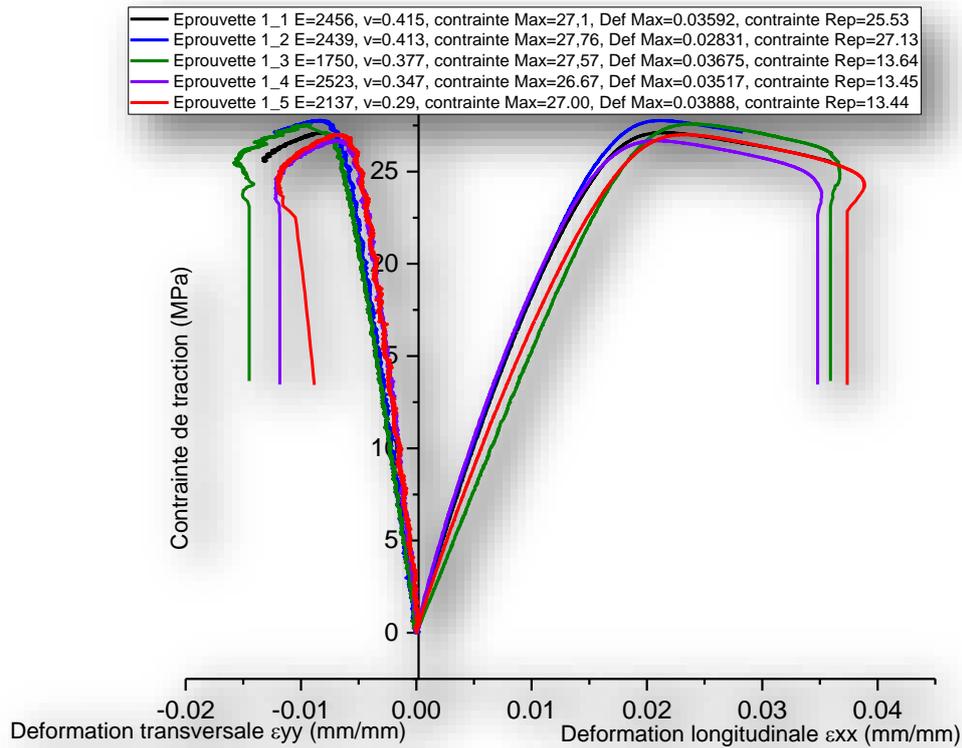


Figure 19 : Courbe contrainte/déformation longitudinale et transversale de matériau PLA éprouvette 1

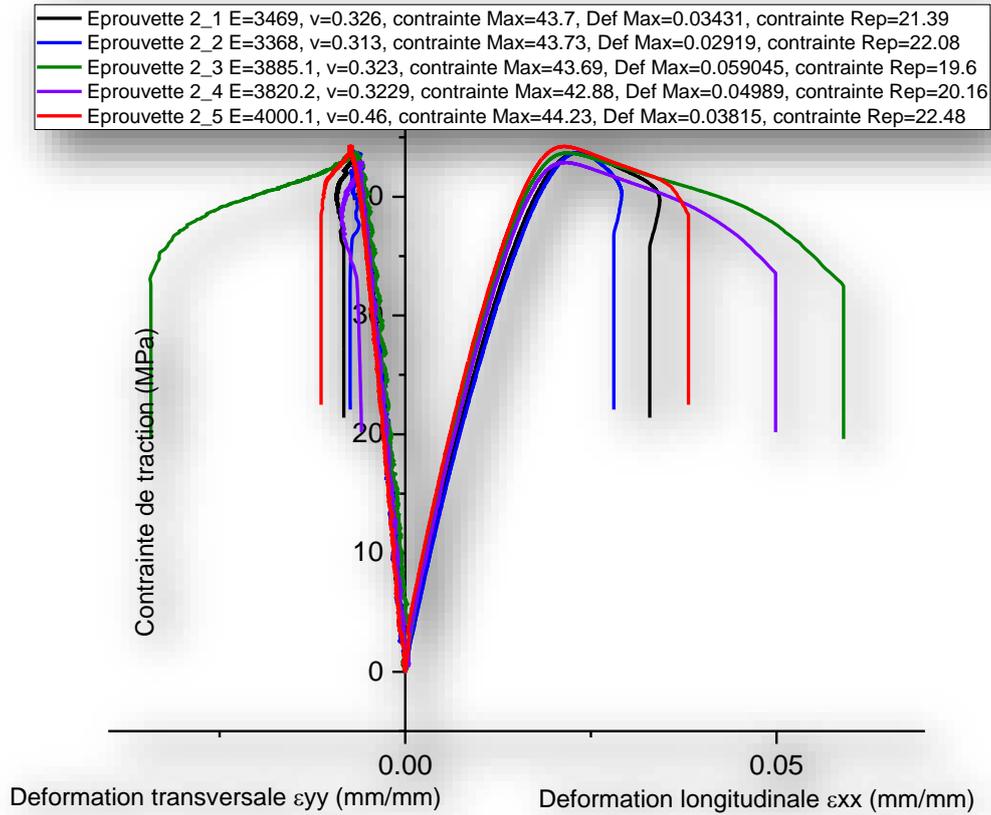


Figure 20 : Courbe contrainte / déformation longitudinale et transversale de matériau PLA éprouvette 2

