

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة أبي بكر بلقايد – تلمسان

Université Aboubakr Belkaïd – Tlemcen –

Faculté de TECHNOLOGIE



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER**

En : Génie Mécanique

Spécialité : Constriction Mécanique

Par : HAMMOUMI Youssouf

MAHIAOUI Zakarya Seyf El Islam

Sujet

Etude comparative de la qualité des caractéristiques mécaniques de pièces mécaniques obtenues par impression 3D avec procédé FDM pour différents matériaux

Soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

M CHORFI Mohammed
Mme BELHADJ KACEM Fadia
M CHEIKH Abdelmadjid

MAA
MCA
Pr

Université de Tlemcen
Université de Tlemcen
Université de Tlemcen

Président
Examineur
Encadreur

Année universitaire : 2025 /2026

REMERCIEMENT

Tout d'abord, nous remercions ALLAH le Tout-Puissant pour Ses faveurs et Ses bontés, de nous avoir accordé la bonne santé psychique et physique, ainsi que le courage, la volonté et la patience nécessaires pour terminer ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer sincèrement notre gratitude envers notre encadreur, Monsieur CHEIKH Abdelmadjid, pour sa disponibilité, sa patience constante et son précieux encadrement. Ses conseils éclairés et son expertise ont grandement contribué à la réussite de ce travail.

Nous tenons également à exprimer notre profonde gratitude envers les membres du jury, la présidente Madame BELHADJ KACEM Fadia ainsi que l'examineur Monsieur CHORFI Mohammed, pour avoir accepté de juger ce travail. Leur volonté de consacrer leur temps à l'examen et à la correction de nos efforts est très appréciée.

Nous leur sommes reconnaissants et espérons être à la hauteur de la confiance qu'ils ont placée en nous.

Dédicaces

Nous sommes profondément reconnaissants envers Dieu pour Son amour infini, Sa grâce et Sa guidance tout au long de notre parcours académique. Grâce à Ses bénédictions et à Sa providence, nous avons pu atteindre nos objectifs. Merci, ô notre Dieu, pour les merveilleuses personnes que Vous avez placées dans nos vies. Nous dédions ce travail avec une immense gratitude, amour et respect. À nos chers parents, nous exprimons notre reconnaissance éternelle pour votre soutien inconditionnel et vos encouragements sans limites. Nous vous serons à jamais redevables.

Nous n'oublions pas nos familles élargies ainsi que nos amis ; merci d'avoir été présents à chaque étape de notre vie. Vos encouragements, votre soutien et votre amour sincère ont été une véritable source de réconfort et de motivation.

Nous adressons également une pensée pleine de respect et de miséricorde au défunt père de notre cher ami Youssef Hammomi.

نسأل الله أن يرحمه ويسكنه فسيح جناته، وأن يفتح له أبواب الجنة، وأن يجعل قبره جنّة من جنات النعيم.

Enfin, nous remercions Dieu de nous avoir entourés d'une famille et d'amis aussi formidables.

Résumé

Cette étude porte sur la caractérisation des propriétés mécaniques de pièces fabriquées par impression 3D, en analysant l'influence des paramètres d'impression tels que le matériau, l'orientation et le type de remplissage. Une préparation à la fabrication additive a été réalisée à l'aide des logiciels IdeaMaker (Raise3D) et SolidWorks afin d'optimiser les paramètres de tranchage.

Des éprouvettes ont été testées en traction à l'aide d'une machine de 600 kN, permettant d'évaluer leur comportement mécanique jusqu'à rupture. L'étude compare également différents motifs de remplissage (grille, gyroid et concentrique) afin d'analyser leur impact sur la résistance des pièces.

Les résultats montrent une variation significative des propriétés mécaniques selon les paramètres d'impression, confirmant l'importance de leur optimisation pour améliorer la performance des pièces imprimées en 3D.

Mots clés

FAO, Impression 3D, Système de tranchage, FDM, Modèle STL, Profile d'impression, IdeaMaker , SolidWorks, G-Code.

Abstract

This study focuses on the characterization of the mechanical properties of parts manufactured by 3D printing, by analyzing the influence of printing parameters such as material, orientation, and infill type. A preparation for additive manufacturing was carried out using IdeaMaker (Raise3D) and SolidWorks software in order to optimize slicing parameters.

Test specimens were subjected to tensile testing using a 600 kN machine, allowing the evaluation of their mechanical behavior up to failure. The study also compares different infill patterns (grid, gyroid, and concentric) in order to analyze their impact on the strength of the printed parts.

The results show a significant variation in mechanical properties depending on the printing parameters, confirming the importance of their optimization to improve the performance of 3D printed parts.

Keywords

CAD/CAM, 3D Printing, Slicing System, FDM, STL Model, Printing Profile, IdeaMaker, SolidWorks, G-Code.

تركز هذه الدراسة على توصيف الخواص الميكانيكية للأجزاء المصنعة عن طريق الطباعة ثلاثية الأبعاد، من خلال تحليل IdeaMaker (Raise3D) تأثير معلمات الطباعة مثل المواد والاتجاه ونوع التعبئة. تم إعداد التصنيع الإضافي باستخدام لتحسين معلمات التقطيع SolidWorks وبرنامج. تم اختبار أنابيب الاختبار في الجر باستخدام آلة 600 كيلو نيوتن، مما يجعل من الممكن تقييم سلوكها الميكانيكي حتى التمزق. تقارن الدراسة أيضا أنماط التعبئة المختلفة (الشبكة والجبرويد والمتحدة المركز) من أجل تحليل تأثيرها على قوة الأجزاء. تظهر النتائج اختلافا كبيرا في الخصائص الميكانيكية وفقا لمعلمات الطباعة، مما يؤكد أهمية تحسينها لتحسين أداء الأجزاء المطبوعة ثلاثية الأبعاد.

الكلمات المفتاحية

ملف تعريف الطباعة، STL نموذج FDM، منظمة الأغذية والزراعة. الطباعة ثلاثية الأبعاد. نظام التقطيع IdeaMaker، SolidWorks، G-Code.

Table des matières

REMERCIEMENT	2
<i>Dédicaces</i>	3
Résumé	4
Abstract	5
ملخص	6
Liste des Figure	10
Liste des tableaux	12
Abréviations	13
Table des unités	14
INTRODUCTION GÉNÉRALE	15
CHAPITRE 1 : Généralités sur l'impression 3D	17
1.1 Introduction	18
1.2 Principe général de fonctionnement de l'impression 3D	18
1.3 Les principaux procédés de fabrication additive	19
1.3.1 Dépôt de matière fondue FDM (Fused Deposition Modeling)	19
1.3.2 Fusion sélective de poudre par laser SLS / DMLS / LPF	20
1.3.3 Stéréolithographie optique SLA	21
1.4 Types d'imprimantes 3D	22
1.4.1 Imprimantes 3D de bureau (grand public)	22
1.4.2 Imprimantes 3D professionnelles	23
1.4.3 Imprimantes 3D industrielles	23
1.5 Matériaux utilisés dans cette étude	23
1.5.1 Acide polylactique — PLA	23
1.5.2 Acrylonitrile Butadiène Styrène — ABS	24
1.5.3 Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé — PETG	24
1.6 Conclusion	24
CHAPITRE 2 : Caractérisation mécanique et conception des éprouvettes	25
2.1 Introduction	26
2.2 Présentation et caractérisation des matériaux	26
2.2.1 Acide Polylactique — PLA	26
2.2.2 Acrylonitrile Butadiène Styrène — ABS	27
2.2.3 Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé — PETG	28
2.3 Machine de traction	29
2.3.1 3.1 Généralités sur la machine d'essai de traction 600 KN :	29

2.3.2	Paramètres mécaniques déterminés	30
2.3.3	Normes et conditions d'essai	30
2.4	Éprouvettes normalisées	31
2.4.1	Choix de la norme	31
2.4.2	Dimensions de l'éprouvette	32
2.4.3	Justification du nombre d'éprouvettes — 3 échantillons	33
2.4.4	Justification du nombre d'essais — 3 essais par configuration	33
2.5	Conception Assistée par ordinateur (CAO)	34
2.5.1	Introduction	34
2.5.2	5.2 Présentation de la pièce modélisée	34
2.6	Démarche de modélisation	34
2.6.1	6.1. Création d'un nouveau document	34
2.6.2	Sélection du plan de travail et activation de l'esquisse	35
2.6.3	Création du profil 2D (Esquisse)	36
2.6.4	Extrusion du profil (Boss-Extrude)	36
2.6.5	Mise en plan	37
2.7	Conception de la pièce sous SolidWorks et exportation en fichier STL	38
2.7.1	Ouverture du fichier et accès à 'Enregistrer sous'	38
2.7.2	Choix du format STL	38
2.7.3	Nommage et enregistrement du fichier	39
2.7.4	Vérification du fichier STL par SolidWorks	40
2.8	Conclusion	40
CHAPITRE 3 : Préparation et impression des éprouvette avec système FAO Ideamaker		42
3.1	Introduction	43
3.2	2. L'imprimante 3D du Laboratoire IS2M utilisée dans l'étude	43
3.3	IdeaMaker	44
3.3.1	3.1 Définition	44
3.3.2	Importation du fichier STL sur IdeaMaker	44
3.3.3	Paramètres d'impression adoptés pour l'étude expérimentale	49
3.3.4	Les différents motifs de remplissage	50
3.4	4. Résultats selon les types de remplissage	53
3.4.1	4.1 Éprouvette avec remplissage Grille	53
3.4.2	Éprouvette avec remplissage Concentrique	54
3.4.3	4.3 Éprouvette avec remplissage Gyroïde	54
3.5	Présentation des éprouvettes finales en PLA et PETG selon les différents motifs de remplissage	54
3.5.1	Présentation des éprouvettes finales obtenues de PLA	54
3.5.2	Présentation des éprouvettes finales obtenues de PETG	55

3.6	Problème d'adhérence rencontré lors de l'impression de l'ABS.....	56
3.6.1	modification de la conception	57
3.6.2	Préparation du modèle pour l'impression 3D.....	58
3.6.3	État final après impression	58
3.6.4	Présentation des éprouvettes finales obtenues de ABS	59
3.7	Conclusion	59
CHAPITRE 4	Les essais et exploitation des données	60
4.1	Introduction	61
4.2	Étude expérimentale	61
4.3	Comportement en traction des éprouvettes imprimés.....	61
4.3.1	Présentation de l'éprouvette (avant essai).....	61
4.3.2	Mise en place de l'éprouvette dans la machine.....	62
4.3.3	3.3 Rupture de l'éprouvette	63
4.3.4	3.4 Exploitation des résultats (tables + graphes).....	64
4.4	Formules utilisées.....	66
4.4.1	Contrainte σ	66
4.4.2	Déformation ε	67
4.4.3	Module de Young E	67
4.5	Exemple de Calcul	67
4.5.1	Points relevés : Zone Élastique.....	67
4.5.2	Calcul de σ et ε pour chaque point	67
4.5.3	Calcul du Module de Young E	68
4.5.4	Résultat Final Éprouvette 1	69
4.6	Présentation et Analyse des Résultats	69
4.6.1	6.1 Résultats PLA (100% remplissage)	69
4.6.2	Résultats PETG (100% remplissage)	70
4.6.3	Résultats ABS (100% remplissage).....	72
4.7	Observations Préliminaires	73
4.8	Analyse Graphique et Interprétation des Résultats.....	74
4.8.1	Résistance Maximale R_m : Par Matériau et Motif	74
4.8.2	Résistance Maximale R_m : Moyenne Globale par Matériau.....	75
4.8.3	Résistance Maximale R_m : Moyenne Globale par Motif	76
4.8.4	Module de Young E :Par Matériau et Motif.....	77
4.8.5	Module de Young E : Moyenne Globale par Matériau.....	78
4.9	Conclusion	79
CONCLUSION GÉNÉRALE		80
Références bibliographiques		82

Liste des Figure

Figure 1.1 Dépôt de fil (FDM) [8].....	20
Figure 1.2 Principe de la fusion sélective de poudre par laser (SLS) [7].....	21
Figure 1.3 Stéréolithographie (SLA) technologie d'impression 3D	22
Figure 2.1 Bobines de PLA sur l'imprimante 3D du Laboratoire IS2M.....	26
Figure 2.2 Bobines de ABS sur l'imprimante 3D du Laboratoire IS2M.....	27
Figure 2.3 Bobines de PETG sur l'imprimante 3D du Laboratoire IS2M.....	28
Figure 2.4 Essai de traction sur la machine Controlab 600KN au laboratoire matériaux de construction[11]	30
Figure 2.5 Forme éprouvette et dimension selon ISO 527-2 [13].....	35
Figure 2.6 Création d'un nouveau document.....	35
Figure 2.7 Sélection du plan de travail et activation de l'esquisse	35
Figure 2.8 Création de l'éprouvette	36
Figure 2.9 Boss-Extrude de l'éprouvette.....	37
Figure 2.10 Mise en plan	38
Figure 2.11 Fenêtre d'enregistrement du fichier STL sous SolidWorks.....	38
Figure 2.12 Fenêtre d'enregistrement du fichier STL sous SolidWorks.....	39
Figure 2.13 Fichier STL de l'éprouvette enregistré sur le Bureau	40
Figure 2.14 Exemple de l'éprouvette avec maillage	40
Figure 3.1 Imprimante Raise3D Pro2 du Laboratoire IS2M.....	44
Figure 3.2 Importation du modèle STL.....	45
Figure 3.3 choix de fichier STL	45
Figure 3.4 Lancement de tranchage.....	46
Figure 3.5 Sélectionne du type d'imprimante	46
Figure 3.6 Sélectionner du type filament	47
Figure 3.7 La sélection du profil de «Slicing» et le lancement du tranchage.....	48
Figure 3.8 Prévisualisation de l'effet de tranchage sur «l'éprouvette» par IdeaMaker	49
Figure 3.9 motif de remplissage concentrique	50
Figure 3.10 motif de remplissage Gyroïde	51
Figure 3.11 motif de remplissage Grille.....	51
Figure 3.12 téléchargement de G-Code.....	52
Figure 3.13 Enregistrement de G-Code.....	52
Figure 3.14 insertion de clé USB.....	53
Figure 3.14 Impression de modèle.....	53
Figure 3.15 Éprouvettes avec remplissage Grille	54
Figure 3.16 Éprouvettes avec remplissage Concentrique	54
Figure 3.17 Éprouvettes avec remplissage Gyroïde	54
Figure 3.18 Éprouvette finale imprimée en PLA.....	55
Figure 3.19 Éprouvette finale imprimée en PETG.....	56
Figure 3.20 Problème d'adhérence lors de l'impression de l'ABS (décollement).....	57
Figure 3.21 Modèle d'éprouvette optimisé avec congés et éléments d'extrémité ajoutés.....	58
Figure 3.22 Préparation du modèle pour l'impression 3D dans le logiciel de slicing	58
Figure 3.23 Éprouvette finale obtenue après impression 3D	59
Figure 3.24 Éprouvette finale imprimée en ABS.....	59
Figure 3.1 Éprouvette de traction imprimée en 3D avant essai.....	62
Figure 3.2 Installation de l'éprouvette dans la machine de traction Controlab	63
Figure 3.3 Rupture de l'éprouvette après essai de traction	64
Figure 3.4.2 Courbes contrainte-déformation des matériaux étudiés.....	66
Figure 4.1 Résistance maximale R_m (N/mm ²) par matériau et motif d'impression.....	74
Figure 4.2 R_m moyen global par matériau (tous motifs confondus)	75
Figure 4.3 R_m moyen global par motif (tous matériaux confondus).....	76

Figure 4.4 Module de Young E (MPa) par matériau et motif d'impression	77
Figure 4.5 Module de Young E moyen global par matériau (tous motifs confondus).....	78

Liste des tableaux

Tableau 2.1 Propriétés caractéristiques du PLA [10]	27
Tableau 2.2 Propriétés caractéristiques de l'ABS [10]	27
Tableau 2.3 Propriétés caractéristiques du PETG [10].....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2.4 Dimensions de l'éprouvette ISO 527-2	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 2.5 des démonstrations principales de l'éprouvette.....	Erreur ! Signet non défini.
Tableau 3.4.1 Résultats des essais de traction des différents matériaux	65

Abréviations

CAO : Conception assistée par ordinateur

FAO : Fabrication Assistée par Ordinateur

STL : STereoLithography

UV : UltraViolet

FDM : Fused Deposition Modeling

SLA : StereoLithography Apparatus

SLS : Selective Laser Sintering

PLA : Polylactic Acid

ABS : Acrylonitrile Butadiene Styrene

PETG : Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé

ISO : International Organization for Standardization

3D : Tridimensionnelles

FFF : Fused Filament Fabrication (Fabrication par filament fondu)

DMLS : Direct Metal Laser Sintering (Frittage laser direct de métal)

LPF : laser Powder Fusion

DTM : Design /Develepoment Technology Manufacturing

FFF : Fabrication du Filament Fondu

2D : deux dimensionnelles

TPU : Thermoplastic polyurethane (Polyuréthane thermoplastique)

Table des unités

Symbole	Signification	Unité	Symbole des unités
σ_r	Contrainte de rupture	KiloNewoton/millimètre ²	KN/mm ²
F_r	Force de ruptur	KiloNewoton	KN
S	Surface	Millimètre ²	Mm ²
ϵ_r	Déformation de rupture		
DL	Déplacement traverse	Millimètre	mm
L_0	La longueur entre les morts de la machine	Millimètre	mm
E_r	Module de young	Newoton/mètre ²	N/m ²

INTRODUCTION GÉNÉRALE

La fabrication additive, communément appelée impression 3D, constitue l'une des innovations technologiques les plus marquantes de ces dernières décennies. L'idée originale d'un procédé de fabrication couche par couche a été conceptualisée dès les années 1980 par Arthur C. Clarke, avant que des réalisations concrètes ne voient le jour. C'est en 1988 que la société américaine Stratasys a proposé le procédé de dépôt de matière fondue (FDM — Fused Deposition Modeling), posant ainsi les bases de l'impression 3D par thermoplastiques. En 1993, le Massachusetts Institute of Technology (MIT) développait la technologie Multi-Jet Modeling (MJM), élargissant encore le champ des procédés additifs disponibles. Il faudra attendre 2005 pour voir apparaître les premières imprimantes abordables et accessibles au grand public, notamment à travers le projet RepRap, qui a démocratisé l'usage de cette technologie.

Aujourd'hui, l'impression 3D occupe une place croissante dans de nombreux secteurs industriels : aéronautique, médical, automobile, conception de prototypes et fabrication de pièces sur mesure. Elle offre une grande liberté de conception géométrique, des délais de production réduits et la possibilité de fabriquer des pièces complexes sans outillage spécifique. Cependant, la qualité mécanique des pièces produites par FDM dépend fortement de plusieurs paramètres d'impression, notamment le matériau utilisé, le motif de remplissage et le taux de remplissage. La compréhension et la maîtrise de ces paramètres constituent un enjeu majeur pour tout ingénieur souhaitant utiliser cette technologie à des fins structurelles.

C'est dans ce contexte que s'inscrit le présent projet de fin d'études. Nous avons choisi d'aborder la thématique de l'impression 3D FDM en raison de la possibilité de l'utilisation de l'imprimante FDM Raise3D de laboratoire IS2M. L'objectif principal de ce travail est de réaliser une étude expérimentale et comparative des caractéristiques mécaniques — résistance à la traction R_m et module d'élasticité E — de pièces fabriquées par impression 3D avec trois matériaux thermoplastiques différents (PLA, ABS et PETG) selon trois motifs de remplissage distincts (Gyroïde, Grille et Concentrique), afin d'identifier les configurations les plus performantes.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres :

- **Le premier chapitre** présente les généralités sur l'impression 3D : définition, contexte historique, principaux procédés de fabrication additive (FDM, SLS, SLA), types d'imprimantes 3D, ainsi que la problématique et les objectifs du présent travail.
- **Le deuxième chapitre** concerne les matériaux étudiés. Il présente en détail les trois thermoplastiques retenus PLA, ABS et PETG leurs propriétés mécaniques et thermiques selon la littérature, ainsi que leur conception et modélisation CAO sous SolidWorks.

- **Le troisième chapitre** est consacré à la fabrication des éprouvettes normalisées ISO 527-2 Type 1A. Il détaille les paramètres d'impression retenus sous le logiciel de tranchage IdeaMaker (motifs Gyroïde, Grille et Concentrique, taux de remplissage 100 %) ainsi que le processus de fabrication sur l'imprimante FDM.
- **Le quatrième chapitre** traite de la partie expérimentale : réalisation des essais de traction sur machine Controlab 600 kN conformément à la norme EN 10002/1, présentation des résultats obtenus (R_m et E) et comparaison des propriétés mécaniques des neuf configurations étudiées.

Ce mémoire est clôturé par une conclusion générale synthétisant les principaux enseignements de l'étude et proposant des perspectives d'approfondissement.

CHAPITRE 1

Généralités sur l'impression

1.1 Introduction

La fabrication additive, ou impression 3D, est une technologie qui permet de construire des pièces tridimensionnelles par ajout de matière couche par couche à partir d'un modèle numérique, offrant une grande liberté de conception et des délais de fabrication réduits. Parmi les procédés de fabrication additive, le dépôt de matière fondue (FDM) est le plus répandu, notamment grâce à sa simplicité de mise en œuvre et à la diversité des matériaux thermoplastiques compatibles. Cependant, les propriétés mécaniques des pièces produites par FDM restent fortement influencées par les paramètres d'impression, en particulier la nature du matériau et le motif de remplissage adopté. Ce chapitre a pour objectif de présenter les bases théoriques nécessaires à la compréhension de cette étude : le principe général de l'impression 3D, les principaux procédés de fabrication additive (FDM, SLS, SLA), ainsi que les différents types d'imprimantes 3D disponibles. Ces éléments permettront de situer le contexte technologique dans lequel s'inscrit ce travail.

