



Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Génie des Matériaux

Présenté par :

BOURENANE Moussa & SEDIRA Sohaib

Thème

INVESTIGATION EXPERIMENTALE DES FACTEURS INFLUENÇANT LE PROCESSUS D'IMPRESSION 3D AVEC L'UTILISATION DE FILAMENTS PLA FONDUS

Devant le jury composé de:

Nom et Prénom:	Grade	Qualité
BECHANE Leila	MCB	Président
AMROUNE Salah	Professeur	Encadreur
LATRACHE Mohamed	MCB	Examineur

Année Universitaire : 2023/ 2024

N° d'ordre : GM/...../2024

REMERCIEMENT

*Nous tenons tout d'abord à exprimer notre sincère gratitude à notre encadreur, le Professeur **Amroune Salah**, pour son dévouement et son soutien indéfectible tout au long de ce projet. Sa guidance experte et son souci du détail ont été inestimables pour notre progression.*

*Nous aimerions également adresser nos remerciements chaleureux au chef du département de génie mécanique, le Professeur **Rokbi Mansour**, pour sa générosité et son assistance précieuse. Sa disponibilité et ses conseils avisés ont grandement contribué à l'élaboration de notre travail.*

*Nous sommes également reconnaissants envers le Docteur **Khaldoune**, le Docteur **ZEGGANE Hauari**, et le Professeur **BENARIOUA Younes** pour leur expertise et leur disponibilité. Leurs contributions intellectuelles ont enrichi notre réflexion et ont éclairé notre cheminement dans cette recherche.*

*Par ailleurs, nous exprimons notre profonde reconnaissance envers la société algérienne **SONA GAZ, SPE** unité de M'sila, pour nous avoir offert l'opportunité de réaliser un stage enrichissant. Nos remerciements s'étendent à tous ceux qui ont rendu cette expérience possible.*

*Enfin, nous souhaitons adresser nos remerciements les plus sincères aux membres de **Maghreb Pipe**. Leur soutien inestimable, notamment celui de Docteur **Baali Ibrahim** et de tout le personnel du laboratoire Maghreb Pipe, a été d'une valeur inestimable pour la réussite de notre projet.*

Nos sincères remerciements vont à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Leur appui et leur encouragement ont été essentiels à notre succès.

DEDICACE

Nous tenons à exprimer notre dévouement à toutes les familles Bourenane et Sedira, ainsi qu'à tous nos amis et parents, qui ont été une source de soutien et d'encouragement tout au long de ce travail.

ملخص:

غالبًا ما يتم دمج الهياكل الخلوية في تصميم و صناعة الألواح العازلة من اجل تخفيف وزنها، لكن الطرق التقليدية لتحقيق ذلك معقدة ومحدودة في إنشاء هياكل خلوية متنوعة، مما يجعل تكاليف تصنيعها مرتفعة. الطباعة ثلاثية الأبعاد توفر طرق مرنة أكبر من الطرق التقليدية، بما في ذلك تقنية تصنيع الطبقات بالترسيب الساخن (FDM) ، التي تستخدم بشكل كبير بالتزامن مع البوليلاكثيد (PLA) لتصنيع الأجزاء الخفيفة. لذلك، ضمن هذه الدراسة، سعينا لفهم كيفية تأثير معاملات طباعة ثلاثية الأبعاد على الأداء الميكانيكي للأجزاء الخفيفة. الصلابة والمتانة هما جوانب مهمة لتطبيقات الهندسة، لذلك قمنا بتصنيع أجزاء خفيفة من PLA باستخدام طباعة ثلاثية الأبعاد، متغيرين كثافة الملء للحصول على كثافات مختلفة. ثم، قمنا بتقييم صلابة ومتانة هذه الأجزاء في اتجاهات التحميل المختلفة من خلال إجراء اختبارات الشد والانحناء والضغط. عند تقاطع البيانات التجريبية والتحليلية، حددنا الهيكل الخلوي والكثافة المثلى، مع مراعاة الاحتياجات الميكانيكية الخاصة لكل تطبيق في الهندسة.

Summary:

Cellular structures are often incorporated into the design and manufacturing of insulated panels to reduce their weight, but traditional methods of achieving this are complex and limited in creating various cellular structures, making their manufacturing costs high. 3D printing offers greater flexibility than traditional methods, including hot deposition manufacturing (FDM) technology, widely used in conjunction with polylactide (PLA) to make lightweight parts. Therefore, in this study, we sought to understand how 3D printing parameters affect the mechanical performance of lightweight parts. Rigidity and durability are important aspects for engineering applications, which is why we manufactured lightweight PLA parts using a 3D printer, varying the infill density to achieve different densities. Then, we evaluated the hardness and durability of these parts under different loading directions by performing tensile, bending, and compression tests. At the intersection of experimental and analytical data, we determined the optimal cellular structure and density, taking into account the specific mechanical needs of each engineering application.

Résumé:

Les structures cellulaires sont souvent intégrées à la conception et à la fabrication de panneaux isolés afin de réduire leur poids, mais les méthodes traditionnelles pour y parvenir sont complexes et limitées dans la création de diverses structures cellulaires, ce qui rend leurs coûts de fabrication élevés. L'impression 3D offre une plus grande flexibilité que les méthodes traditionnelles, notamment la technologie de fabrication de couches par dépôt à chaud (FDM), largement utilisée en conjonction avec le polylactide (PLA) pour fabriquer des pièces légères. Par conséquent, dans le cadre de cette étude, nous avons cherché à comprendre comment les paramètres d'impression 3D affectent les performances mécaniques des pièces légères. La rigidité et la durabilité sont des aspects importants pour les applications d'ingénierie, c'est pourquoi nous avons fabriqué des pièces légères en PLA à l'aide d'une imprimante 3D, en faisant varier la densité de remplissage pour obtenir différentes densités. Ensuite, nous avons évalué la dureté et la durabilité de ces pièces dans différentes directions de chargement en effectuant des tests de traction, de flexion et de compression. À l'intersection des données expérimentales et analytiques, nous avons déterminé la structure cellulaire et la densité optimales, en tenant compte des besoins mécaniques spécifiques de chaque application d'ingénierie.

SOMMAIRE

Introduction générale	14
-----------------------------	----

CHAPITRE I

Structures sandwich et impression 3D

I. Introduction.....	16
I.1. Introduction générale aux structures des panneaux sandwich	16
I.2. Définition structures sandwiches:	16
I.3. Constituants structures sandwiches.....	16
I.4. Les peaux:	17
I.5. Matrice	17
I.5.1. La structure des thermoplastiques.....	18
I.5.2. La structure des thermodurcissables:	18
I.5.3. La résine époxy	18
I.6. Renforts:.....	19
I.6.1. Classifications de fibres	20
I.6.1.1. Fibre de carbone.....	20
I.6.2. Les avantages et les inconvénients des fibres de carbone.....	20
I.6.2.1. Fibre de verre:	21
I.6.2.2. Les avantages et les inconvénients des fibres de verre	22
I.6.3. Cœur (âme):	22
I.6.4. Cœur Pleine:.....	23
I.6.5. Cœur creuses:.....	23
I.6.6. Les Adhésifs (interface):.....	24
I.6.7. Domaine d'application des structures sandwiches.....	24
I.6.7.1.Aérospatiale :	25
I.6.7.2.Domaine de Ferroviaire:	26
I.6.7.3.Domaine de la construction navale:	26
I.6.7.4.Automobile:	27
I.6.7.5.Construction :	28
I.7. Introduction à l'impression 3D:.....	28
I.7.1. Comment fonctionne l'impression 3D:	29

I.7.2. Avantages et inconvénients de l'impression 3D:.....	30
I.7.3. Types de technologies d'impression 3D:.....	30
I.7.4. Applications d'impression 3D:	30
I.7.5. L'impression 3D de panneaux sandwich :	30
I.8. Les caractéristiques géométriques de panneaux sandwich	32
I.8.1. Structure multicouche:	32
I.8.2. Forme et taille:	32
I.8.3. Épaisseur:.....	33
I.8.4. Géométrie des canaux et des structures internes:.....	33
I.8.5. Détails de surface:.....	33
I.8.6. Bords et finitions:.....	33
I.9. Literature review:	34

CHAPITRE II

Méthode et Matériels

II. Méthode et Matériels:	43
II.1. Géométrie des éprouvettes sandwiches:	43
II.1.1. Cellule en nid d'abeille:	43
II.1.2. Cellule re-entrante:	43
II.1.3. Cellule tétra-chirale:	44
II.2. Conception des éprouvettes avec SolidWorks:.....	44
II.2.1. Le logiciel SolidWork:	44
II.2.2. Les principales taches de SolidWorks:.....	45
II.2.3. Les formats de fichier de SolidWorks supportent:	45
II.2.3.1. Fichiers natifs SolidWorks:	45
II.2.3.2. Fichiers neutres de CAO :	46
II.2.3.3. Fichiers de formats de fichier standard :	46
II.2.3.4. Autres formats :	46
II.2.4. Les éprouvettes réalisées par SolidWoks:	46
II.1. Le logiciel de découpage CURA:	49
II.1.1. Le logiciel CURA:.....	49
II.1.2. Les principales taches de CURA	50

II.1.2.1. Importation de modèles 3D :	50
II.1.2.2. Configuration des paramètres d'impression :	50
II.1.2.3. Étapes pour préparer les échantillons pour l'impression:	51
II.1.2.3.1. Etape 1:	51
II.1.1.1.1. Etape 2:	52
II.2. L'imprimante Anycubic i3 Mage:	53
II.3. Impression des éprouvettes pour les essais:	54
II.4. Caractérisation mécaniques des échantillons élaborés	55
II.4.1. Machine d'essai mécanique :	55
II.4.2. Essais mécaniques standards :	56
II.4.2.1. Essai de flexion 3 points :	56
II.4.2.2. Essai de traction :	58
II.4.2.3. Essai de compression :	60

CHAPITRE III

Résultats et discussions

III. Les résultats et discussions:	64
III.1. Les tests de flexion:	64
III.1.1. Le but de test:	64
III.1.2. Les résultats:	65
III.2. Les tests de Traction:	66
III.2.1. Le but de test:	66
III.2.2. Les résultats:	66
III.3. Tests de compressions	67
III.3.1. Le but de test:	67
III.3.2. Les résultats:	67
III.4. Discussions:	69
III.4.1. Test de flexion:	69
III.4.2. Test de traction:	69
III.4.3. Test de compression:	69
III.5. Conclusion:	70

CHAPITRE IV

Modélisation sur Abaqus

IV.1 Introduction:.....	72
IV.2 Logiciel ABAQUS:.....	72
IV.3 Les différentes phases de simulation:	74
IV.3.1 Modélisation de la géométrie :.....	74
IV.3.2 Définition des matériaux :.....	75
IV.3.3 Assembler le modèle (module ASSEMBLY)	76
IV.3.4 Définition du « Step » et des variables à calculer (le module step).....	76
IV.3.5 Définition des conditions aux limites et chargement (Module Load):.....	77
IV.3.6 Le maillage de modèle (module mesh)	77
IV.3.7. Création du fichier résultats (Module Job)	78
IV.3.8. Visualisation des résultats (Module visualisation):	79
IV.3.9. Conclusion	80
Conclusion général.....	81
Les références.....	82

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Structure sandwich.	17
Figure I.2: Matériaux pour les peaux.	17
Figure I.3: Différentes familles de matrice.	19
Figure I.4: Matériaux des renforts.	19
Figure I.5: Fiber de carbone.	20
Figure I.6: fibre de verre.	22
Figure I.7: Eléments constitutifs d'un panneau sandwich à âme pleine.....	23
Figure I.8: Eléments constitutifs d'un panneau sandwich à cœur creuse.	23
Figure I.9: Matériaux pour les âmes.	24
Figure I. 10: L'utilisation panneaux composite dans la construction aéronautique	25
Figure I.11: Train à grande vitesse.	26
Figure I.12 : Bateau transport de voyageur.	27
Figure I. 13: l'utilisation dans l'industrie automobile	27
Figure I. 14: La construction des panneaux sandwiches dans bâtiments.	28
Figure I.15: Schéma d'imprimante 3D.	29
Figure I.16: Les étapes d'impression 3D	29
Figure 1.17: panneaux sandwich flexibles	31
Figure I-18: Sections d'aile	34
Figure I.19: Schéma de principe de l'essai de flexion trois points	35
Figure I.20: Conception de la cellule unitaire de la ferme	36
Figure I.21: Vue schématique de la structure et de leurs cellules unitaires	37
Figure I.22 : (a) Cellule unitaire de cellules architecturées à six côtés comme noyau de panneaux sandwich architecturés et (b) Appliqué conditions aux limites périodiques pour l'homogénéisation de la maille unitaire ou de l'élément de volume représentatif	38
Figure I.23 : (a) la machine d'essai et (b) le principe de l'essai de flexion 3 points	40
Figure II.1 Configuration de cellules unitaires conçue à l'aide de solidworks	44
Figure II.2: Interface du logiciel SolidWorks	45
Figure II.3: Géomètre des cellules.	46
Figure II.4: Eprouvette de flexion Cellule nid d'abeille (CNA)	47
Figure II.5: Eprouvette de flexion Cellule en re-rentrant (CR).	47
Figure II.6: Eprouvette de flexion Cellule tétra chiral (CTC).	47
Figure II.7: Eprouvette de traction Cellule nid d'abeille (CNA).	47

Figure II.8: Eprouvette de traction Cellule re-rentrant (CR)	48
Figure II.9: Eprouvette de traction Cellule tétra chiral (CTC)	48
Figure II.10: Eprouvette de compression Cellule re-rentrant (CR)	48
Figure II.11: Eprouvette de compression Cellule tétra chiral (CTC)	48
Figure II.12: Eprouvette de compression Cellule nid d'abeille (CNA)	49
Figure II.13: Interface du logiciel CURA	49
Figure II.14: Paramètre d'impression	50
Figure II.15: Eprouvette importé	51
Figure II.16: Création de trois duplicatas	51
Figure II.17: Configuration de l'imprimante	52
Figure II.18: Imprimante Anycubic	53
Figure II.19: Les éprouvettes des essais	54
Figure II.20: Machine d'essai mécanique TesT 112	55
Figure II.21: Essai de flexion 3 points	56
Figure II.22: Schéma d'essai de flexion 3 points	57
Figure II.23: Courbes types de la contrainte en flexion	58
Figure II.24: Essai de traction	59
Figure II.25: Schéma d'essai de traction	59
Figure II.26: Courbes contrainte/déformation typiques	60
Figure II.27: Essai de compression	61
Figure II.28: Schéma d'essai de compression	61
Figure II.29: Courbes types contrainte/déformation	62
Figure III.1: Les éprouvettes après tests de flexion	65
Figure III.2: Courbes contrainte/allongement des échantillons	65
Figure III.3: calcule Module d'Young a partir de Courbes contrainte/allongement	65
Figure III.4: Résultats des tests flexion	66
Figure III.4: les éprouvettes après tests de traction	66
Figure III.5: Courbes de traction	66
Figure III.6: Les résultats des tests traction	67
Figure III.7: Les éprouvettes après tests de traction	68
Figure III.8: Courbes de compression	70
Figure III.9: Les résultats des tests traction	70
Figure VI.1: interface de logiciel Abaqus	73
Figure IV.2: Import d'éprouvette CNA	74

Figure IV.3: Modélisation par Abaqus	75
Figure IV.4: Définir la propriété mécanique de matériaux	75
Figure IV.5: Génération des instances à assembler.....	76
Figure IV.6: Création du STEP pour un chargement statique.....	76
Figure IV.7: Conditions aux limites de module LOAD.	77
Figure IV.8: Présentation de maillage	78
Figure IV.9: Création du fichier résultats (Module Job).....	79
Figure IV.10: Modèle d'essai de flexion en trois points sur Abaqus.....	79
Figure IV.11: Visualisation et exploitation des résultats.	80

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Caractéristiques de résines thermoplastiques.	18
Tableau I.2 : Caractéristiques de résines thermodurcissables.	18
Tableau I.3 : Différents types de fibres de verres.	21
Tableau I.4: Caractéristiques mécaniques des verres types E, A, R, S et D	21
Tableau I.5 : Panneaux sandwich architecturés avec une architecture de noyau cellulaire alternative	39
Tableau III.1: Résultats de test flexion	65
Tableau III.2: Résultats des tests traction	67
Tableau III.3: Résultats des tests compression	68

LISTE DES ABREVIATIONS

3D :	Tridimensionnel.
ASTM :	Société américaine pour les tests et les matériaux.
CAO :	Conception assistée par ordinateur.
CN :	Programmation de commande numérique.
EBM:	Electron Beam Melting.
FA:	Fabrication additive.
FDM:	Fused Deposition Modeling (Dépôt de matière fondue).
FFF:	Fused filament fabrication.
ISO:	International organization for standardization.
PET :	Polytéréphtalate.
PLA :	Poly lactique.
PP :	Polypropylène.
SLA:	Stereolithography Apparatus.
SLS:	Selective Laser Sintering.
STL:	STereo-Lithography.
L :	la longueur du côté d'une cellule.
h:	La hauteur de la paroi verticale d'une cellule.
N:	Le nombre de cellules sur une seule ligne.
d:	Le diamètre du cercle interne.
D:	Le diamètre du cercle externe.
a:	Longueur de l'éprouvette.
b:	Largueur de l'éprouvette.
ts :	épaisseur de la feuille frontale.
tc:	Épaisseur du noyau ;
t:	Épaisseur de paroi),
CNA:	Cellule en nid d'abeille,
CR:	Cellule réentrant.
CTC:	Cellule tétra-chirale.
σ_f :	La contrainte.
P :	La charge en (N).
L :	La distance entre appuis (mm)
b :	Le largeur de l'éprouvette

h :	L'épaisseur de l'éprouvette
E_f :	Le module d'élasticité en flexion (MPa)
b :	Le largeur de l'éprouvette
h :	L'épaisseur de l'éprouvette
m :	La pente linéaire de la courbe charge-déflexion
ε_f :	Déformation en flexion (MPa)
L :	La distance entre appuis (mm)
D :	Fleche maximale (mm)

Introduction générale

Le FDM (Fused Deposition Modeling), ou dépôt de matière fondue, est une méthode de fabrication d'objets 3D où des couches de filament thermoplastique sont déposées successivement à partir d'un modèle CAD, offrant ainsi des avantages en termes de réduction des coûts et des délais par rapport aux techniques traditionnelles. Dans cette perspective, notre projet vise à analyser expérimentalement et numériquement l'impact des paramètres d'impression 3D utilisant des filaments de PLA fondus. Pour ce faire, notre travail est divisé en quatre parties distinctes :

Le premier chapitre offre une introduction approfondie aux panneaux sandwichs, explorant en détail l'utilisation de la technologie d'impression 3D dans leur fabrication. Il examine également les divers types de filaments utilisés dans ce processus, en mettant en évidence leurs caractéristiques et leurs avantages spécifiques. De plus, ce chapitre explore les nombreuses applications des panneaux sandwichs dans différents domaines industriels et commerciaux. Enfin, il inclut une revue approfondie de la littérature existante sur ce sujet, offrant une perspective contextuelle sur les recherches antérieures et les tendances actuelles dans ce domaine.

Le deuxième chapitre détaille la méthode de conception des échantillons en utilisant des logiciels tels que SolidWorks. Nous convertissons ensuite les conceptions en fichiers STL et utilisons CURA pour générer les fichiers Gcode nécessaires à l'impression. Enfin, nous produisons trois échantillons de chaque type à l'aide d'une imprimante 3D.

Le troisième chapitre implique des tests de flexion, de traction et de compression réalisés avec une machine d'essai équipée d'un logiciel de suivi. Les données recueillies sont enregistrées dans un fichier Excel, puis analysées à travers des courbes, suivies d'une discussion approfondie des résultats dans le contexte de notre étude.

Le quatrième chapitre se concentre sur des simulations réalisées à l'aide du logiciel Abaqus. Nous comparons ensuite les résultats de ces simulations avec ceux des expériences précédentes afin d'évaluer la validité des modèles de simulation et de tirer des conclusions sur leur capacité à représenter le comportement mécanique des échantillons étudiés.

En conclusion, nous résumons nos résultats et discutons des perspectives futures de notre étude.

CHAPITRE I

Structures sandwich et impression 3D.

I. Introduction

Dans cette section, nous avons subdivisé le chapitre en deux parties distinctes. La première partie aborde l'introduction générale aux structures des panneaux sandwich et à l'utilisation de l'impression 3D, tandis que la seconde partie se concentre sur la revue de la littérature.

I.1. Introduction générale aux structures des panneaux sandwich

Les chercheurs et les industriels ont développé dans le domaine des matériaux légers, appelés matériaux composites, et qui développés en de nouveaux types et formes de composites, y compris les sandwichs. Dans ce chapitre, nous allons parler de ces matériaux.

Dès la seconde guerre Mondiale, les structures sandwichs sont apparues dans les structures de l'avion «Mosquito »^[1].

Parmi tous les concepts de conception possibles dans les structures composites, l'idée de sandwich dans la construction est devenue de plus en plus populaire en raison du développement de matériaux cellulaires artificiels en tant que matériaux centraux^[2].

Les sandwichs sont des matériaux possédant deux peaux de grande rigidité et de faible épaisseur renfermant un cœur de forte épaisseur et de faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté, et résistante^[3].

Par conséquent, leur utilisation est de plus en plus fréquente dans différents secteurs industriels tels que l'aéronautique, le transport, la construction etc. Historiquement, ce sont les premières structures composites allégées et performantes^[4].