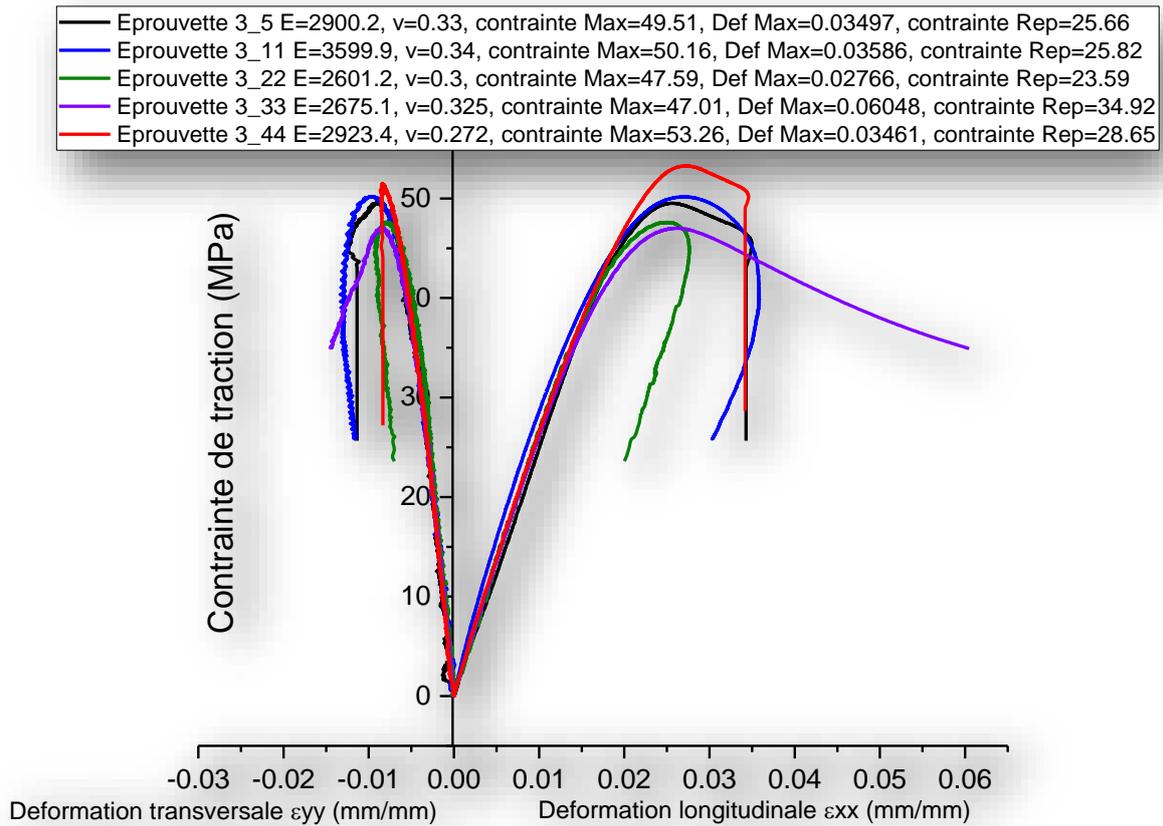


Figure 21 : Courbe contrainte / déformation longitudinale et transversale de matériau PLA éprouvette 3



Figure22 : Rupture par traction des éprouvettes

Le Tableau ci-dessous résume toutes les valeurs moyennes des propriétés mesurées pour chaque éprouvette. Les propriétés mécaniques sont déterminées de la manière suivante :

- La contrainte axiale $\sigma_x = F/S$ dans l'éprouvette est calculée en divisant la force axiale mesurée par l'aire de la section transversale effective de l'éprouvette au début de l'essai.
- La contrainte maximale σ_{max} correspond à la valeur maximale enregistrée pendant toute la durée de l'essai.
- La contrainte à la rupture σ_{rup} est la valeur enregistrée au moment de la rupture de l'éprouvette.
- La déformation maximale ϵ_{max} est la valeur enregistrée au moment de la rupture de l'éprouvette.
- Le module élastique longitudinal E_x est caractérisé par la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation longitudinale ϵ_{xx} .
- Le coefficient de Poisson ν_{xy} est obtenu en calculant la moyenne des déformations transversales ϵ_{yy} par rapport à la moyenne des déformations longitudinales ϵ_{xx} dans la zone élastique de la courbe, selon la formule $\nu_{xy} = -\epsilon_{yy} / \epsilon_{xx}$.
- Le module de cisaillement G_{xy} de chaque éprouvette est calculé par la relation $G = E/2(1-\nu^2)$. [21].
- Le poids et le temps de fabrication des éprouvettes sont enregistrés en minutes.
- De plus, le rapport entre la rigidité et le poids est calculé.

Tableau 5 : Valeurs moyennes des propriétés mécaniques des éprouvettes.

<i>Caractéristique</i>	<i>Eprouvette 1</i>	<i>Eprouvette 2</i>	<i>Eprouvette 3</i>
<i>Module de Young (E) (MPa)</i>	2261	3708	2940
<i>Coefficient de Poisson</i>	0.360	0.348	0.313
<i>Contrainte maximale (MPa)</i>	27.22	43.64	49.5
<i>Déformation maximale</i>	0.035	0.04211	0.0387
<i>Module de cisaillement (MPa)</i>	831.25	1375.4	1119.6
<i>Poids (g)</i>	6.94	9.56	10.44
<i>Temps (min)</i>	20	28	32
<i>E/Poids</i>	325.8	387.8	281.6