1.2 Principe général de fonctionnement de l'impression 3D

La technique d'impression 3D, qui est relativement nouvelle, a vu une forte croissance. Grâce à l'accroissement constant des capacités scientifiques et techniques de fabrication, on regroupe maintenant en impression 3D toutes les productions qui ne résultent pas d'un procédé traditionnel d'enlèvement de matière, mais d'un dépôt de matières en ajoutant des couches. Chaque couche est imprimée de manière bidimensionnelle dans le plan de la section du modèle numérique d'un volume. L'empilement des diverses couches de matière successive (d'abord faible hauteur, puis plus importante) contient progressivement la troisième dimension, qui est l'épaisseur de matière voulue pour construire la pièce. C'est ainsi que la technique de « fabrication additive » était présentée en opposition à la fabrication en soustraction. [2]

Le mouvement est asservi aux trois axes X, Y et Z et permet de placer la buse dans l'espace souhaité pour imprimer les volumes. Des imprimantes plus sophistiquées peuvent avoir des axes de rotation supplémentaires A et B. [2]

L'épaisseur des couches est l'un des principaux paramètres du procédé. Une couche plus épaisse permet un gain de temps d'impression en dégradant la qualité de surface, alors qu'une couche plus fine améliore la précision dimensionnelle. Les valeurs retenues pour une impression de qualité se situent en pratique entre 0,1 mm et 0,4 mm. [1]

1.3 Les principaux procédés de fabrication additive

Les procédés de fabrication additive sont caractérisés par une diversité de techniques en termes de principes de mise en forme de la matière et de type de matériau. Ce développement n'a de sens qu'à l'aune de la réponse à des besoins industriels conditionnés par les niveaux de précision, de résistance mécanique, de coût et de complexité géométrique des pièces convoitées. [2]

1.3.1 Dépôt de matière fondue FDM (Fused Deposition Modeling)

La méthode FDM, souvent désignée par l'acronyme FFF (Fused Filament Fabrication), consiste en un fonctionnement par extrusion d'un filament thermoplastique à travers une buse chauffée qui dépose la matière par superposition de couches, suivant un parcours défini par un logiciel FAO ; la matière déposée se solidifiant par refroidissement, garantissant ainsi la cohésion des couches, et donc, la pièce finale. [1]

Les propriétés mécaniques des pièces obtenues par FDM sont très sensibles aux paramètres d'impression :

- La nature du matériau (PLA, ABS, PETG...)
- La hauteur de couche
- Le taux et la forme de remplissage
- La température d'extrusion et la vitesse d'impression
- L'orientation des couches

Parmi ses points forts, ce procédé est très simple à mettre en œuvre, peu coûteux et les matériaux compatibles avec cette technologie sont assez largement disponibles. [1] En contrepartie, les pièces produites peuvent être sujettes à une anisotropie mécanique due à l'orientation des couches, ce qui limite leur utilisation pour les applications structurelles. [2]

C'est ce procédé, pourtant, qui est choisi ici, pour réaliser les éprouvettes de traction.

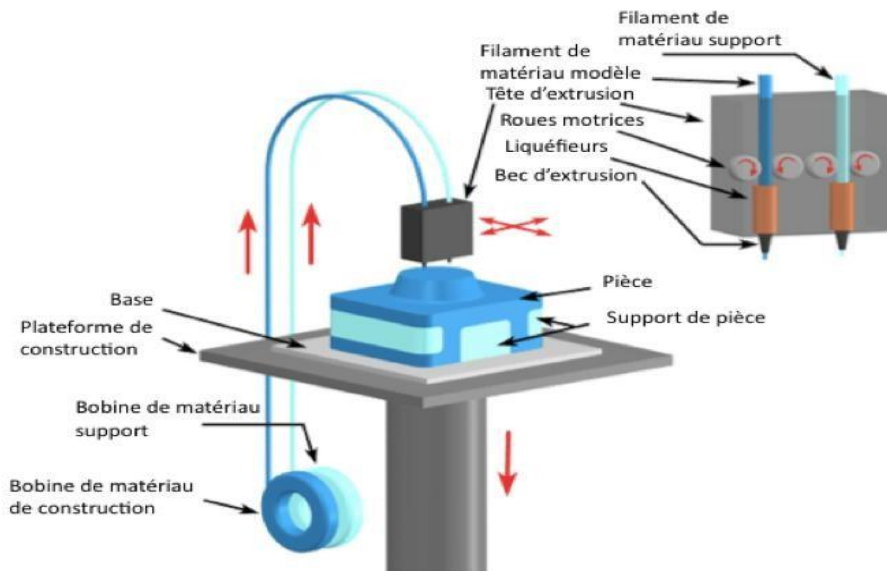


Figure 1.1 Dépôt de fil (FDM) [8]

1.3.2 Fusion sélective de poudre par laser SLS / DMLS / LPF

La conception de pièces de trois dimensions à partir de matériaux pulvérulents est une technique dont la première approche a été développée par Pierre Ciraud dans les années 70 ; [3] C'est cependant à partir des années 1990 que la technologie a connu son premier passage à l'industrialisation, notamment avec la commercialisation par la société DTM, en 1992, d'une machine basée sur le brevet déposé par Carl Deckard, et appelée Selective Laser Sintering (SLS) [4], au moment où la société allemande EOS a développé, en 1994, le Direct Metal Laser Sintering (DMLS). Le principe consiste à utiliser un lit de poudre sur lequel un faisceau laser va venir chauffer sélectivement les particules et les lier entre elles pour construire peu à peu la géométrie de la pièce. [5] Les poudres peuvent être des métaux ou des polymères, voire des céramiques, suivant l'application recherchée. Le procédé s'effectue en cycles successifs : dépôt d'une couche de poudre d'épaisseur fine, balayage qui génère les opérations laser suivant le profil de la section, abaissement de la plateforme, répétition jusqu'à l'obtention de la pièce.

En parallèle, des procédés de type Laser Powder Fusion (LPF) ont été développés, fondés sur l'usage d'un laser de forte puissance (souvent supérieure à 1500 W) combiné à une tête mobile projetant un flux de poudre métallique directement dans le domaine de fabrication. [5] Ces procédés

sont particulièrement adaptés à la fabrication de pièces mécaniques complexes à hautes performances dans les secteurs aéronautique, automobile et médical.

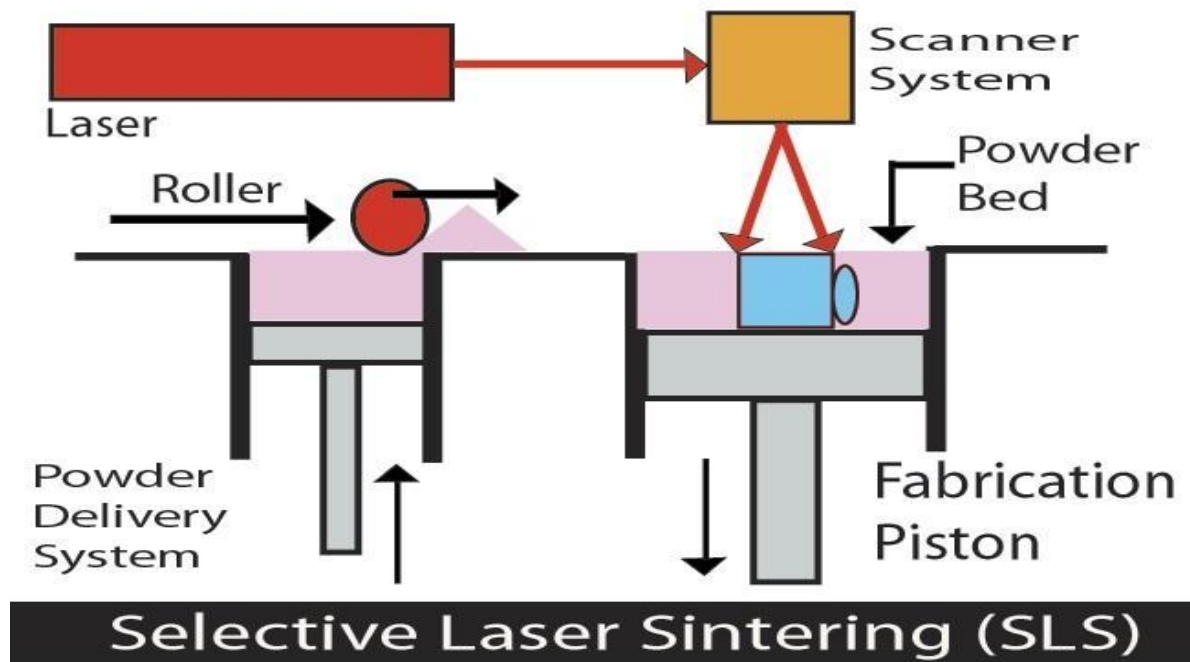


Figure 1.2 Principe de la fusion sélective de poudre par laser (SLS) [7]

1.3.3 Stéréolithographie optique SLA

La stéréolithographie (SLA) figure parmi les premières techniques de fabrication additive, développée à partir d'un processus de polymérisation, par l'intermédiaire d'un faisceau laser ultraviolet (UV), d'une résine liquide photosensible pour réaliser des objets en 3D de manière continue, en procédant par couches successives. [2]

Le processus débute avec la création d'un modèle numérique en trois dimensions, au moyen d'un logiciel de conception assistée par ordinateur (CAO) (SolidWorks, Autodesk Maya,...), exporté au format STL puis tranché en couches par un logiciel de tranchage. L'imprimante SLA se compose d'un bac de résine photosensible, d'une plateforme mobile selon l'axe Z, d'un système de raclage ainsi que d'un système optique composé d'un laser ultraviolet, de lentilles de focalisation et de miroirs galvanométriques. [7]

Le faisceau laser polymérise la résine par couches successives. Une fois solidifiée l'ensemble de la couche, la plateforme descend d'une épaisseur et un nouveau dépôt de résine est fait. Ce cycle se renouvelle jusqu'à l'obtention de la pièce souhaitée. [2][7]

Chabitre1 : Généralité sur l'impression 3D

Cette technologie est beaucoup appréciée pour sa grande précision dimensionnelle et sa capacité à obtenir des surfaces de haute qualité, en particulier dans le cadre de prototypes très détaillés, de pièces complexes ou d'applications médicales ou relatives au design industriel. [2]

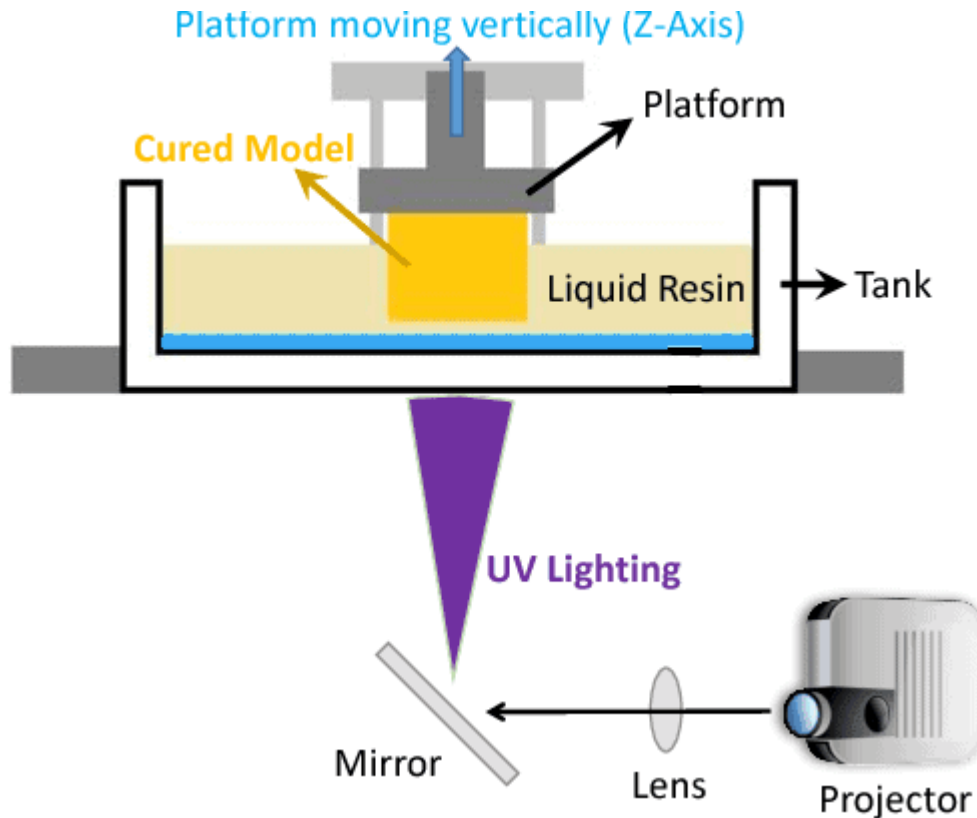


Figure 1.3 Stéréolithographie (SLA) technologie d'impression 3D

[9]

1.4 Types d'imprimantes 3D

Ce qui distingue les imprimantes 3D, ce n'est pas seulement leur façon de produire, mais aussi leurs caractéristiques techniques, leur prix et l'usage qu'on peut en faire. En général, on en distingue trois grandes catégories en fonction de l'usage visé.

1.4.1 Imprimantes 3D de bureau (grand public)

Parmi les imprimantes 3D présentes sur les marchés, on trouve en premier lieu les machines de type FFF ou FDM, principalement destinées aux utilisateurs de l'enseignement supérieur, de la recherche et du grand public, et dont la popularité est attribuée à l'accessibilité économique et à la facilité d'utilisation.[1] Devant un large éventail de matériaux compatibles (PLA, ABS, PETG...), celles-ci constituent un outil polyvalent de prototypage rapide et d'usage didactique.

1.4.2 Imprimantes 3D professionnelles

Ces imprimantes sont spécifiquement destinées à des secteurs tels que les bureaux d'études, les agences d'architecture ou encore les studios de design pour des travaux de prototypage rapide et validation de concepts. [6] Elles fournissent un rendu bien plus précis que les imprimantes du grand public et leurs seuls matériaux d'emploi sont des plastiques techniques comme les polyamides ou l'ABS.

1.4.3 Imprimantes 3D industrielles

Conçues pour répondre aux besoins de la production industrielle, elles assurent les meilleures résolutions du marché dans un large choix de matières : plastiques haute performance, céramique, métaux, cire ou sable [5]. Leur emploi se trouve dans des filières à forte exigence comme l'aéronautique, le médical, ou l'automobile.

1.5 Matériaux utilisés dans cette étude

Les performances et la qualité des pièces obtenues par le biais de l'impression 3D dépendent fortement du choix du matériau. C'est pourquoi trois thermoplastiques couramment utilisés dans le procédé FDM, le PLA, l'ABS et le PETG, ont été utilisés dans le cadre de ce travail. Ces matériaux possèdent des propriétés mécaniques, thermiques et physiques différentes, ce qui permet de comparer leur comportement en fabrication additive. [2]

1.5.1 Acide polylactique — PLA

Le PLA (Polylactic Acid) est un thermoplastique biodégradable issu de ressources renouvelables telles que l'amidon de maïs ou la canne à sucre. [2] C'est le matériau le plus utilisé en impression 3D FDM en raison de sa facilité d'impression, de sa faible température de fusion, de sa bonne stabilité dimensionnelle et de sa rigidité élevée. Il présente une bonne qualité de surface mais une faible résistance thermique (ramollissement vers 60°C) et une certaine fragilité mécanique sous choc, ce qui limite son utilisation pour des applications soumises à des charges élevées ou à des températures importantes. [2]

Dans cette étude, le PLA a présenté les meilleures propriétés mécaniques parmi les trois matériaux testés, avec une résistance maximale à la traction $R_m = 47,75 \text{ N/mm}^2$ et un module d'élasticité $E = 1275,5 \text{ MPa}$ pour le motif concentrique.

1.5.2 Acrylonitrile Butadiène Styrène — ABS

L'ABS est un thermoplastique d'origine pétrochimique largement utilisé dans l'industrie automobile et électronique. [2] Il se distingue par sa bonne résistance aux chocs, sa ténacité et sa meilleure tenue thermique par rapport au PLA (jusqu'à 80-100°C). En impression 3D, il nécessite des conditions de fabrication plus contrôlées : un plateau chauffant et parfois une enceinte fermée sont indispensables pour limiter le retrait thermique et les déformations (warping). [1]

Dans cette étude, l'ABS a présenté les propriétés mécaniques les plus faibles des trois matériaux testés, avec $R_m = 32,45 \text{ N/mm}^2$ et $E = 834,8 \text{ MPa}$ pour le motif concentrique.

1.5.3 Polyéthylène Téréphthalate Glycolisé — PETG

Le PETG est une variante du PET modifiée par l'ajout de glycol, ce qui améliore sa transparence et réduit sa fragilité. [2] Il constitue un compromis entre le PLA et l'ABS : il combine une bonne facilité d'impression avec de meilleures propriétés mécaniques, notamment une résistance aux chocs supérieure et une bonne flexibilité. Le PETG présente également une bonne résistance chimique, une faible tendance au retrait lors de l'impression et une excellente adhésion inter-couches. [1]

Dans cette étude, le PETG a affiché des performances intermédiaires, avec $R_m = 46,53 \text{ N/mm}^2$ et $E = 1070,7 \text{ MPa}$ pour le motif concentrique, soit des valeurs proches du PLA pour la résistance, avec une ténacité supérieure à l'ABS.

1.6 Conclusion

Ce premier chapitre a permis de dresser un panorama général de la fabrication additive, en présentant ses principaux procédés (FDM, SLS, SLA), les différents types d'imprimantes 3D selon leur usage, ainsi que les matériaux thermoplastiques retenus pour cette étude : le PLA, l'ABS et le PETG. Il ressort de cette synthèse bibliographique que le procédé FDM constitue une solution accessible et polyvalente, dont les performances mécaniques dépendent fortement des paramètres d'impression et du matériau utilisé.

Dans le chapitre suivant, nous nous intéresserons plus en détail aux propriétés mécaniques de ces trois matériaux à travers une revue de la littérature, afin d'établir une base de comparaison solide pour l'interprétation des résultats expérimentaux obtenus dans cette étude.

CHAPITRE 2

Caractérisation mécanique et conception des éprouvettes

2.1 Introduction

Ce chapitre présente le protocole expérimental mis en place pour caractériser le comportement mécanique des matériaux thermoplastiques fabriqués par impression 3D FDM. Après une présentation et une caractérisation rapide des trois matériaux utilisés (PLA, ABS et PETG), nous décrirons la machine de traction employée, les normes appliquées, les justifications du nombre d'éprouvettes et d'essais, puis la conception CAO des éprouvettes normalisées sous SolidWorks.

2.2 Présentation et caractérisation des matériaux

Les trois matériaux thermoplastiques utilisés dans cette étude ont été sélectionnés pour leurs propriétés mécaniques distinctes et leur compatibilité avec le procédé FDM. Une présentation synthétique de chacun, accompagnée de ses principales caractéristiques mécaniques et thermiques, est donnée ci-dessous.

2.2.1 Acide Polylactique — PLA

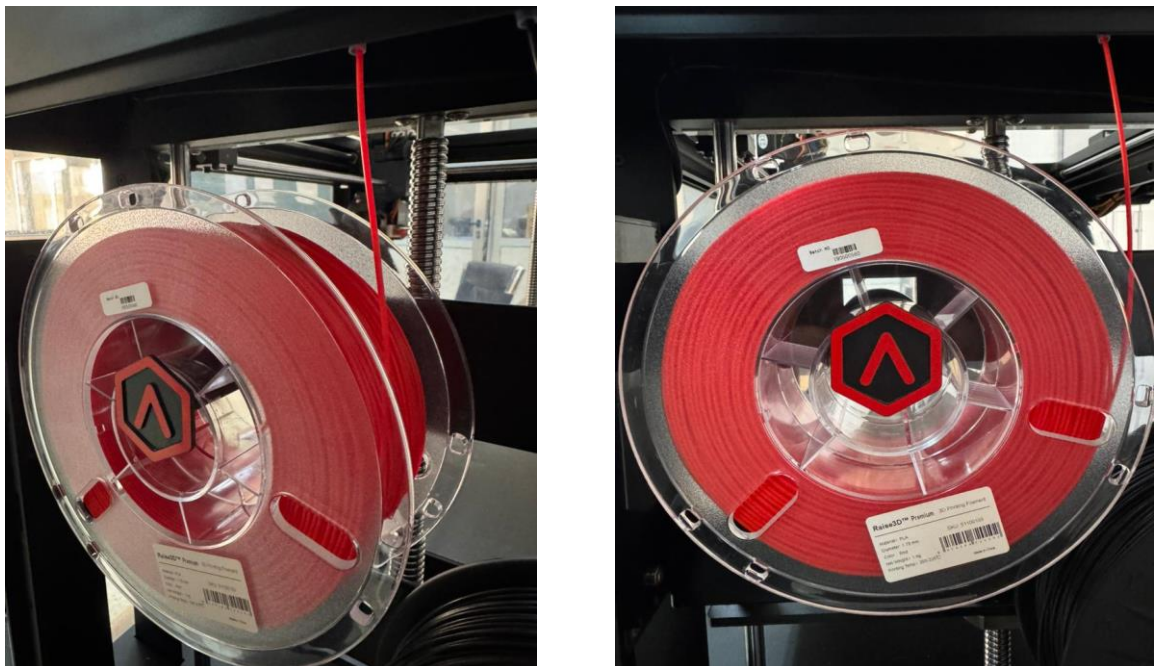


Figure 2.1 Bobines de PLA sur l'imprimante 3D du Laboratoire IS2M

Le PLA (Polylactic Acid) est un thermoplastique biodégradable d'origine végétale, largement utilisé en impression 3D FDM grâce à sa facilité d'impression, sa rigidité élevée et sa bonne stabilité dimensionnelle. [10] Il présente les meilleures propriétés mécaniques parmi les trois matériaux testés dans cette étude.

Tableau 2.1 Propriétés caractéristiques du PLA [10]

Propriété	Valeur	Unité
Masse volumique	1,24	g/cm ³
Température de fusion	145 – 160	°C
Température d'extrusion	190 – 220	°C
Résistance à la traction Rm	47 – 60	MPa
Module d'élasticité E	1 200 – 3 500	MPa
Allongement à la rupture	2 – 6	%
Résistance thermique	≈ 60	°C

2.2.2 Acrylonitrile Butadiène Styrène — ABS

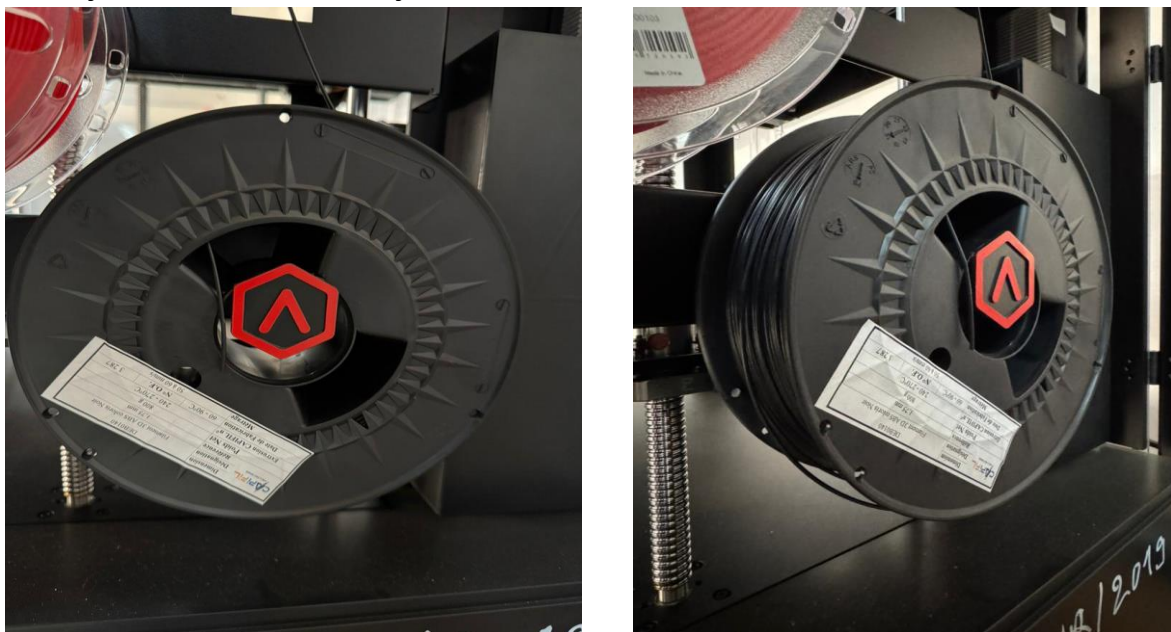


Figure 2.2 Bobines de ABS sur l'imprimante 3D du Laboratoire IS2M

L'ABS est un thermoplastique d'origine pétrochimique reconnu pour sa bonne résistance aux chocs et sa ténacité. [10] Il nécessite un plateau chauffant et une enceinte fermée pour limiter le phénomène de warping (retrait thermique). Dans cette étude, il présente les propriétés mécaniques les plus faibles.