I.2. Définition structures sandwiches:

Une structure sandwich est obtenue à partir de deux peaux ou revêtements, réalisées dans un matériau ayant de très bonnes caractéristiques, collées sur un cœur réalisée avec un matériau très léger et ayant des faibles caractéristiques mécaniques (Figure I.1). L'objet d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier légèreté et rigidité^[5].

I.3. Constituants structures sandwiches

Une structure sandwich présente une solution de compromis permettant à la fois de rigidifier et d'alléger une structure. Elle est constituée généralement de trois composants de base possédant des propriétés différentes, mais complémentaires : les peaux, le cœur et l'interface (adhésif)^[6].

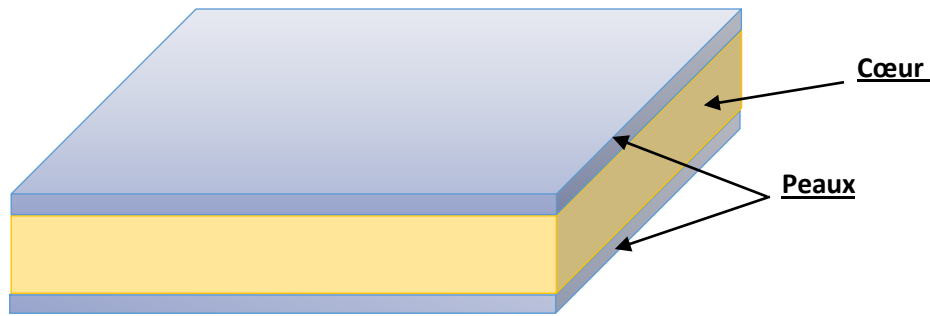


Figure I.1: Structure sandwich.

I.4. Les peaux:

Généralement de faibles épaisseurs, les peaux sont constituées de tout matériau pouvant être obtenu sous forme de couche. Elles peuvent être en bois, métal ou matériau composite. Choix de la nature et de la séquence des couches dépendra de l'utilisation des matériaux composites ^[7].

Pour les composites à moyennes et hautes performances, de stratifiés à matrice thermodurcissable (polyesters insaturés, époxydes ou thermoplastique polypropylène...) et d'un renfort fibreux (mat et tissu) de verre et de carbone ou d'aramide.

- a) Pour les structures portantes, de feuilles métalliques (aluminium, acier)
- b) Pour des structures de faibles à moyennes performances, de bois, laminé, stratifié, contre-plaqué.
- c) Peau en matériaux composites est constituée d'une matrice et d'un renfort.

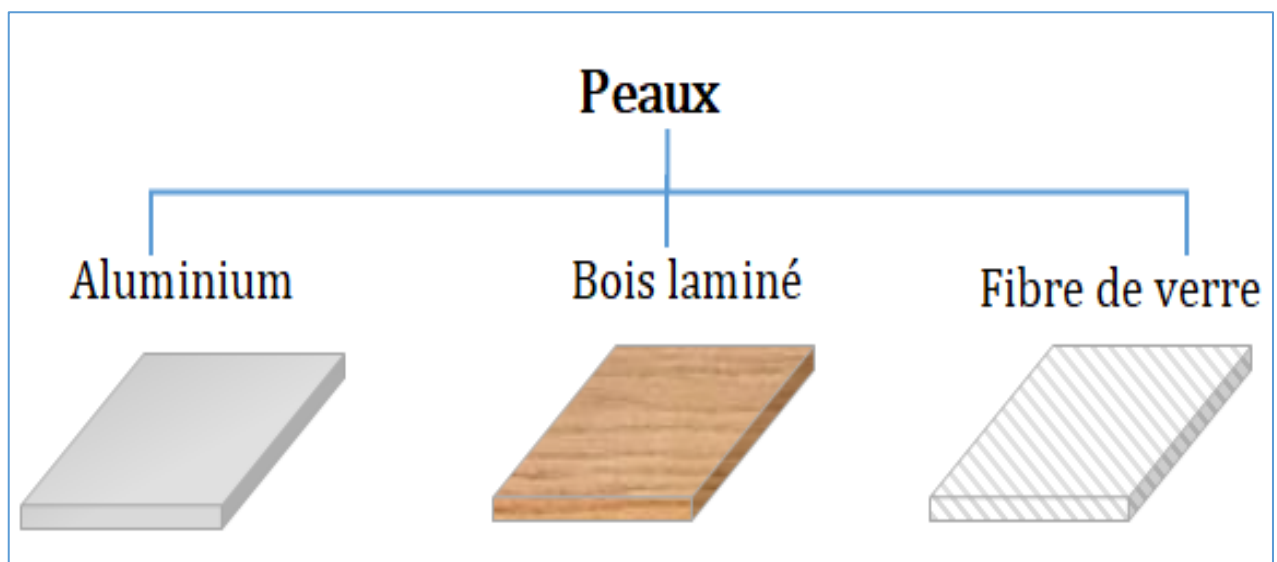


Figure I.2: Matériaux pour les peaux. ^[7]

I.5. Matrice

La matrice a pour rôle de lier les fibres, répartir les contraintes encaissées, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit ^[8].

1.5.1. La structure des thermoplastiques

Se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la (Figure I.3). On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques renforcés de fibres courtes se développe fortement ^[8].

Résine	T _f (C ⁰)	ρ(kg/m ³)	ε _t ^R (%)	σ _t ^R (MPa)	σ _c ^R (MPa)	E(GPa)
polyamide	65 à 100	1140		60 à 85		1,2 à 2,5
polypropylène	900	1200		20 à 35		1,1 à 1,4

Tableau I.1 : Caractéristiques de résines thermoplastiques ^[15].

1.5.2. La structure des thermodurcissables:

A la forme d'un réseau tridimensionnel, se ponté (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible ^[8].

Résine	T _f (C ⁰)	ρ(kg/m ³)	ε _t ^R (%)	σ _t ^R (MPa)	σ _c ^R (MPa)	E(GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

Tableau I.2 : Caractéristiques de résines thermodurcissables ^[15].

1.5.3. La résine époxy

Polyesters insaturés sont les plus utilisés comme des résines thermodurcissables. Une grande série de propriétés physiques et mécaniques peut être obtenue en utilisant ces résines. Les propriétés mécaniques de la matrice dépendent de sa composition chimique. Le produit chimique de la matrice contrôle les propriétés mécaniques tandis que le durcissement chimique

Contrôle la densité et la longueur du réseau formé. Le durcissement est généralement complété par un programme impliquant la chaleur et gardant la résine à un ou plusieurs niveaux de température

à un temps donné[8].

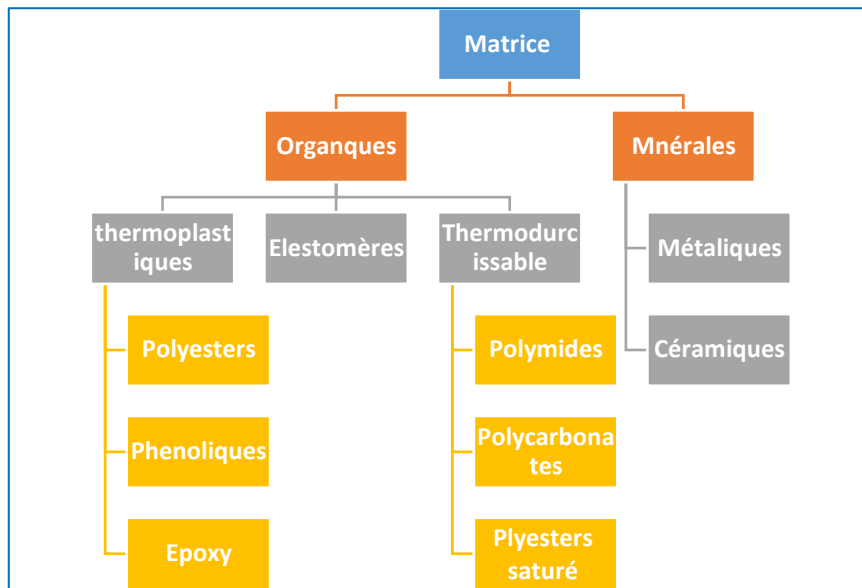


Figure I.3 : Différentes familles de matrice ^[8].

I.6. Renforts:

Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite. Un grand nombre des fibres sont disponibles sur le marché fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus). ^[9]

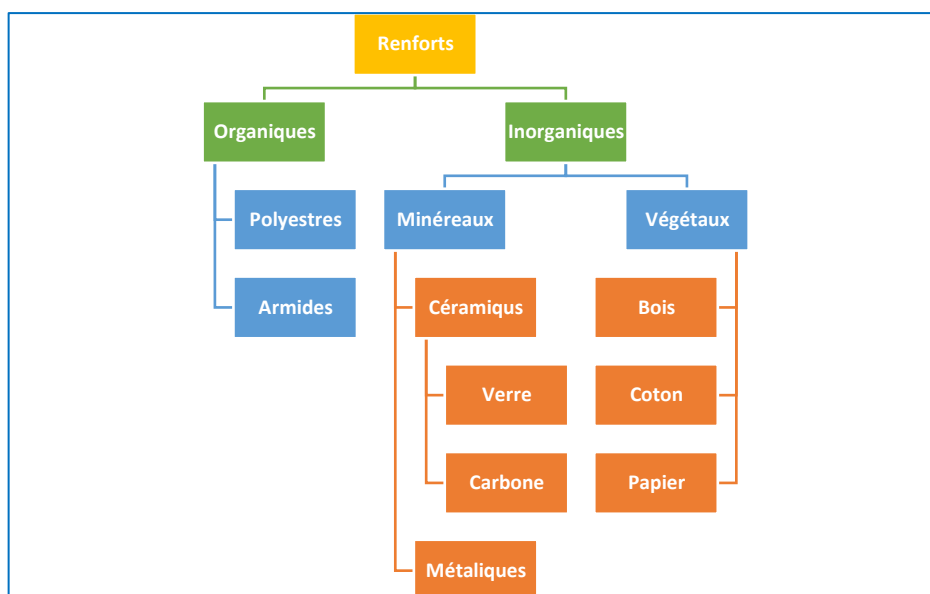


Figure I.4 : Matériaux des renforts ^[12].

I.6.1. Classifications de fibres

Cette figure résume les différents types de fibre utilisés dans la mise en œuvre des matériaux composites.

I.6.1.1. Fibre de carbone

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur. Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques. (Fibre synthétique).

Le principe d'élaboration est de faire :

- Constitue d'une stabilisation d'oxydation contrôlée entre 200° et 300°
- Tirer simultanément le matériau pour induire l'orientation moléculaire de précurseur appropriée.
- Carbonisation sous une atmosphère d'azote une température comprise entre 1000° et 1500°
- Une graphitisation plus de 1800°
- Les fibres de carbone subissent, en général un traitement de surface ^[9].



Figure I.5 : Fibre de carbone[9].

I.6.2. Les avantages et les inconvénients des fibres de carbone

a) Les avantages :

- faible densité.
- Haute résistance à la traction.
- Haut module d'élasticité longitudinal.
- haute conductivité électrique.

b) Les inconvénients :

- Réduction de la résistance au choc.
- Faible résistance à la compression.
- Coût élevé.

I.6.3. Fibre de verre:

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres de faibles diamètres (quelques dizaines de micromètres), le verre perd ce caractère et possède alors de bonnes caractéristiques mécaniques [9].

Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performance /prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites[9].

- *Il existe différents types de verres : le verre E, C, D, R ou S, de différentes propriétés dues à la différence de la composition du mélange de préparation.*
- *Les verres de type E constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement [9].*

Type	Caractéristiques générales
E	à usage général ; bonnes propriétés électriques
D	hautes propriétés diélectriques
A	haute teneur en alcali
R, S	haute résistance mécanique

Tableau I.3 : Différents types de fibres de verres[10].

Caractéristique	Verre E	Verre A	Verre R ou S	Verre D
Masse volumique	2540	2460	2550	2160
Module de Young (MPa)	7200	7100	8600	5500
Contrainte à la rupture (MPa)	3500	3100	4500	2500
Allongement à la rupture (%)	4,4	-	5,2	-

Tableau I.4: Caractéristiques mécaniques des verres types E, A, R, S et D mesurées sur filament vierge[9].

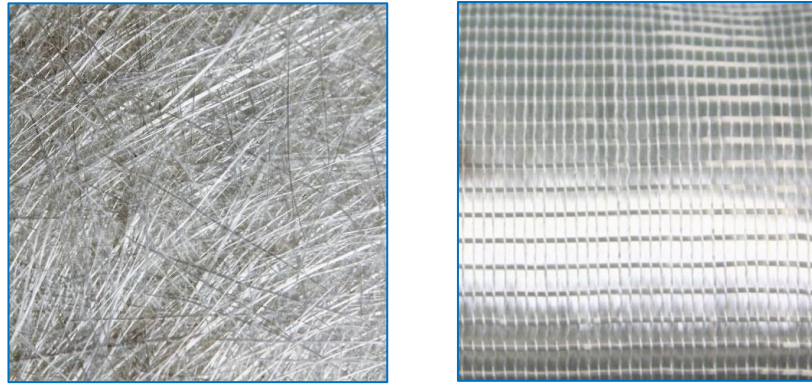


Figure I.6: fibre de verre[11].

I.6.3.1. Les avantages et les inconvénients des fibres de verre [9].

a. Les avantages :

- Haute résistance à la traction et à la compression.
- Faible coût par rapport à d'autres fibres.
- Haute résistance chimiques.
- Haute résistance au feu.

b. Les inconvénients :

- Module d'élasticité réduite.
- Haute densité.
- Sensibilité à l'abrasion.
- Sensibilité aux températures élevées.
- Faible résistance à la fatigue.

I.6.4. Cœur (âme):

Le cœur est l'élément central d'une structure sandwich, est généralement un matériau ayant de faibles caractéristiques mécaniques. Il a pour rôle de résister aux contraintes de cisaillement engendrées suite aux mouvements de glissement des peaux sous charge, et de maintenir leur écartement. En effet, si l'épaisseur des panneaux n'est pas maintenue constante, il en résulte une diminution des capacités des peaux externes à résister à la flexion.

L'âme est souvent épaisse et de faible masse volumique. D'après les exigences de performance, de nombreux matériaux sont utilisés comme des âmes (Figure I.3) [6].

Parmi les différents types d'âmes qui existent sur le marché on trouve:

I.6.5. Cœur Pleine:

- le balsa ou bois cellulaire.
- diverses mousses cellulaires.

Des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques.

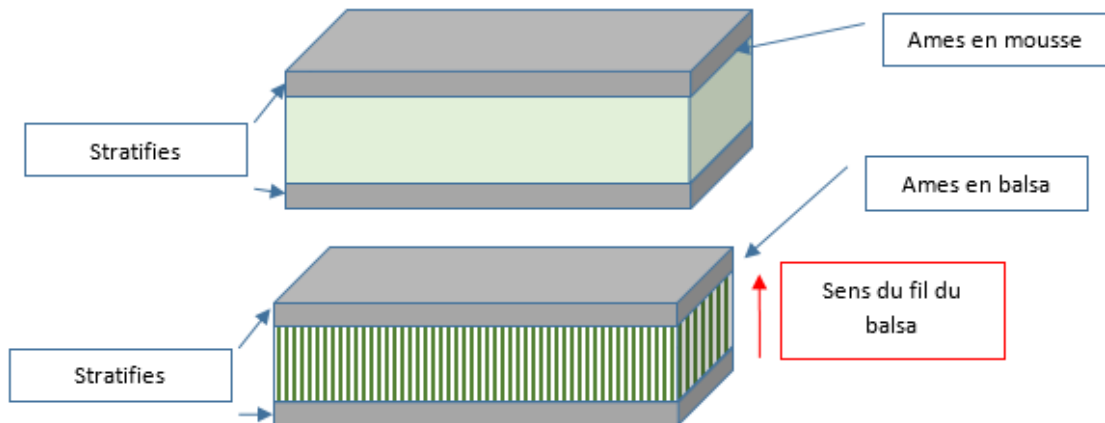


Figure I.7 : *Éléments constitutifs d'un panneau sandwich à âme pleine[4].*

I.6.6. Cœur creuses:

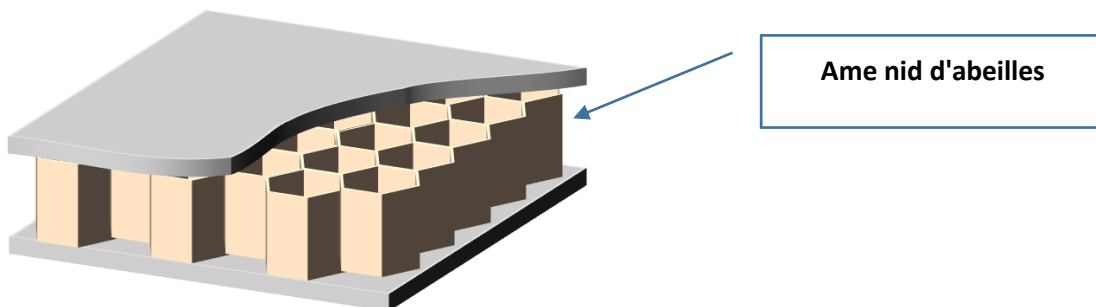


Figure I.8: *Éléments constitutifs d'un panneau sandwich à cœur creuse[4].*

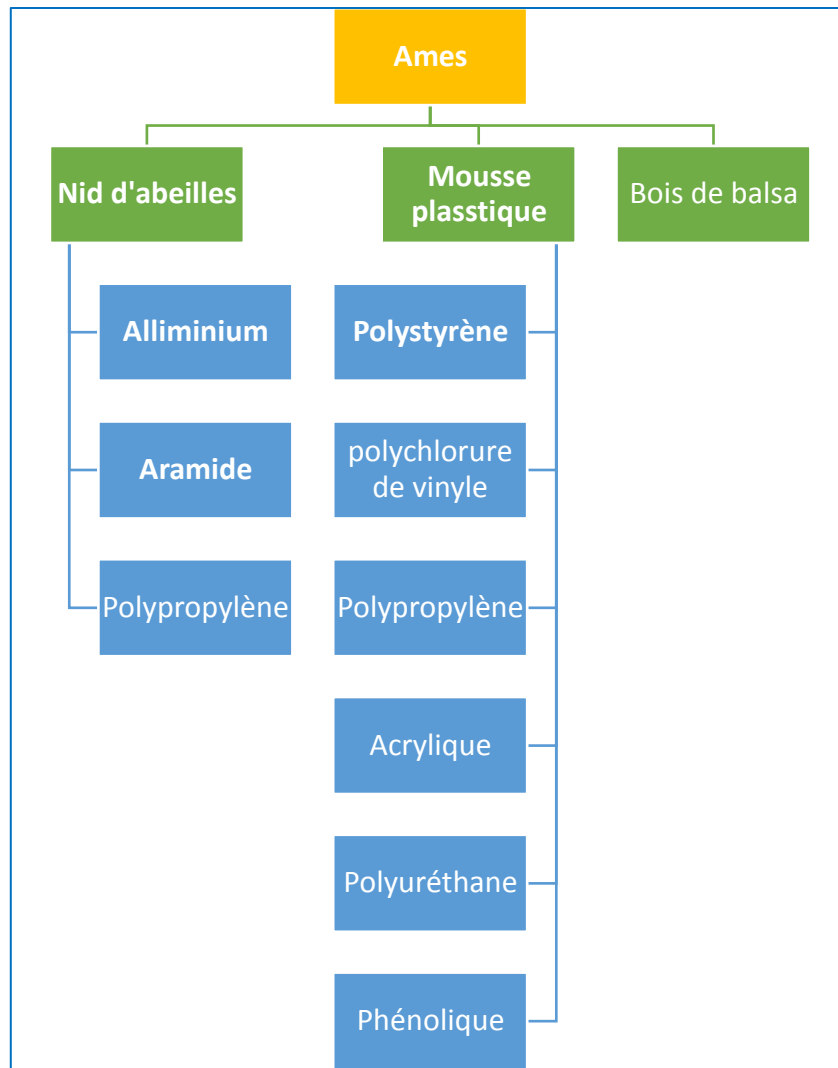


Figure I.9 : Matériaux pour les âmes[12].

I.6.7. Les Adhésifs (interface):

En plus de ces deux constituants de base, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine. Ces produits chimiques entrent aussi dans la composition du composite, qui peuvent jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. Le choix d'un adhésif est principalement guidé par la recherche de performance de la structure par le biais d'une bonne adhésion entre l'âme et les peaux[6].

I.6.8. Domaine d'application des structures sandwiches:

Les structures sandwiches sont utilisées dans une variété de domaines pour fournir une combinaison optimale de légèreté, de rigidité et de résistance.

I.6.8.1. Aéronautique :

L'une des premières applications significatives de la technologie de construction en sandwich remonte à la Seconde Guerre mondiale, avec la conception de l'avion militaire britannique, le Mosquito (voir figure I.10). Contrairement aux structures métalliques traditionnelles, l'utilisation de panneaux sandwichs, avec des peaux de placage en bois et une âme en balsa, confère à l'avion une légèreté exceptionnelle, ce qui se traduit par une vitesse accrue. Cette configuration présente également l'avantage d'offrir une furtivité améliorée face aux radars.

Dans les années 1940, l'évolution des matériaux pour les âmes a incité les principaux fabricants d'aéronefs militaires à adopter davantage les composites sandwichs. En effet, dès 1943, la base aérienne américaine de Wright-Patterson (WPAFB) a commencé à utiliser des structures sandwich, combinant des peaux stratifiées en résine polyester renforcée de fibres de verre avec une âme légère en balsa ou en nid d'abeille en fibres de verre, pour la construction du fuselage de leur VULTEE. BT-15[6].