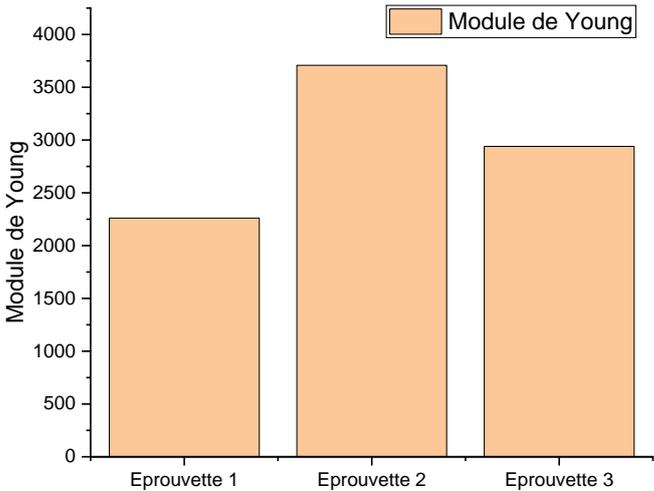


Figure 23 : Module de young des éprouvettes expérimentés

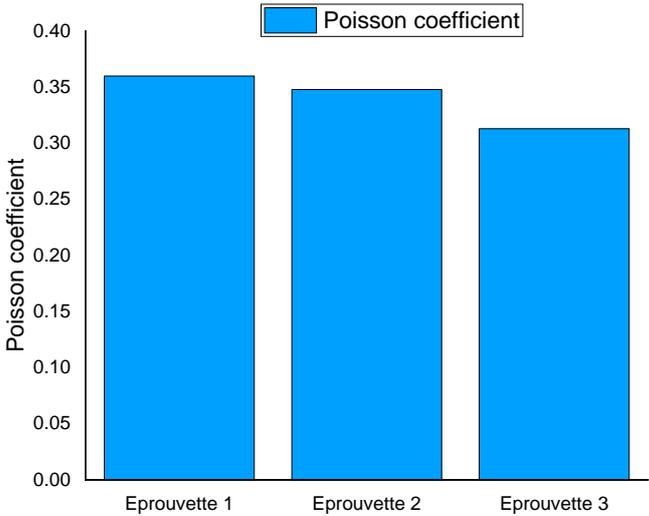


Figure 24 : Coefficient de poisson des éprouvettes expérimenté

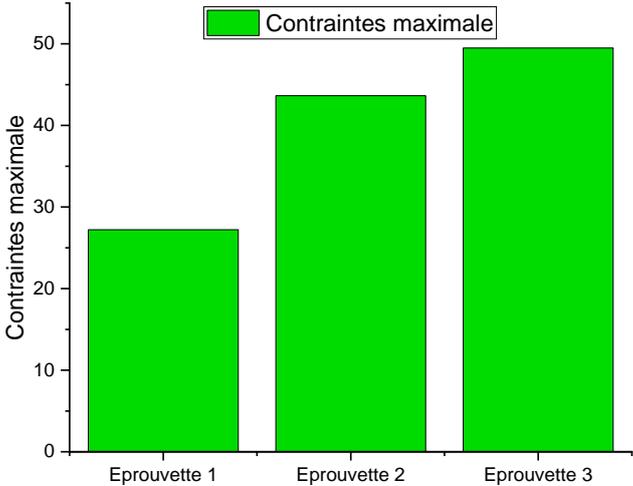


Figure 25 : Contraintes maximales des éprouvettes expérimentées

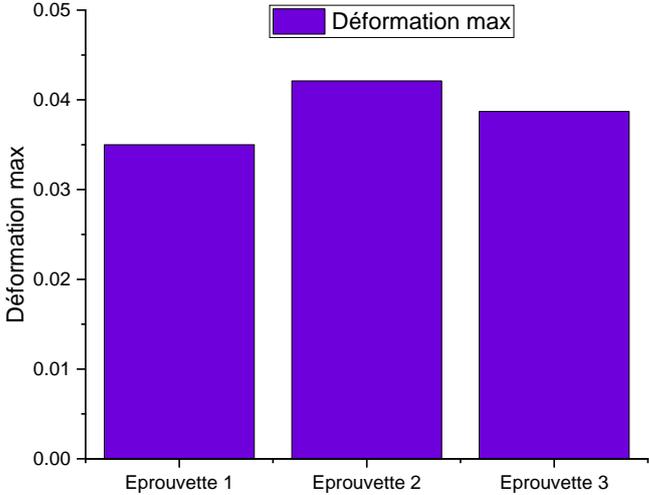


Figure. Déformation maximale des éprouvettes expérimenté

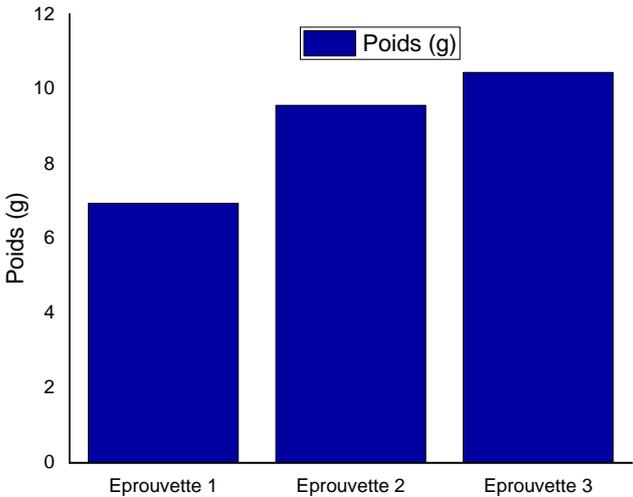


Figure 26 : Poids des éprouvettes expérimenté

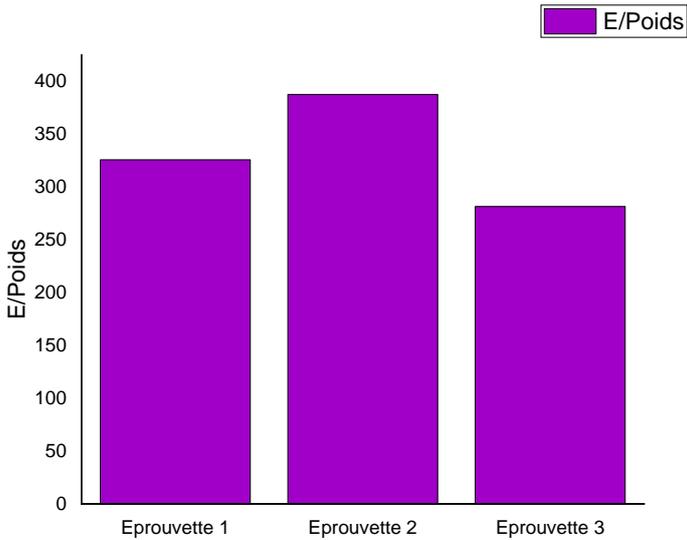


Figure. Rapport Module de Young-Poids E/poids des éprouvettes expérimenté

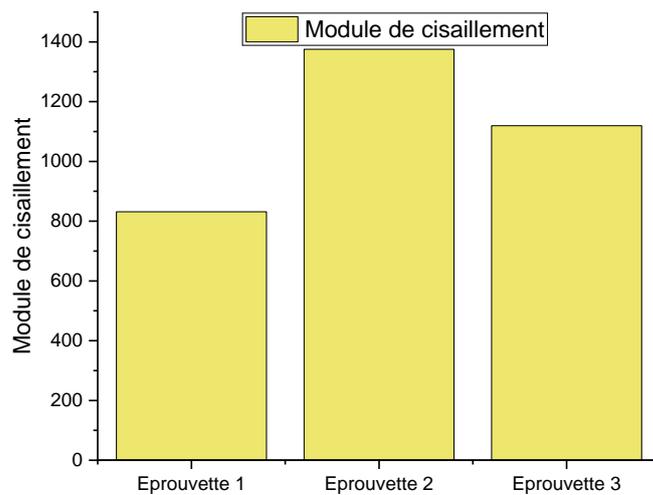


Figure 27 : Module de cisaillement des épreuves calcule

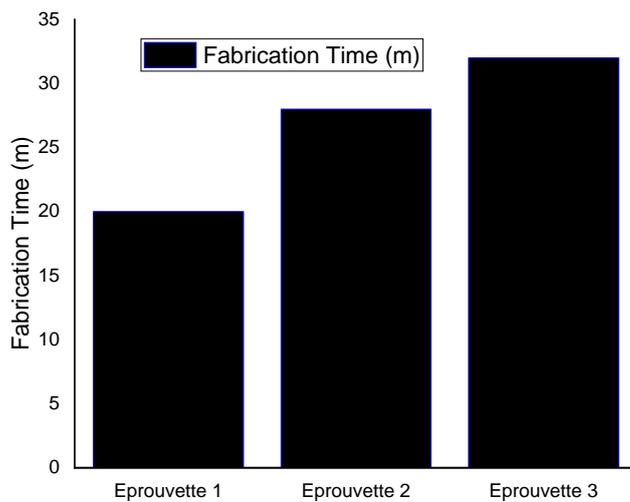


Figure 28 : Mesure de temps de fabrication des épreuves.

5. Analyse des Résultats :

5.1. Rigidité (Module de Young) :

- **Epreuve 1** : 2261 MPa
- **Epreuve 2** : 3708 MPa
- **Epreuve 3** : 2940 MPa

L'éprouvette 2 a le module de Young le plus élevé, indiquant une rigidité supérieure par rapport aux éprouvettes 1 et 3, de 64 % et 26,12 % respectivement.

5.1.Explication :