Tableau 2.2 Propriétés caractéristiques de l'ABS [10]

Propriété	Valeur	Unité
Masse volumique	1,04 – 1,10	g/cm ³
Température de fusion	200 – 240	°C
Température d'extrusion	220 – 250	°C
Résistance à la traction Rm	27 – 45	MPa
Module d'élasticité E	600 – 2 700	MPa
Allongement à la rupture	5 – 50	%
Résistance thermique	≈ 80 – 100	°C

2.2.3 Polyéthylène Téréphtalate Glycolisé — PETG



Figure 2.3 Bobines de PETG sur l'imprimante 3D du Laboratoire IS2M

Le PETG est un compromis entre le PLA et l'ABS : il offre une bonne facilité d'impression, une excellente adhésion inter-couches, une bonne résistance chimique et une ductilité supérieure. [10] Dans cette étude, il affiche des performances intermédiaires.

Tableau 2.3 Propriétés caractéristiques du PETG [10]

Propriété	Valeur	Unité
Masse volumique	1,27	g/cm ³
Température de fusion	220 – 250	°C
Température d'extrusion	230 – 250	°C
Résistance à la traction R _m	39 – 50	MPa
Module d'élasticité E	880 – 2 100	MPa
Allongement à la rupture	50 – 230	%
Résistance thermique	≈ 70 – 80	°C

2.3 Machine de traction

2.3.1 3.1 Généralités sur la machine d'essai de traction 600 KN

La machine d'essai utilisée pour réaliser les essais de traction en cours est une machine universelle de traction d'une capacité maximum de 600 kN qui permet de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux soumis à un effort de traction uniaxiale.

Elle permet de réaliser des essais normalisés portant sur le comportement des matériaux soumis à des charges, notamment de traction. Elle est équipée de mors de serrage, d'un système d'application contrôlée de la charge, et d'un système de mesure de la force appliquée et de la déformation correspondante[11].

Le principe de l'essai de traction consiste à appliquer progressivement, le long du principal axe de l'éprouvette normalisée, une force de traction d'une vitesse de déplacement constante jusqu'à rupture du matériau ou jusqu'à la résistance maximale à l'effort de traction ou une déformation maximale.

Au cours de l'essai, la machine enregistre en continu :

- la force appliquée F,
- l'allongement ΔL de l'éprouvette.

Ces mesures permettent de tracer la courbe contrainte-déformation, à partir de laquelle

plusieurs paramètres mécaniques peuvent être déterminés.



Figure 2.4 Essai de traction sur la machine Controlab 600KN au laboratoire matériaux de construction[11]

2.3.2 Paramètres mécaniques déterminés

L'essai de traction permet de déterminer notamment :

- la résistance à la traction,
- le module d'élasticité en traction (module de Young),
- la déformation à la rupture,
- ainsi que le comportement élastique et plastique du matériau.

Ces paramètres sont essentiels pour évaluer les performances mécaniques des matériaux étudiés et comparer l'influence des conditions de fabrication, notamment dans le cas des matériaux imprimés en 3D.

2.3.3 Normes et conditions d'essai

L'essai de traction est réalisé conformément aux normes en vigueur, qui définissent :

- les types de matériaux pouvant être testés,

Chapitre2 :Caractérisation mécanique et conception des éprouvettes

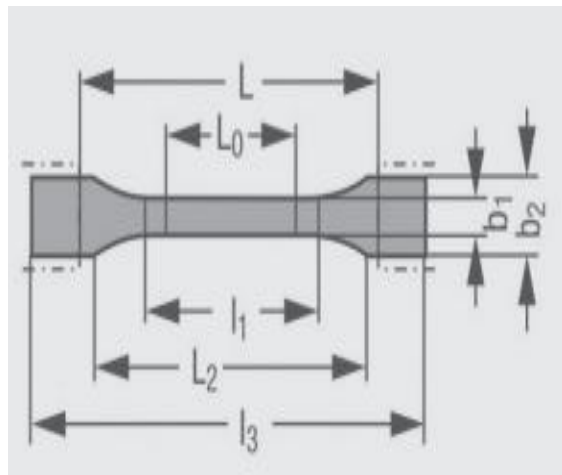
- la géométrie et les dimensions des éprouvettes,
- les procédures opératoires,
- ainsi que les méthodes de calcul des propriétés mécaniques.

Le respect de ces normes garantit la fiabilité et la reproductibilité des résultats obtenus.

2.4 Éprouvettes normalisées

2.4.1 Choix de la norme

Dans le cadre de cette étude on a conformément aux préconisations de la norme ISO 527-2, le Type 1A a été choisi pour les essais de traction. Ce dernier est effectivement préconisé pour les matériaux plastiques thermoplastiques, notamment lorsqu'ils sont réalisés par des procédés de fabrication additive comme le FDM[13]. Le Type 1A est la seule géométrie de référence à pouvoir convenir à ce procédé (longueur totale $l_3 = 170\text{mm}$) permettant d'assurer une bonne stabilité mécanique lors de l'essai. Quant au Type 1B, il est davantage réservé aux éprouvettes obtenues par pressage ou usinage mécanique et est donc peu en rapport avec le mode de fabrication choisi dans cette étude. De plus, la longueur calibrée du Type 1A ($l_1 = 80\pm 2\text{mm}$) est adaptée à l'écartement entre mors de la machine d'essai de traction Controlab ($L=115\pm 1\text{mm}$), permettant ainsi de garantir des conditions d'essai conformes à la norme et des résultats fiables et reproductibles.



- L_0 Longueur de référence
- L Écartement entre outillages
- l_1 Longueur de la partie parallèle étroite/Diamètre interne
- l_2 Écartement entre les parties parallèles larges
- l_3 Longueur totale / Diamètre externe
- b_2 Largeur éprouvette dans la zone de l'épaulement
- b_1 Largeur éprouvette dans la zone de la longueur de référence
- h Épaisseur éprouvette

Figure 2.5 Forme éprouvette et dimension selon ISO 527-2 [13]

2.4.2 Dimensions de l'éprouvette

Tableau 2.4 Dimensions de l'éprouvette ISO 527-2

Norme	Type d'échantillon	Remarque	l_3 mm	l_1 mm	b^2 mm	b_1 mm	h mm	L_0 mm	L mm
ISO 527-2	1A	Échantillon par moulage par injection (forme préférentielle)	≈ 170	80 ± 2	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$ (préféré)	$75 \pm 0,5$ ou $50 \pm 0,5$	115 ± 1
ISO 527-2	1B	Échantillon par pressage ou usinage mécanique (forme préférentielle)	≥ 150	$60 \pm 0,5$	$20 \pm 0,2$	$10 \pm 0,2$	$4,0 \pm 0,2$ (préféré)	$50 \pm 0,5$	115 ± 1

2.4.3 Justification du nombre d'éprouvettes — 3 échantillons

Le minimum absolu reconnu pour caractériser un matériau homogène est de 3 éprouvettes. [14]

Ce choix est justifié par :

- La possibilité de calculer une moyenne et d'identifier les résultats aberrants.
- L'homogénéité relative des thermoplastiques PLA, ABS et PETG qui limite la dispersion.
- Le contexte académique comparatif (3 matériaux $\times$ 3 motifs $\times$ 3 éprouvettes = 27 éprouvettes au total).
- Les contraintes pratiques de temps, de matière et de disponibilité machine.

2.4.4 Justification du nombre d'essais — 3 essais par configuration

Pour chaque combinaison matériau / motif, 3 essais ont été réalisés. Ce nombre permet : [14]

- De calculer une valeur moyenne de R_m et de E ainsi qu'un écart-type indicatif.

Chapitre2 :Caractérisation mécanique et conception des éprouvettes

- D'écarter un essai invalide (rupture hors zone calibrée) tout en conservant 2 valeurs exploitables.
- De rester dans les limites des ressources disponibles au laboratoire.

2.5 Conception Assistée par ordinateur (CAO)

2.5.1 Introduction

Dans le cadre de ce projet, nous avons utilisé le logiciel SolidWorks 2018 Premium pour la modélisation et la mise en plan de la pièce étudiée. SolidWorks est un logiciel de CAO 3D paramétrique largement utilisé dans le domaine de la mécanique et du génie des matériaux. Il permet de créer des modèles volumiques précis et d'en extraire automatiquement les plans techniques nécessaires à la fabrication .

2.5.2 5.2 Présentation de la pièce modélisée

La pièce que nous avons modélisée est une éprouvette d'essai de traction à plat, conforme aux normes type d'essais mécaniques. Cette éprouvette permet de déterminer les propriétés mécaniques du matériau, à savoir : la limite élastique, la résistance à la traction, et l'allongement à la rupture.

2.6 Démarche de modélisation

La modélisation de l'éprouvette a été réalisée en suivant une démarche méthodique structurée en plusieurs étapes

2.6.1 6.1. Création d'un nouveau document

La première étape consiste à ouvrir SolidWorks et à créer un nouveau document de type "Part" (pièce). Ce type de document permet la modélisation d'un composant 3D unique.

L'environnement de travail se compose d'un arbre de conception à gauche et d'une zone de visualisation 3D au centre.

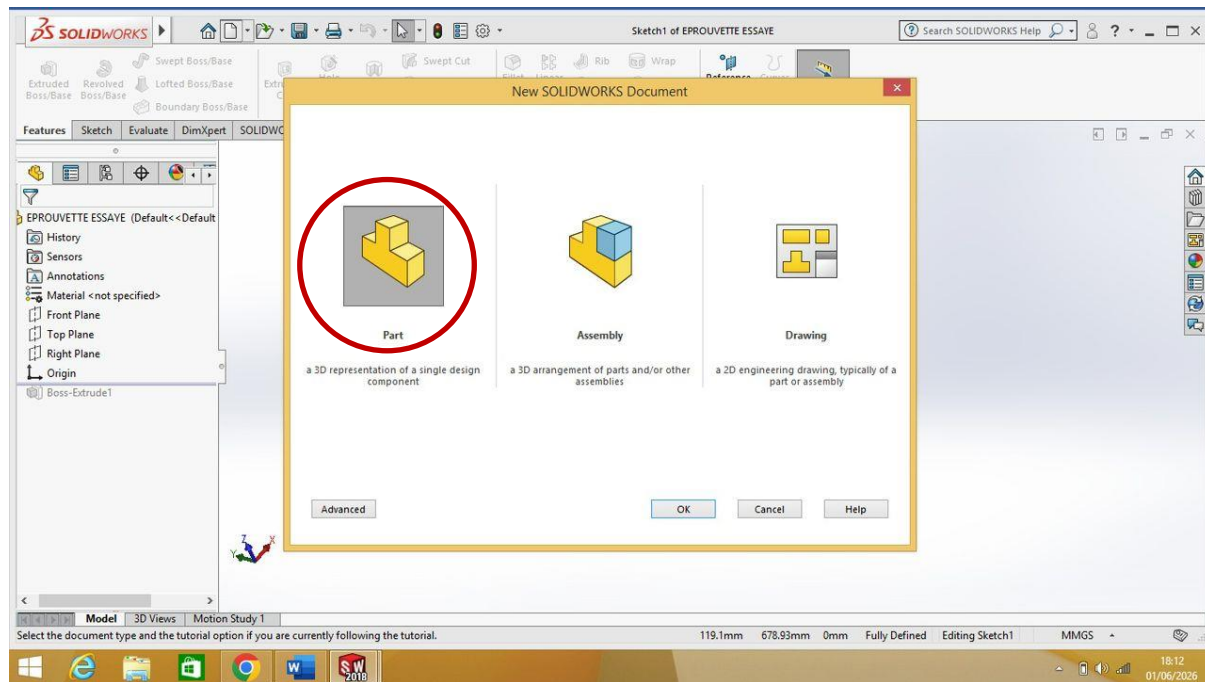


Figure 2.6 Création d'un nouveau document

2.6.2 Sélection du plan de travail et activation de l'esquisse

Avant de commencer le dessin, il est nécessaire de choisir le plan sur lequel sera tracé le profil 2D de la pièce. Nous avons sélectionné le Plan frontal (Front Plane) dans l'arbre de conception, puis activé l'outil Sketch pour entrer en mode esquisse.

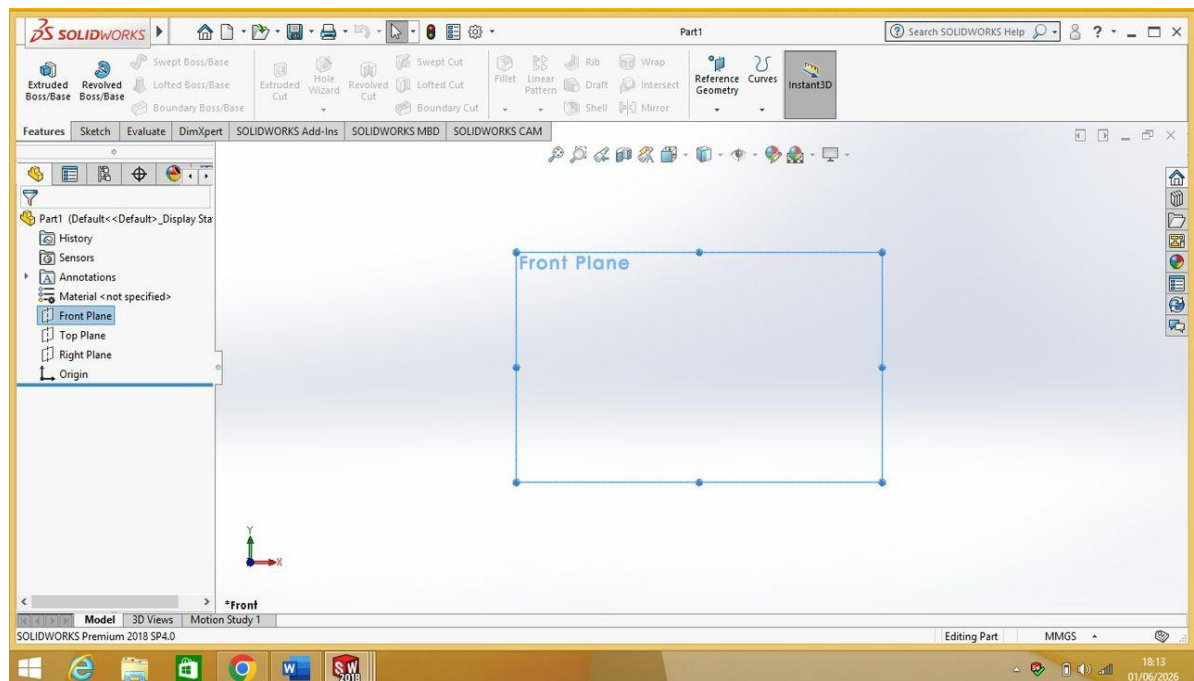


Figure 2.7 Sélection du plan de travail et activation de l'esquisse

Ce plan est mis en surbrillance bleue pour confirmer la sélection.

2.6.3 Création du profil 2D (Esquisse)

Le profil de l'éprouvette a été dessiné en 2D à l'aide des outils de dessin disponibles dans SolidWorks. Les contraintes géométriques et les cotes ont été appliquées pour définir complètement la géométrie de la pièce. Le statut "Fully Defined" affiché en bas de l'écran confirme que toutes les dimensions sont correctement renseignées.

Tableau des démonstrations principales de l'éprouvette

Paramètre	Valeur
Longueur totale	170 mm
Largeur aux extrémités	20 mm
Largeur au centre (zone utile)	5 mm
Longueur de la zone utile	40 mm
Rayon de congé de raccordement	R 24 mm

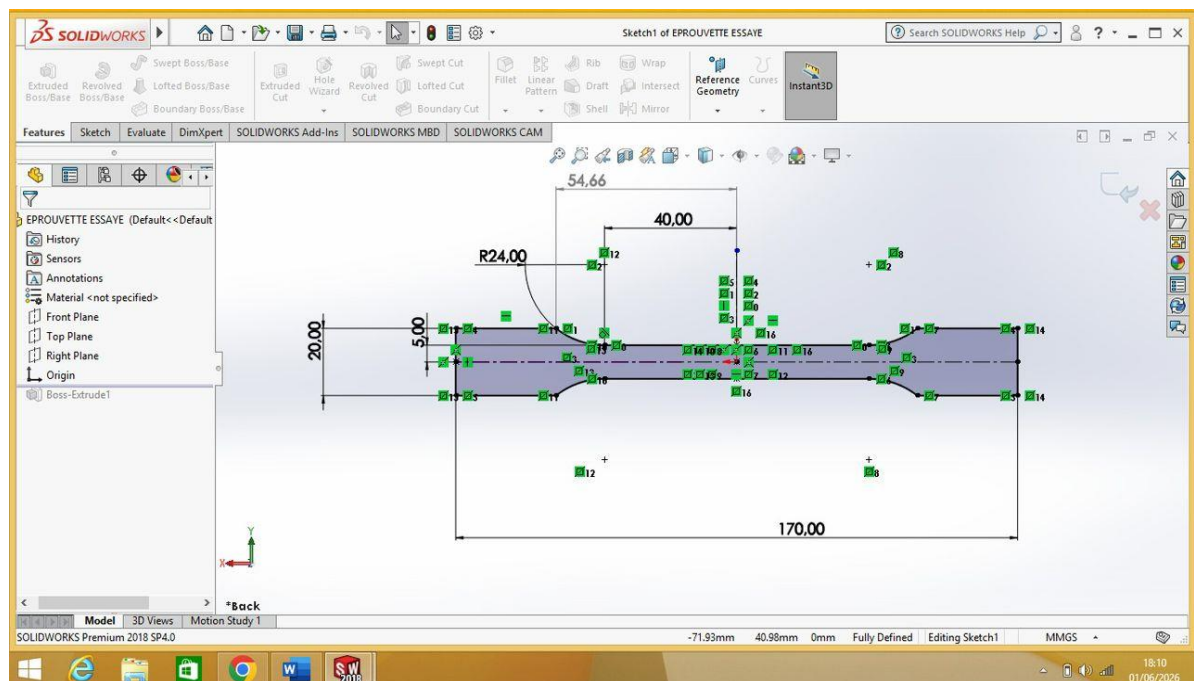


Figure 2.8 Création de l'éprouvette

2.6.4 Extrusion du profil (Boss-Extrude)

Une fois l'esquisse 2D complètement définie, nous avons appliqué la fonction "Extruded Boss/Base" pour transformer le profil 2D en un solide 3D.

Chapitre2 :Caractérisation mécanique et conception des éprouvettes

Cette opération consiste à donner une épaisseur au profil dans la direction perpendiculaire au plan de l'esquisse.

L'épaisseur appliquée est de 4,00 mm, ce qui correspond à l'épaisseur standard d'une éprouvette plate. Le résultat est un modèle volumique 3D de l'éprouvette, visible sous différentes orientations dans l'espace.

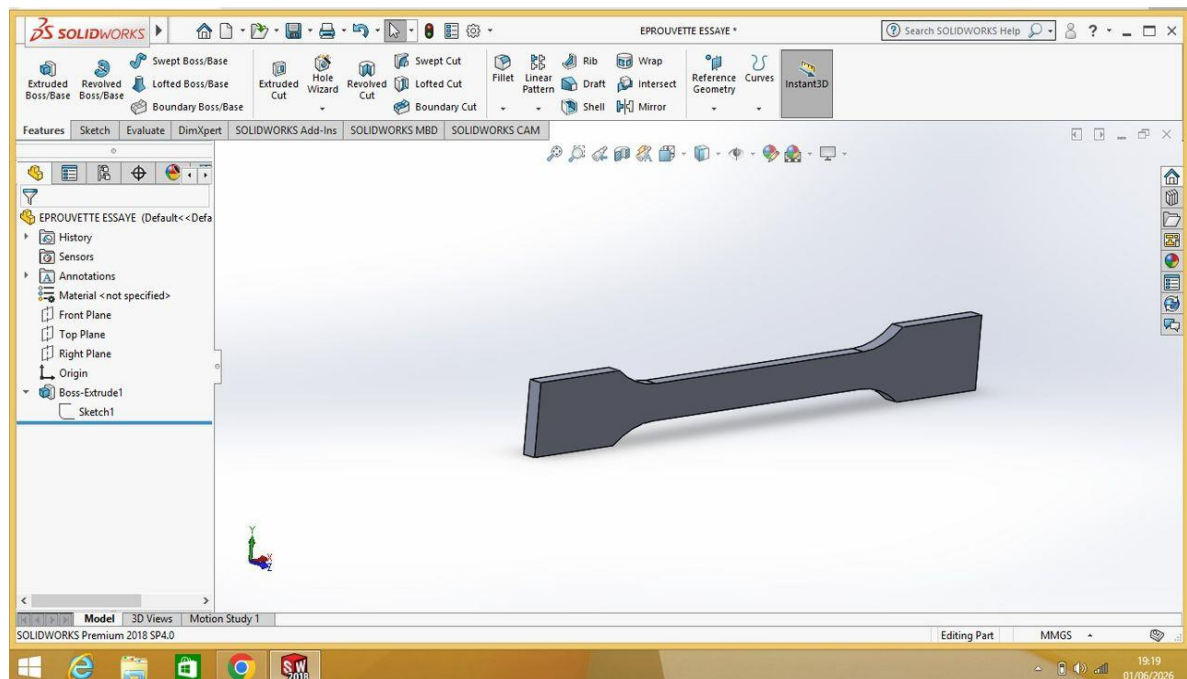


Figure 2.9 Boss-Extrude de l'éprouvette

2.6.5 Mise en plan

Après la création du modèle 3D, nous avons généré la mise en plan technique de la pièce dans un nouveau document de type "Drawing" SolidWorks permet de créer automatiquement les vues du modèle 3D et d'y ajouter la cotation.

La mise en plan comporte les vues suivantes :

- Vue de face : représentation principale de l'éprouvette.
- Vue de dessus : vue de la longueur totale de la pièce.
- Vue de côté : représentation de l'épaisseur.
- Vue isométrique : représentation 3D de la pièce pour une meilleure visualisation.