Ces dernières années, la plupart des avions civils ont également adopté cette construction pour de nombreux composants. Par exemple, les planchers de l'avion Boeing 747 sont fabriqués à partir d'un panneau sandwich de balsa et de feuille d'aluminium[6].



Figure I. 10: L'utilisation panneaux composite dans la construction aéronautique[6].

1.6.8.2. Domaine de Ferroviaire:

Dans le secteur ferroviaire, la technique de construction en sandwich a été sélectionnée pour la fabrication des cabines de trains à grande vitesse (TGV) (Figure I.11.). Les propriétés exceptionnelles de ces structures en font le matériau idéal pour pallier aux problèmes de la propagation des ondes de pression lors de croisement de deux trains dans un tunnel.

De plus, la bonne résistance au feu et la grande résistance à des températures très élevées de certaines mousses thermoplastiques, ont permis par exemple la conception du train allemand «Transrapid». Grâce à une structure en matériaux sandwichs, ce dernier peut atteindre des vitesses supérieures à 550 Km/h[6].



Figure I.11 : Train à grande vitesse[6].

1.6.8.3. Domaine de la construction navale:

Dans le domaine de la construction navale, les caractéristiques de légèreté et surtout d'absence de corrosion des structures sandwich, lorsque les divers constituants ne sont pas métalliques, commencent à susciter de l'intérêt. ont mené une étude expérimentale et analytique sur l'utilisation des panneaux sandwichs possédant une âme en acier ondulé dans la construction des superstructures de navires. Ils ont démontré que le remplacement d'une construction en acier conventionnelle par une construction en sandwich peut apporter des gains de masse jusqu'à 40 à 50%. L'utilisation de construction sandwich à âme en nid d'abeille pour la fabrication des voiliers a pour conséquence de diminuer la masse de la structure de 70% comparativement à la construction traditionnelle en composite à base de fibres de graphite (carbone). De nos jours, pratiquement tous les bateaux de plaisance américains de moins de 43 mètres sont construits en sandwichs composites en fibres de verre[6].



Figure I.12 : Bateau transport de voyageur[6].

I.6.8.4. Automobile:

Dans l'industrie automobile, les structures sandwiches sont utilisées pour les panneaux de carrosserie, les portes, les capots et d'autres composants où la réduction de poids est essentielle pour améliorer l'efficacité énergétique et les performances[6].

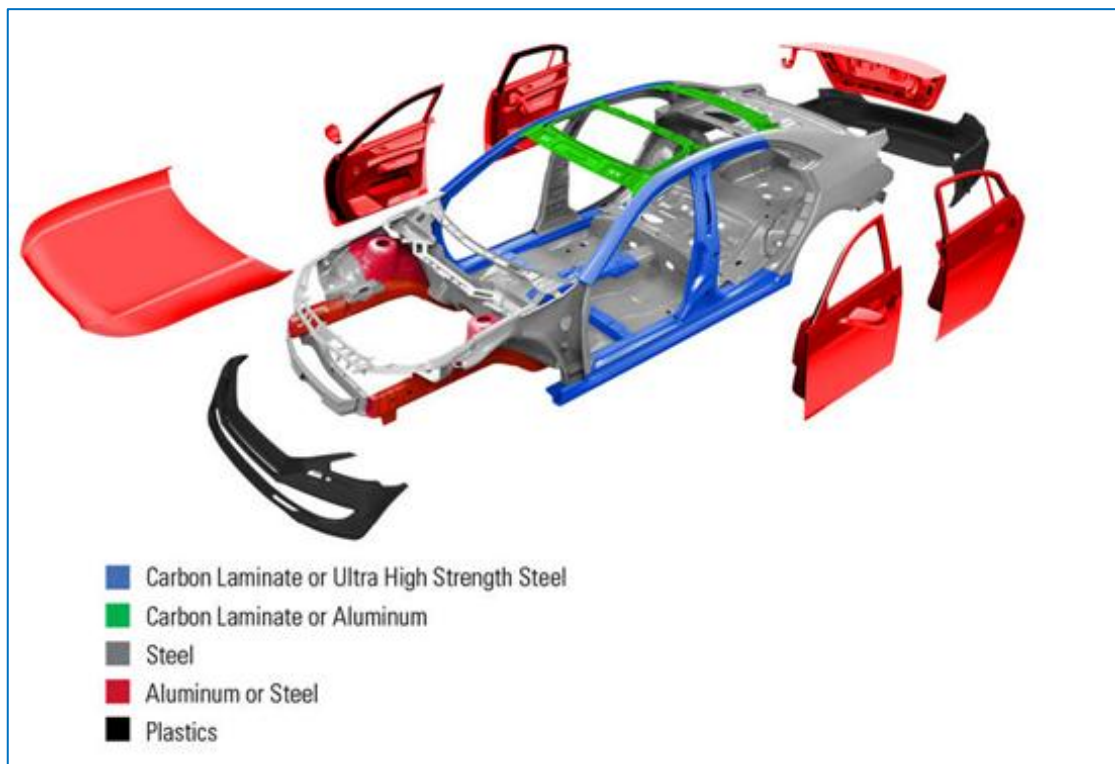


Figure I. 13: l'utilisation dans l'industrie automobile [6].

I.6.8.5. Construction :

Les panneaux sandwichs sont utilisés dans la construction pour les murs, les planchers et les toits. Ils offrent une isolation thermique et acoustique supérieure tout en étant légers et robustes[7].

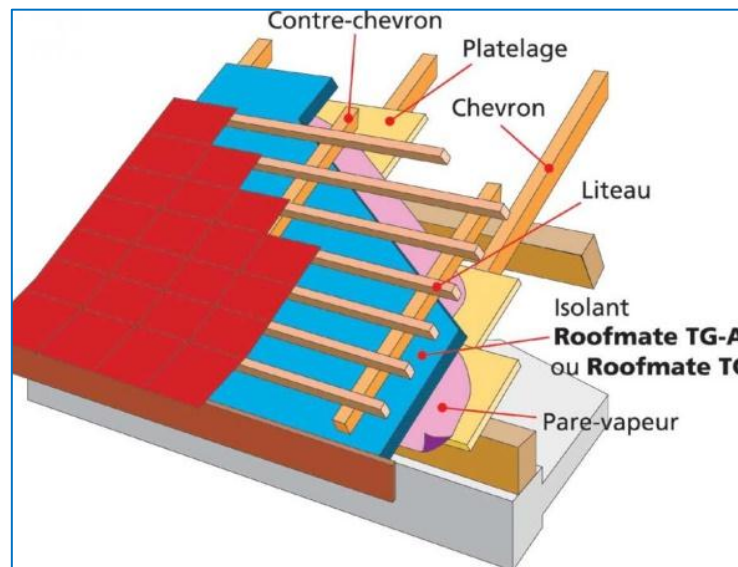


Figure I. 14. La construction des panneaux sandwichs dans bâtiments[7].

I.7. Introduction à l'impression 3D:

L'impression 3D est une industrie en croissance rapide qui a fait des vagues dans divers domaines, notamment la santé, l'éducation et la fabrication. C'est le processus de création d'un objet 3D en plaçant des matériaux les uns sur les autres à l'aide d'une imprimante 3D. Grâce à cette technologie, il est désormais possible de créer des conceptions et des prototypes complexes qui auraient été impossibles à réaliser avec les méthodes de fabrication traditionnelles. Dans cette section, nous approfondirons le monde de l'impression 3D et explorerons son fonctionnement, ses avantages et ses inconvénients, ainsi que les différents types de technologies d'impression 3D disponibles[16].

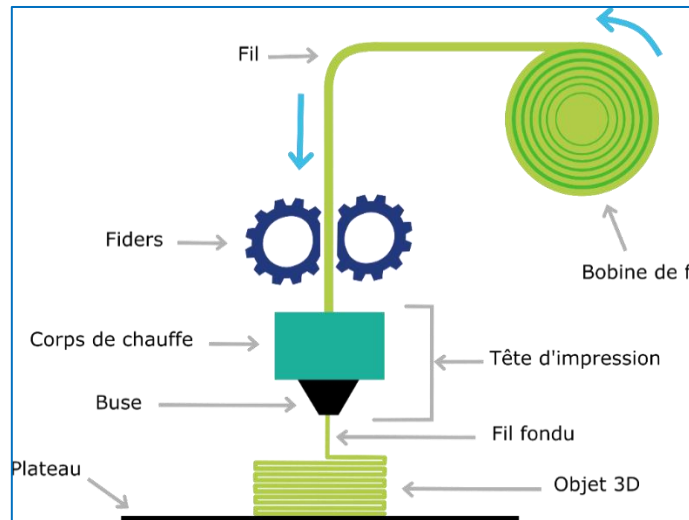


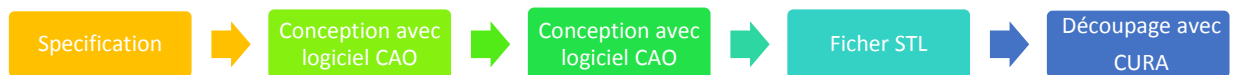
Figure I.15: schéma d'imprimante 3D [16].

I.7.1. Comment fonctionne l'impression 3D:

Le processus d'impression 3D comporte plusieurs étapes, notamment la conception, la découpe et l'impression. Tout d'abord, un modèle numérique de l'objet est créé à l'aide d'un logiciel de CAO (conception assistée par ordinateur) ou obtenu à partir d'un scanner 3D.

Ensuite Le modèle est divisé en plusieurs couches et l'imprimante lit les instructions pour créer l'objet couche par couche. L'imprimante utilise divers matériaux, notamment du plastique, du métal et même de la nourriture, pour construire le corps. Selon la complexité du design et la taille de l'objet, le processus d'impression peut prendre de quelques minutes à plusieurs heures [17]

Etape 1: Conception:



Etape 2: Impression:



Etape 3: Evaluation:



Figure I.16: Les étapes d'impression 3D [16].

1.7.2. Avantages et inconvénients de l'impression 3D:

- 1. la possibilité de créer des géométries et des conceptions complexes impossibles à réaliser avec les méthodes de fabrication traditionnelles.*
- 2. Un moyen rentable de produire de petits lots de produits et de prototypes, ce qui en fait une solution idéale pour les startups et les entrepreneurs.*
- 3. L'impression 3D a ses limites, notamment la taille des objets pouvant être imprimés, la qualité des matériaux utilisés et le temps nécessaire pour imprimer un objet.*
- 4. l'impression 3D n'est pas adaptée à la production de masse et le coût unitaire peut être plus élevé que les méthodes de fabrication traditionnelles[19].*

1.7.3. Types de technologies d'impression 3D:

Il existe plusieurs types de technologies d'impression 3D, chacune ayant ses propres avantages et inconvénients. Les types les plus courants sont la modélisation par dépôt fondu (FDM), la stéréolithographie (SLA) et le frittage sélectif par laser (SLS).

FDM est le type de technologie d'impression 3D le plus largement utilisé et le plus abordable, dans lequel une imprimante extrude des filaments de matière plastique pour construire un objet. SLA utilise une résine liquide durcie par un laser UV pour créer l'objet, tandis que SLS utilise un laser pour fritter des matériaux en poudre afin de créer l'objet. Chaque technique a ses forces et ses faiblesses, et le choix dépend de l'application et du résultat souhaité[19].

1.7.4. Applications d'impression 3D:

Les applications de l'impression 3D sont vastes et diverses, allant des soins de santé à l'éducation et à la fabrication. Dans le secteur de la santé, l'impression 3D est utilisée pour créer des prothèses, des implants et des instruments chirurgicaux personnalisés. Dans l'éducation, il est utilisé pour enseigner aux étudiants les concepts de conception et d'ingénierie, et dans la fabrication, il est utilisé pour créer des prototypes et de petits lots de produits. L'impression 3D fait également des vagues dans l'industrie de la mode, les designers l'utilisant pour créer des vêtements et accessoires uniques et personnalisés[16].

L'impression 3D est une technologie qui change la façon dont nous produisons et fabriquons des choses. Grâce à sa capacité à créer des conceptions et des prototypes complexes, il a le potentiel de révolutionner diverses industries et d'offrir de nouvelles opportunités d'innovation et de créativité. Même si la technologie présente encore des limites, il est passionnant de voir comment elle continuera d'évoluer et d'avoir un impact sur nos vies à l'avenir[17].

1.7.5. L'impression 3D de panneaux sandwich :

Un aspect crucial des panneaux sandwich produits grâce à l'impression 3D réside dans le choix des matériaux. Les fabricants ont accès à une vaste gamme de matériaux offrant des caractéristiques

diverses telles que la résistance, la flexibilité, la résistance à la chaleur et la conductivité. Cette variété permet de créer des solutions sur mesure pour des applications spécifiques, qu'il s'agisse de composants aéronautiques, de pièces automobiles ou d'éléments architecturaux[18].

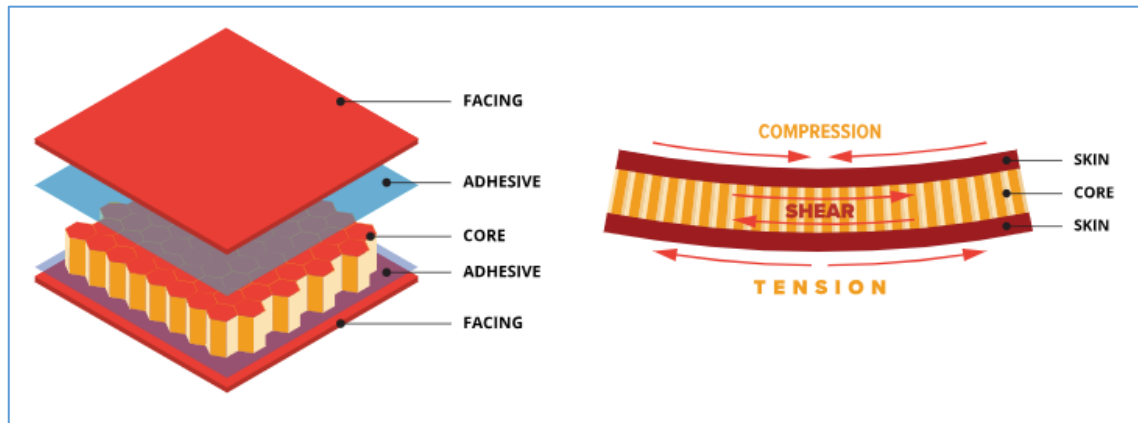


Figure 1.17: panneaux sandwich flexibles [18]

L'impression 3D permet également la création de structures internes complexes au sein des panneaux sandwich, optimisant ainsi leurs propriétés mécaniques. Grâce à des algorithmes d'optimisation topologique, les concepteurs peuvent générer des structures légères mais solides, réduisant ainsi l'utilisation de matériaux tout en conservant l'intégrité structurelle. Cette approche conduit à des composants à la fois robustes et légers, particulièrement précieux dans des secteurs comme l'aérospatiale et l'automobile où la réduction de poids est essentielle[18].

Au-delà de l'optimisation structurelle, l'impression 3D simplifie l'intégration de fonctionnalités supplémentaires directement dans la conception des panneaux sandwich. Cela peut inclure l'intégration de capteurs pour surveiller l'état des structures, la mise en place de conduits pour des systèmes fluidiques ou électriques, voire l'incorporation de composants tels que des fibres de renforcement pour améliorer les propriétés mécaniques. Cette intégration rationalise le processus de fabrication et diminue le besoin d'étapes d'assemblage supplémentaires, ce qui se traduit par une production plus efficace et économique[18].

L'un des principaux avantages de l'impression 3D réside dans sa capacité à produire des géométries complexes et hautement personnalisées. Cette capacité est particulièrement avantageuse pour le prototypage et la production en petites séries, où les méthodes traditionnelles peuvent être coûteuses ou chronophages. Les concepteurs peuvent ainsi explorer rapidement différentes itérations de conception, en ajustant avec précision la géométrie et la composition des matériaux pour répondre à des exigences de performance spécifiques. L'utilisation de l'impression 3D ouvre de nouvelles perspectives pour des pratiques de fabrication plus respectueuses de l'environnement.

En rationalisant l'utilisation des matériaux et en réduisant les déchets, cette technologie contribue à atténuer l'impact écologique des processus de production. De plus, la possibilité de produire des composants sur demande et localement offre un potentiel supplémentaire pour réduire l'empreinte carbone associée au transport et à la logistique[18].

Toutefois, l'impression 3D de panneaux sandwich reste confrontée à des défis majeurs, notamment la nécessité d'assurer des propriétés matérielles constantes, de garantir l'adhésion entre les différentes couches et d'augmenter la capacité de production pour des applications à grande échelle. Des travaux de recherche sont en cours pour surmonter ces obstacles, mettant en avant les avancées dans les domaines de la science des matériaux, de l'optimisation des processus et des techniques de contrôle qualité[18].

Dans le domaine de la fabrication, l'impression 3D de panneaux sandwich représente une approche véritablement transformative. Elle offre une liberté de conception accrue, permet une optimisation structurelle et facilite l'intégration de fonctionnalités de manière inédite. Avec la progression continue de la technologie et le dépassement des défis techniques, son adoption est en passe de s'étendre à divers secteurs industriels, favorisant ainsi l'innovation et l'efficacité dans la production de structures légères et performantes[18].

1.8. Les caractéristiques géométriques de panneaux sandwich fabriqués en PLA (Acide Polylactique) via l'impression 3D:

1.8.1. Structure multicouche:

Comme pour tous les panneaux sandwich, ceux fabriqués en PLA comportent une structure multicouche avec une couche de base, une couche d'âme et une ou plusieurs couches extérieures. Le PLA est généralement utilisé pour les couches extérieures et, parfois, comme matériau d'âme, bien que d'autres matériaux puissent également être utilisés en fonction des exigences[19].

1.8.2. Forme et taille:

Les panneaux sandwich en PLA peuvent être imprimés dans une variété de formes et de tailles en fonction des exigences de conception spécifiques. L'impression 3D permet une grande liberté de conception, ce qui signifie que les panneaux peuvent être fabriqués dans des formes complexes ou sur mesure pour s'adapter à diverses applications[19].

I.8.3. Épaisseur:

L'épaisseur des panneaux sandwich en PLA peut être ajustée en fonction des exigences de résistance, de poids et d'isolation. Les panneaux peuvent être imprimés avec différentes épaisseurs de paroi et d'âme pour répondre à ces besoins spécifiques.

I.8.4. Géométrie des canaux et des structures internes:

L'impression 3D permet l'intégration de structures internes complexes, telles que des nervures de renfort, des canaux pour le passage de câbles ou de fluides, des perforations pour l'aération, etc. Ces caractéristiques géométriques peuvent être conçues pour optimiser la performance du panneau en fonction de son utilisation prévue[19].

I.8.5. Détails de surface:

Les détails de surface des panneaux sandwich en PLA peuvent être ajustés pour obtenir des finitions lisses ou texturées, en fonction des exigences esthétiques et fonctionnelles. L'impression 3D permet également l'ajout de motifs, de logos ou d'autres éléments décoratifs directement sur la surface des panneaux[19].

I.8.6. Bords et finitions:

Les bords des panneaux en PLA peuvent être finis de différentes manières pour assurer une bonne intégrité structurelle et une apparence esthétique. Cela peut inclure des bords lisses, biseautés ou renforcés, selon les besoins de l'application.

Les panneaux sandwich fabriqués en PLA via l'impression 3D offrent une flexibilité de conception élevée, permettant une personnalisation précise des caractéristiques géométriques pour répondre aux exigences spécifiques de chaque application[19].

Les panneaux sandwich sont des structures composées de plusieurs couches, généralement deux couches externes rigides et une couche centrale légère, souvent en forme de nid d'abeille ou de mousse, qui offre une combinaison de légèreté et de résistance. Le PLA (Acide Polylactique) est un matériau plastique biodégradable et recyclable, souvent utilisé dans l'impression 3D[19].

1.9. Literature review:

Plusieurs chercheurs ont entamé des travaux sur l'impression 3D, parmi eux:

Sebastian et al [20] ont utilisé la fabrication additive, à travers le processus d'extrusion thermoplastique de filament, pour fabriquer des structures sandwich composites complexes en un temps court et à faible coût. Ils conçoivent et fabriquent par Fabrication par Fusion de Filament (FFF) des structures sandwich composites avec des fibres courtes, comprenant trois types de noyau : C, Z et H. Ensuite, ils effectuent des tests de performance mécanique des structures en compression et en flexion en trois points.

Les tests de compression en flexion et en trois points ont clairement montré la performance supérieure des structures sandwich à noyau H en raison de leurs structures de noyau dense. Les principaux modes de défaillance des structures sandwich composites ont été analysés microscopiquement, mettant en évidence le flambage du noyau en cisaillement dans les tests de compression et l'indentation de la face dans les tests de flexion en trois points.

Le rapport résistance-masse a permis d'identifier les structures offrant les meilleures performances tout en réduisant la masse : les structures sandwich à noyau H ont montré les meilleurs résultats dans les tests de compression et les structures sandwich à noyau C dans les tests de flexion en trois points (Figure I-20).

La faisabilité du processus FFF et du test de flexion en trois points des sections d'aile composites, qui seront utilisées sur un avion sans pilote, a également été démontrée. L'analyse par éléments finis a montré la répartition des contraintes équivalentes et des forces de réaction pour les sections d'aile composites testées en flexion, validant ainsi les résultats expérimentaux.