L'éprouvette 2 a la rigidité la plus élevée. Cela signifie qu'elle se déformera le moins sous une contrainte donnée, ce qui en fait le matériau le plus rigide des trois. Une haute rigidité est généralement souhaitable dans des applications structurales où une déformation minimale sous charge est critique pour la performance et la durabilité.

5.2.Coefficient de Poisson:

- **Eprouvette 1** : 0.36
- **Eprouvette 2** : 0.348
- **Eprouvette 3** : 0.313

L'éprouvette 3 a le plus petit coefficient de Poisson par rapport aux éprouvettes 1 et 2, avec des baisses de -13,5 % et -10 % respectivement., ce qui peut indiquer une meilleure performance sous charge en présentant une petite déformation transversale.

5.2.1.Explication

Le coefficient de Poisson plus faible (0.313 pour l'éprouvette 3 par rapport à 0.36 et 0.348 pour les autres éprouvettes) signifie que, sous une même contrainte longitudinale, l'éprouvette 3 subira moins de déformation latérale. Cela peut être interprété comme une meilleure performance en termes de résistance à la déformation transversale, ce qui est souvent souhaitable pour des applications nécessitant une grande stabilité dimensionnelle.

5.3.Contrainte maximale:

- **Eprouvette 1** : 27.22 MPa
- **Eprouvette 2** : 43.64 MPa
- **Eprouvette 3** : 49.5 MPa

L'éprouvette 3 supporte la contrainte la plus élevée avant de céder par rapport aux éprouvettes 1 et 2, avec des augmentations de 81,8 % et 13,4 % respectivement.