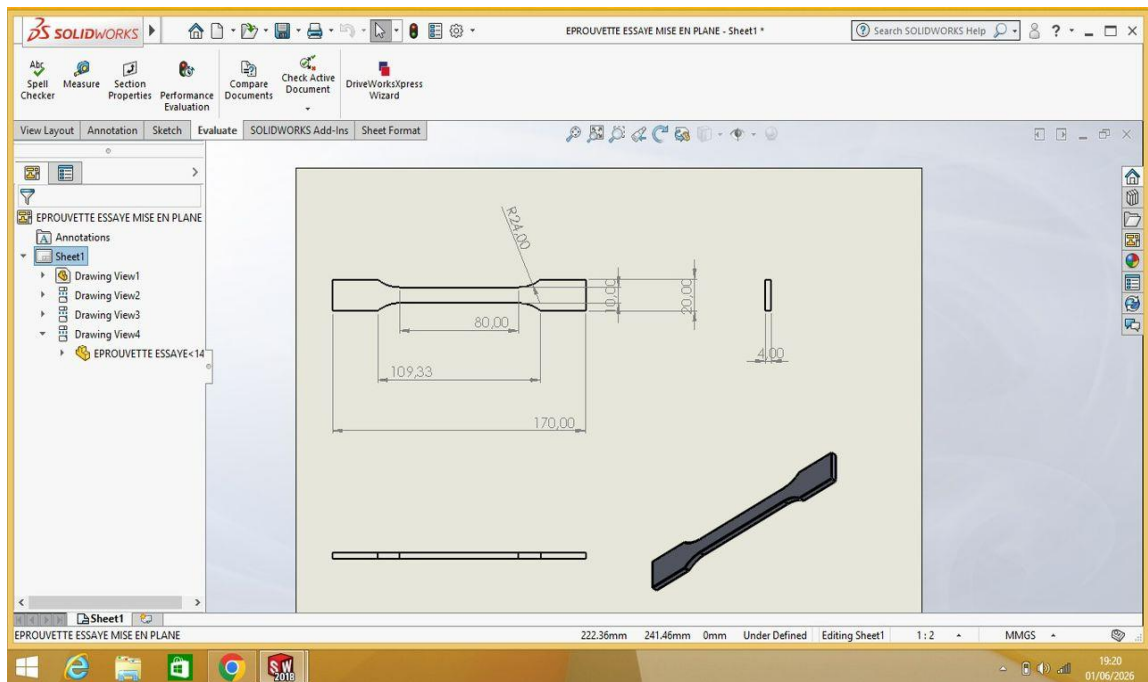


Figure 2.10 Mise en plan

2.7 Conception de la pièce sous SolidWorks et exportation en fichier STL

2.7.1 Ouverture du fichier et accès à 'Enregistrer sous'

Depuis SolidWorks, avec la pièce EPROUVETTE ESSAYE FINAL ouverte (on voit le sketch avec les dimensions : 170mm, 40mm, R24mm...), cliquer sur le menu Fichier puis choisir “Save As” (Enregistrer sous).

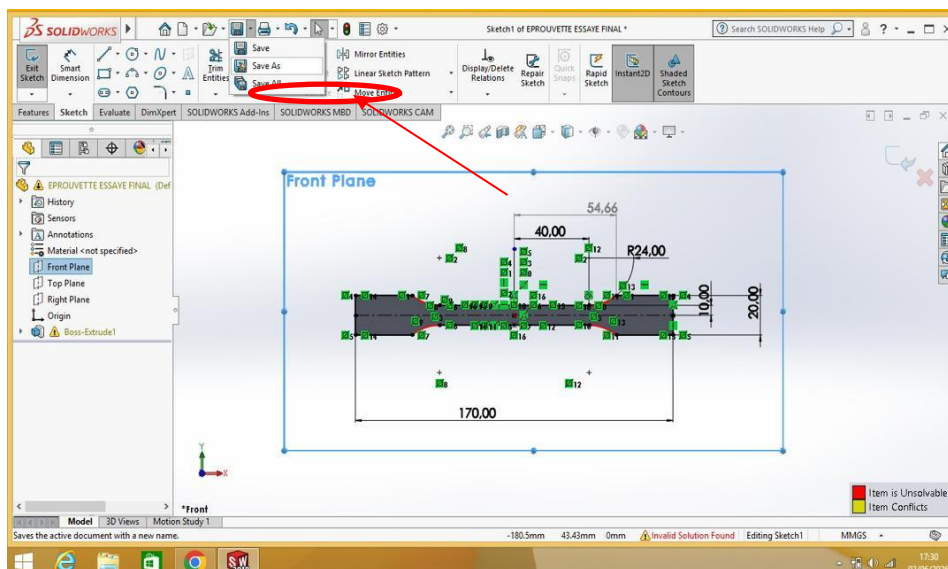


Figure 2.11 Fenêtre d'enregistrement du fichier STL sous SolidWorks

2.7.2 Choix du format STL

Dans la fenêtre “Enregistrer sous”, cliquer sur le menu déroulant “Type” pour afficher la liste des formats disponibles. Sélectionner STL (*.stl) (surligné en bleu dans la liste).

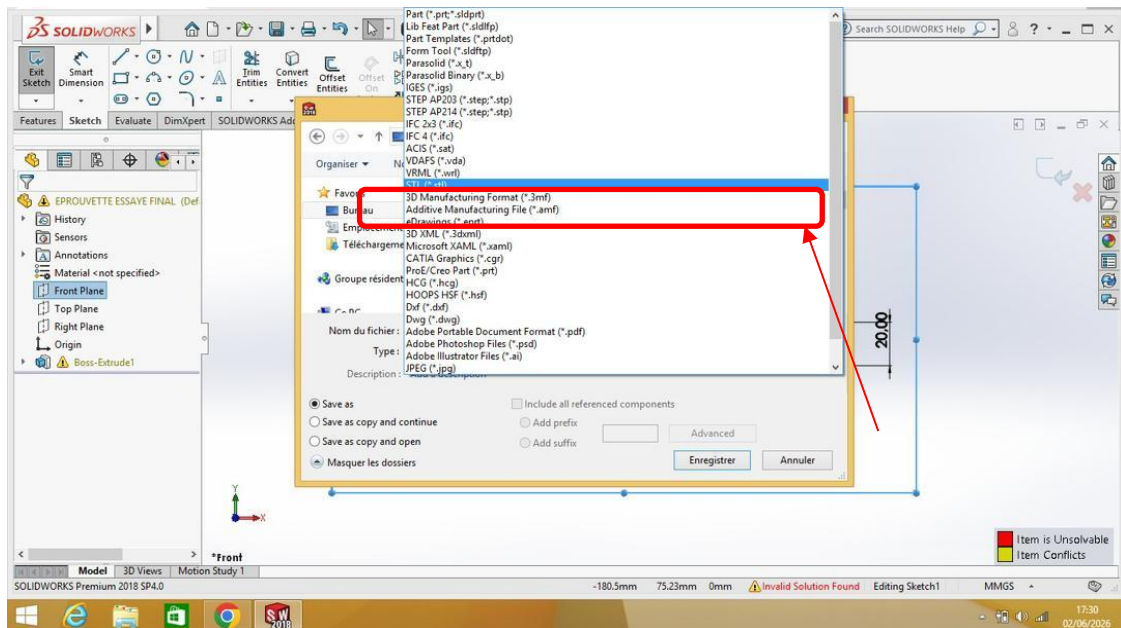


Figure 2.12 Fenêtre d'enregistrement du fichier STL sous SolidWorks

2.7.3 Nommage et enregistrement du fichier

Une fois le format STL sélectionné, le nom du fichier “EPROUVETTE ESSAYE FINAL” apparaît dans le champ “Nom du fichier”. Choisir l’emplacement de sauvegarde (ici : Bureau), puis cliquer sur “Enregistrer”.

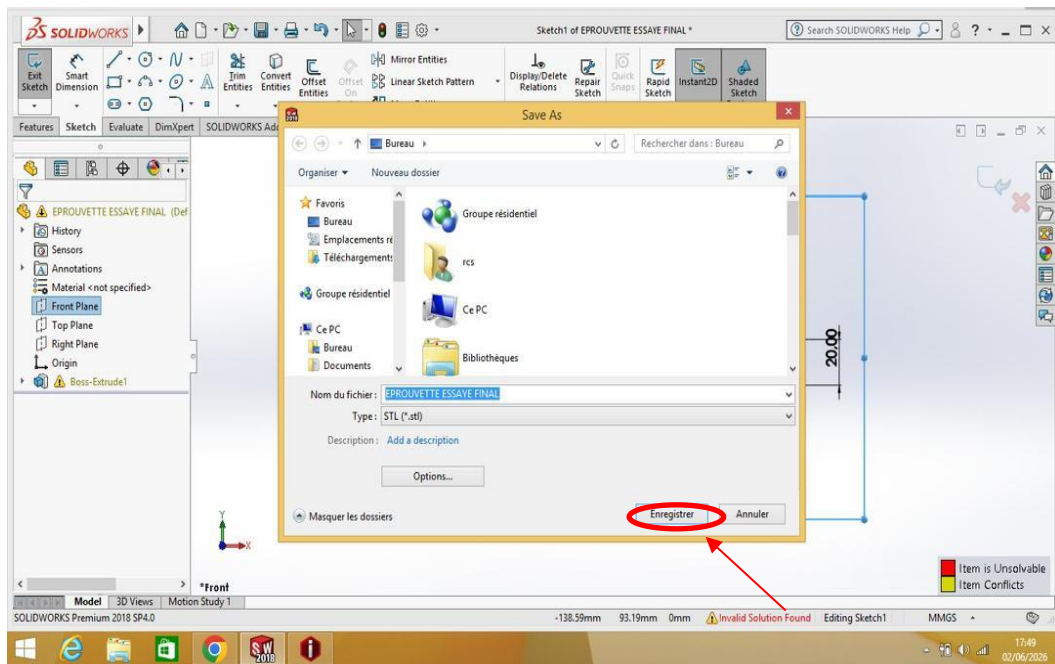


Figure 2.13 Fichier STL de l'éprouvette enregistré sur le Bureau

2.7.4 Vérification du fichier STL par SolidWorks

Le fichier STL est bien créé et apparaît sur le SolidWorks confirmant que l'exportation a été effectuée avec succès.



Figure 2.14 Exemple de l'éprouvette avec maillage

2.8 Conclusion

Ce chapitre a présenté les trois matériaux thermoplastiques utilisés (PLA, ABS, PETG) avec leurs caractéristiques mécaniques essentielles, la machine de traction Controlab 600 kN et son

Chapitre2 :Caractérisation mécanique et conception des éprouvettes

protocole d'essai , ainsi que la justification du choix de 3 éprouvettes et 3 essais par configuration. La conception des éprouvettes normalisées ISO 527-2 Type 1A a été réalisée sous SolidWorks et exportée au format STL.

Le chapitre suivant sera consacré à la fabrication additive des éprouvettes : paramétrage sous IdeaMaker, impression sur imprimante 3D FDM et contrôle dimensionnel des pièces obtenues.

CHAPITRE 3
Préparation et impression des
épreuve avec système FAO
Ideamaker

3.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons examiner de manière approfondie la préparation et l'impression d'éprouvettes au format STL avec le logiciel de IdeaMaker de tranchage , en nous concentrant sur les méthodes et les paramètres permettant d'optimiser le processus d'impression 3D. Nous aborderons l'ensemble des étapes, depuis la préparation jusqu'à l'impression, en utilisant trois matériaux différents : le PLA, le PETG et l'ABS. Par ailleurs, nous étudierons l'influence du taux et du type de remplissage en utilisant trois structures distinctes : grille, gyroïde et concentrique, afin d'analyser leur impact sur les performances des éprouvettes imprimées.

3.2 2. L'imprimante 3D du Laboratoire IS2M utilisée dans l'étude

La Raise3D Pro2 est une imprimante 3D compacte avec un poids net de 50,32 kg destinée aux professionnels ou à la formation. Elle a des dimensions de 620 × 590 × 760 mm, ce qui la rend facile à intégrer dans un espace de travail, Elle possède une double extrusion avec des buses rétractables, permettant d'utiliser deux filaments différents pour des impressions en multi-couleurs ou multi-matériaux, avec un diamètre de filament de 1,75 mm compatible avec une large gamme de filaments du marché. Sa température maximale de buse de 300 °C permet d'imprimer avec des matériaux hauts température. Avec une surface d'impression spacieuse de 305 × 305 × 300 mm et une vitesse d'impression réglable de 30 à 150 mm/s. Elle est compatible avec divers matériaux d'impression tels que le PLA, l'ABS, le PETG, le TPU, le NYLON, et plus.

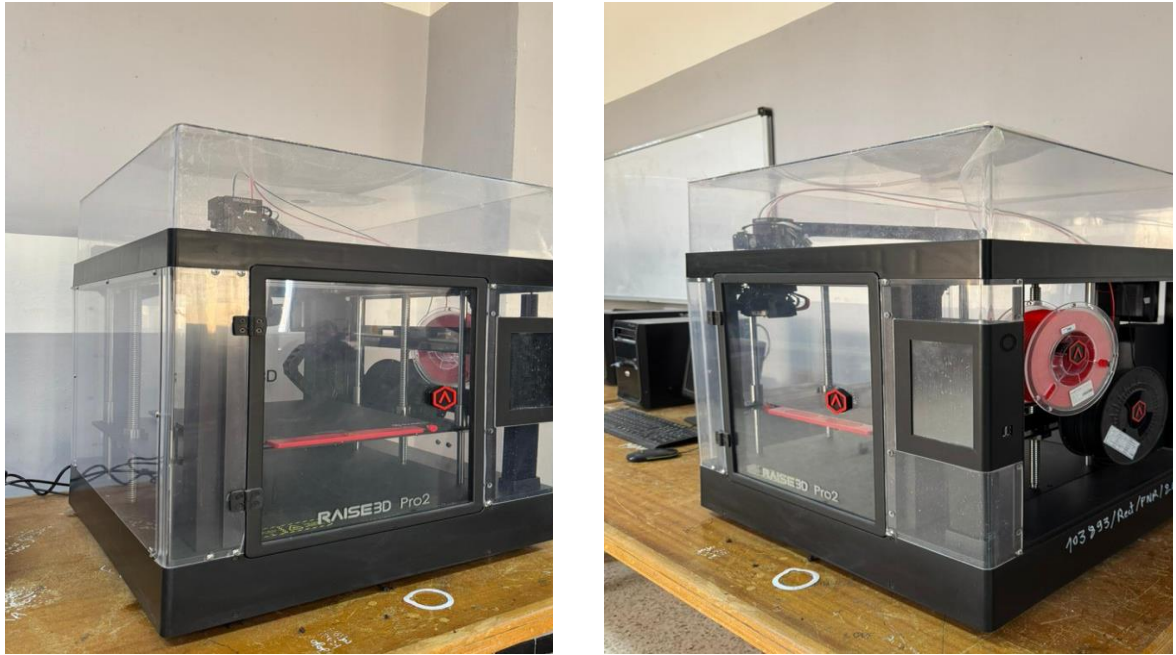


Figure 3.1 Imprimante Raise3D Pro2 du Laboratoire IS2M

3.3 IdeaMaker

3.3.1 Définition

ideaMaker est un logiciel de tranchage dédié à l'impression 3D, développé par la société Raise3D. Il a été conçu afin de fournir une solution complète de préparation à l'impression, permettant le réglage précis d'un grand nombre de paramètres influençant directement la qualité finale des pièces produites. Ce logiciel se distingue par une interface utilisateur à la fois intuitive et ergonomique, tout en intégrant des fonctionnalités avancées adaptées aux besoins des utilisateurs. Par ailleurs, il est fourni avec l'imprimante Raise3D Pro2, disponible au sein du laboratoire de recherche IS2M, qui sera utilisée dans le cadre de la réalisation expérimentale des modèles étudiés.

3.3.2 Importation du fichier STL sur IdeaMaker

Après avoir téléchargé les fichiers STL, on ouvre IdeaMaker et on clique sur « Import model » (voir Figure 3.2)

Chapitre 3 : Préparation et impression des éprouvettes avec système FAO Ideamaker

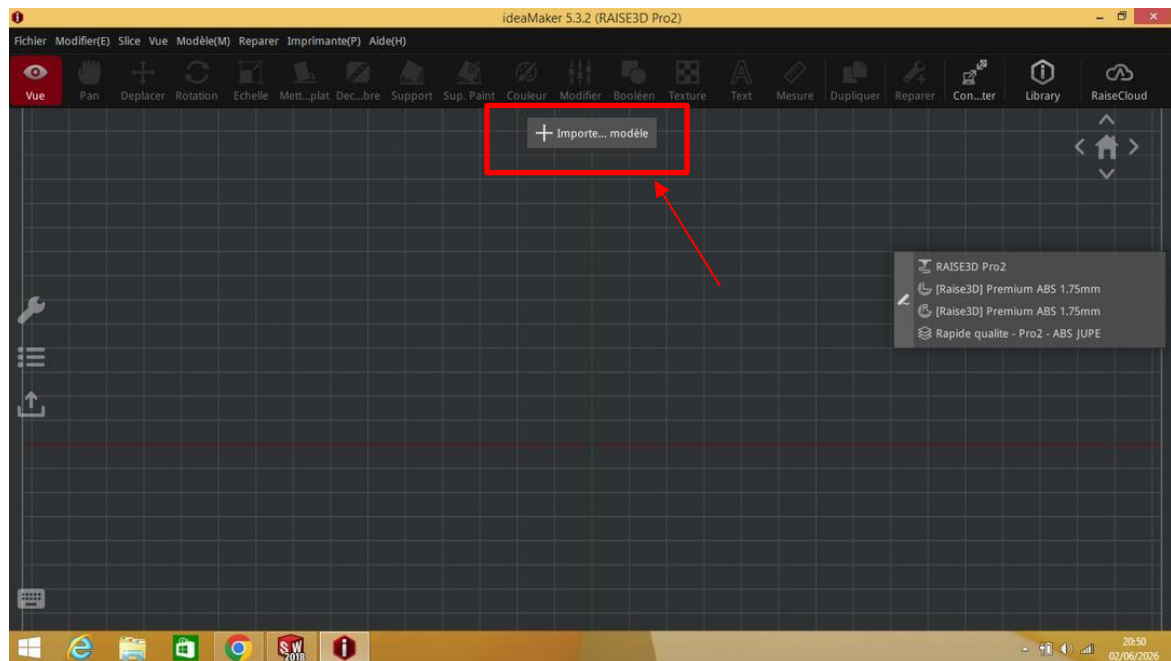


Figure 3.2 Importation du modele STL

La fenêtre «Import model files» s'ouvrira, on sélectionne le fichier de test de température et on clique sur «Ouvrir» (voir Figure II-3).

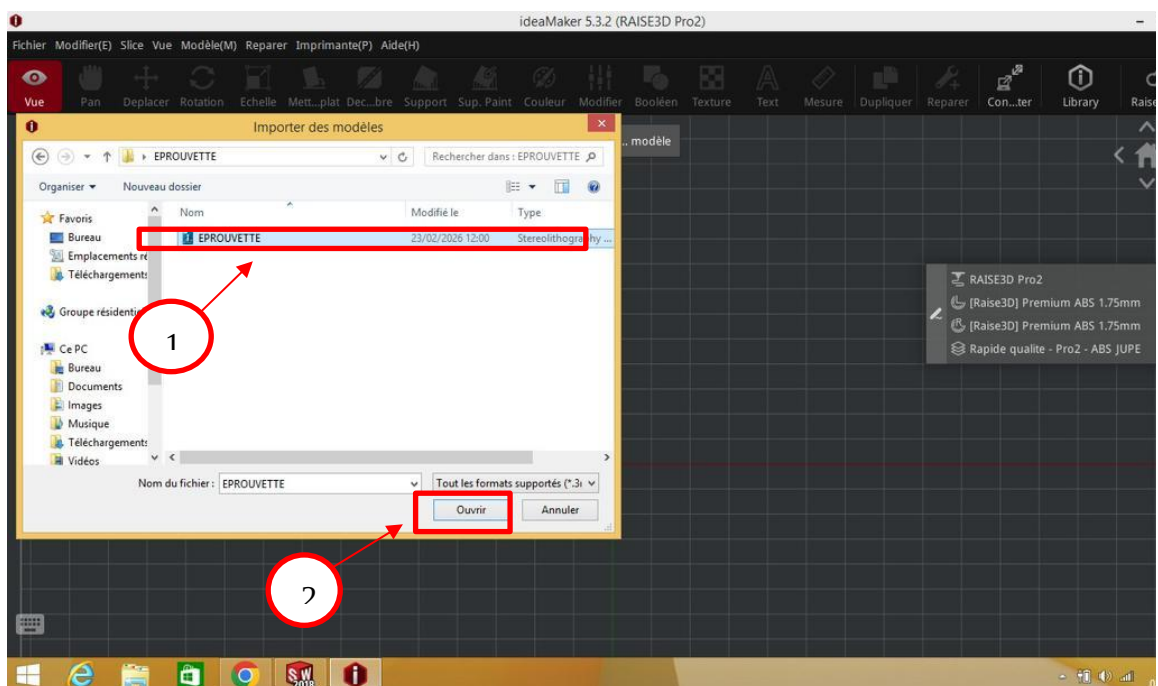


Figure 3.3 choix de fichier STL

Le modèle STL apparaît dans le « Workspace », ensuite on clique sur « Start Slicing» pour lancer le tranchage (voir Figure 3.4).

Chapitre 3 : Préparation et impression des éprouvettes avec système FAO Ideamaker

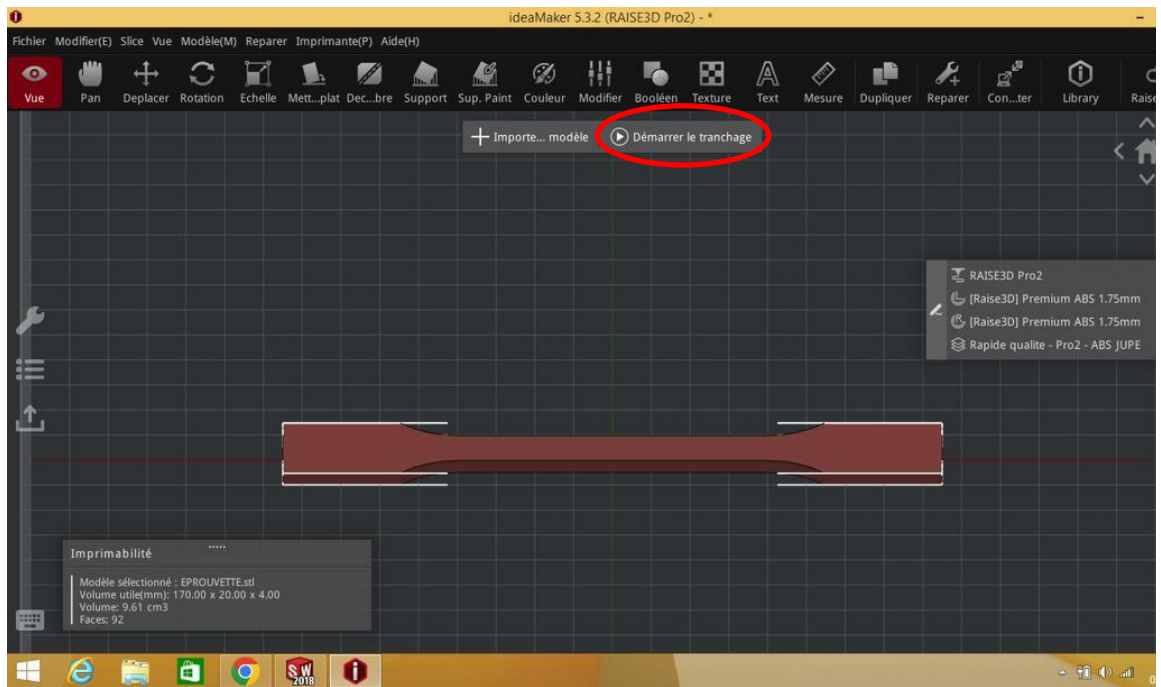


Figure 3.4 Lancement de tranchage

Une fenêtre s'ouvrira, dans laquelle on doit sélectionner le type d'imprimante (voir figure 3.5) et le type de filament (voir figure 3.6).