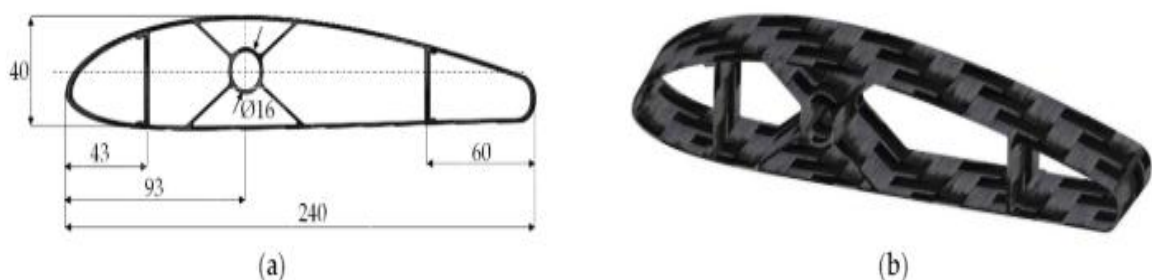


Figure I-18: Sections d'aile : (a) vue avant de la section d'aile (mm); (b) structure composite interne du segment d'aile soumis à une flexion en trois points [20]

Kui et al [21], ont étudié les composites polymères renforcés de fibres continues sont très utilisés dans les pièces supportant des charges et absorbant de l'énergie grâce à leur résistance spécifique et leur module élevés. La planification des trajets des fibres continues est étroitement liée à leurs défauts structurels et à leurs propriétés mécaniques. Dans cette étude, nous avons utilisé la modélisation par dépôt fondu (FDM) pour concevoir et fabriquer des structures en nid d'abeilles en polymère renforcé de fibres continues (CFRPHS) en utilisant différentes trajectoires d'impression. Nous avons analysé le déplacement des fibres aux intersections des trajets pour étudier les imperfections structurelles des nœuds causées par les trajets d'impression. Les nœuds présentant une rigidité réduite, remplis principalement de polymère pur en raison du déplacement des fibres, entraînaient une répartition inégale de la rigidité. En soumettant les CFRPHS avec différents trajets d'impression ainsi que leurs structures en nid d'abeilles en polymère pur correspondantes à des tests de flexion en trois points, nous avons examiné leurs performances de flexion et leurs modes de déformation. Les résultats ont montré que l'effet d'amélioration des performances de flexion des structures en nid d'abeilles par les fibres continues dépendait fortement des trajets d'impression choisis. Notamment, les CFRPHS avec un trajet trapézoïdal décalé ont présenté la capacité de charge spécifique la plus élevée ($68,33 \pm 2,25$ N/g) et la rigidité à la flexion la plus importante ($627,70 \pm 38,78$ N/mm). De plus, la répartition des fibres et les défauts structurels causés par les trajets d'impression ont déterminé la répartition de la rigidité dans la région de chargement, influençant ainsi la répartition des contraintes et les modes de défaillance des CFRPHS.

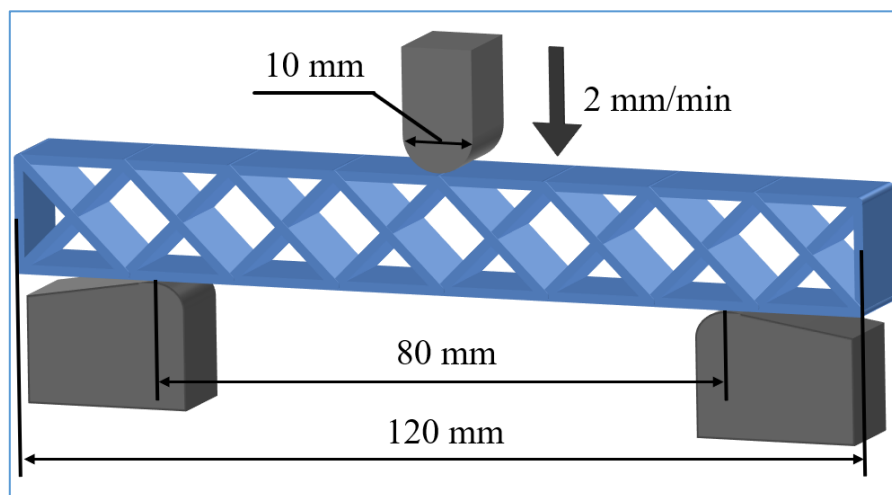


Figure I.19: Schéma de principe de l'essai de flexion trois points (la flèche indique le sens du chargement) [21].

Tiantian Li et Lifeng Wang ont collaboré pour créer une nouvelle génération de sandwichs composites, en combinant l'impression 3D, l'analyse numérique et des expériences. Ces structures novatrices sont entièrement fabriquées à partir de matériaux imprimés en 3D, offrant une variété de comportements élastiques. Elles se distinguent par leurs différentes configurations, telles que les treillis, les structures traditionnelles et les structures en nid d'abeille. Au lieu de se limiter aux tests classiques de flexion à trois points, cette étude approfondie explore spécifiquement le comportement de flexion de ces sandwichs composites, en utilisant deux types distincts de feuilles frontales en polymère renforcé de fibre de carbone.

Lorsqu'ils sont soumis à une déformation en flexion, les sandwichs composites avec une âme en treillis présentent la plus grande rigidité et une résistance à la flexion souhaitable pour les composants structuraux. En revanche, ceux avec une âme en nid d'abeille montrent une instabilité séquentielle instantanée qui améliore significativement leur capacité d'absorption d'énergie. Les résultats expérimentaux et numériques suggèrent que les architectures de base peuvent être utilisées pour ajuster les propriétés de flexion ainsi que les mécanismes de défaillance. Ces découvertes ouvrent de nouvelles perspectives dans l'étude des réponses mécaniques non linéaires des structures sandwich, offrant des avantages pour un large éventail d'industries et d'applications.

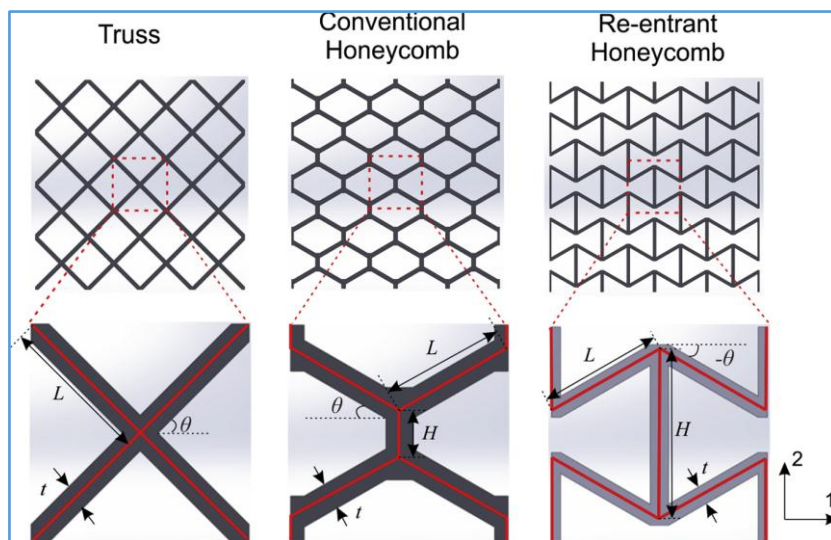


Figure 1.20: Conception de la cellule unitaire de la ferme, de la structure en nid d'abeille conventionnelle et de la structure en nid d'abeille rentrante. Ici, L est la longueur des parois cellulaires inclinées des structures en treillis ; t est l'épaisseur des parois cellulaires ; et h est l'angle entre les parois cellulaires inclinées. Les formes des structures en nid d'abeilles régulières et rentrantes sont décrites comme la longueur des parois cellulaires verticales, H ; la longueur des parois cellulaires inclinées, L ; l'épaisseur des parois cellulaires, t , et l'angle entre les parois cellulaires verticales et inclinées, h . [22].

Amin Montazeri, Ehsan Bahmanpoura , Ils ont examiné les performances des structures en nid d'abeille hexagonales, tant conventionnelles qu'auxiliaires, dans divers secteurs tels que l'automobile, la construction et l'ingénierie de la protection. Les structures auxiliaires se distinguent par leur capacité remarquable à absorber l'énergie et à fléchir, grâce à leur aptitude à se déformer sous charge. Ce projet explore les performances des nids d'abeille hexagonaux et leur capacité de réentrée, fabriqués à partir de PLA et de TPU par impression additive, soumis à des tests expérimentaux de flexion en trois points (TPB) ainsi qu'à une analyse par éléments finis (FEA).

Les structures cellulaires conventionnelles et auxétiques imprimées en 3D sont remplies de mousse de polyuréthane (PU), puis leurs capacités d'absorption d'énergie et de flexion sont comparées à celles de structures creuses. Les résultats révèlent une nette amélioration de la capacité d'absorption d'énergie et du module de flexion pour les structures à base de TPU, tandis que les performances des structures à base de PLA se dégradent lorsqu'elles sont remplies de mousse PU. De plus, il est observé que les nids d'abeilles rentrants bénéficient d'un renforcement plus efficace avec de la mousse par rapport aux nids d'abeilles hexagonaux, principalement en raison de la plus grande amplitude de la cellule unitaire du rentrant par rapport à celle du hexagone. [23]

Enfin, des études paramétriques sont menées via FEA pour analyser l'impact des paramètres géométriques des structures et de la configuration des charges de flexion sur leurs performances. Ces analyses mettent en lumière que les structures dotées d'entretoises plus épaisses et d'un angle de cellule plus élevé tendent à offrir une plus grande rigidité lorsqu'elles sont soumises à une flexion en trois points. Les résultats de cette étude soulignent les performances prometteuses des structures auxétiques à base de TPU, renforcées par de la mousse[23].

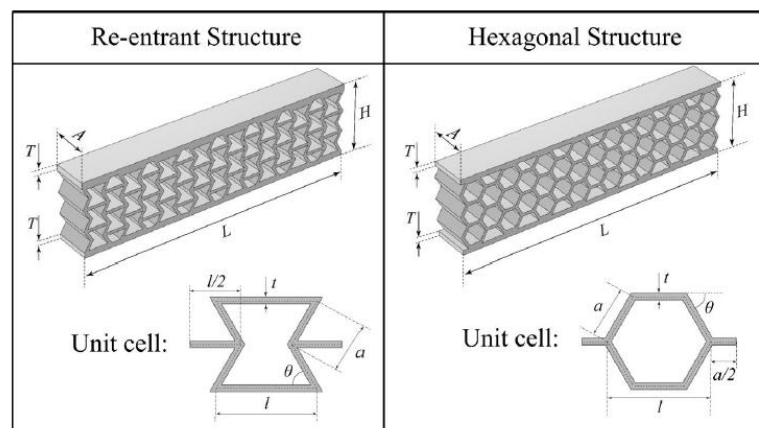


Figure I.21: Vue schématique de la structure et de leurs cellules unitaires[23].

H. Yazdani Sarvestani¹, A.H ils sont penchés sur l'intégration de noyaux architecturaux légers pour augmenter les performances des structures sandwich, en mettant l'accent sur des panneaux légers imprimés en 3D avec des noyaux cellulaires hexagonaux. Ils ont employé des méthodes semi-analytiques et par éléments finis, accompagnées de tests expérimentaux, pour évaluer ces configurations. En modifiant les paramètres géométriques des cellules, différentes topologies de noyaux ont été créées, notamment hexagonales, rectangulaires et aux étiques. Une méthodologie semi-analytique a été développée pour effectuer des analyses d'impact structural et à faible vitesse, tandis que l'homogénéisation mécanique standard a été utilisée via une modélisation par éléments finis pour prédire les propriétés mécaniques des noyaux cellulaires architecturés.

Une simulation par éléments finis en grandes déformations a été réalisée pour analyser le comportement élasto-plastique des panneaux sandwich sous impact à faible vitesse. Pour valider les modèles théoriques et informatiques et évaluer la fabricabilité des panneaux, des échantillons ont été imprimés en 3D à partir de biopolymères d'acide polylactique, et des tests d'impact à faible vitesse ont été effectués.

Les résultats ont montré que le panneau sandwich auxétique présentait une capacité d'absorption d'énergie élevée et transférait une force minimale depuis le panneau imprimé en 3D, ce qui en fait un candidat approprié pour les applications d'absorption d'énergie. La microtomographie à rayons X a été utilisée pour étudier les caractéristiques microstructurales des panneaux avant et après l'impact, fournissant ainsi une compréhension approfondie de leur comportement. Ces résultats suggèrent que les panneaux sandwich auxétiques pourraient offrir des avantages significatifs dans diverses applications nécessitant une absorption d'énergie efficace[28].

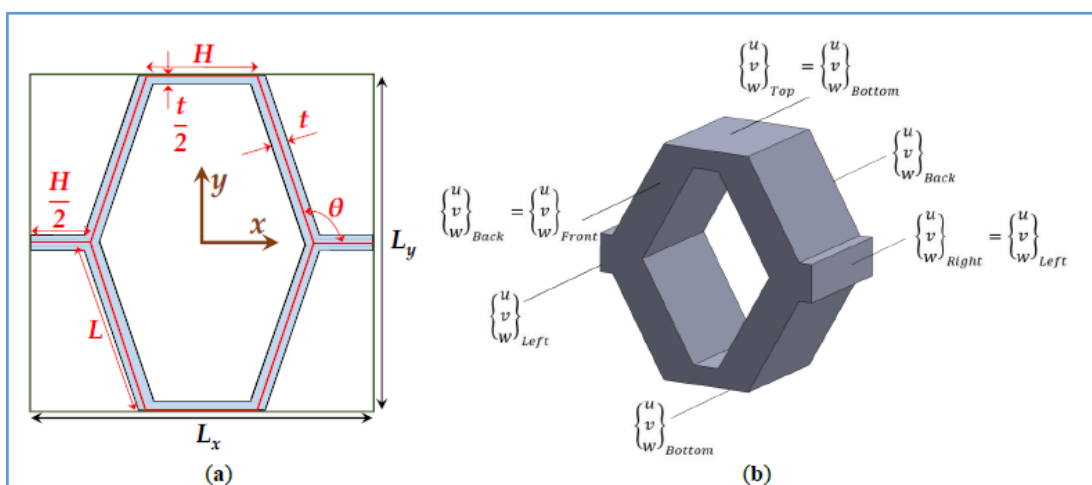


Figure I.22 : (a) Cellule unitaire de cellules architecturées à six côtés comme noyau de panneaux sandwich architecturés et (b) Appliqué conditions aux limites périodiques pour l'homogénéisation de la maille unitaire ou de l'élément de volume représentatif [28]

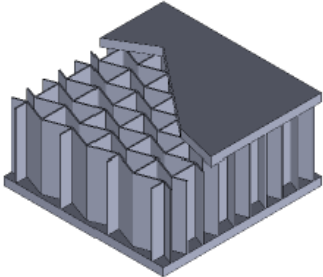
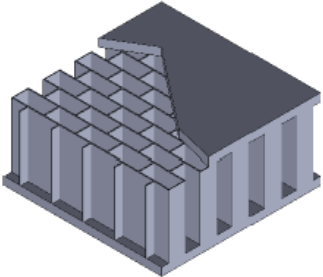
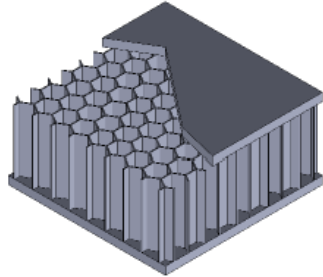
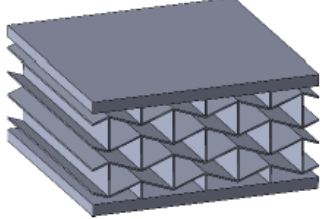
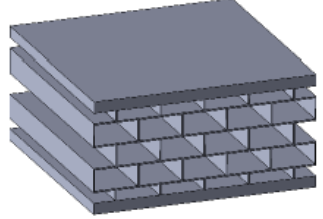
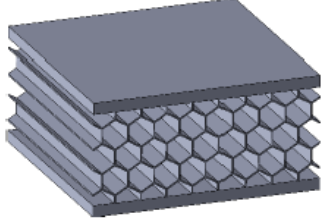
Cell type Cell direction	Auxetic core $\theta = 70^\circ$ ($N_h \times N_v$)	Rectangular core $\theta = 90^\circ$ ($N_h \times N_v$)	Hexagonal core $\theta = 120^\circ$ ($N_h \times N_v$)
In-plane	 (5×3)	 (5×5)	 (5×8)
Out-of-plane	 (3×2)	 (5×2)	 (8×2)

Tableau 1.5 : *Panneaux sandwich architecturés avec une architecture de noyau cellulaire alternative [28].*

Salah Amroune et Ahmed Belaadi et d'autres recherches sur les fibres naturelles [34-60], Amroune et Ahmed Belaadi ont produit des fibres biocomposites (lin/époxy) avec différentes proportions de fibres et ont analysé leurs propriétés de traction, de flexion triangulaire et leur morphologie. L'intégrité de l'interface entre les échantillons composites fracturés a été évaluée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) après des essais de traction et de flexion en trois points. Les résultats mécaniques ont révélé une amélioration significative des échantillons composites fabriqués selon la deuxième formule CT090 (biocomposites UD [0/90°] traités au NaHCO₃) par rapport aux différentes compositions étudiées. Par exemple, les valeurs de contrainte et de module d'Young de traction quasi-statique du bio-composite CT090 traité au bicarbonate de sodium ont été mesurées à 70,13 MPa et 1420,47 MPa, respectivement. Ces résultats démontrent que le traitement au bicarbonate de sodium a conduit à une amélioration significative des propriétés mécaniques des biocomposites étudiés. Les analyses morphologiques ont également confirmé cette amélioration [29].

Enfin, les résultats expérimentaux ont été soumis à une analyse de variance unidirectionnelle (ANOVA) à l'aide du logiciel MINITAB, permettant ainsi une évaluation statistique rigoureuse des différences observées entre les différents échantillons. Cette analyse a permis de confirmer de manière objective l'impact du traitement au bicarbonate de sodium sur les propriétés mécaniques des biocomposites étudiés, renforçant ainsi la validité des conclusions de l'étude [29].

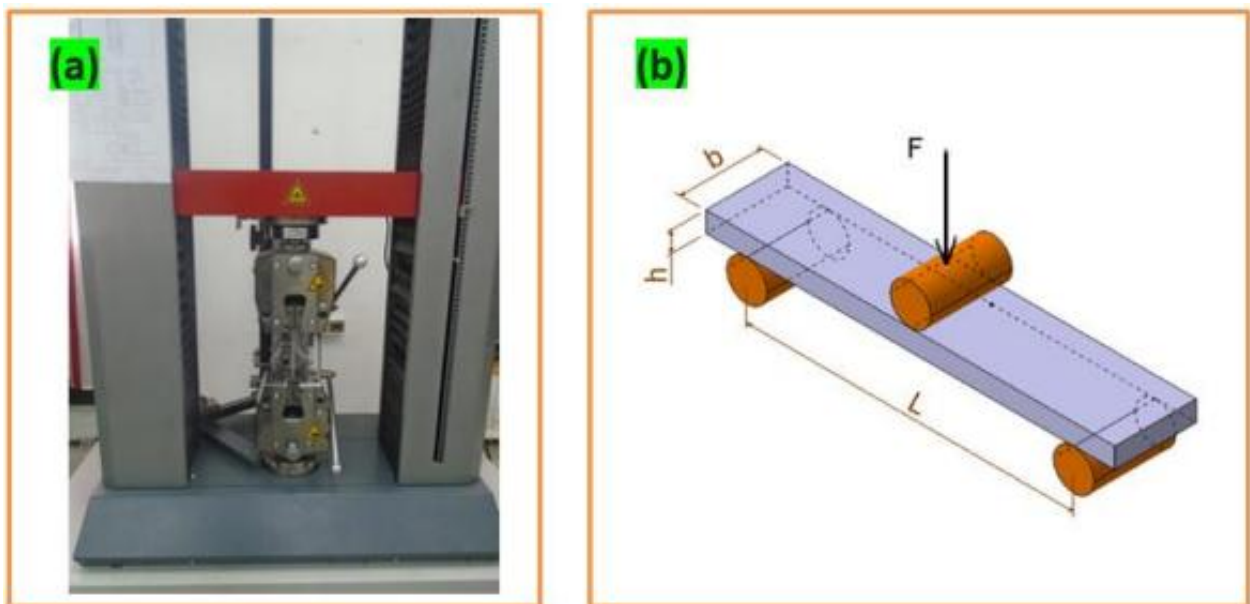


Figure I.23 : (a) la machine d'essai et (b) le principe de l'essai de flexion 3 points [29]

Après les travaux ci-dessus, nous avons développé des échantillons de panneaux sandwich avec des cellules de différentes formes géométriques, telles qu'un motif en nid d'abeille, re rentrant et tétra chiral, conformément au norme internationale ASTM C393-20.

Nous avons choisi le logiciel de conception technique SolidWorks en raison de sa précision et de sa facilité d'utilisation. De plus, nous avons utilisé le logiciel de découpage CURA. Ces aspects seront détaillés dans le chapitre suivant.

CHAPITRE II

METHODE ET MATERIELS

II. Méthode et Matériels:

Dans ce chapitre, nous concevons des éprouvettes avec différentes structures internes, utilisant des modèles de nid d'abeilles, re-rentrant et tétra chiral, créés avec SolidWorks. Conformément à la norme internationale ASTM C393-20, nous utilisons du filament PLA et la technique de modélisation par dépôt fondu (FDM) pour imprimer les échantillons avec l'imprimante Anycubic i3 Mage. Nous avons effectué trois essais mécaniques (flexion, traction, compression) avec la machine d'essais Test112 afin de déterminer les propriétés mécaniques de ces structures. Ensuite, nous commentons les résultats en prenant en compte les observations liées à leur défaillance.