5.3.1Explication

La contrainte maximale de 49.5 MPa de l'éprouvette 3 fait de ce matériau une option supérieure pour des applications nécessitant une haute résistance à la traction. Elle offre une meilleure performance en termes de capacité à supporter des charges avant la rupture, par rapport aux autres éprouvettes étudiées. Cela en fait un choix idéal pour des environnements exigeants où la robustesse et la durabilité sont des priorités.

5.4.Déformation maximale :

- **Eprouvette 1** : 0.035
- **Eprouvette 2** : 0.04211
- **Eprouvette 3** : 0.0387

L'éprouvette 2 a la plus haute déformation maximale par rapport aux éprouvettes 1 et 3, avec des augmentations de 20,2 % et 8,7 % respectivement., indiquant qu'elle peut s'allonger davantage (4.211%) avant de se rompre.

5.4.1.Explication

L'éprouvette 2 est la meilleure en termes de déformation maximale car elle peut se déformer de 0.04211 (ou 4.211%) avant de se rompre, indiquant qu'elle est la plus ductile. Une plus grande ductilité signifie que le matériau peut absorber plus d'énergie et subir plus de déformation avant de se rompre, ce qui est souvent souhaitable dans des applications où la flexibilité et la capacité à résister aux chocs sont importantes.

5.5.Module de cisaillement :

- **Eprouvette 1** : 831.25 MPa
- **Eprouvette 2** : 1375.4 MPa
- **Eprouvette 3** : 1119.6 MPa

L'éprouvette 2 a le module de cisaillement le plus élevé par rapport aux éprouvettes 1 et 3, avec des augmentations de 65.4 % et 22.8 % respectivement.

5.5.1.Explication

Éprouvette 2 (1375.4 MPa) est la meilleure en termes de module de cisaillement, ce qui la rend plus appropriée pour les applications nécessitant une haute résistance aux forces de cisaillement. Cette caractéristique est essentielle pour assurer la performance et la durabilité dans des environnements où les charges de cisaillement sont prédominantes.

5.6.Poids :

- **Eprouvette 1** : 6.94 g
- **Eprouvette 2** : 9.56 g
- **Eprouvette 3** : 10.44 g

L'éprouvette 1 est la plus légère à celui des éprouvettes 2 et 3, avec des diminutions de -27,4 % et -33,52 % respectivement.

5.6.1.Explication

L'éprouvette 1 (6.94 g) est la meilleure en termes de poids, ce qui en fait le choix optimal pour des applications où un poids minimal est crucial pour les performances,

5.7.Temps de fabrication:

- **Eprouvette 1** : 20 min
- **Eprouvette 2** : 28 min
- **Eprouvette 3** : 32 min

L'éprouvette 1 nécessite le moins de temps de fabrication à celui des éprouvettes 2 et 3, avec des baisses de -28,57 % et -37,5 % respectivement.

- **5.7.1.Explication**

L'éprouvette 1 est la meilleure en termes de temps de fabrication de 20 minutes, ce qui en fait le choix optimal pour des applications où la rapidité de production est cruciale pour améliorer l'efficacité, réduire les coûts et répondre rapidement à la demande du marché.

5.8.Rigidite (E)/Poids :

- **Eprouvette 1** : 325.8
- **Eprouvette 2** : 387.8
- **Eprouvette 3** : 281.6

L'éprouvette 2 a le meilleur rapport E/Poids que celui des éprouvettes 1 et 3, avec des augmentations de 60 % et 14,28 % respectivement.

- **5.8.1.Explication**

L'éprouvette 2 se distingue par son rapport E/poids le plus élevé parmi les trois, avec une valeur de 387.8. Cette caractéristique démontre qu'elle offre la meilleure rigidité par rapport à son poids, ce qui en fait un choix optimal pour des applications où la légèreté et la rigidité sont des critères essentiels.

Pour déterminer le meilleur modèle parmi les éprouvettes proposées dans cette étude, en tenant compte de valeurs et de rapports précis, nous recommandons l'utilisation de la méthode des facteurs de pondération.

6. La méthode des facteurs de pondération :

La méthode des "Weight-factors" (ou facteurs de pondération) est une approche efficace pour sélectionner la meilleure éprouvette parmi plusieurs alternatives en tenant compte de différents critères de performance. Cette méthode implique l'attribution de poids spécifiques à chaque critère en fonction de leur importance relative. Ensuite, un score pondéré est calculé pour chaque alternative, et celle avec le score le plus élevé est considérée comme la meilleure.[22], [23]

7. Principes de la méthode des facteurs de pondération :

- **Identification des critères** : Déterminer les critères pertinents pour l'évaluation des alternatives. Chaque critère doit être mesurable et significatif pour la décision à prendre.

- **Attribution des poids** : Consiste à distribuer des valeurs proportionnelles aux critères en fonction de leur importance relative dans la décision. Ces poids peuvent être déterminés par diverses méthodes, comme la comparaison par paires, l'analyse hiérarchique des processus (AHP), ou les jugements d'experts. L'ensemble des poids attribués doit totaliser 1 (ou 100%).
- **Normalisation des critères** : Les valeurs des critères sont normalisées pour les rendre comparables. Pour les critères à maximiser ou minimiser, on utilise généralement la formule :

Pour les critères à maximiser, on utilise :

$$\text{Valeur normalisée} = \frac{\text{Valeur actuelle}}{\text{Valeur maximale}}$$

Pour les critères à minimiser, on utilise :

$$\text{Valeur normalisée} = \frac{\text{Valeur minimale}}{\text{Valeur actuelle}}$$

-Calcul des scores pondérés : Chaque valeur normalisée est multipliée par le poids correspondant, et les résultats sont additionnés pour obtenir un score pondéré pour chaque alternative :

$$\text{Score pondéré} = \sum_{i=1}^n w_i \times \text{Valeur normalisée}_i$$

-Comparaison des scores : Les scores pondérés des alternatives sont comparés pour identifier celle qui a la meilleure performance globale en fonction des critères et des poids attribués.