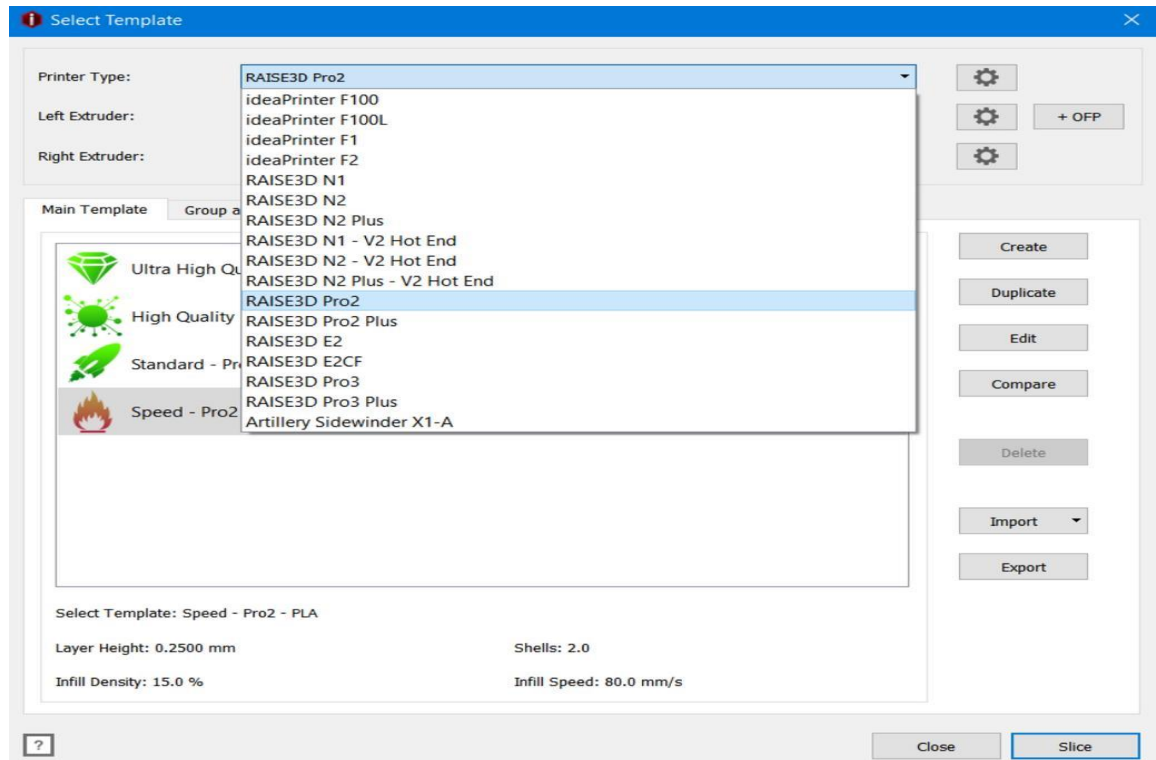


Figure 3.5 Sélectionne du type d'imprimante

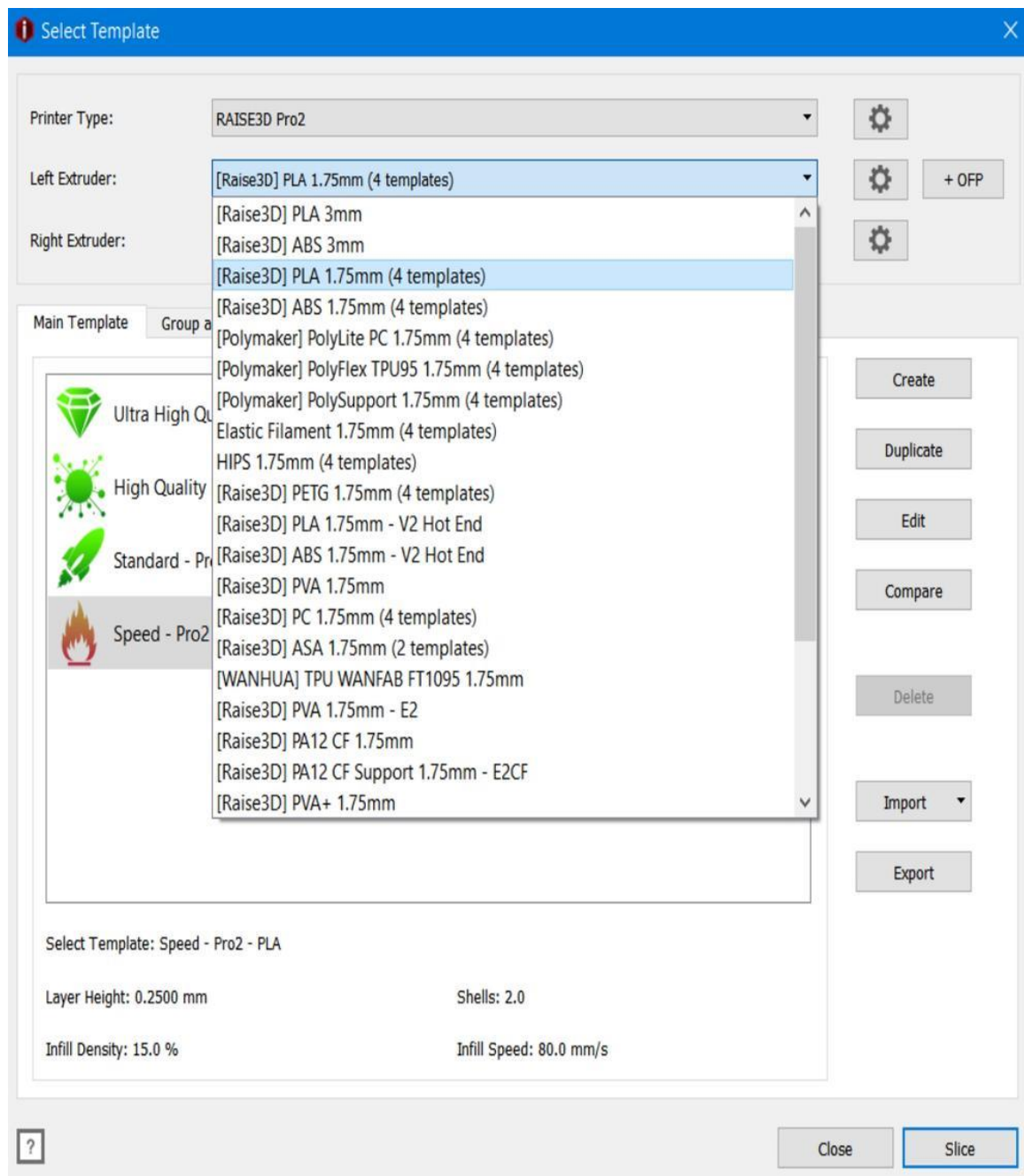


Figure 3.6 Sélectionner du type filament

Ensuite, on choisit le profil de « slice » adapté à nos besoins. IdeaMaker propose quatre profils du « le tranchage » par défaut : «Speed», «Standard» et «High Quality» «Ultra High Quality» (voir figure 3.7). Après avoir sélectionné le profil du « slice » que nous souhaitons utiliser dans IdeaMaker, nous pouvons lancer le processus de tranchage en cliquant sur le bouton «slice» tel qu'indiqué par le rectangle rouge sur (la figure 3.7), Le logiciel va alors automatiquement découper le modèle en tranches horizontales.

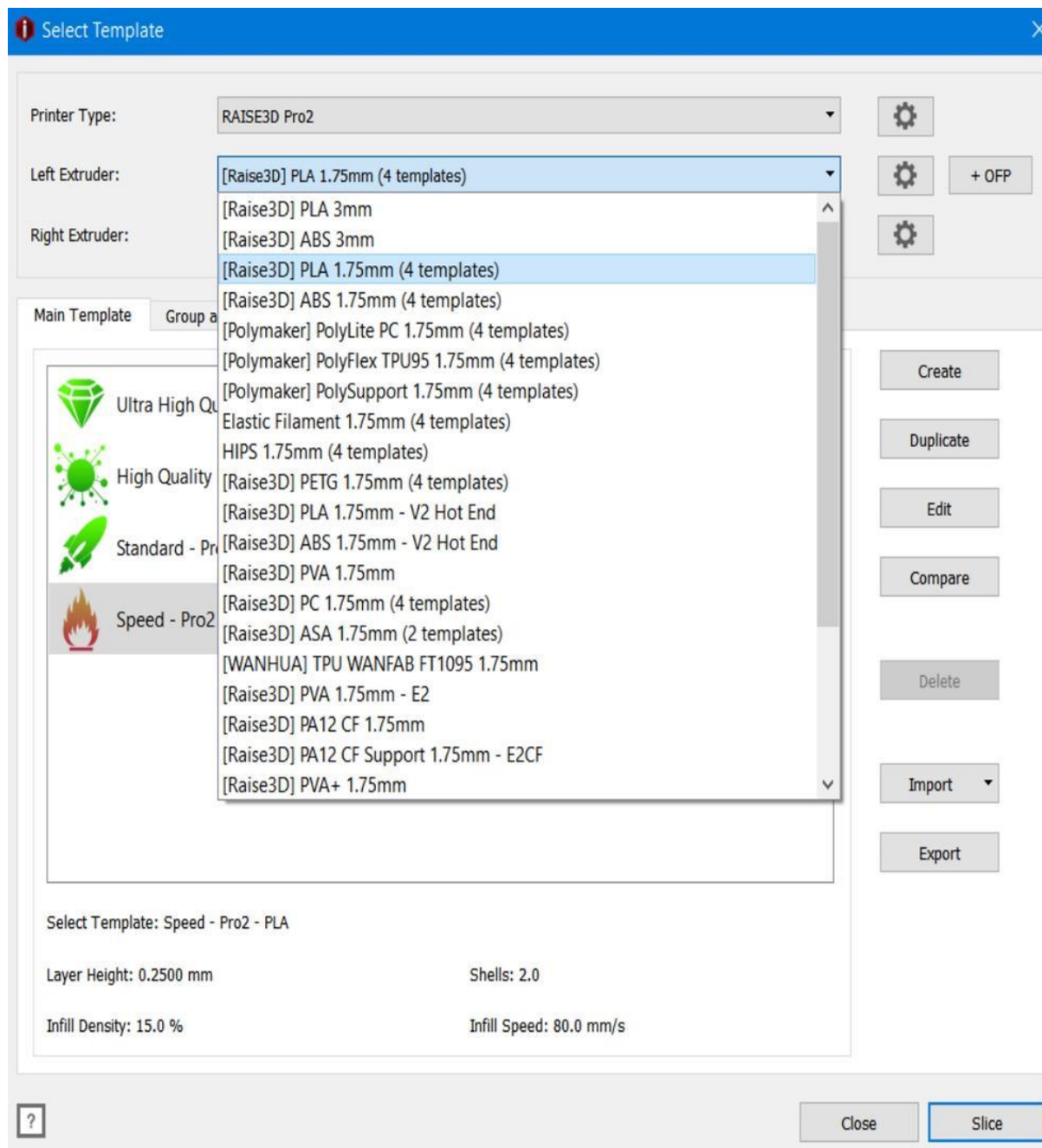


Figure 3.7 La sélection du profil de «Slicing» et le lancement du tranchage

Une fois le tranchage terminé, IdeaMaker nous fournit une estimation du temps d'impression, de la quantité de filament nécessaire en poids et en longueur, ainsi que le coût d'impression comme le montre la figure 3.8 Pour le profil «Speed Quality».

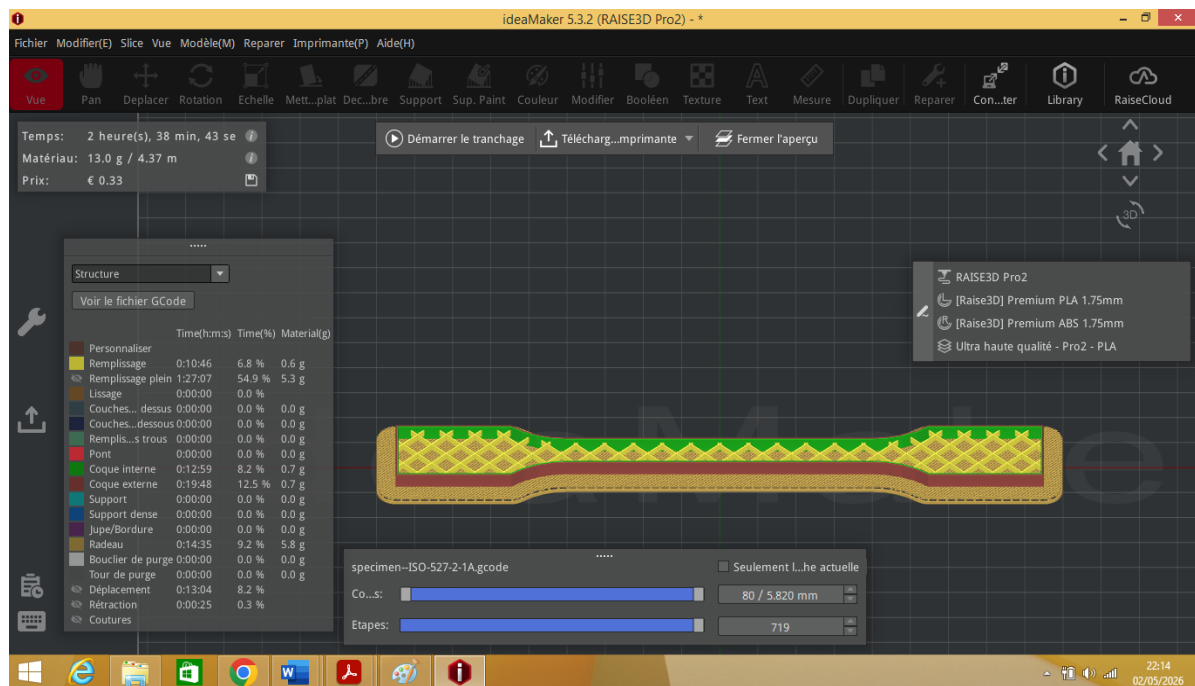


Figure 3.8 Prévisualisation de l'effet de tranchage sur «l'éprouvette» par IdeaMaker

3.3.3 Paramètres d'impression adoptés pour l'étude expérimentale

Dans le cadre de cette étude expérimentale, le choix des paramètres d'impression a été défini de manière à garantir la reproductibilité des essais ainsi que la pertinence des résultats obtenus. Une hauteur de couche de 0,25 mm a été retenue, correspondant à un compromis optimal entre précision dimensionnelle et temps de fabrication. Ce paramètre permet d'assurer une qualité de surface acceptable tout en limitant la durée d'impression, ce qui est essentiel dans une approche comparative impliquant plusieurs matériaux.

Par ailleurs, un taux de remplissage de 100 % a été appliqué afin d'obtenir des éprouvettes entièrement denses. Cette configuration vise à éliminer l'influence des structures internes (motifs de remplissage) sur le comportement mécanique, permettant ainsi d'évaluer de manière plus fidèle les propriétés intrinsèques des matériaux étudiés, à savoir le PLA, l'ABS et le PETG.

En outre, un mode d'impression rapide a été adopté dans le but de réduire le temps global de production, tout en conservant des conditions d'impression constantes pour l'ensemble des essais. Ce choix s'inscrit dans une logique d'optimisation du processus expérimental, où la cohérence des paramètres est primordiale pour assurer une comparaison fiable entre les différents matériaux et configurations étudiés.

3.3.4 Les différents motifs de remplissage

Parmi les motifs de remplissage les plus utilisés, on distingue notamment le motif **grille**, le motif **concentrique** et le motif **gyroïde**, chacun présentant des caractéristiques mécaniques et structurelles spécifiques :

3.3.4.1 Concentrique

Le motif concentrique (Concentric) suit la géométrie externe de la pièce en générant des contours internes parallèles aux parois. Ce type de remplissage est particulièrement adapté aux pièces nécessitant une bonne qualité de surface et une continuité des formes. Il présente toutefois une résistance mécanique plus faible au centre de la pièce, en raison de l'absence de structure croisée interne.

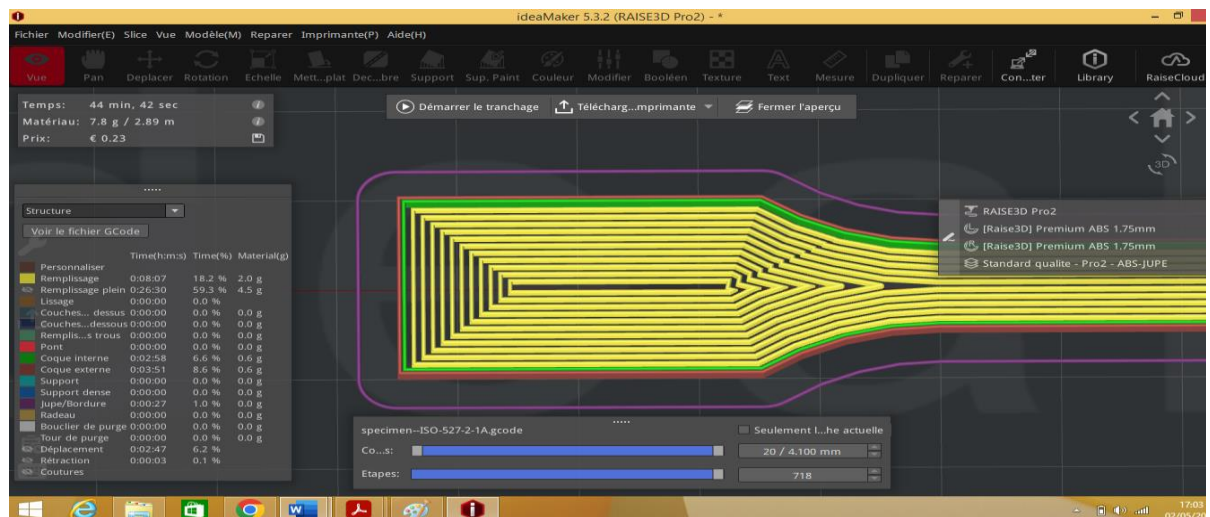


Figure 3.9 motif de remplissage concentrique

3.3.4.2 Gyroïde

Le motif gyroïde (Gyroid) est une structure tridimensionnelle complexe caractérisée par une surface minimale continue. Il offre une excellente répartition des contraintes dans toutes les directions (isotropie relative), ainsi qu'un bon rapport résistance/poids. De plus, sa géométrie permet une meilleure adhésion entre les couches et une circulation fluide des contraintes, ce qui le rend particulièrement intéressant pour les applications mécaniques avancées.

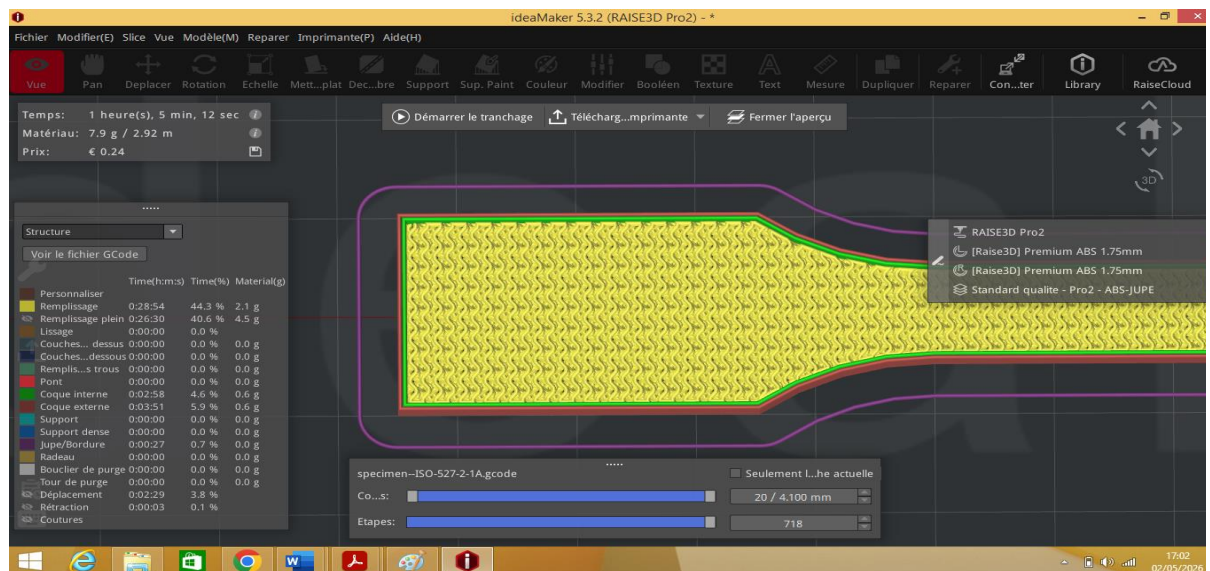


Figure 3.10 motif de remplissage Gyroïde

3.3.4.3 Grille

Le motif grille (Grid) est constitué d'un maillage orthogonal formé par des lignes croisées selon deux directions principales. Il offre une bonne rigidité dans le plan horizontal (axes X et Y) et assure une répartition relativement homogène des contraintes. Ce motif est apprécié pour sa simplicité, sa stabilité et son bon compromis entre résistance mécanique et temps d'impression.