II.1. Géométrie des éprouvettes sandwiches:

Tous les échantillons testés en flexion trois points ont une longueur de 160 mm, une largeur b de 20 mm, une hauteur H de 25 mm, avec l'épaisseur de la plaque de 2 mm et épaisseur de noyau TC de 21mm. L'épaisseur de paroi des trois topologies peut varier de 0,5 ou 0,8 mm.

Par conséquent, la densité relative est devenue 0,15 ou 0,25 ; il a été calculé en divisant le volume du noyau imprimé (établi par le logiciel SolidWorks) par le volume parallélépipédique du noyau calculé comme $160 - 20 - 21$ mm.

Les trois topologies sont conçues, comme indiqué sur la figure 1, avec un angle θ de 120- pour la topologie en nid d'abeille, 70- pour la topologie en nid d'abeilles rentrante, et 40- pour la topologie aux étiquettes chirales [62-92].

L'épaisseur de la paroi de la cellule est notée t , ayant une valeur de $t/2$ où les cellules adjacentes sont disposées côte à côte, comme pour le nid d'abeilles commercial. Les relations entre les paramètres de la cellule, telles que conçues à l'aide du logiciel SolidWorks, sont:

II.1.1. Cellule en nid d'abeille:

- la longueur du côté d'une cellule: $L = \frac{a}{54 \cdot \cos(\theta - 90)}$
- La hauteur de la paroi verticale d'une cellule: $h = \frac{tc}{4 - L \cdot \sin(\theta - 90)}$
- Le nombre de cellules sur une seule ligne: $N = \frac{a}{2 \cdot L \cdot \cos(\theta - 90)}$

II.1.2. Cellule re-entrante:

- la longueur du côté d'une cellule: $L = \frac{a}{30 \cdot \cos(\theta - 90)}$
- La hauteur de la paroi verticale d'une cellule: $h = \frac{tc}{4 - L \cdot \sin(\theta - 90)}$
- Le nombre de cellules sur une seule ligne: $N = \frac{a}{2 \cdot L \cdot \cos(\theta - 90)}$

II.1.3. Cellule tétra-chirale:

- La longueur imposée comme : $L=9.5 \text{ mm}$
- Le diamètre du cercle interne: $d = 2r - t$
- Le diamètre du cercle externe: $D = 2r + t$

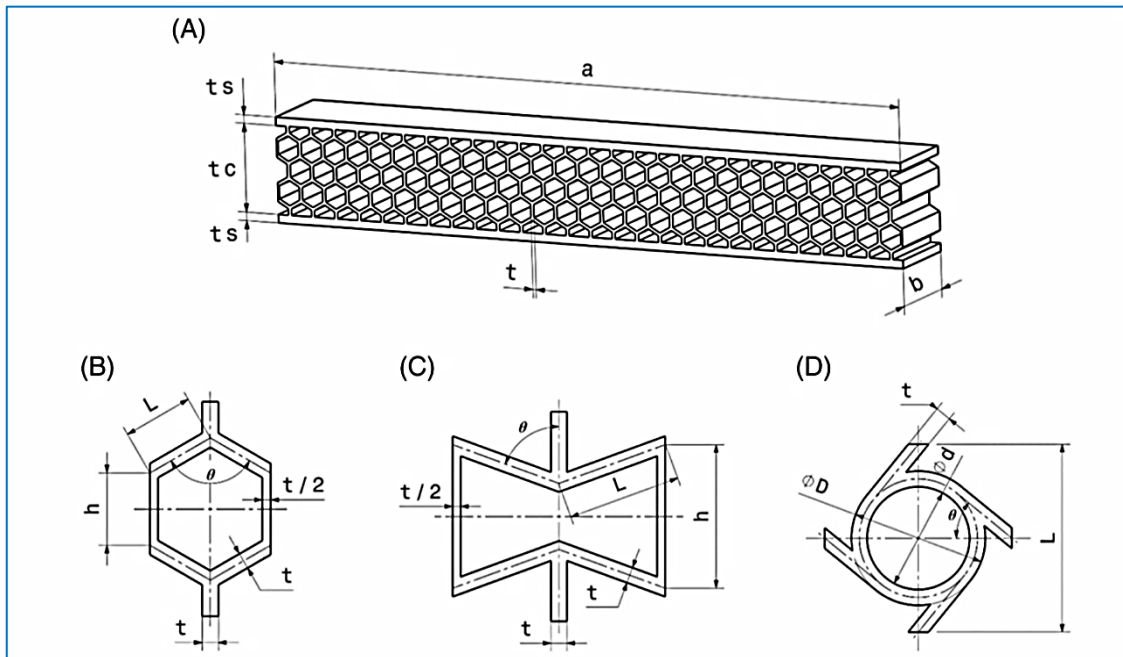


Figure II.1 Configuration de cellules unitaires conçue à l'aide de solidworks :

A: Structures sandwich pour test de flexion (**a**: Longueur de l'éprouvette; **b**: Largeur; **ts** : épaisseur de la feuille frontale **tc**: Épaisseur du noyau ; **t**: Épaisseur de paroi), **B**: Cellule en nid d'abeille, **C**: Cellule réentrant. **D**: Cellule tétra-chirale.

II.2. Conception des éprouvettes:

Pour notre projet, nous avons choisi SolidWorks pour concevoir les échantillons mentionnés. SolidWorks est réputé pour sa facilité d'utilisation et ses fonctionnalités avancées en matière de conception mécanique.

II.2.1. Le logiciel SolidWorks:

C'est un logiciel de conception, appartenant à la société Dassault Systèmes. Il utilise le principe de conception paramétrique et génère trois types de fichiers qui sont liés: la pièce, l'assemblage, et la mise en plan. Ainsi toute modification sur un de ces trois fichiers sera répercuté sur les deux autres.

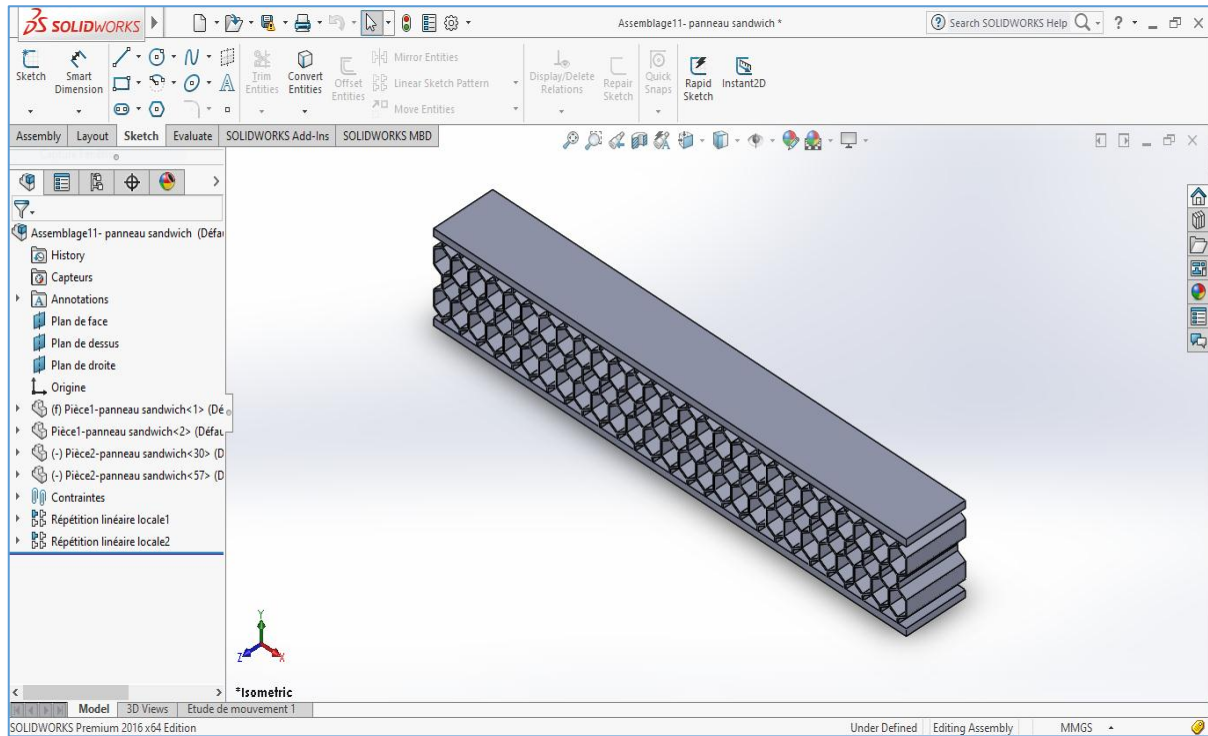


Figure II.2: Interface du logiciel SolidWorks

SolidWorks permet de réaliser de la modélisation 2D et 3D, ce logiciel de CAO est réputé pour sa simplicité d'utilisation et se veut intuitif.

II.2.2. Les principales tâches de SolidWorks:

- *Concevoir des objets en 3D de manière très précise.*
- *Développer des produits*
- *Vérifier la conception de votre fichier*
- *Détenir une bibliothèque de vos fichiers 3D*
- *Mettre en place des mises en plan 2D*
- *Créer des images et animations de vos objets 3D*
- *Estimer le coût de la fabrication de vos objets 3D*

II.2.3. Les formats de fichier de SolidWorks supportent:

II.2.3.1. Fichiers natifs SolidWorks:

*(*sldprt pour les pièces, .sldasm pour les assemblages, .slddrw pour les dessins) : Ce sont les formats de fichier propriétaires de SolidWorks. Ils contiennent des informations sur la géométrie, les propriétés matérielles, les annotations, etc., spécifiques aux modèles créés dans SolidWorks.*

II.2.3.2. Fichiers neutres de CAO :

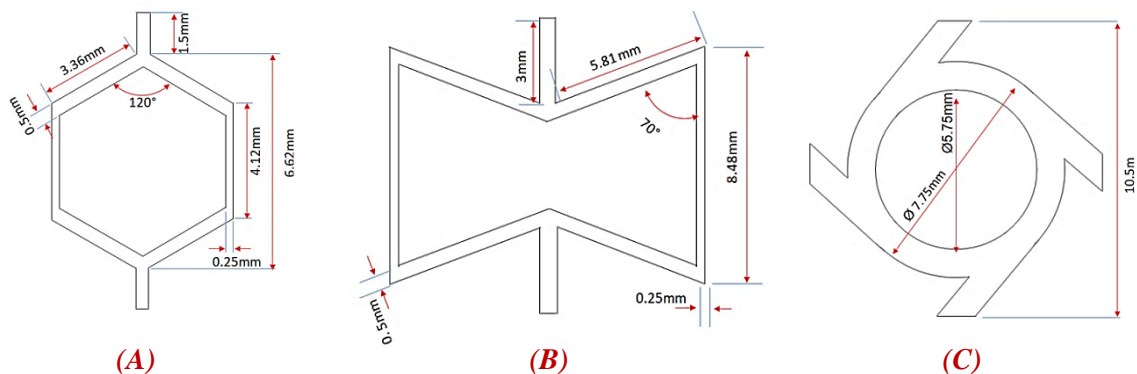
- STEP (*.step, *.stp)
- IGES (*.igs, *.iges)
- Parasolid (*.x_t, *.x_b)
- ACIS (*.sat)
- DXF (.dxf) et DWG (.dwg) pour les dessins 2D

II.2.3.3. Fichiers de formats de fichier standard :

- STL (*.stl) pour la fabrication additive
- OBJ (*.obj) pour la modélisation 3D
- VRML (*.wrl) pour la visualisation 3D

II.2.3.4. Autres formats :

SolidWorks offre également des options pour importer et exporter d'autres formats de fichiers spécifiques à certaines applications ou industries, tels que les fichiers CATIA, Pro/ENGINEER, Siemens NX, etc.

II.2.4. Les éprouvettes réalisées par SolidWoks:

A) Cellule nid d'abeille (C) B) Cellule en re-rentrant C) Cellule tétra chiral (CTC).

Figure II.3: Géométrie des cellules.

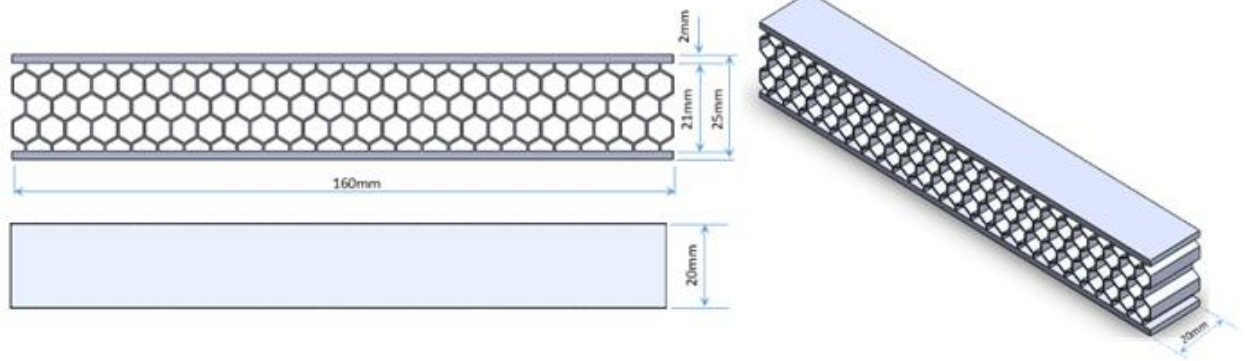


Figure II.4: Epreuve de flexion Cellule nid d'abeille (CNA)

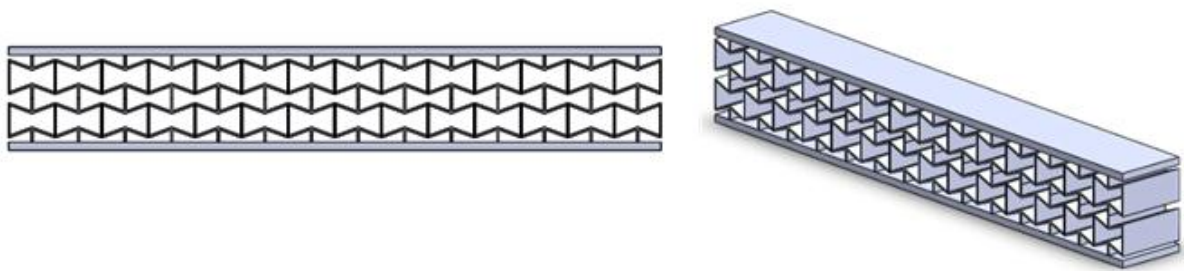


Figure II.5: Epreuve de flexion Cellule en re-rentrant (CR).

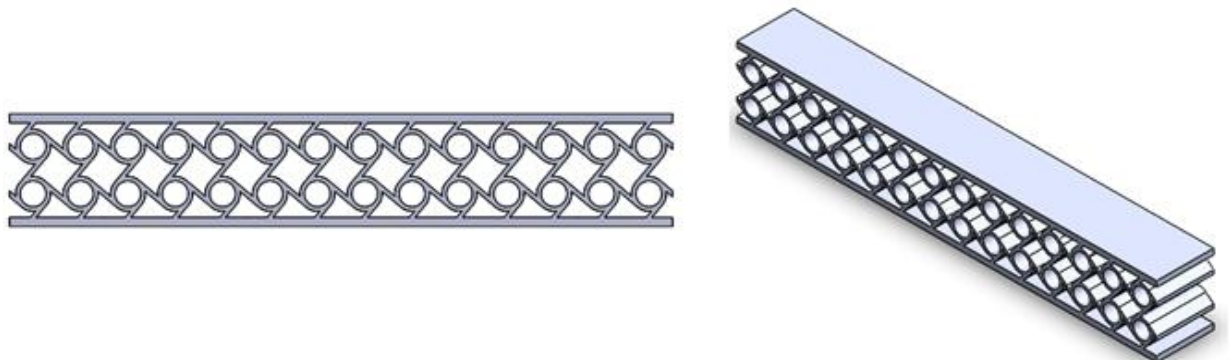


Figure II.6: Epreuve de flexion Cellule tétra chiral (CTC).

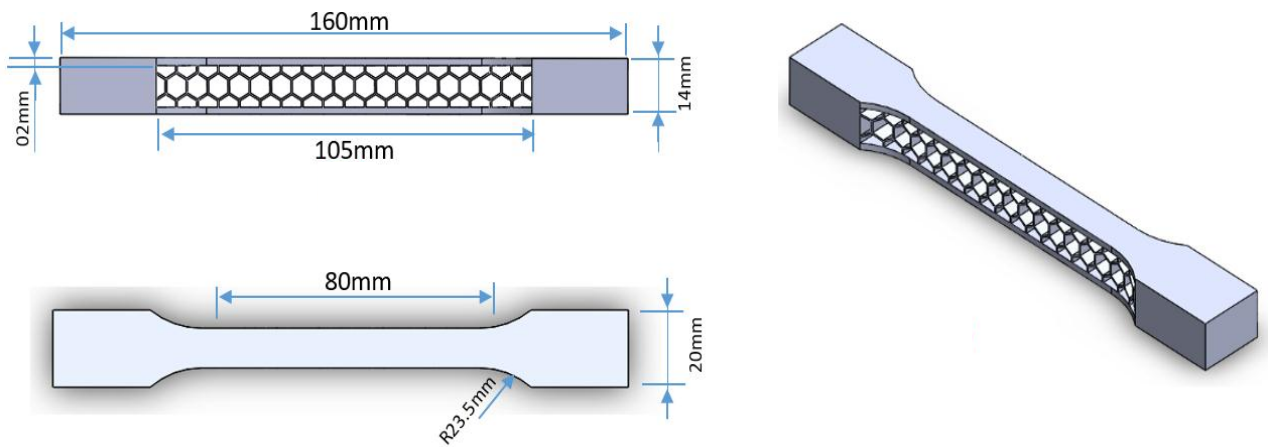


Figure II.7: Epreuve de traction Cellule nid d'abeille (CNA).

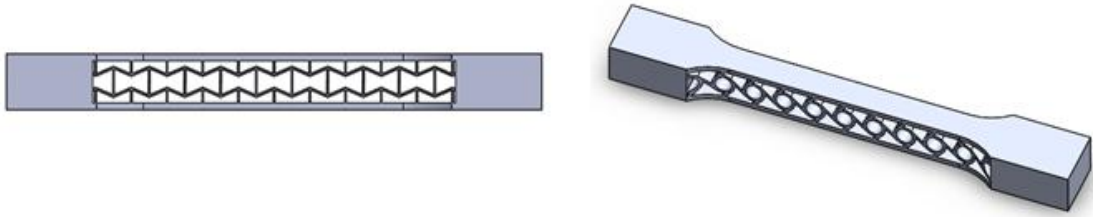


Figure II.8: Eprouvette de traction Cellule re-rentrant (CR)

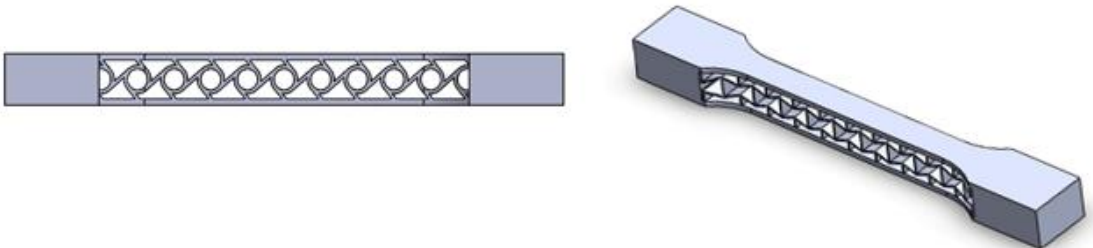


Figure II.9: Eprouvette de traction Cellule tétra chiral (CTC)

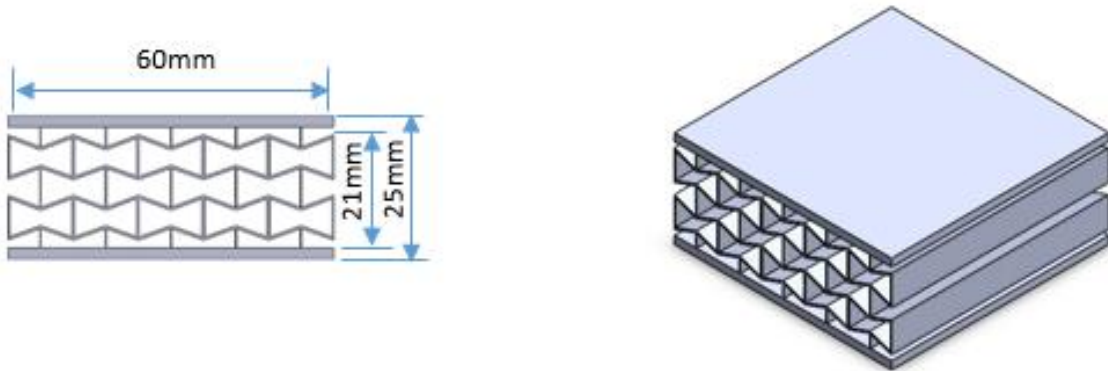


Figure II.10: Eprouvette de compression Cellule re rentrant (CR)

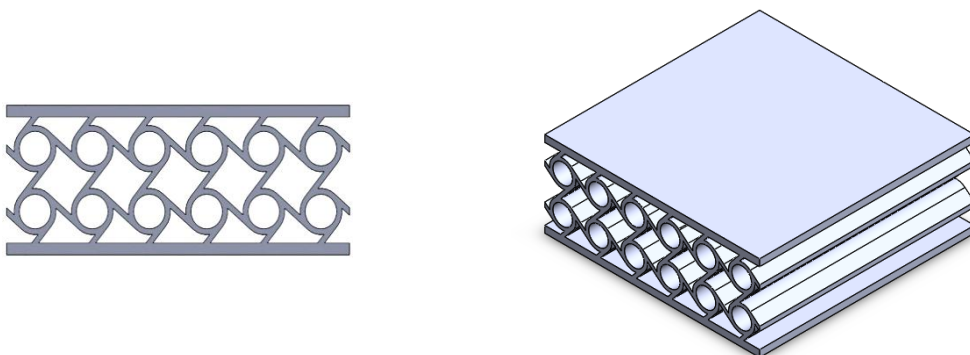


Figure II.11: Eprouvette de compression Cellule tétra chiral (CTC)

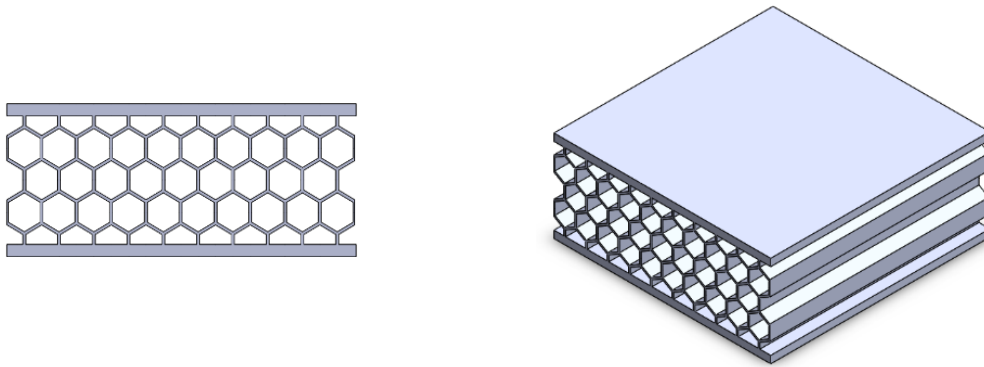


Figure II.12: Epreuve de compression Cellule nid d'abeille (CNA)
A: Vue de face, B: Vue de dessus C: Vue 3D

II.1. Le logiciel de découpage CURA:

Après avoir conçu les échantillons conformément aux normes internationales définies dans ASTM C393-20[24], nous les enregistrons sous forme de fichiers STL pour les importer dans le logiciel CURA. Ensuite, nous préparons ces modèles dans CURA et les exportons sous forme de fichiers GCODE pour les transférer à l'imprimante 3D.