8. Application

Dans notre étude des éprouvettes, nous souhaitons calculer le score pondéré avec des poids w_i où l'importance de toutes les propriétés des éprouvettes est égale. Les propriétés (Module de Young (E), Contrainte maximale, Déformation maximale, Module de cisaillement, E/Poids) doivent être maximisées, tandis que les propriétés (Coefficient de Poisson, Poids, Temps de fabrication) doivent être minimisées (Voir Tableau).

9. Attribuer des poids égaux à chaque critère des propriétés :

- Puisqu'il y a 8 critères, chaque critère aura un poids de $\frac{1}{8} = 0.125$
- **Normalisation des critères**

Tableau 6 : Valeurs maximales et minimales

Critère	Valeur maximale	Valeur minimale
Module de Young (MPa)	3708	/
Coefficient de Poisson	/	0.313
Contrainte maximale (MPa)	49.5	/

Déformation maximale	0.04211	/
Module de cisaillement (MPa)	1375.4	/
Poids (g)	/	6.94
Temps de fabrication (min)	/	20
E/Poids	387.8	/

Tableau 7 : Normalisation des critères

Critère	Eprouvette 1	Eprouvette 2	Eprouvette 3
Module de Young (MPa)	$\frac{2261}{3708} = 0.61$	$\frac{3708}{3708} = 1$	$\frac{2940}{3708} = 0.79$
Coefficient de Poisson	$\frac{0.313}{0.36} = 0.869$	$\frac{0.313}{0.348} = 0.899$	$\frac{0.313}{0.313} = 1$
Contrainte maximale (MPa)	$\frac{27.22}{49.5} = 0.55$	$\frac{43.64}{49.5} = 0.88$	$\frac{49.5}{49.5} = 1$
Déformation maximale	$\frac{0.035}{0.04211} = 0.83$	$\frac{0.04211}{0.04211} = 1$	$\frac{0.0387}{0.04211} = 0.92$
Module de cisaillement (MPa)	$\frac{831.25}{1375.4} = 0.6$	$\frac{1375.4}{1375.4} = 1$	$\frac{1119.6}{1375.4} = 0.814$
Poids (g)	$\frac{6.94}{6.94} = 1$	$\frac{6.94}{9.56} = 0.726$	$\frac{6.94}{10.44} = 0.665$
Temps de fabrication (min)	$\frac{20}{20} = 1$	$\frac{20}{28} = 0.714$	$\frac{20}{32} = 0.625$
E/Poids	$\frac{325.8}{387.8} = 0.84$	$\frac{387.8}{387.8} = 1$	$\frac{281.6}{387.8} = 0.726$

10. Calcule le score pondéré des éprouvettes

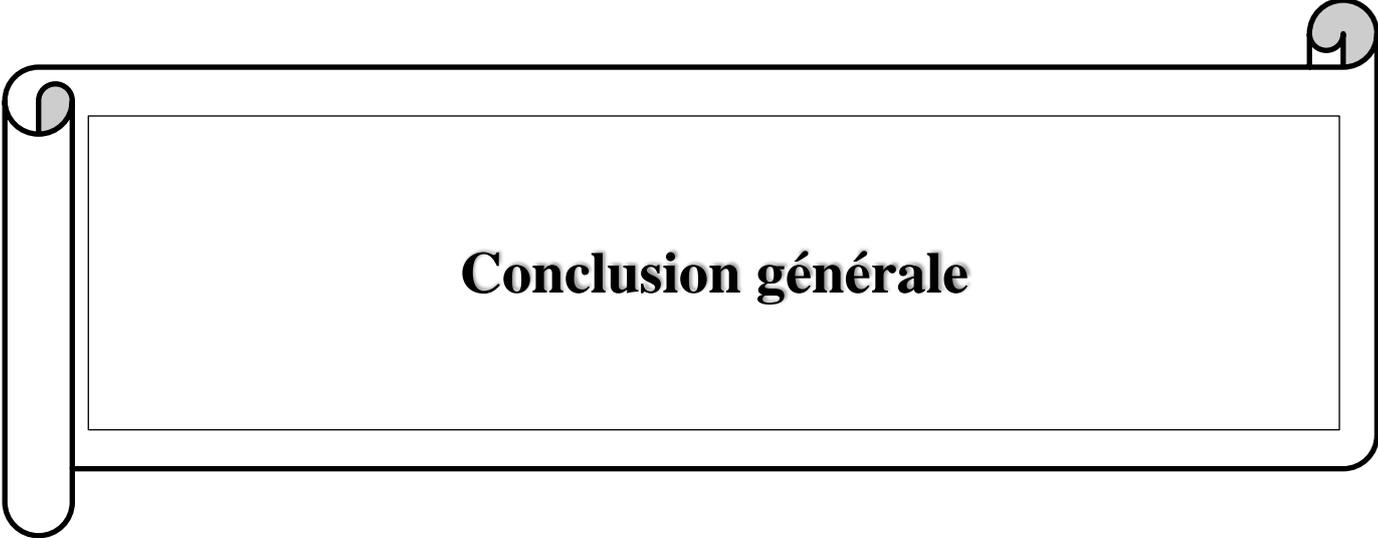
$$\text{Score Eprouvette} = \sum_{i=1}^8 0.125 \times \text{Valeur normalisée}_i$$