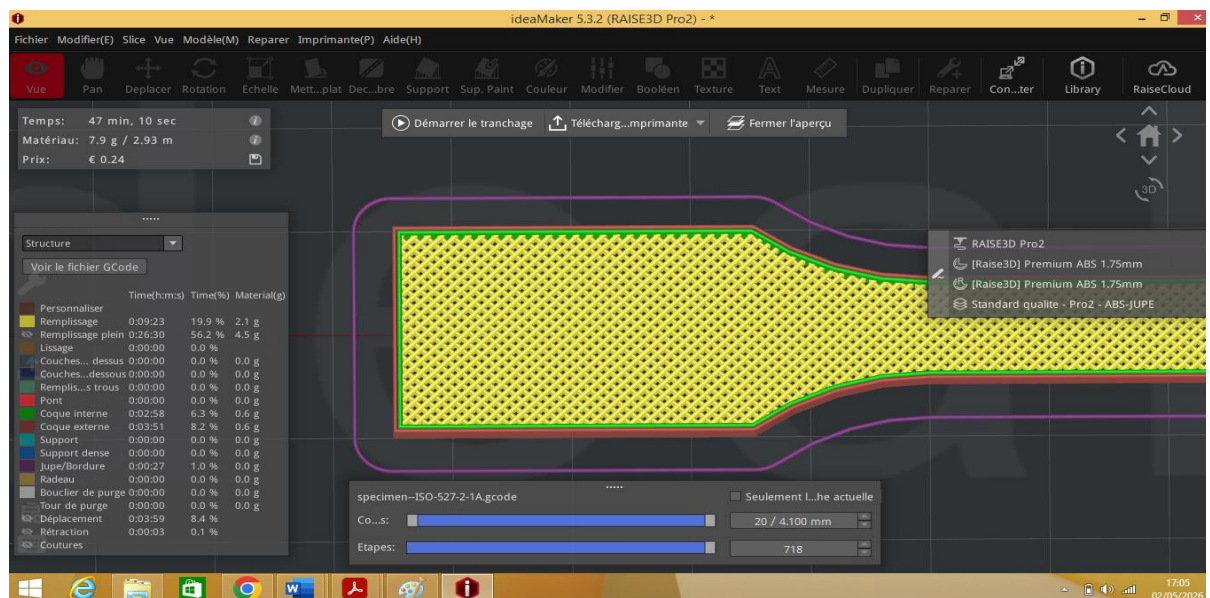


Figure 3.11 motif de remplissage Grille

Finalement après traitement, Profil Iterator nous donne le Code-G à télécharger pour l'imprimante avec le filament PLA 1.75mm. Nous cliquons sur « Download Gcode » comme le montre la figure 3.12 et 3.13 pour télécharger le fichier Code-G .

Chapitre 3 : Préparation et impression des éprouvettes avec système FAO Ideamaker

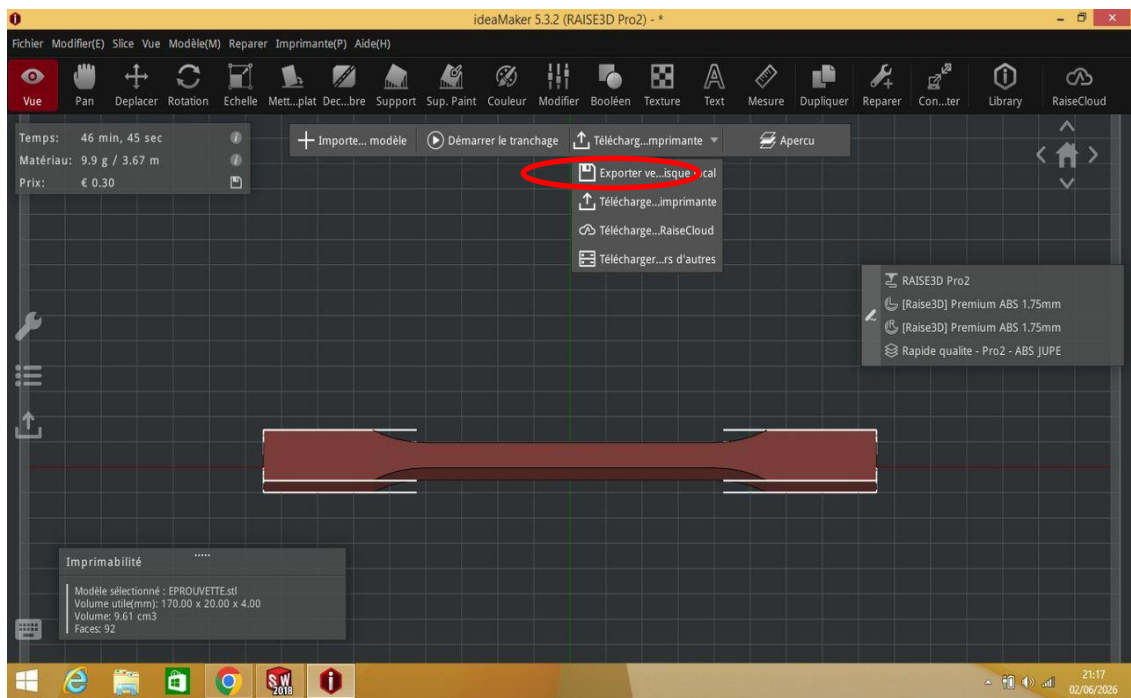


Figure 3.12 téléchargement de G-Code

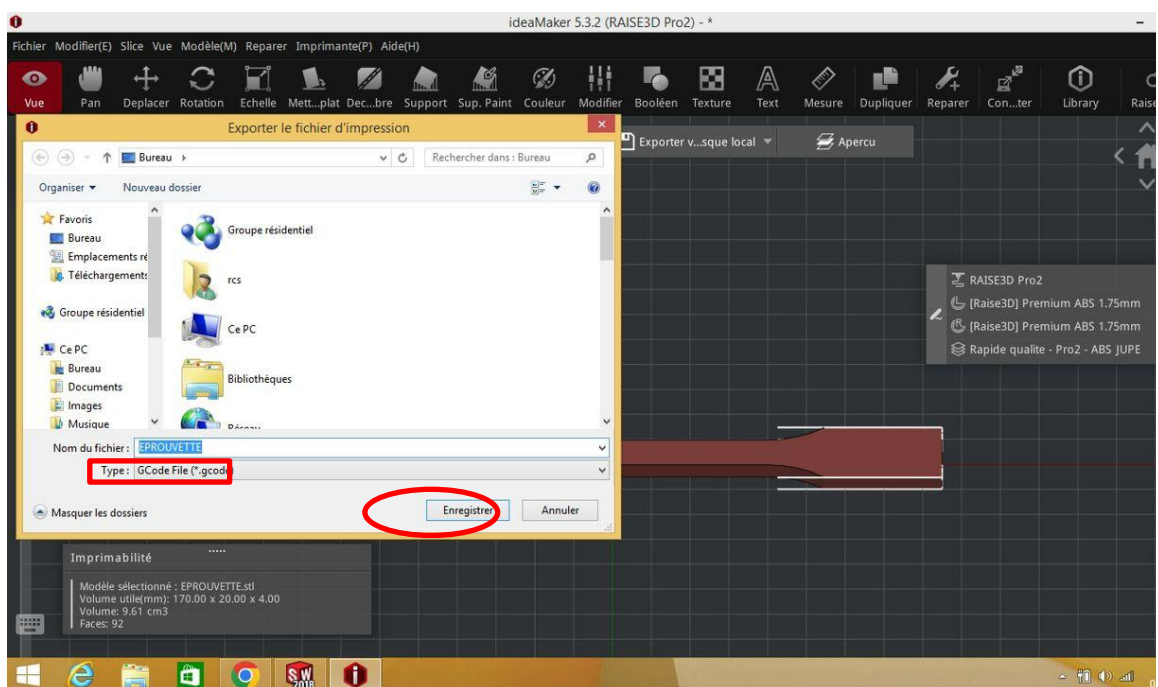


Figure 3.13 Enregistrement de G-Code

On copie le fichier (.gcode) nommé «tempertureTestFile.gcode» sur une clé USB, puis on l'insère dans la machine d'impression 3D comme apparaît dans la figure 3.14.



Figure 3.14 insertion de clé USB

On accède à notre fichier (.gcode) via l'écran d'interface de la machine et on clique sur "Imprimer". et la machine commencera l'impression (voir Figure 3.14)

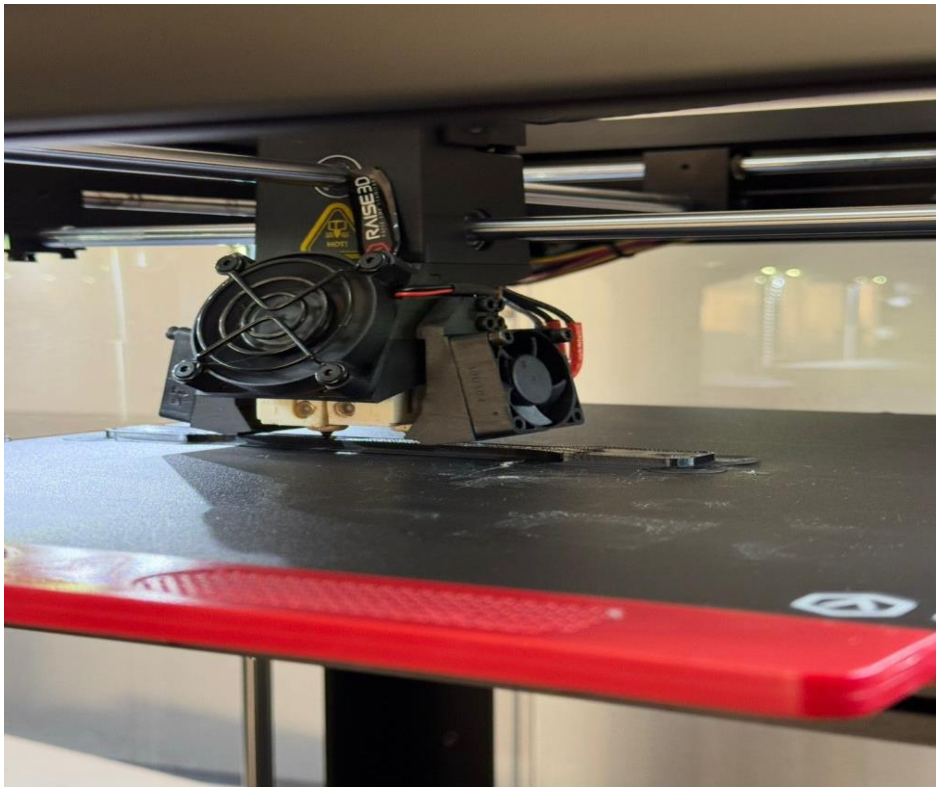


Figure 3.14 Impression de modèle

3.4 4. Résultats selon les types de remplissage

3.4.1 4.1 Éprouvette avec remplissage Grille

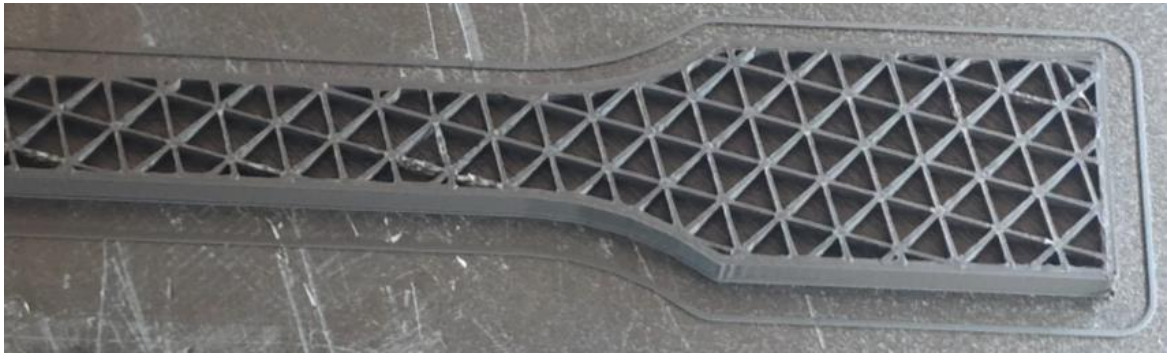


Figure 3.15 Éprouvettes avec remplissage Grille

3.4.2 Éprouvette avec remplissage Concentrique

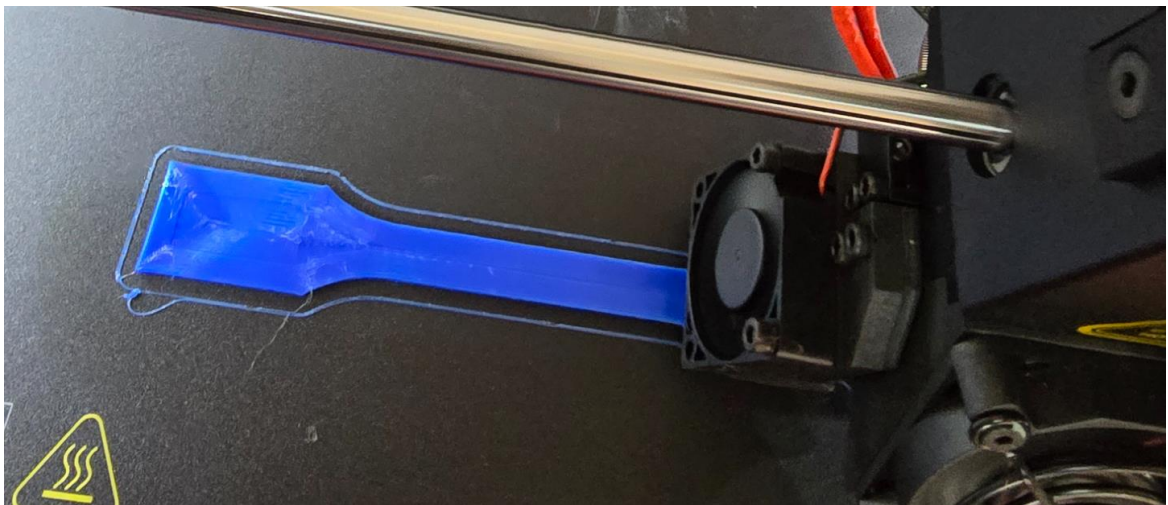


Figure 3.16 Éprouvettes avec remplissage Concentrique

3.4.3 4.3 Éprouvette avec remplissage Gyroïde



Figure 3.17 Éprouvettes avec remplissage Gyroïde

3.5 Présentation des éprouvettes finales en PLA et PETG selon les différents motifs de remplissage

3.5.1 Présentation des éprouvettes finales obtenues de PLA

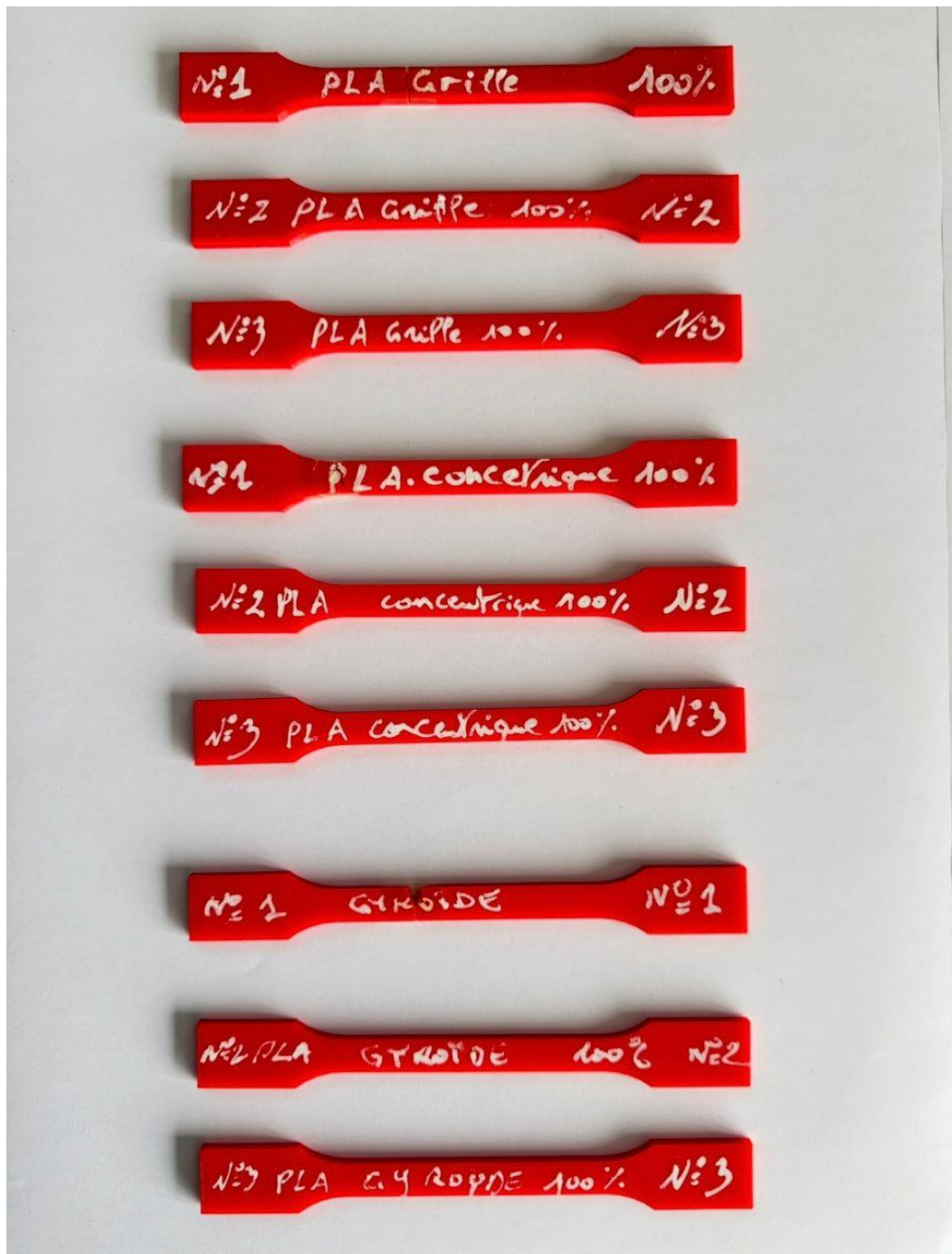


Figure 3.18 Éprouvette finale imprimée en PLA

3.5.2 Présentation des éprouvettes finales obtenues de PETG

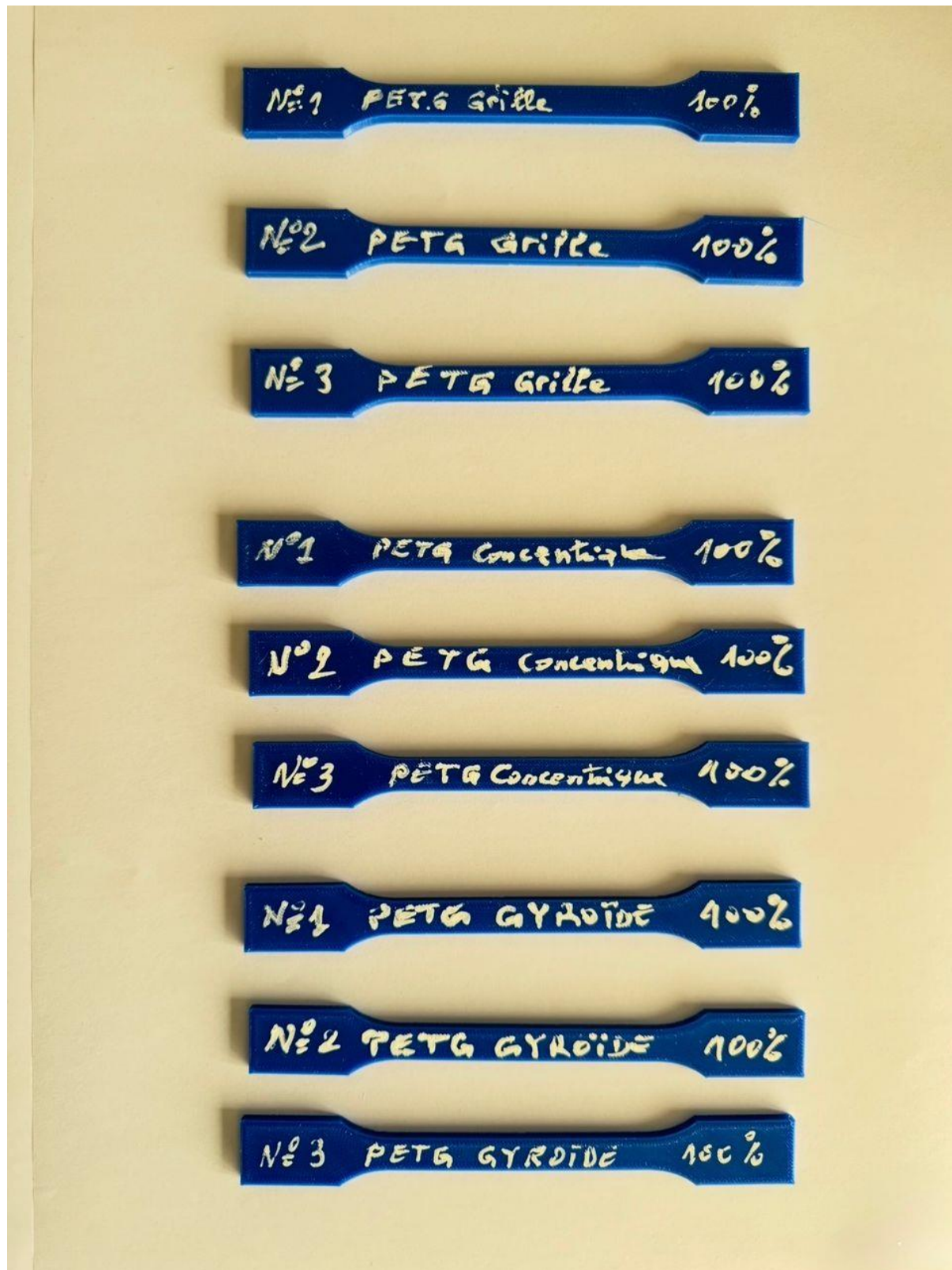


Figure 3.19 Éprouvette finale imprimée en PETG

3.6 Problème d'adhérence rencontré lors de l'impression de l'ABS

Lors des essais d'impression 3D des éprouvettes en ABS, un problème d'adhérence a été observé, principalement au niveau de la première couche déposée sur le plateau. Ce défaut s'est

manifesté par un décollement partiel de la pièce pendant le processus d'impression, entraînant une déformation de l'éprouvette et une mauvaise stabilité dimensionnelle. Ce phénomène est fréquent avec l'ABS en raison de sa sensibilité au retrait thermique (warping) et au refroidissement rapide.

La figure ci-dessous illustre l'état de l'éprouvette avant correction du problème



Figure 3.20 Problème d'adhérence lors de l'impression de l'ABS (décollement)

3.6.1 modification de la conception

Lors des essais d'impression des éprouvettes en ABS, certaines difficultés ont été observées, notamment liées à la déformation et à la concentration des contraintes au niveau des zones de transition. Afin de remédier à ces problèmes, une optimisation géométrique du modèle a été réalisée sous SolidWorks. Cette amélioration a consisté à modifier la géométrie de l'éprouvette en introduisant un congé (fillet) d'une valeur de 5 mm au niveau des zones critiques, permettant ainsi de réduire les concentrations de contraintes et d'améliorer la continuité des formes.

En complément, des éléments circulaires ont été ajoutés aux extrémités de chaque éprouvette, avec un rayon de 5 mm, dans le but d'améliorer l'adhérence et la stabilité lors de l'impression. Par ailleurs, le choix d'une hauteur de couche de 0,55 mm a été adopté afin d'accélérer le processus d'impression, tout en restant compatible avec les contraintes expérimentales. Ces ajustements ont permis d'obtenir une meilleure qualité d'impression et de limiter les défauts observés avec le matériau ABS.