II.1.1. Le logiciel CURA:

Cura est un logiciel open-source de préparation et de découpe (slicing) de modèles 3D, spécialement conçu pour être utilisé avec les imprimantes 3D. Il permet de transformer des modèles 3D en fichiers GCODE, qui contiennent les instructions nécessaires pour que l'imprimante 3D puisse créer l'objet couche par couche.

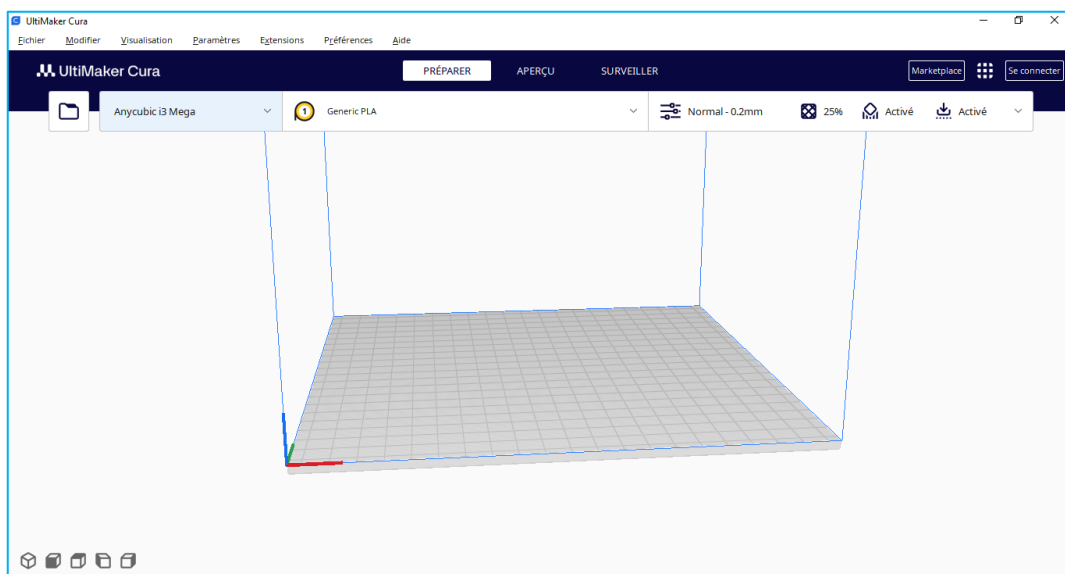


Figure II.13: Interface du logiciel CURA

II.1.2. Les principales taches de CURA:

II.1.2.1. Importation de modèles 3D :

Cura permet l'importation de modèles 3D dans une variété de formats de fichier, notamment les formats les plus couramment utilisés comme STL, OBJ et AMF. Cela offre une grande flexibilité aux utilisateurs, car ils peuvent travailler avec différents logiciels de modélisation 3D et exporter leurs modèles vers Cura pour la préparation et l'impression.

II.1.2.2. Configuration des paramètres d'impression :

Il est possible de configurer une variété de paramètres d'impression afin d'adapter le processus d'impression à nos besoins particuliers. (Figure II.6):

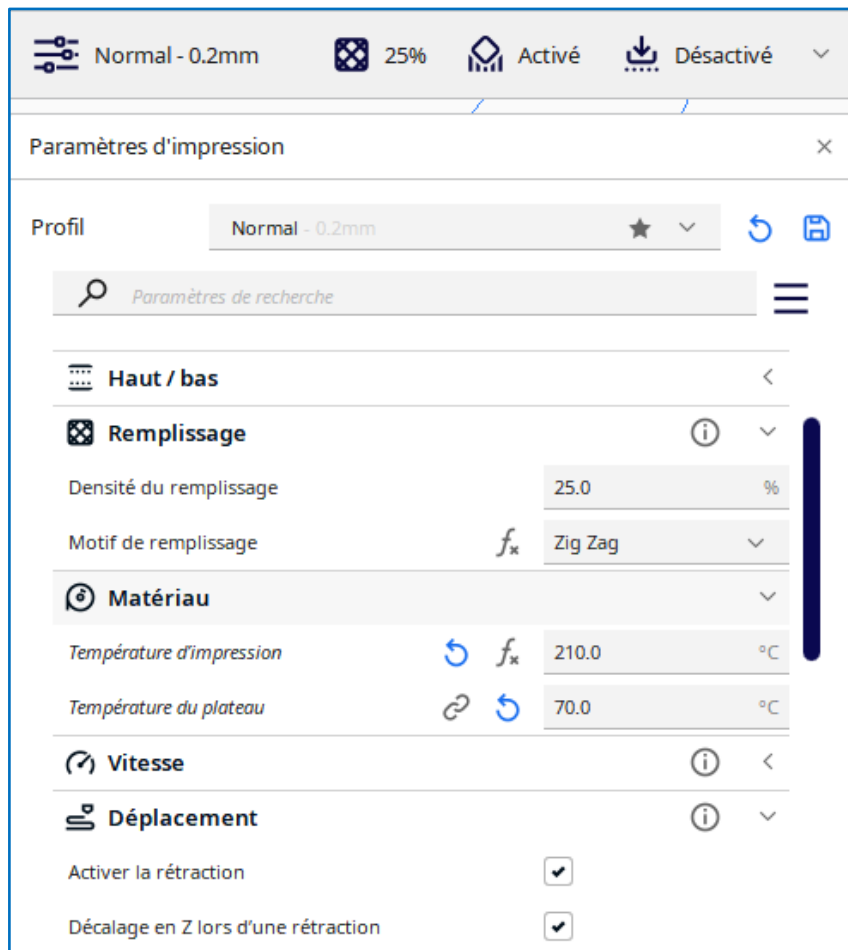


Figure II.14: Paramètre d'impression

II.1.2.3. Étapes pour préparer les échantillons pour l'impression:

Etape 1:

On démarre le logiciel CURA et ensuite, on importe le fichier STL pour préparer l'impression.

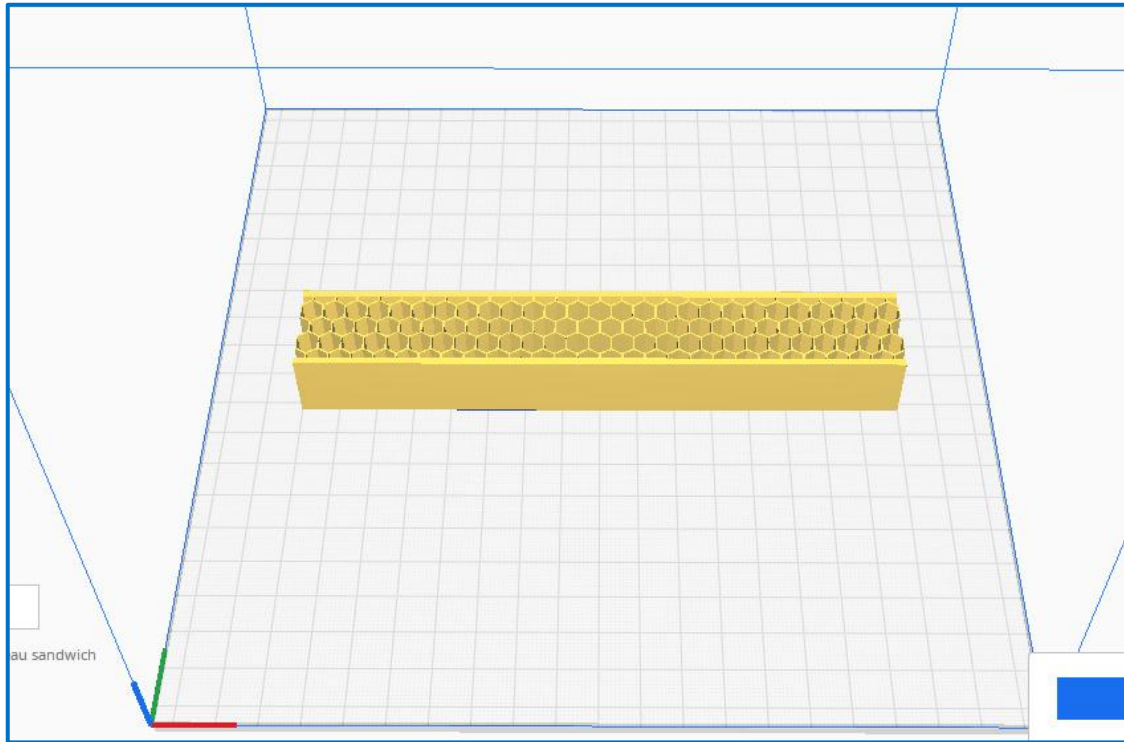


Figure II.15: Epreuve importé

Etape 2:

Une fois que le fichier STL est importé, l'échantillon est affiché en 3D sur l'interface. Nous en créons trois duplicatas.

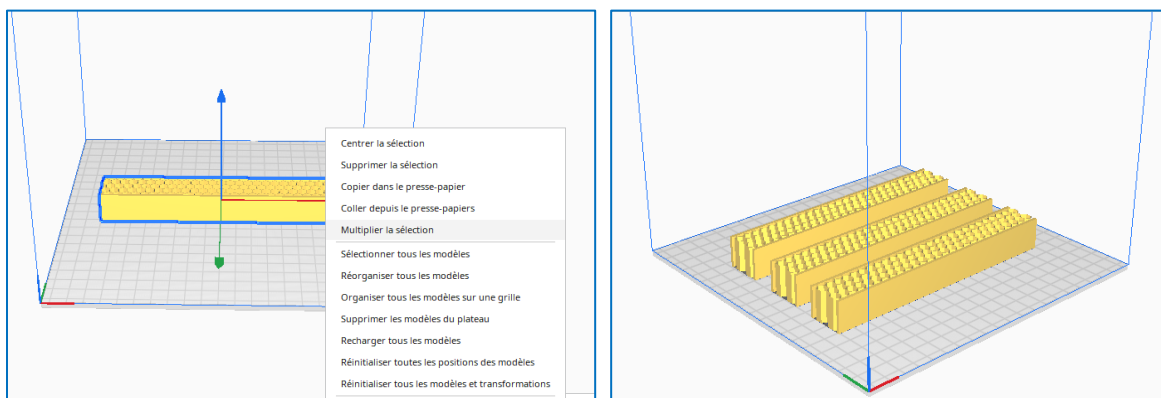
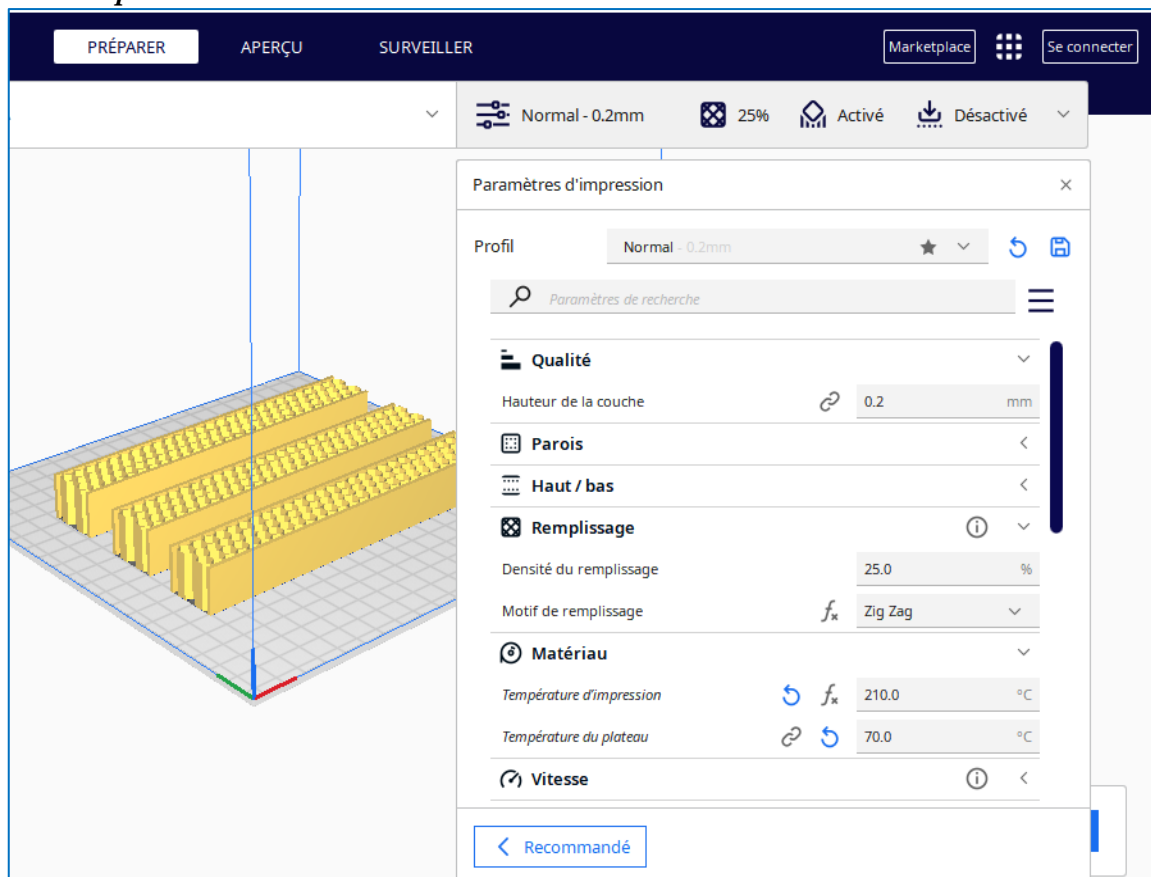
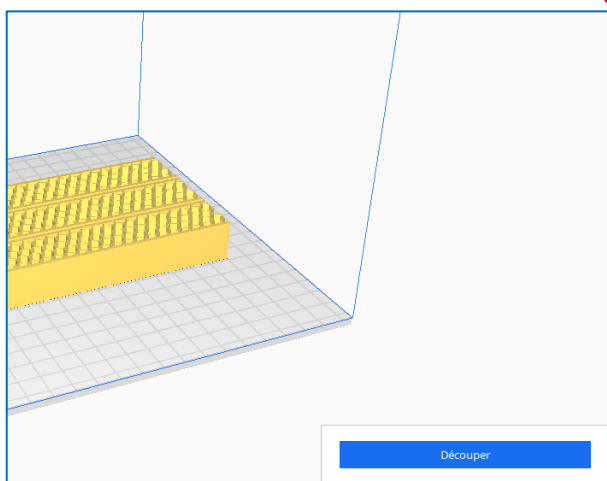


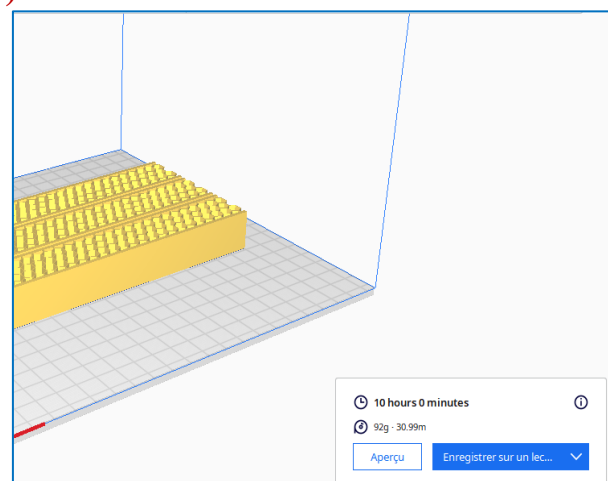
Figure II.16: Création de trois duplicatas

Etape 3:

(A)



(B)



(C)

Figure II.17: Configuration de l'imprimante**A: Ajuster les paramètres de l'imprimante B: On clique sur le bouton découper****C: On clique sur le bouton enregistrer.**

Une fois le fichier GCODE sauvegardé sur la carte mémoire, nous le transférons vers l'imprimante.

II.2. L'imprimante Anycubic i3 Mega:

L'Anycubic i3 Mega est une imprimante 3D populaire et bien connue. Elle est fabriquée par la société chinoise Anycubic et est appréciée pour sa qualité d'impression, sa facilité d'utilisation et son prix abordable. L'i3 Mega utilise la technologie d'impression FDM (Fused Deposition Modeling) pour créer des objets en 3D en déposant des couches de filament plastique fondu. Elle dispose d'un grand volume d'impression, d'un écran tactile convivial et est souvent recommandée aux débutants ainsi qu'aux amateurs avancés d'impression 3D.



Figure II.18: Imprimante Anycubic

II.3. Impression des éprouvettes pour les essais:

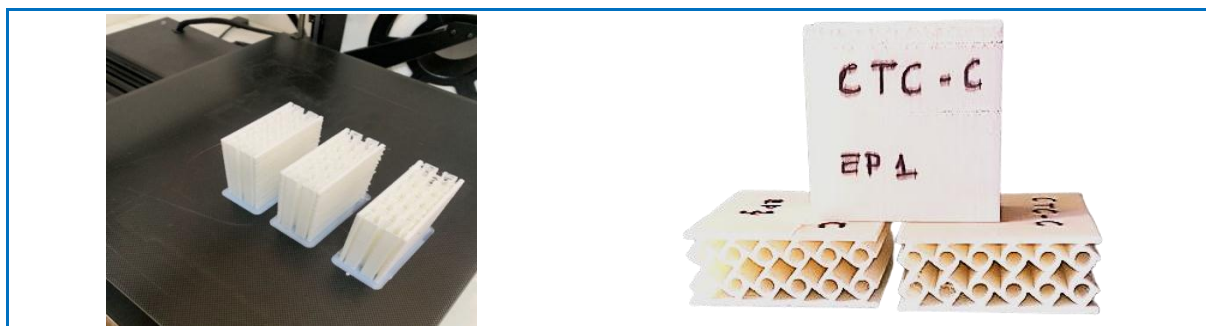
Après avoir enregistré les fichiers de conception des échantillons en format STL, nous les importons dans le programme de découpage CURA. Ensuite, nous ajustons les paramètres de l'imprimante, comme la vitesse d'impression (Figure II.17.A), la densité et les températures de la tête et de la table d'impression. Une fois que nous avons enregistré le fichier en format GCODE sur la carte mémoire, nous le transférons à l'imprimante pour commencer l'impression des échantillons. Et ainsi, les opérations s'enchaînent (Figure II.11).



(A)



(B)



(C)

Figure II.19: les éprouvettes après l'impressions
 (A) flexion (B) Traction (C) compression

II.4. Caractérisation mécaniques des échantillons élaborés :**II.4.1. Machine d'essai mécanique :**

Nous avons mené nos essais mécaniques dans les installations du laboratoire de génie mécanique de l'Université de M'sila, qui abrite la machine des essais mécaniques modèle Test 112. Ce dispositif, un choix classique pour tester une variété de matériaux et de composites, est équipé de deux arbres capables d'appliquer des forces allant jusqu'à 10 kN. Il est connecté à un ordinateur où le programme de contrôle de la machine est installé, permettant ainsi l'enregistrement des données et la création de courbes pour l'analyse des essais.

Cette machine offre une grande flexibilité d'utilisation pour divers types d'essais, notamment la traction, la compression et la flexion. Bien que sa conception de base soit de type table, elle peut être également configurée de manière autonome en fonction des besoins de surface de mesure ou de hauteur de travail.