Tableau 8 : Comparaison des scores

Eprouvette	Score pondéré
Eprouvette 1	$(0.125 \times 0.61 + 0.125 \times 0.869 + 0.125 \times 0.55 + 0.125 \times 0.83 + 0.125 \times 0.6 + 0.125 \times 1 + 0.125 \times 1 + 0.125 \times 0.84) = \mathbf{0.78}$
Eprouvette 2	$(0.125 \times 1 + 0.125 \times 0.898 + 0.125 \times 0.88 + 0.125 \times 1 + 0.125 \times 1 + 0.125 \times 0.726 + 0.125 \times 0.714 + 0.125 \times 1) = \mathbf{0.90}$
Eprouvette 3	$(0.125 \times 0.79 + 0.125 \times 1 + 0.125 \times 1 + 0.125 \times 0.91 + 0.125 \times 0.814 + 0.125 \times 0.665 + 0.125 \times 0.625 + 0.125 \times 0.726) = \mathbf{0.81}$

11. Conclusion

Avec des poids égaux pour tous les critères, l'éprouvette 2 obtient le score pondéré le plus élevé, ce qui en fait la meilleure option parmi les trois. Elle est suivie par l'éprouvette 3, puis l'éprouvette 1.



Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude a montré divers aspects de la fabrication additive des plastiques, en mettant particulièrement l'impression 3D par dépôt de fil fondu. Un plan d'expérience a été proposé pour la conception géométrique assistée par ordinateur (CAO) des éprouvettes conformes à la norme ISO 527 en vue des essais de traction. Ces éprouvettes ont été fabriquées en PLA selon trois modèles d'impression 3D basés sur la structure de remplissage "Cubic Subdivision", en utilisant le logiciel de tranchage Ultimaker Cura.

- Le premier modèle est conçu avec 2 couches pour la paroi ainsi que pour les couches supérieures et inférieures.
- Le second modèle possède 4 couches pour la paroi ainsi que pour les couches supérieures et inférieures.
- Le troisième modèle est conçu avec 6 couches pour la paroi ainsi que pour les couches supérieures et inférieures.

Ensuite, une étude expérimentale sur les essais mécaniques de traction des éprouvettes a été menée. Ces tests ont été réalisés avec une machine de traction universelle INSTRON, permettant de mesurer diverses propriétés telles que la contrainte maximale, la déformation maximale, le module élastique longitudinal et le coefficient de Poisson. Les résultats ont montré que les paramètres d'impression influencent significativement la résistance mécanique des pièces. L'analyse des résultats a révélé que le modèle 2 est le meilleur pour plusieurs raisons :

- Le modèle n°2 présente une valeur supérieure du module de Young de 3708 MPa par rapport aux modèles n°1 et n°3, avec des augmentations de 64 % et 26,12 % respectivement. De plus, le modèle n°2 a augmenté la valeur du module d'élasticité du PLA, qui varie entre 3000 et 3500 MPa selon la littérature.
- De plus, le modèle n°2 a augmenté la valeur du module d'élasticité du PLA, qui varie entre 3000 et 3500 MPa selon la littérature.
- Le modèle n°2 présente une déformation maximale plus élevée de 0.04211

par rapport aux éprouvettes n°1 et n°3, avec des augmentations de 20,2 % et 8,7 % respectivement. • Le modèle n°2 présente un module de cisaillement de 1375,4 MPa, plus élevé par rapport aux éprouvettes n°1 et n°3, avec des augmentations de 65,4 % et 22,8 % respectivement.

- Le rapport entre la rigidité et la légèreté du modèle n°2 est plus élevé, avec une valeur de 387,8, dépassant celles des modèles n°1 et n°3 de 60 % et 14,28 % respectivement.

Ensuite, la méthode des facteurs de pondération a été utilisée pour évaluer et confirmer le meilleur modèle imprimé, en tenant compte des critères maximaux normalisés de module de Young (E), contrainte maximale, déformation maximale, module de cisaillement, et E/Poids, ainsi que des critères minimaux normalisés de coefficient de Poisson, poids et temps de fabrication. Cette méthode a confirmé que le modèle 2 est la meilleure structure, avec un score pondéré de 0,9, comparé aux modèles 1 et 3, qui ont respectivement obtenu des scores de 0,81 et 0,78.

Perspective :

Cette recherche a démontré l'importance de l'optimisation des paramètres d'impression pour obtenir des pièces performantes et durables, capables de résister aux contraintes environnementales. Les échantillons étudiés ont révélé des différences notables en termes de rigidité, de résistance à la traction, et de comportement sous charge, ce qui ouvre des perspectives pour des études futures visant à améliorer davantage la qualité des pièces imprimées en 3D.

Résumé :

L'étude examine l'impression 3D de plastiques, en se focalisant sur le PLA et trois modèles d'éprouvettes conformes à la norme ISO 527, fabriquées avec différentes configurations de remplissage "Cubic Subdivision" via Ultimaker Cura. Des tests de traction réalisés avec une machine INSTRON révèlent que les paramètres d'impression influencent significativement les propriétés mécaniques des pièces. Le modèle 2, caractérisé par 4 couches pour la paroi et les couches supérieures et inférieures, surpasse les modèles 1 et 3 en termes de module de Young, déformation maximale, module de cisaillement et rapport entre rigidité et légèreté. Une évaluation pondérée des critères normalisés confirme que le modèle 2 offre les meilleures performances globales par rapport aux autres modèles testés.