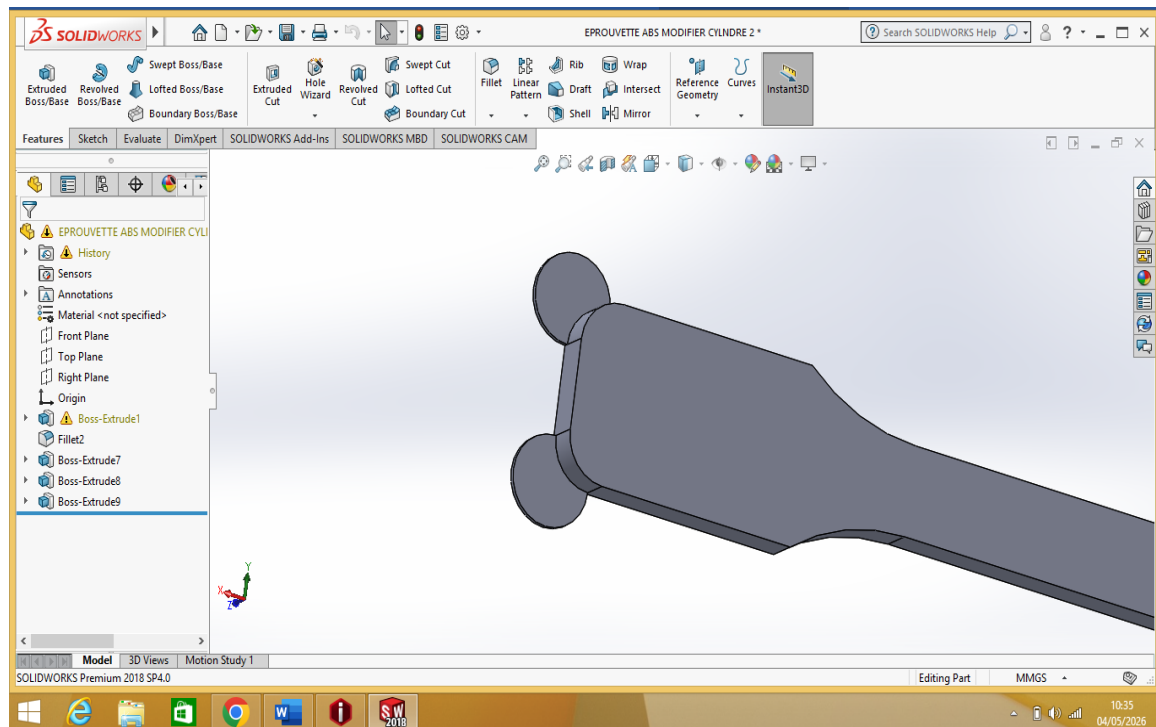


Figure 3.21 Modèle d'éprouvette optimisé avec congés et éléments d'extrémité ajoutés

3.6.2 Préparation du modèle pour l'impression 3D

Après la validation du modèle CAO, celui-ci est importé dans le logiciel de slicing afin de définir les paramètres d'impression tels que le type de remplissage, la hauteur de couche et les températures. Cette étape permet de générer le G-code nécessaire pour l'impression.

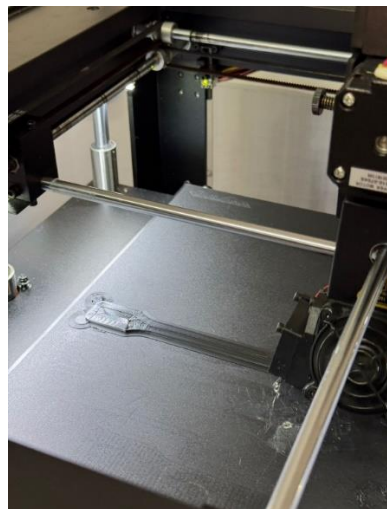


Figure 3.22 Préparation du modèle pour l'impression 3D dans le logiciel de slicing

3.6.3 État final après impression

Une fois l'impression terminée, les éprouvettes obtenues sont inspectées afin d'évaluer leur qualité. L'aspect final permet de vérifier la réussite du procédé d'impression ainsi que l'influence des paramètres adoptés sur la géométrie et la qualité de surface .



Figure 3.23 Éprouvette finale obtenue après impression 3D

3.6.4 Présentation des éprouvettes finales obtenues de ABS



Figure 3.24 Éprouvette finale imprimée en ABS

3.7 Conclusion

Dans ce chapitre, la préparation et l'impression des éprouvettes ont été effectuées avec succès à l'aide du système FAO et du logiciel ideaMaker, après résolution du problème d'adhérence de l'ABS sur la plaque d'impression. Les éprouvettes obtenues sont conformes et prêtes pour les essais de traction, qui feront l'objet du chapitre suivant consacré aux résultats et à leur interprétation

CHAPITRE 4

Les essai et exploitation des données

4.1 Introduction

Le présent chapitre est consacré à l'étude expérimentale du comportement mécanique en traction des matériaux étudiés. Les essais de traction ont été réalisés afin de déterminer les principales propriétés mécaniques, telles que la résistance maximale à la traction, le module d'élasticité et l'allongement à la rupture.

Dans cette étude, le taux de remplissage a été maintenu constant à 100 %, tandis que l'analyse porte principalement sur l'influence du motif de remplissage sur les performances mécaniques des matériaux. Les résultats obtenus sont présentés, analysés et comparés afin de mettre en évidence l'effet de ce paramètre sur le comportement mécanique des éprouvettes imprimées en 3D .

4.2 Étude expérimentale

Il est procédé à des essais mécaniques de traction par les moyens de la machine Controlab d'une capacité de 600 kN.

Les éprouvettes étudiées dans ce travail sont imprimées en 3D à partir de trois thermoplastiques lors des procédés d'impression, à savoir le PLA, l'ABS et le PETG.

L'impression 3D des éprouvettes est influencée par plusieurs paramètres tels que la hauteur de couche, le taux de remplissage, le motif de remplissage, la position d'impression, la température d'extrusion et la vitesse d'impression. Tous ces paramètres peuvent avoir un impact significatif sur la résistance et les propriétés mécaniques des pièces fabriquées par les procédés de fabrication additive.

L'objectif principal de la présente étude est ainsi de caractériser le comportement mécanique des éprouvettes de traction en 3D par l'analyse au laboratoire d'essais de traction machine, afin de vérifier l'influence des paramètres d'impression sur la résistance à la traction et le module d'élasticité des matériaux étudiés.

4.3 Comportement en traction des éprouvettes imprimés

4.3.1 Présentation de l'éprouvette (avant essai)

Dans cette étape, les éprouvettes utilisées dans les essais de traction sont présentées avant leur mise en charge.

Chapitre 4 : Les essais et exploitation des données

Ces pièces sont réalisées par fabrication additive (impression 3D) à partir de trois matériaux thermoplastiques : PLA, ABS et PETG.

Chaque éprouvette est normalisée afin de garantir la reproductibilité des essais et la comparaison des résultats mécaniques.

Nous avons pris un échantillon de l'éprouvette de PLA .

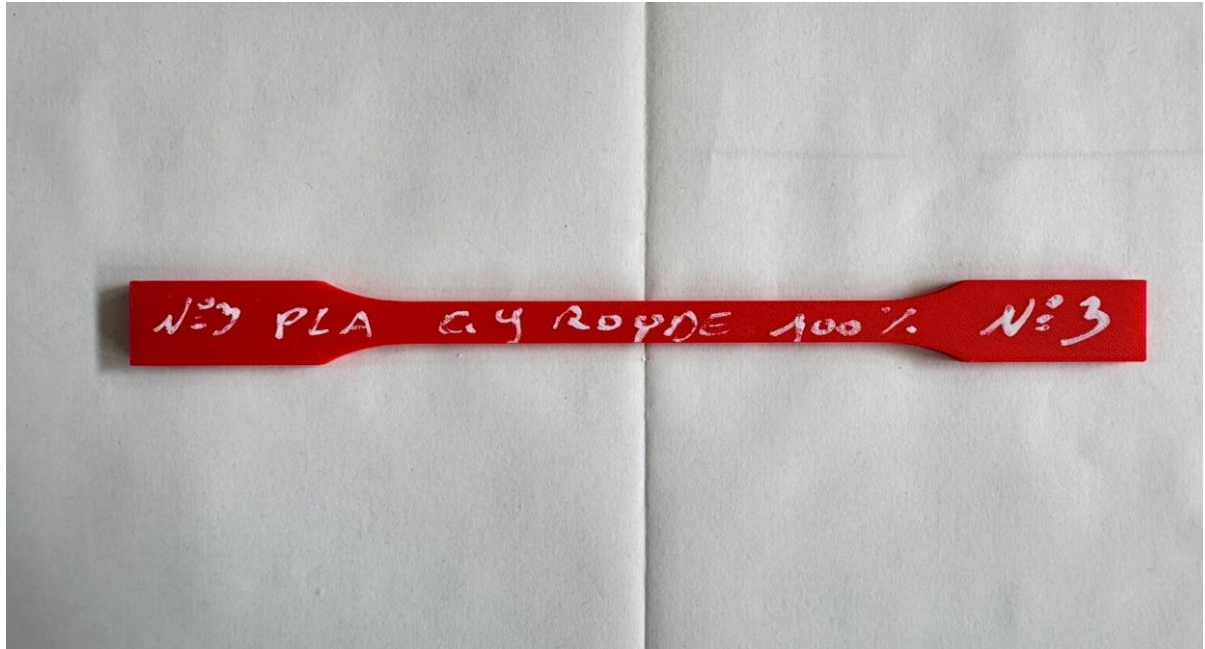


Figure 4.1 Éprouvette de traction imprimée en 3D avant essai

4.3.2 Mise en place de l'éprouvette dans la machine

L'éprouvette est fixée entre les mors de la machine de traction Controlab d'une capacité de 600 kN. Le serrage est réalisé de manière à assurer un bon alignement de l'échantillon afin d'éviter toute flexion parasite pouvant influencer les résultats. Une vérification est effectuée avant le lancement de l'essai pour garantir la stabilité de l'éprouvette.



Figure 4.2 Installation de l'éprouvette dans la machine de traction Controlab

4.3.3 3.3 Rupture de l'éprouvette

La rupture de l'éprouvette intervient lorsque la contrainte appliquée dépasse la résistance maximale du matériau. Cette étape marque la fin de l'essai et permet d'analyser le mode de rupture (fragile ou ductile selon le matériau). Les surfaces de rupture sont ensuite observées pour mieux comprendre le comportement mécanique.



Figure 4.3 Rupture de l'éprouvette après essai de traction

4.3.4 3.4 Exploitation des résultats (tables + graphes)

Les tableaux et les graphes présentés dans ce travail sont construits à partir des données expérimentales figurant dans les trois annexes, Les données utilisées dans cet exemple proviennent de l'Annexe 3

4.3.4.1 Tableaux des résultats

Après chaque essai, les données sont exploitées sous forme de tableaux regroupant :

- Allongement à la rupture (%)
- Force maximale (KN)

Tableau Charge-Déformation			
Charge (N)	Déformation (mm)	Charge (N)	Déformation (mm)
250.0	.785	5250.0	
500.0	1.460	5500.0	
750.0	1.970	5750.0	
1000.0	2.576	6000.0	
1250.0	3.265	6250.0	
1500.0	3.911	6500.0	
1750.0		6750.0	
2000.0		7000.0	
2250.0		7250.0	
2500.0		7500.0	
2750.0		7750.0	
3000.0		8000.0	
3250.0		8250.0	
3500.0		8500.0	
3750.0		8750.0	
4000.0		9000.0	
4250.0		9250.0	
4500.0		9500.0	
4750.0		9750.0	
5000.0		10000.0	

Tableau 4.4 Résultats des essais de traction des différents matériaux

4.3.4.2 Courbes contrainte-déformation

Les courbes obtenues permettent de comparer le comportement mécanique de matériaux PLA. Chaque courbe met en évidence la zone élastique et plastique ainsi que le point de rupture

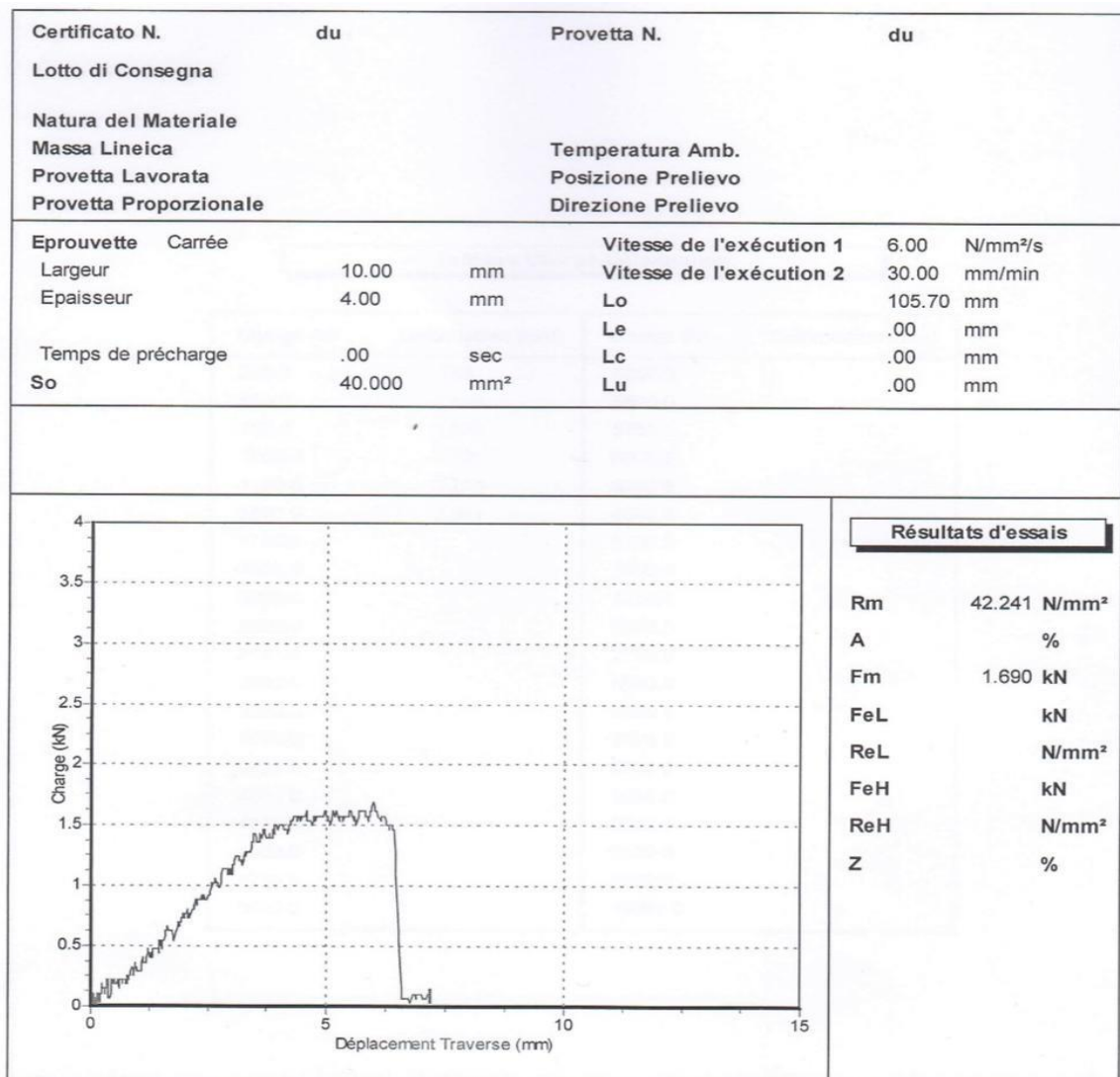


Figure 4.5 Courbes contrainte-déformation des matériaux étudiés

4.4 Formules utilisées

4.4.1 Contrainte σ

$$\sigma = F / S_0 \quad [\text{N/mm}^2]$$

F = force appliquée (N)

S₀ = section initiale (mm²)

Chapitre 4 : Les essais et exploitation des données

4.4.2 Déformation ε

$$\varepsilon = \Delta L / L_0 \quad [\text{sans unité}]$$

ΔL = allongement mesuré (mm)

L_0 = longueur de référence (mm)

4.4.3 Module de Young E

$$E = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon \quad [\text{MPa}]$$

E est la pente de la droite dans la zone élastique (régression linéaire).

4.5 Exemple de Calcul

Matériau : PLA | Motif : Gyroïde | Éprouvette : 1

4.5.1 Points relevés : Zone Élastique

Tableau des résultats Zone Élastique:

Point	F (N)	ΔL (mm)
P1	250.0	0.785
P2	500.0	1.460
P3	750.0	1.970
P4	1000.0	2.576
P5	1250.0	3.265
P6	1500.0	3.911

4.5.2 Calcul de σ et ε pour chaque point

Tableau des résultats Zone Élastique

Point	F (N)	$\sigma = F/40$ (N/mm ²)	ΔL (mm)	$\varepsilon = \Delta L/105.70$
P1	250.0	6.250	0.785	0.00743
P2	500.0	12.500	1.460	0.01381

P3	750.0	18.750	1.970	0.01864
P4	1000.0	25.000	2.576	0.02437
P5	1250.0	31.250	3.265	0.03089
P6	1500.0	37.500	3.911	0.03700

Détail du calcul pour P1 (F = 250 N) :

$$\sigma_1 = 250 / 40 = 6.250 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_1 = 0.785 / 105.70 = 0.00743$$

Détail du calcul pour P6 (F = 1500 N) :

$$\sigma_6 = 1500 / 40 = 37.500 \text{ N/mm}^2$$

$$\varepsilon_6 = 3.911 / 105.70 = 0.03700$$

4.5.3 Calcul du Module de Young E

On prend le premier point P1 et le dernier point P6 de la zone élastique :

Point	σ (N/mm²)	ε
Point P1 (F = 250 N)	6.250	0.00743
Point P6 (F = 1500 N)	37.500	0.03700
$\Delta = P6 - P1$	31.250	0.02957

Application numérique :

$$\Delta\sigma = 37.500 - 6.250 = 31.250 \text{ N/mm}^2$$

$$\Delta\varepsilon = 0.03700 - 0.00743 = 0.02957$$

$$E = 31.250 / 0.02957 = 1056.7 \text{ MPa}$$

Résultat : $E(3) = 1056.7 \text{ MPa} = 1.057 \text{ GPa}$

4.5.4 Résultat Final Éprouvette 1

Grandeur	Symbole	Valeur	Unité
Résistance maximale	Rm	42.241	N/mm ²
Module de Young	E	1056.7	MPa

Ce même calcul est reproduit pour les 27 éprouvettes (3 matériaux × 3 motifs × 3 essais).

4.6 Présentation et Analyse des Résultats

4.6.1 6.1 Résultats PLA (100% remplissage)

4.6.1.1 PLA Gyroïde

Tableau des résultats d'essais :

Essai	Rm (N/mm ²)	E (MPa)	Fm (kN)	So (mm ²)	Lo (mm)
1	42.241	1056.8	1.690	40.000	105.70
2	40.404	1090.4	1.616	40.000	105.70
3	39.486	1057.9	1.579	40.000	105.70
Moyenne	40.710	1068.4	—	—	—

4.6.1.2 PLA Grille

Tableau des résultats d'essais :

Essai	Rm (N/mm ²)	E (MPa)	Fm (kN)	So (mm ²)	Lo (mm)
1	44.077	1147.5	1.763	40.000	105.70
2	42.241	1228.3	1.690	40.000	105.70
3	42.241	1287.2	1.690	40.000	105.70
Moyenne	42.853	1221.0	—	—	—

4.6.1.3 PLA Concentrique

Tableau des résultats d'essais :

Essai	Rm (N/mm ²)	E (MPa)	Fm (kN)	So (mm ²)	Lo (mm)
1	47.750	1247.5	1.910	40.000	105.70
2	49.587	1268.2	1.983	40.000	105.70
3	45.914	1310.7	1.837	40.000	105.70
Moyenne	47.750	1275.5	—	—	—

4.6.1.4 Récapitulatif PLA

Tableau des résultats Récapitulatif :

Motif	Rm moyen (N/mm ²)	E moyen (MPa)	E (GPa)
Gyroïde	40.710	1068.4	1.068
Grille	42.853	1221.0	1.221
Concentrique	47.750	1275.5	1.276

4.6.2 Résultats PETG (100% remplissage)

4.6.2.1 PETG Gyroïde

Tableau des résultats d'essais :

Essai	Rm (N/mm ²)	E (MPa)	Fm (kN)	So (mm ²)	Lo (mm)
1	39.486	927.0	1.579	40.000	105.70

Chapitre 4 : Les essais et exploitation des données

2	38.568	861.2	1.543	40.000	105.70
3	40.404	852.5	1.616	40.000	105.70
Moyenne	39.486	880.2	—	—	—

4.6.2.2 PETG Grille

Tableau des résultats d'essais :

Essai	Rm (N/mm ²)	E (MPa)	Fm (kN)	So (mm ²)	Lo (mm)
1	41.322	918.1	1.653	40.000	105.70
2	45.914	962.4	1.837	40.000	105.70
3	43.150	1001.5	1.726	40.000	105.70
Moyenne	43.462	960.7	—	—	—

4.6.2.3 PETG Concentrique

Tableau des résultats d'essais :

Essai	Rm (N/mm ²)	E (MPa)	Fm (kN)	So (mm ²)	Lo (mm)
1	45.914	1077.5	1.837	40.000	105.70
2	46.832	1081.3	1.873	40.000	105.70
3	46.832	1053.2	1.873	40.000	105.70
Moyenne	46.526	1070.7	—	—	—

4.6.2.4 Récapitulatif PETG

Tableau des résultats Récapitulatif :

Motif	Rm (N/mm ²)	E moyen (MPa)	E (GPa)
-------	----------------------------	---------------	---------

Chapitre 4 : Les essais et exploitation des données

Gyroïde	39.486	880.2	0.880
Grille	43.462	960.7	0.961
Concentrique	46.526	1070.7	1.071

4.6.3 Résultats ABS (100% remplissage)

Les essais ABS présentent une dispersion plus importante que les autres matériaux. Des observations spécifiques seront formulées lors de l'interprétation.

4.6.3.1 ABS Gyroïde

Tableau des résultats d'essais :

Essai	Rm (N/mm ²)	E (MPa)	Fm (kN)	So (mm ²)	Lo (mm)
1	22.039	549.7	0.882	40.000	105.70
2	29.385	687.9	1.175	40.000	105.70
3	33.058	808.2	1.322	40.000	105.70
Moyenne	28.161	681.9	—	—	—

4.6.3.2 ABS Grille

Tableau des résultats d'essais :

Essai	Rm (N/mm ²)	E (MPa)	Fm (kN)	So (mm ²)	Lo (mm)
1	24.793	642.0	0.992	40.000	105.70
2	30.303	932.4	1.212	40.000	105.70
3	28.466	624.8	1.139	40.000	105.70
Moyenne	27.854	733.1	—	—	—

4.6.3.3 ABS Concentrique

Tableau des résultats d'essais :

Essai	Rm (N/mm ²)	E (MPa)	Fm (kN)	So (mm ²)	Lo (mm)
1	27.548	725.3	1.102	40.000	105.70
2	34.894	903.2	1.396	40.000	105.70
3	34.894	876.0	1.396	40.000	105.70
Moyenne	32.445	834.8	—	—	—

Observation : Les essais 2 et 3 présentent un Rm identique (34.894 N/mm²)

4.6.3.4 Récapitulatif ABS

Tableau des résultats Récapitulatif :

Motif	Rm (N/mm ²)	E moyen (MPa)	E (GPa)
Gyroïde	28.161	681.9	0.682
Grille	27.854	733.1	0.733
Concentrique	32.445	834.8	0.835

4.7 Observations Préliminaires

- Le motif Concentrique donne les meilleures performances mécaniques (Rm et E) pour les 3 matériaux testés.
- Le motif Gyroïde donne systématiquement les valeurs les plus faibles pour le PETG et l'ABS, mais reste compétitif pour le PLA.
- Le PLA Concentrique présente les meilleures performances globales : Rm = 47.750 N/mm² et E = 1275.5 MPa.
- L'ABS affiche des valeurs mécaniques nettement inférieures aux deux autres matériaux pour tous les motifs (conditions d'impression, sensibilité à l'humidité, retrait thermique).