Figure II.20: Machine d'essai mécanique Test 112

II.4.2. Essais mécaniques standards :

Les propriétés mécaniques des échantillons imprimés ont été évaluées en utilisant l'impression tridimensionnelle avec différentes formes de cellules, notamment le nid d'abeille (CNA), le re-rentant (CR) et le tétra chiral (CTC). Pour chaque type d'essai - flexion, traction et compression - trois types d'échantillons ont été imprimés (Figure II.19). Des séries de tests ont été réalisées pour chaque type, avec trois exemplaires de chaque échantillon, afin de garantir la fiabilité des résultats.

II.4.2.1. Essai de flexion 3 points :

L'essai de flexion trois points offre la possibilité d'étudier le comportement d'un matériau, soit en flexion (privilégiant une rupture par contrainte normale σ_x due au moment de flexion M_x , avec T_{xz} presque négligeable) ou en cisaillement (privilégiant une rupture par contrainte de cisaillement τ due à effort T_{xz}). Ceci est réalisé par l'adoption des conditions d'appuis fixées par la norme des rapports L/h . [21]. Ici nous aborderons le cas de la flexion 3 points car le dispositif expérimental utilisé et les essais effectués dans le cadre de notre étude reposent sur cette sollicitation.

Trois échantillons de chaque type (CNA, CR et CTC) seront soumis à ce test. Les résultats seront enregistrés par un ordinateur connecté à la machine de test, garantissant une collecte de données précise et efficace.

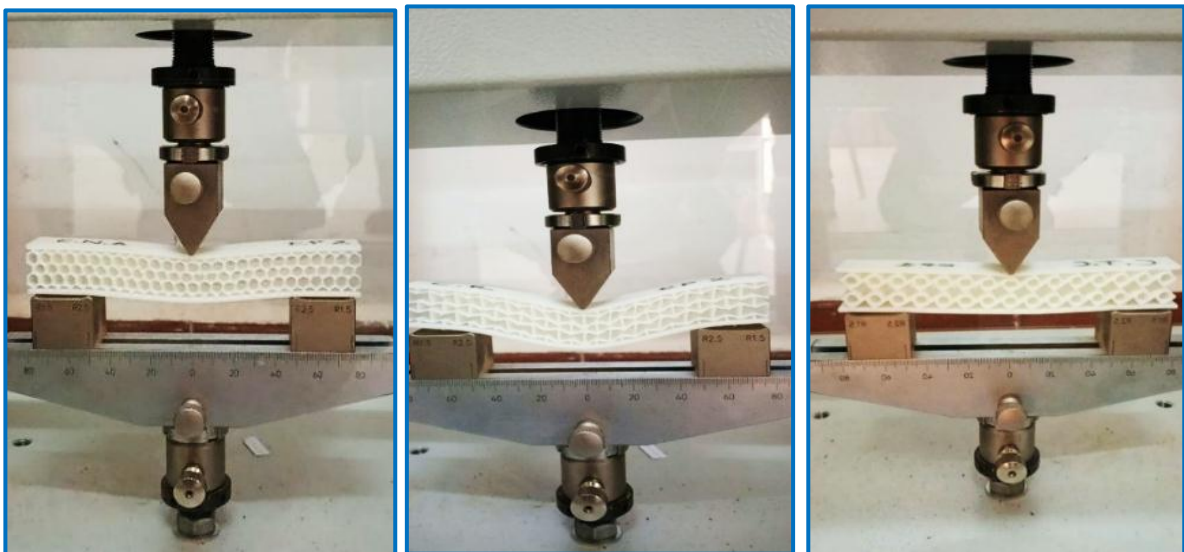


Figure II.21: Essai de flexion 3 points

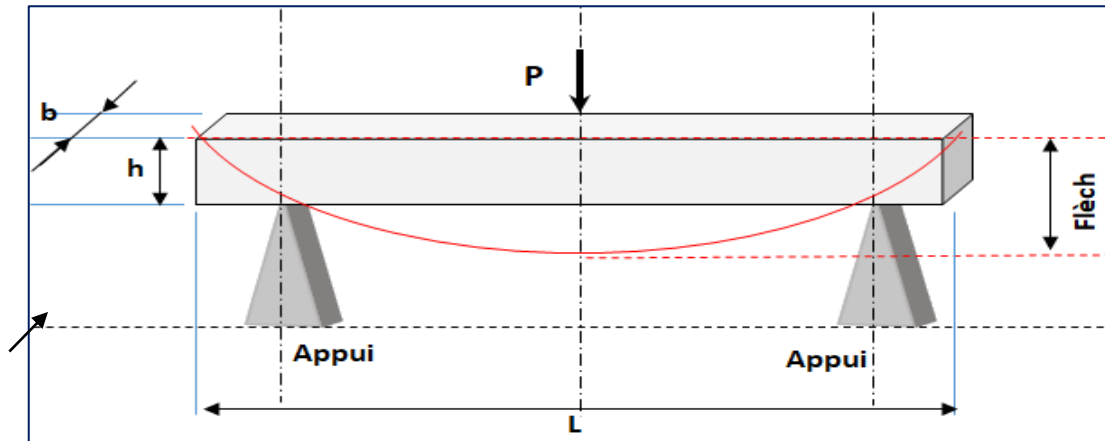


Figure II.22: Schéma d'essai de flexion 3 points

- **Calcul de contrainte en flexion:**

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

P : La charge en (N),

L : La distance entre appuis (mm)

b : La largeur de l'éprouvette

h : L'épaisseur de l'éprouvette

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

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

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

L : La distance entre appuis (mm)

b : Le largeur de l'éprouvette

h : L'épaisseur de l'éprouvette

m : la pente linéaire de la courbe charge-déflexion

$$m = \frac{\Delta P}{\Delta f}$$

- **Calcul de déformation en flexion:**

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

ε_f : Déformation en flexion (MPa)

L : La distance entre appuis (mm)

h : L'épaisseur de l'éprouvette (mm)

D : Fleche maximale (mm)

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bh^2} \quad \varepsilon_f = \frac{6 Dh}{L^2} \quad E_f = \frac{L^3 m}{4bh^3}$$

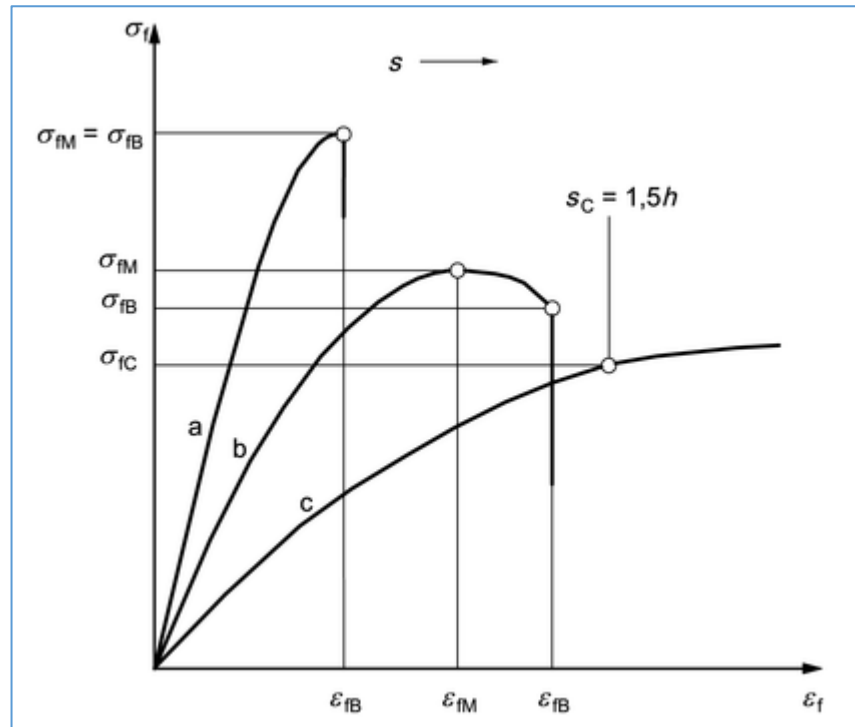


Figure II.23: Courbes types de la contrainte en flexion, σ_f , par rapport à la déformation en flexion, ε_f , et la flèche, s [26]

II.4.2.2. Essai de traction :

Les essais de traction représentent la méthode la plus courante pour analyser le comportement mécanique des matériaux soumis à une compression progressive à des vitesses de chargement faibles ou modérées. Ils permettent également d'étudier et d'identifier les mécanismes physiques de la déformation plastique, qui joue un rôle crucial dans la formation des matériaux lors des processus de fabrication industriels, qu'ils impliquent ou non l'enlèvement de matière.

Dans notre procédure, nous testons trois exemplaires de chaque type d'échantillon (CNA, CR, CTC). Chaque échantillon mesure 14 mm de hauteur, 20 mm de largeur et 160 mm de longueur. Nous plaçons l'échantillon entre les mâchoires de la machine, puis nous lançons le programme de contrôle à partir de l'ordinateur connecté à la machine pour démarrer le processus de test.



Figure II.24: Essai de traction

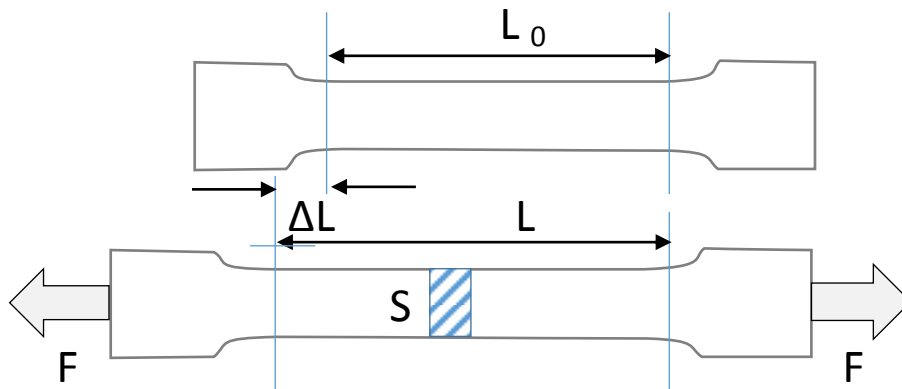


Figure II.25: schéma d'essai de traction

- **Calcul de contrainte en Traction:**

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

F : La force appliquée.

S : La section de l'éprouvette.

- **Calcul la déformation en Traction:**

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

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

L_0 : la longueur initiale (mm).

- **Calcul le module d'élasticité en traction:**

$$\sigma = E \varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

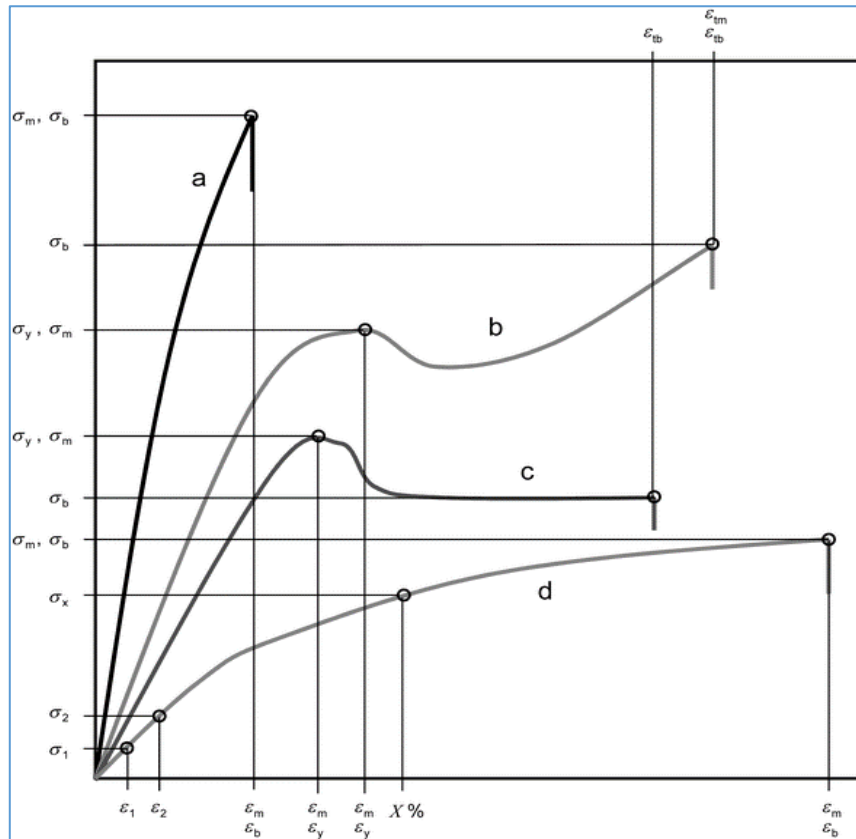


Figure II.26: Courbes contrainte/déformation typiques [30]

II.4.2.3. Essai de compression :

L'essai de compression est relativement simple à effectuer : il implique de soumettre une éprouvette, généralement cylindrique ou prismatique, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales égales et opposées visant à la comprimer. Pour les matériaux ductiles, ce test peut ne pas aboutir à la rupture.

Nous testons trois exemplaires de chaque type d'échantillon (CNA, CR, CTC). Chaque échantillon a des dimensions de 25 mm de hauteur et une surface de 60x60 mm, Après avoir positionné l'échantillon entre les mâchoires de la machine, nous lançons le programme de contrôle depuis l'ordinateur connecté à la machine pour initier le processus de test.

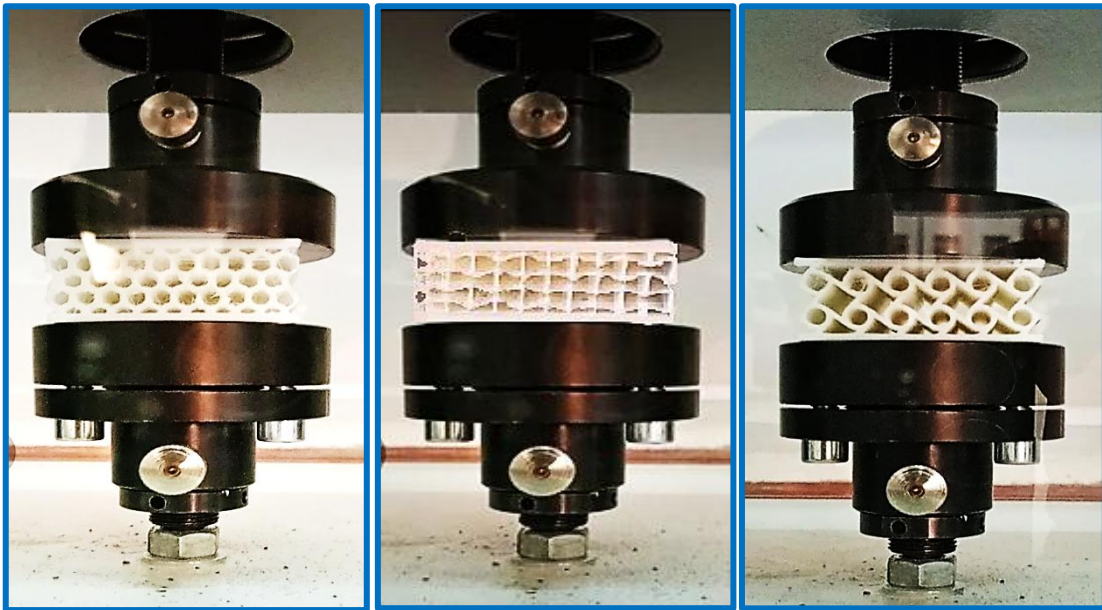


Figure II.27: Essai de compression

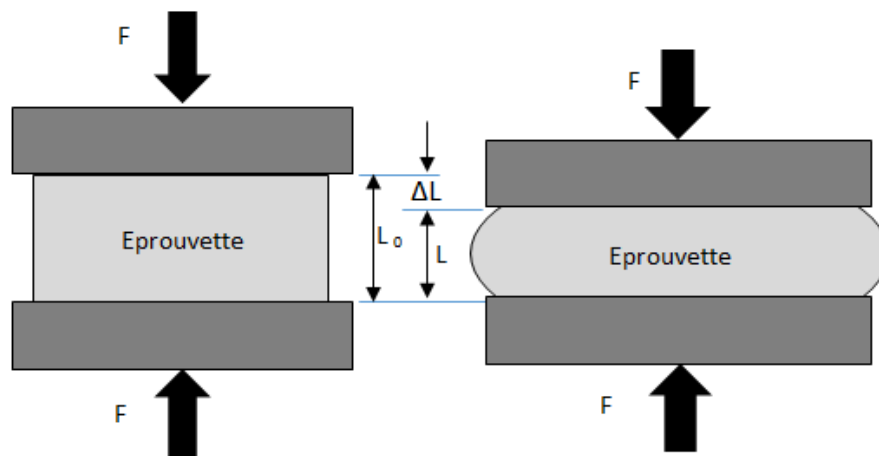


Figure II.30: schéma d'essai de compression

- **Calcul de contrainte en compression:**

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

F: La force appliquée.

S: La section de l'éprouvette.

- **Calcul la déformation en compression:**

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

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

L_0 : La longueur initiale (mm).

- **Calcul le module d'élasticité en compression:**

$$\sigma = E \varepsilon \Rightarrow E = \frac{\sigma}{\varepsilon}$$

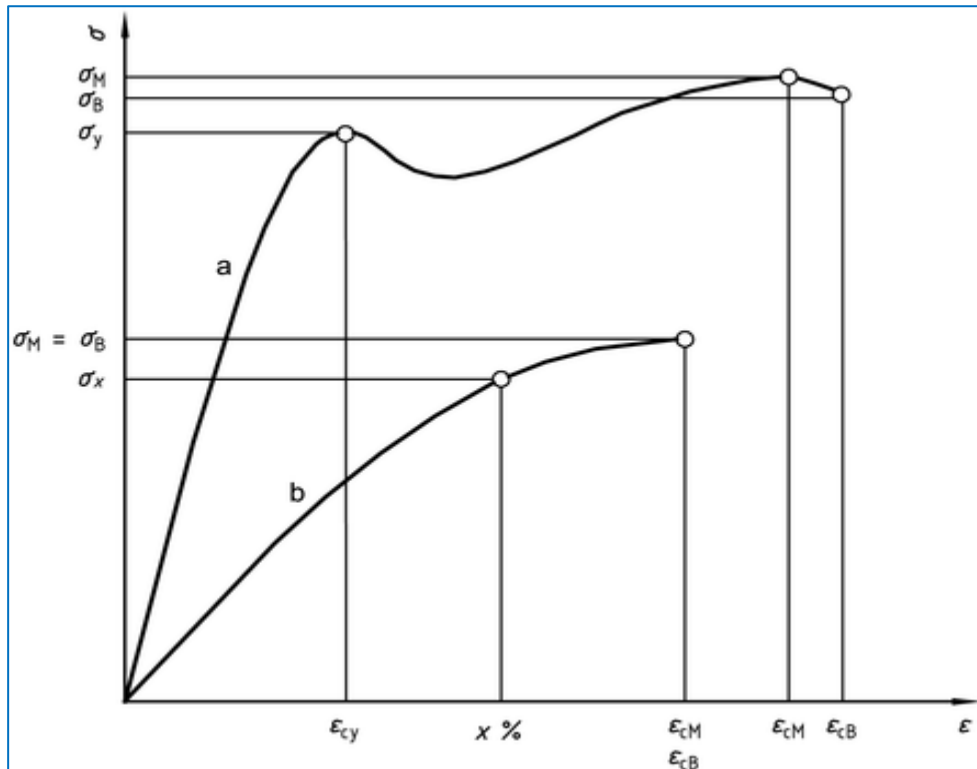


Figure II.29: Courbes types contrainte/déformation

Après avoir effectué les tests nécessaires sur les trois échantillons, avec trois éprouvettes pour chaque échantillon, nous analysons les résultats à l'aide du logiciel Excel, une démarche que nous détaillerons dans le chapitre suivant.

CHAPITRE III

RESULTATS ET DISCUSSIONS

III. Résultats et discussions:

Après avoir réalisé trois impressions de chaque échantillon (pour les tests de flexion, traction et compression), nous avons procédé à des essais mécaniques. Ensuite, nous avons extrait les fichiers de résultats pour calculer les contraintes, les déformations et le module d'Young. Enfin, nous avons tracé les courbes correspondantes à chaque type d'essai.

III.1. Tests de flexion:**III.1.1. But de test:**

Nous utilisons l'essai de flexion en trois points conformément à la norme **ISO 178** pour déterminer les propriétés de flexion des plastiques durcissables ou des thermoplastiques.[26] Les principaux résultats de cet essai sont le module de flexion, calculé à partir de la pente initiale dans le diagramme contrainte-déformation (**Figure III.2**), ainsi que la résistance à la flexion et l'allongement en flexion à la rupture de l'éprouvette (**voir Tableau III.1**). Nous déterminons également la contrainte de flexion pour une déflexion spécifique.

Le dispositif d'essai de flexion en trois points selon **ISO 178** [26] se compose de deux supports parallèles et d'une panne de flexion disposée au centre, dans laquelle l'éprouvette standard est déformée dans la zone des petits angles de flexion. En mesurant de manière appropriée les forces de flexion et de déflexion, la contrainte et la déformation des fibres marginales de l'éprouvette peuvent être déterminées, à partir desquelles les résultats des tests individuels seront calculés sous forme de valeurs caractéristiques ponctuelles.

Une autre méthode normalisée pour caractériser les propriétés de flexion des plastiques est décrite dans l'**ASTM D790**. [27].

III.1.2. Les résultats:

Les caractéristiques mécaniques telles que le module de flexion, le module d'Young, la résistance à la flexion et l'allongement en flexion à la rupture sont des indicateurs clés des propriétés des matériaux. Elles permettent d'évaluer la performance et l'adaptabilité des matériaux pour diverses applications industrielles et de recherche.