Summary :

The study explores 3D printing of plastics, focusing on PLA, with three test specimen models designed according to ISO 527 standards using "Cubic Subdivision" infill configurations in Ultimaker Cura:

1. The first model uses 2 layers for the walls and top/bottom layers.
2. The second model uses 4 layers for the walls and top/bottom layers.
3. The third model uses 6 layers for the walls and top/bottom layers.

Mechanical tensile tests were conducted using an INSTRON universal testing machine, measuring parameters such as maximum stress, maximum deformation, longitudinal elastic modulus, and Poisson's ratio. Results indicate significant influence of printing parameters on mechanical strength.

Detailed analysis reveals that Model 2, with 4 layers for walls and top/bottom layers, outperforms Models 1 and 3 in Young's modulus, maximum deformation, shear modulus, and stiffness-to-weight ratio. Weighted evaluation of standardized criteria confirms that Model 2 provides superior overall performance compared to the other tested models.

ملخص :

تتناول الدراسة طباعة البلاستيك بتقنية ثلاثية الأبعاد، مع التركيز على الـ باستخدام تكوينات ISO 527 وثلاث نماذج للقطع التجريبية تم تصميمها وفقًا لمعايير PLA Ultimaker Cura في برنامج "Cubic Subdivision"

1. النموذج الأول يستخدم 2 طبقة للجدران والطبقات العلوية / السفلية.
2. النموذج الثاني يستخدم 4 طبقات للجدران والطبقات العلوية / السفلية.
3. النموذج الثالث يستخدم 6 طبقات للجدران والطبقات العلوية / السفلية.

الشاملة، حيث تم INSTRON تم إجراء اختبارات الشد الميكانيكية باستخدام آلة اختبار قياس معاملات مثل الإجهاد الأقصى، أقصى تشوه، النموذج المروني الطولي، ونسبة بواسون. أظهرت النتائج تأثيرًا كبيرًا لمعاملات الطباعة على القوة الميكانيكية

تكشف التحليلات المفصلة أن النموذج رقم 2، الذي يتميز بـ 4 طبقات للجدران والطبقات العلوية / السفلية، يفوق النماذج 1 و 3 من حيث موديل يونغ، أقصى تشوه، موديل الانحراف، ونسبة الصلادة إلى الوزن. التقييم المُزوّد بعوامل الوزن للمعايير الموحدة يؤكد أن النموذج رقم 2 يوفر أداءً عاليًا على الإجمال مقارنة بالنماذج الأخرى المختبرة

]

La bibliographie

- [1] Verhulst Julien " Analyse de l'état et de l'avenir du marché de l'impression 3d », Mémoire-recherche en vue de l'obtention du titre de Master en sciences de gestion, Université Catholique de Louvain. 2015
- [2] site: https://cofab-in-bondy.fr/?page_id=5347
- [3] SOLIDWORKS Web Help. (2024) . <https://help.solidworks.com/>
- [4] Ultimaker Cura. (2024). <https://ultimaker.com/fr/software/ultimaker-cura/>
- [5] Adnene SAKLY " Fabrication additive de pièces à base d'alliages métalliques complexes ", thèse université de Lorraine, 2013
- [6] The STL Tutorial and Reference Guide: C++ Programming with the Standard Template Library par David R. Musser et Atul Saini. (1995)
- [7] Blum, G., M.d. Blois, and N. Tadjine L'impression 3D: de l'émerveillement technique aux enjeux organisationnels, économiques et sociétaux. 2017.
- [8] Additive Manufacturing Technologies: 3D Printing, Rapid Prototyping, and Direct Digital Manufacturing" by Ian Gibson, David Rosen, and Brent Stucker. 2009
- [9] Gibson, I., Rosen, D. W., & Stucker, B. (2015). Additive manufacturing technologies: 3D printing, rapid prototyping, and direct digital manufacturing. Springer.
- [10] site: <https://www.prusa3d.com/fr/>
- [11] site : <https://www.3dnatives.com/en/pla-vs-abs-which-material-080820224/#!>
- [12] site:
https://fr.wikipedia.org/wiki/Acrylonitrile_butadi%C3%A8ne_styr%C3%A8ne
- [13] Peters, Edward N., "Plastics: Thermoplastics, Thermosets, and Elastomers", Handbook of Materials Selection, New York: John Wiley & Sons, Inc., pp. 363–365
- [14] Anders Södergård et Mikael Stolt, « Properties of lactic acid based polymers and their correlation with composition », Progress in Polymer Science,

vol. 27, 1er juillet 2002, p. 1123–1163 (DOI 10.1016/S0079-6700(02)00012-6, lire en ligne [archive], consulté le 15 juin 2016).

[15] ISO 527-2. Plastics- Determination of tensile des properties.

[16] SOLIDWORKS Web Help. (2024) . <https://help.solidworks.com/>

[17] "The STL Tutorial and Reference Guide: C++ Programming with the Standard Template Library" par David R. Musser et Atul Saini. (1995)

[18] Ultimaker Cura. (2024). <https://ultimaker.com/fr/software/ultimaker-cura/>

[19] ISO 527-2 Plastiques — Détermination des propriétés en traction. Partie 1: Principes généraux

[20] Doucement technique de instron, www.INSTRON 5969.com.

[21] wikipedia. https://fr.wikipedia.org/wiki/Module_de_cisaillement

[22] Michael F. Ashby - Materials Selection in Mechanical Design-Butterworth-Heinemann (1999).

[23] Triantaphyllou, E. (2000). Multi-Criteria Decision Making Methods: A Comparative Study. Springer Science & Business Media.