- Dispersion notable sur l'ABS : forte variabilité des R_m et E entre essais d'un même motif, notamment pour la Grille (E entre 624.8 et 932.4 MPa) et le Concentrique (essai 1 et essai 3 avec R_m identique).
- Le PLA Grille montre un E élevé (1221.0 MPa) malgré un R_m modéré comparé au Concentrique.

4.8 Analyse Graphique et Interprétation des Résultats

4.8.1 Résistance Maximale R_m : Par Matériau et Motif

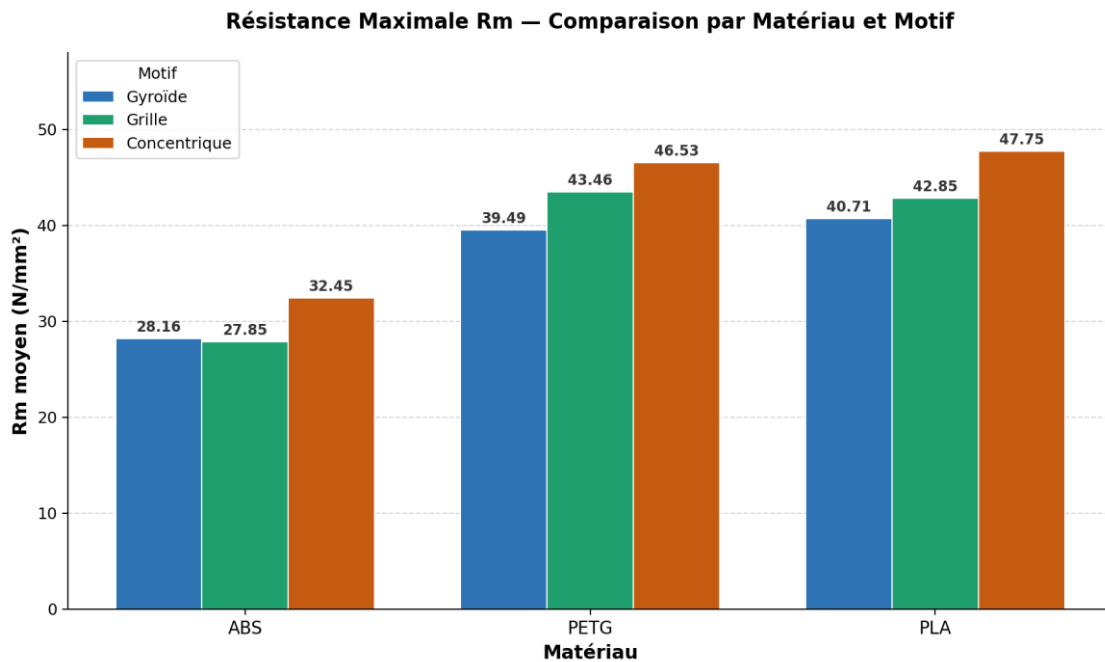


Figure 4.6 Résistance maximale R_m (N/mm²) par matériau et motif d'impression

- **Influence du motif :** Le motif Concentrique génère systématiquement les valeurs de R_m les plus élevées pour les trois matériaux testés. Cela s'explique par la continuité des trajectoires de dépôt qui confèrent une meilleure cohésion interne à l'éprouvette sous charge.
- **Comportement du PLA :** Le PLA présente les meilleures performances quelle que soit la géométrie de remplissage. Avec le motif Concentrique, il atteint $R_m = 47.750$ N/mm², soit la valeur la plus élevée de l'ensemble des essais.
- **Comportement du PETG :** Le PETG occupe une position intermédiaire, avec des valeurs de R_m comprises entre 39.486 et 46.526 N/mm². Il suit la même tendance que le PLA, le motif Concentrique donnant les meilleurs résultats.

➤ **Comportement de l'ABS** : L'ABS affiche des valeurs nettement inférieures aux deux autres matériaux pour tous les motifs. Cette faiblesse relative est attribuable à sa sensibilité au retrait thermique lors de l'impression, à l'humidité ambiante et aux difficultés d'adhésion entre couches.

➤ **Motif Gyroïde** : Le motif Gyroïde donne les valeurs les plus faibles pour le PETG et l'ABS. En revanche, pour le PLA, il reste compétitif ($R_m = 40.710 \text{ N/mm}^2$), ce qui suggère une meilleure compatibilité entre la structure gyroïdale et les propriétés rhéologiques du PLA.

4.8.2 Résistance Maximale R_m : Moyenne Globale par Matériau

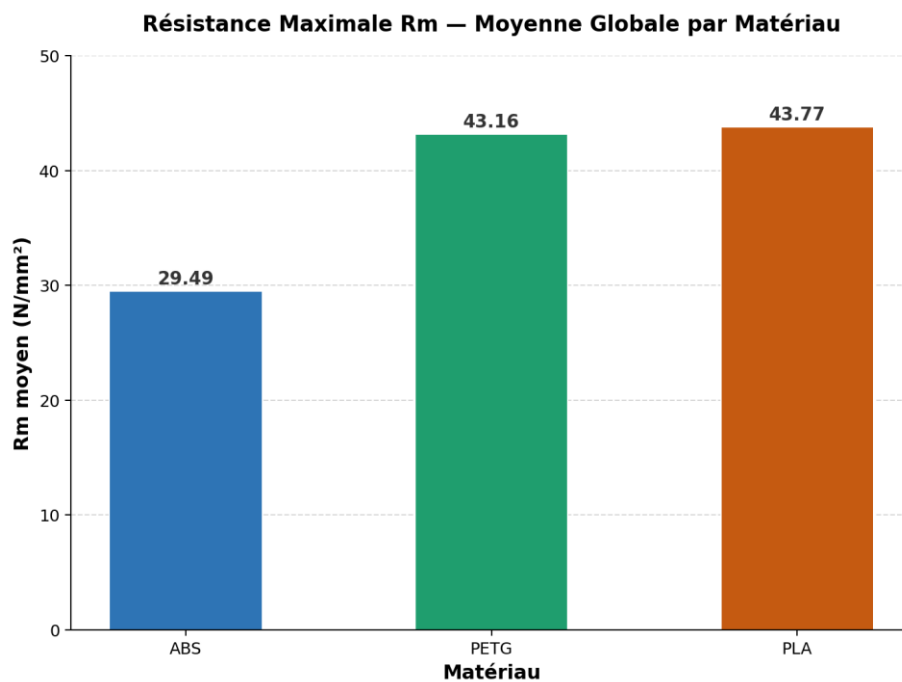


Figure 4.7 R_m moyen global par matériau (tous motifs confondus)

- **Classement global** : En moyenne sur l'ensemble des motifs, le PLA est le matériau le plus résistant (R_m moyen = 43.771 N/mm^2), suivi du PETG (43.158 N/mm^2) et de l'ABS (29.487 N/mm^2).
- **Écart PLA / PETG** : L'écart entre le PLA et le PETG est relativement faible, ce qui confirme que ces deux matériaux présentent des comportements mécaniques proches dans les conditions d'impression adoptées (taux de remplissage 100 %, FDM).
- **Infériorité de l'ABS** : L'ABS se distingue par une résistance moyenne significativement plus basse, avec un écart d'environ 14 N/mm^2 par rapport au PLA. Ce résultat confirme que l'ABS est

plus difficile à maîtriser en impression FDM et nécessite des conditions d'impression rigoureusement contrôlées pour atteindre des propriétés mécaniques optimales.

4.8.3 Résistance Maximale R_m : Moyenne Globale par Motif

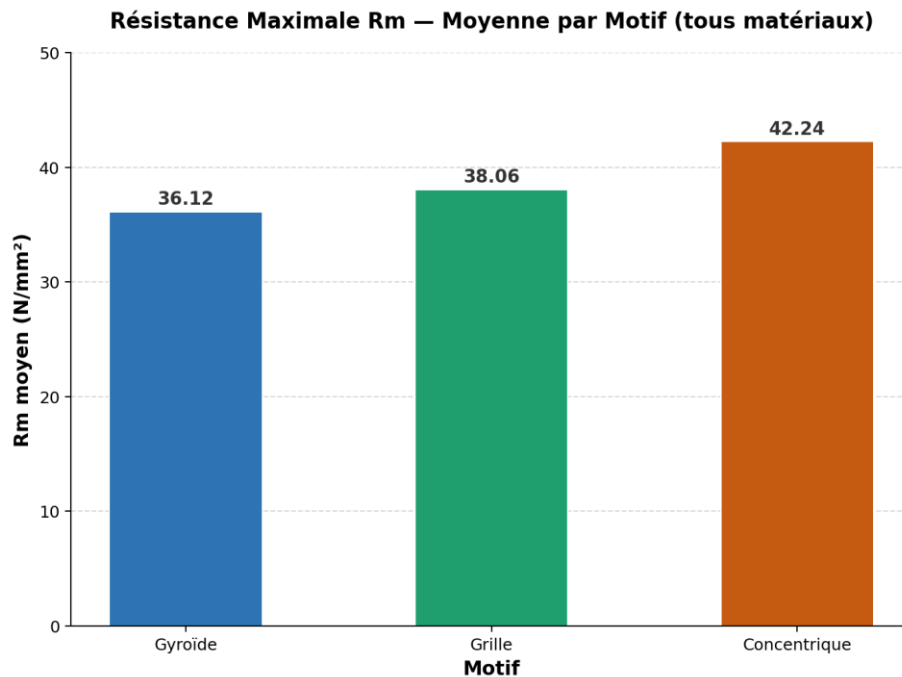


Figure 4.8 R_m moyen global par motif (tous matériaux confondus)

- **Supériorité du motif Concentrique :** Le motif Concentrique enregistre la moyenne la plus haute ($R_m = 42.240 N/mm^2$), confirmant son efficacité structurelle indépendamment du matériau utilisé. La continuité des lignes de dépôt dans ce motif favorise une répartition homogène des contraintes lors de la traction.
- **Motif Grille :** Le motif Grille présente des performances légèrement inférieures au Concentrique (R_m moyen = $38.056 N/mm^2$), mais reste nettement supérieur au Gyroïde pour les matériaux ABS et PETG.
- **Motif Gyroïde :** Bien que le Gyroïde soit reconnu pour ses propriétés isotropiques, sa performance en traction directe est la plus faible en moyenne. Son architecture tridimensionnelle complexe ne favorise pas la résistance dans une direction de sollicitation unique.

4.8.4 Module de Young E : Par Matériau et Motif

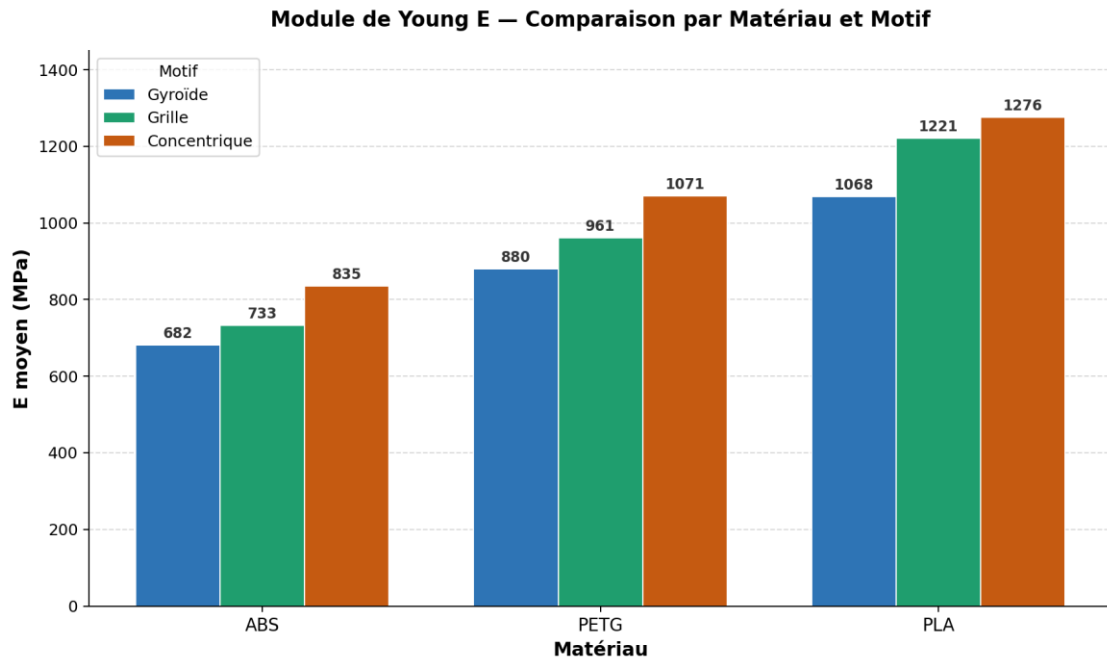


Figure 4.9 Module de Young E (MPa) par matériau et motif d'impression

- **Rigidité du PLA :** Le PLA présente les valeurs de module de Young les plus élevées pour tous les motifs testés. Le motif Concentrique atteint $E = 1275.5$ MPa, ce qui en fait la configuration la plus rigide de l'étude.
- **Cas du PLA Grille :** Le motif Grille du PLA affiche un module de Young élevé ($E = 1221.0$ MPa) malgré un R_m modéré comparé au Concentrique. Cela indique que la structure en grille confère une rigidité importante tout en limitant la résistance à la rupture, phénomène pouvant être lié à des concentrations de contraintes aux nœuds d'intersection des filaments.
- **PETG :** Le PETG montre une rigidité intermédiaire cohérente avec ses valeurs de R_m . Le motif Concentrique donne $E = 1070.7$ MPa, tandis que le Gyroïde présente la valeur la plus faible (880.2 MPa).
- **ABS et dispersion :** L'ABS présente non seulement les modules les plus faibles, mais aussi la plus forte variabilité. Pour le motif Grille, les valeurs individuelles s'étalent de 624.8 à 932.4 MPa, soit un écart de plus de 300 MPa entre essais du même motif. Cette dispersion

traduit une sensibilité élevée de l'ABS aux conditions d'impression (température, refroidissement, adhérence inter-couches).

4.8.5 Module de Young E : Moyenne Globale par Matériau

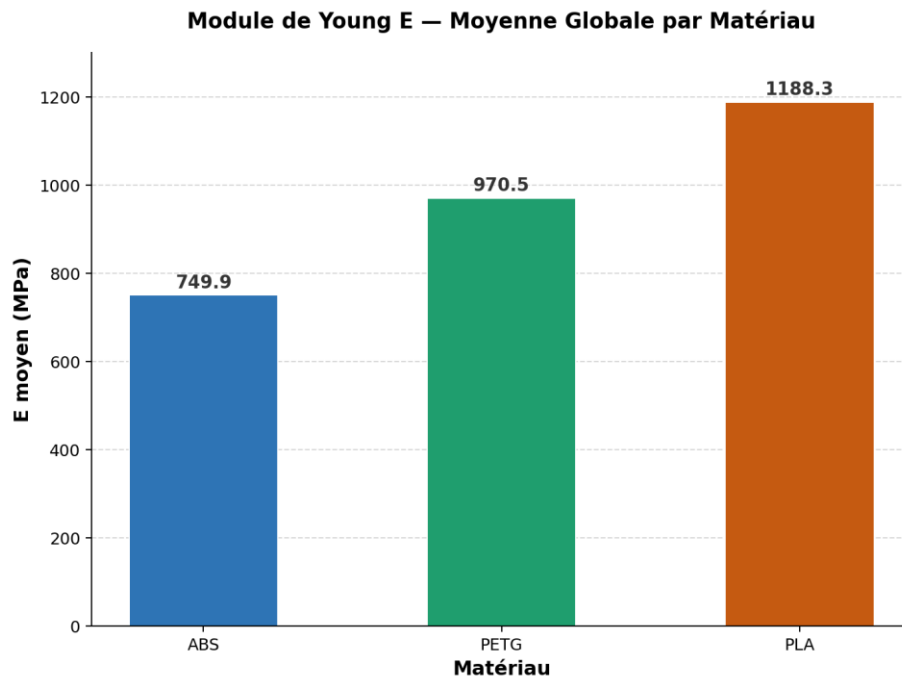


Figure 4.10 Module de Young E moyen global par matériau (tous motifs confondus)

- **Classement en rigidité :** Le PLA est le matériau le plus rigide avec un module moyen de 1188.3 MPa, suivi du PETG (970.5 MPa) et de l'ABS (749.9 MPa). Ce classement est cohérent avec les données de la littérature sur ces polymères en impression FDM.
- **Écart entre matériaux :** L'écart entre le PLA et l'ABS dépasse 438 MPa en moyenne, ce qui représente une différence de rigidité de près de 60 %. Cela confirme que le choix du matériau est le facteur dominant dans la détermination du comportement élastique des pièces imprimées en FDM à taux de remplissage 100 %.
- **Conclusion générale :** L'analyse comparative des modules de Young confirme la supériorité du PLA en termes de rigidité. Le PETG constitue une alternative intéressante pour les applications nécessitant une certaine flexibilité, tandis que l'ABS, malgré ses bonnes propriétés thermiques, présente les performances mécaniques les plus faibles dans les conditions d'impression de cette étude.

4.9 Conclusion

En conclusion, ce chapitre a permis d'étudier le comportement mécanique des matériaux imprimés en 3D à travers des essais de traction. Les résultats obtenus ont mis en évidence des différences significatives entre les matériaux analysés, notamment en termes de résistance maximale, de module d'élasticité et de ductilité. La comparaison réalisée montre que chaque matériau présente des performances mécaniques spécifiques, influencées principalement par leur nature et les conditions d'impression. Globalement, ces essais ont permis de mieux comprendre et d'identifier le matériau le plus adapté selon les exigences mécaniques recherchées dans le cadre de cette étude

CONCLUSION GÉNÉRALE

Ce travail de fin d'études avait pour objectif principal d'étudier et de comparer les caractéristiques mécaniques de pièces fabriquées par impression 3D FDM en fonction du matériau utilisé et du motif de remplissage adopté. Trois matériaux thermoplastiques ont été retenus le PLA, l'ABS et le PETG combinés à trois motifs de remplissage : Gyroïde (A), Grille (B) et Concentrique (C), avec un taux de remplissage fixé à 100 %.

La démarche adoptée a suivi une chaîne complète : de la conception CAO des éprouvettes normalisées ISO 527-2 Type 1A sous SolidWorks, en passant par la FAO sous IdeaMaker et l'impression sur imprimante FDM, jusqu'à la réalisation des essais de traction sur machine Controlab 600 kN conformément à la norme EN 10002/1.

Le PLA s'est révélé le matériau le plus performant mécaniquement dans cette étude, avec la résistance maximale à la traction la plus élevée ($R_m = 47,75 \text{ N/mm}^2$) et le module d'élasticité le plus important ($E = 1275,5 \text{ MPa}$). Le PETG présente des performances légèrement inférieures mais reste très compétitif, notamment grâce à son allongement à la rupture nettement supérieur. L'ABS affiche les valeurs les plus basses dans toutes les configurations, ce qui s'explique en partie par sa sensibilité thermique et les phénomènes de retrait inhérents à son impression.

Quel que soit le matériau considéré, le motif Concentrique (C) génère systématiquement les meilleures performances mécaniques, suivi du motif Grille (B), puis du motif Gyroïde (A). Le motif concentrique, en orientant les fibres parallèlement à l'axe de sollicitation, optimise la résistance à la traction et la rigidité de la pièce. Ces résultats confirment l'importance du paramètre de remplissage dans la conception de pièces FDM à hautes performances.

La combinaison PLA + Concentrique représente la configuration la plus favorable parmi les neuf testées, avec $R_m = 47,75 \text{ N/mm}^2$ et $E = 1275,5 \text{ MPa}$. Elle constitue le choix recommandé pour des applications nécessitant une rigidité et une résistance maximales en impression FDM à 100 % de remplissage.

En perspective, les résultats obtenus ouvrent plusieurs pistes d'approfondissement qui peuvent être :

- Étudier l'influence du taux de remplissage (inférieur à 100 %) sur les performances mécaniques, ce qui permettrait d'optimiser le compromis masse/résistance.
- Tester d'autres motifs de remplissage disponibles dans IdeaMaker (Nid d'abeille, Octète, etc.) pour identifier des configurations encore plus performantes.
- Analyser l'influence de l'orientation d'impression (0°, 45°, 90°) sur les propriétés mécaniques.
- Élargir l'étude à d'autres matériaux FDM avancés tels que le PEEK, le Nylon ou les composites à fibres courte

Références bibliographiques

- [1] 3D PRINT. (s.d.). Impression 3D par dépôt de fil fondu (FDM). Repéré à <https://www.3dprint.fr/prototypage/impression-3d-par-depot-de-fil-fondu-fdm/>
- [2] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. Springer.
- [3] Gebhardt, A. (2012). Understanding Additive Manufacturing. Hanser Publishers.
- [4] Deckard, C. (1989). Selective Laser Sintering. University of Texas at Austin.
- [5] Kruth, J.P., Levy, G., Klocke, F., & Childs, T.H.C. (2007). Consolidation phenomena in laser and powder-bed based layered manufacturing. CIRP Annals, 56(2), 730–759.
- [6] ERM Fabtest. (s.d.). Dominant DIM — Imprimante 3D métal. Repéré à <https://www.erm-fabtest.com/3d-metal/1074-dominant-dim-imprimante-3d-metal.html>
- [7] Filimprimante3D. (s.d.). Imprimante LCD à cristaux liquides. Repéré à https://www.filimprimante3dmedia.fr/objets/contenu/pages/imprimante-lcd-cristaux-liquides/prusa_sl1.jpg
- [8] <https://www.3dprint.fr/prototypage/impression-3d-par-depot-de-fil-fondu-fdm/>
- [9] littérature scientifique et documentation industrielle (EOS, SLS process)
- [10] Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (2015). Additive Manufacturing Technologies. Springer.
- [11] Machine Controlab. (s.d.). Machine universelle d'essais de traction 600 kN — Documentation technique. Controlab.
- [12] EN 10002/1. Matériaux métalliques — Essai de traction — Méthode d'essai à température ambiante.
- [13] ISO 527-2. (2012). Plastiques — Détermination des propriétés en traction — Partie 2. Organisation internationale de normalisation.
- [14] Exploitation des données d'essai de traction — Nombre minimal d'éprouvettes. Document interne de laboratoire.