La figure III.1 montre l'état d'éprouvette après les essais, et Les graphiques contrainte/allongement (Figure III.2) montrent la relation entre la contrainte appliquée à un matériau et l'allongement qu'il subit en réponse. Cette relation est cruciale pour comprendre le comportement mécanique du matériau sous différentes conditions de charge. la (Figure III.3) montrent la relation entre la charge et déplacement, ils nous permettent de déduire la valeur m la pente linéaire de la courbe charge-déflexion .



Figure III.1: Les éprouvettes après les tests de flexion

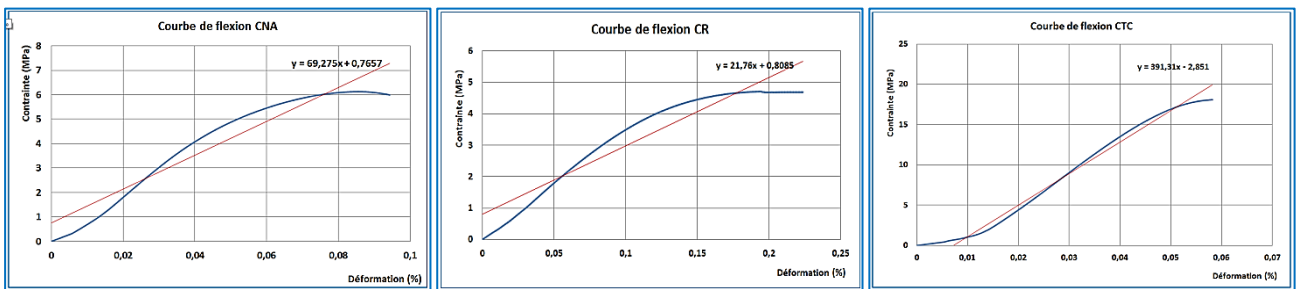


Figure III.2: Courbes contrainte/allongement des échantillons

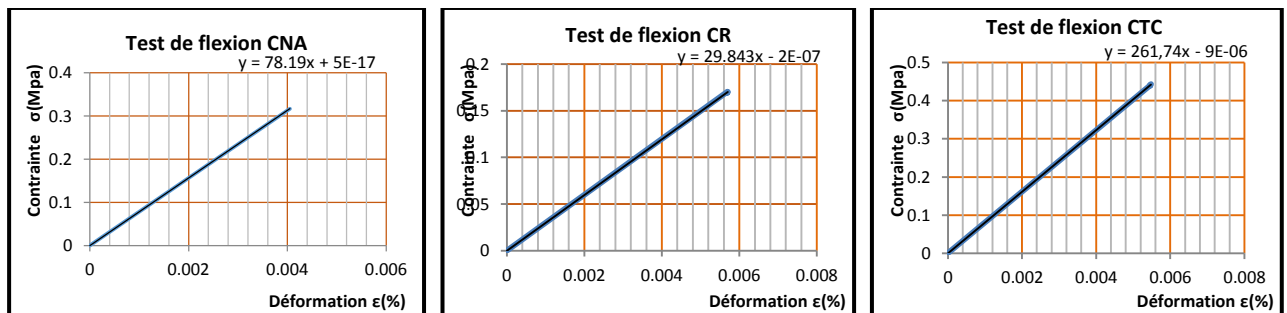


Figure III.3: calculé Module d'Young a partir de Courbes contrainte/allongement

	CNA	CR	CTC
σ (MPa)	6.13	4,71	18,09
ϵ (%)	10.00	21,00	6.00
Elasticité E (MPa)	77.17	30.79	264,92

Tableau III.1: Résultats de test flexion

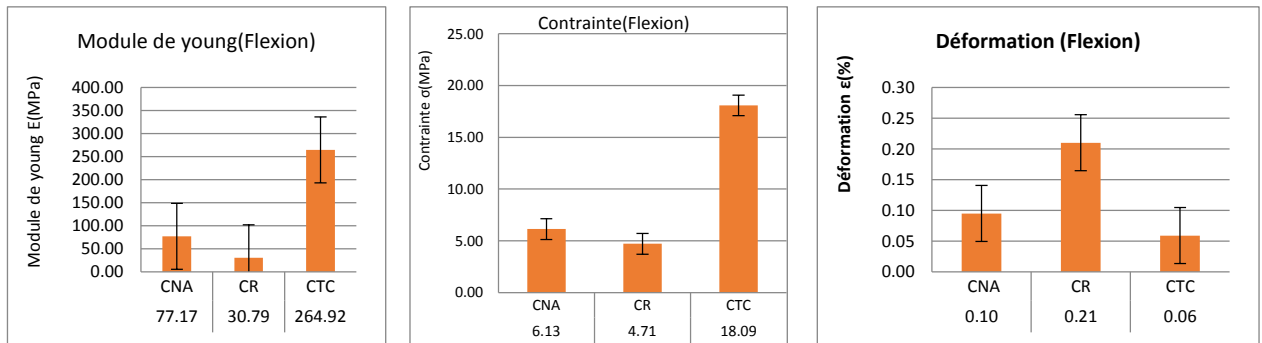


Figure III.4: Résultats des tests flexion

III.2. Tests de Traction:

III.2.1. But de test:

Nous avons employé des essais de traction pour analyser les échantillons CNA, CR et CTC imprimés avec des filaments de PLA fondu. Cette méthode implique de placer l'échantillon à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction, qui exerce une force jusqu'à ce que le matériau se fracture (voir Figure III.4). Ce test destructif enregistre à la fois l'allongement et la force appliquée, lesquels sont ensuite convertis en contrainte et déformation.

III.2.2. Les résultats:

Les propriétés mécaniques telles que la contrainte à la rupture, le module d'Young et l'allongement à la rupture ont été déterminées. Les courbes contrainte/allongement de nos échantillons sont illustrées dans la (Figure III.5), et les résultats obtenus sont résumés dans le (Tableau III.2).



Figure III.5: les éprouvettes après les tests de traction

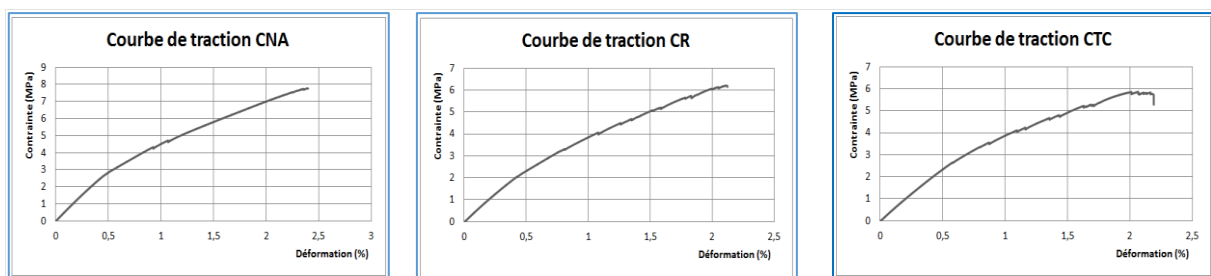


Figure III.5: Courbes de traction

	CNA	CR	CTC
σ (MPa)	4,73	3,73	3,74
ϵ (%)	1,20	1,06	1,10
Elasticité(MPa)	4,46	3,88	3,80

Tableau III.2: Résultats des tests traction

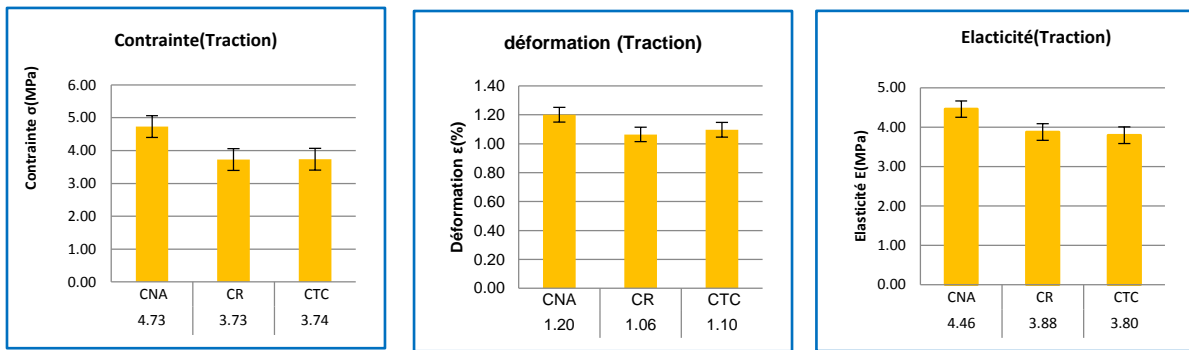


Figure III.6: Résultats des tests traction

III.3. Tests de compressions

III.3.1. Le but de test:

L'objectif des essais de compression est de comprendre le comportement et la réaction d'un matériau soumis à une charge de compression en mesurant des variables essentielles telles que la contrainte et la déformation.

Ces essais sont effectués sur une machine d'essais mécaniques selon un protocole normalisé. Pendant le test, des forces sont appliquées sur le matériau, le poussant contre un côté opposé, ce qui entraîne sa compression, son écrasement ou son aplatissage. Pendant ce processus, l'échantillon subit une déformation, se raccourcissant et s'élargissant, et peut même présenter des irrégularités latérales ou se fissurer sous l'effet de la pression.

Ces tests permettent de déterminer des propriétés telles que le module d'élasticité du matériau, comprenant sa résistance à la compression, sa limite d'élasticité et sa résistance finale. En utilisant ces valeurs, il est possible d'évaluer si le matériau est adapté à certaines applications ou s'il ne répond pas aux exigences spécifiques dans certaines conditions.

III.3.2. Les résultats:

Les propriétés mécaniques telles que la contrainte à la rupture, le module d'Young et l'allongement à la rupture ont été déterminées. Les courbes contrainte/allongement de nos échantillons sont illustrées dans la (Figure III.8), et les résultats obtenus sont résumés dans le (Tableau III.3).

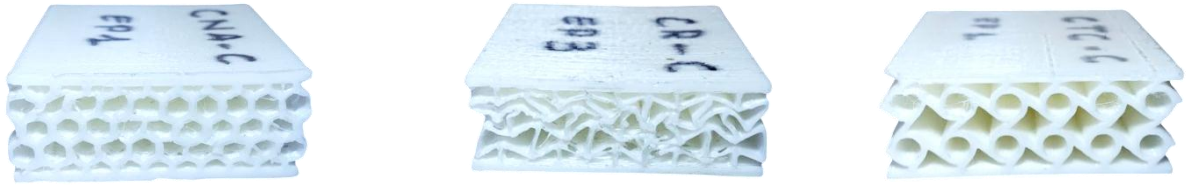


Figure III.7: les éprouvettes après tests de compression

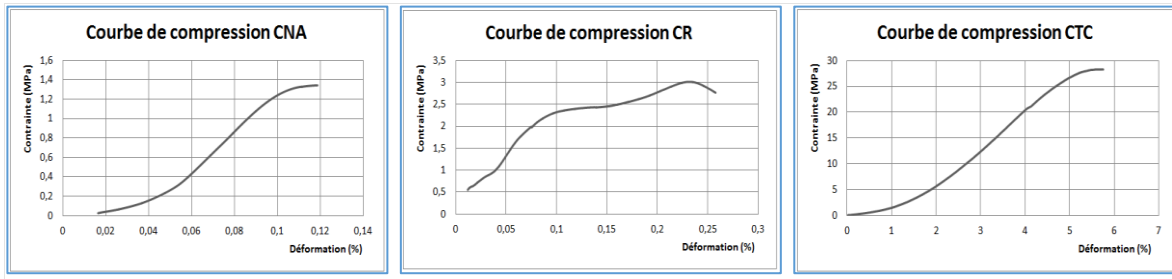


Figure III.8: Courbes de compression

	CNA	CR	CTC
σ (MPa)	4,73	3,73	3,74
ϵ (%)	1,20	1,06	1,10
Elasticité(MPa)	3,94	3,51	3,41

Tableau III.3: Résultats des tests compression

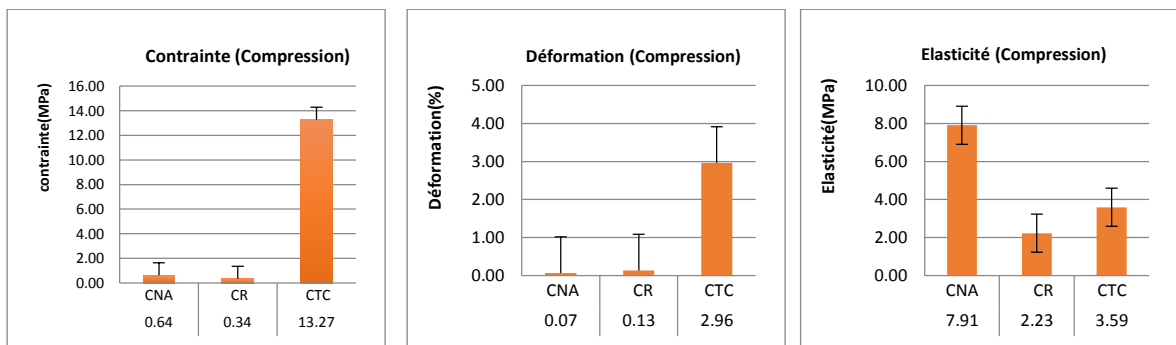


Figure III.9: Les résultats des tests compression

III.4. Discussions:**III.4.1. Test de flexion:**

Les résultats des essais de flexion soulignent l'importance de la forme géométrique des cellules pulpaies des échantillons dans leur comportement mécanique, comme le mettent en évidence les courbes des échantillons avec cellules CTC, qui ont montré une résistance significativement plus élevée par rapport aux échantillons contenant des cellules CR et CNA.

Les données obtenues pour l'éprouvette CTC révèlent une contrainte de $18,09 \pm 2,003$ MPa, une déformation de $0,06 \pm 0,015$ % et un module d'Young de $264,92 \pm 86,64$ MPa, suggérant une robustesse et une rigidité considérables. En revanche, les échantillons CR et CNA se sont avérés relativement élastiques.

III.4.2. Test de traction:

Les résultats des tests de traction montrent un comportement similaire pour tous les échantillons, avec un manque notable d'allongement, attribuable à la nature intrinsèquement rigide du matériau PLA, comme indiqué par les courbes présentées dans la Figure III.5, où la phase plastique est pratiquement absente. L'analyse (voir Figure III.6) révèle que l'échantillon CNA a enregistré une contrainte de $4,73 \pm 2,12$ MPa et une déformation de $1,20 \pm 0,69$ %. En revanche, les résultats des échantillons CR et CTC étaient inférieurs et comparables entre eux.

III.4.3. Test de compression:

Dans les essais de compression, les échantillons avec cellules CTC ont également montré une grande résistance, confirmant les observations faites lors des tests de flexion, tandis que les échantillons avec cellules CR ont montré une faiblesse par rapport à ceux avec cellules CNA, ce qui est cohérent avec les résultats obtenus. L'échantillon CTC a affiché une contrainte de $13,27 \pm 1,72$ MPa et une déformation de $2,96 \pm 1,72$ %, mettant en évidence une rigidité supérieure par rapport aux autres échantillons.

III.5. Conclusion:

En conclusion, nos analyses approfondies des essais de flexion, de traction et de compression ont révélé des insights significatifs sur les propriétés mécaniques des échantillons étudiés. Les essais de flexion ont mis en évidence l'importance de la forme géométrique des cellules pulpaire dans le comportement mécanique, avec une résistance notablement plus élevée observée chez les échantillons présentant des cellules CTC par rapport à ceux contenant des cellules CR et CNA. Les essais de traction ont mis en évidence un manque d'allongement significatif pour tous les échantillons, en raison de la nature intrinsèquement rigide du matériau PLA. Enfin, les essais de compression ont confirmé la résistance supérieure des échantillons avec des cellules CTC, tandis que ceux avec des cellules CR ont montré une faiblesse relative, en accord avec les observations des autres tests.

Ces résultats soulignent l'importance de la composition et de la structure des matériaux dans leurs propriétés mécaniques, offrant ainsi des perspectives précieuses pour leur utilisation dans diverses applications. Cependant, des variations peuvent survenir en raison de différences dans les méthodes d'analyse ou les conditions expérimentales. En définitive, ces conclusions enrichissent notre compréhension des matériaux étudiés et ouvrent la voie à de futures recherches visant à optimiser leurs performances pour des applications spécifiques.

CHAPITRE IV

MODELISATION SUR ABAQUS

IV.1. Introduction:

La simulation et l'analyse numériques par éléments finis sont des outils très efficaces pour aborder ces problématiques. Dans l'étude des phénomènes mécaniques complexes, elles servent de méthode d'approximation essentielle de la réalité, désormais quasiment indispensable dans le domaine de la recherche. Les résultats obtenus par simulation numérique doivent systématiquement être confrontés à ceux issus de tests expérimentaux. La méthode des éléments finis influence directement la qualité et le délai des études, dans une optique de réduction des coûts, étant plus économiques que les tests en laboratoire, notamment avec un nombre optimal de tests.

Dans ce chapitre, nous décrivons les différentes étapes pour modéliser le comportement d'une structure sandwich imprimée en 3D, nid d'Abeille (CNA), utilisant des filaments PLA, sous chargement mécanique, à l'aide du logiciel de calcul ABAQUS. La géométrie du modèle et la sélection des éléments finis pour le maillage tridimensionnel sont générées. Une étude de sensibilité du maillage est réalisée pour déterminer la dimension optimale des éléments finis, assurant une meilleure convergence vers la solution. Les propriétés mécaniques des différents matériaux constitutifs sont ensuite déterminées à partir de modèles numériques. En outre, nous abordons l'interaction entre les différents composants ainsi que les étapes d'assemblage et de chargement des panneaux isolés.

IV.2. Logiciel ABAQUS:

ABAQUS, développé par DASSAULT, est un logiciel de calcul par éléments finis largement reconnu. Il se décline en trois produits : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. Réputée pour sa technologie de pointe, sa qualité et sa fiabilité, la gamme de logiciels ABAQUS est devenue essentielle dans les processus de conception de sociétés renommées à travers le monde, couvrant tous les secteurs industriels. ABAQUS offre des solutions de premier plan pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. En fournissant un environnement complet pour l'analyse par éléments finis, ABAQUS propose une large gamme d'options, évitant ainsi le recours à plusieurs fournisseurs et produits pour les opérations d'analyse.

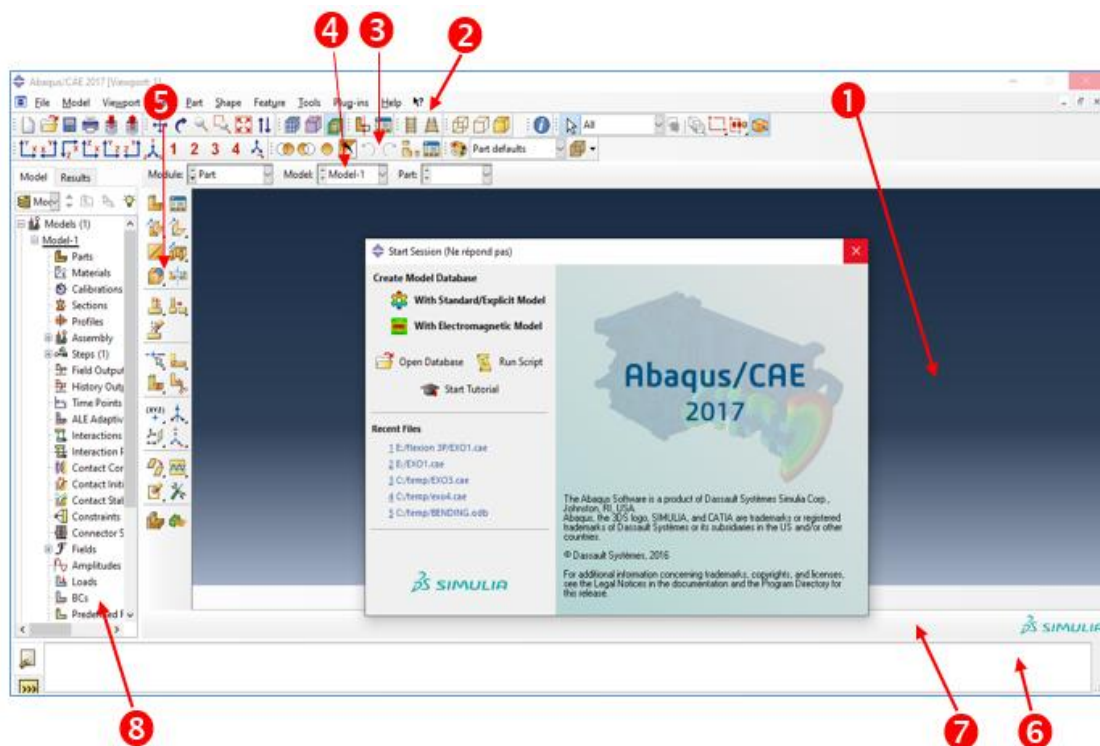


Figure VI.1: interface de logiciel Abaqus

1. Fenêtre d'affichage graphique.
2. Barre de menu en haut, ces menus sont relatifs au module correspondant.
3. Barre horizontale d'outil, y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes.
4. Une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou de sélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler.
5. On dispose à gauche d'une colonne d'icône permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.
6. L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique correspond aux messages affichés par ABAQUS lors de la modélisation ; ils permettent d'être mieux guidés dans les actions entreprises.
7. une fenêtre en dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.
8. Enfin, arbre du modèle et résultats.

Après avoir utilisé SolidWorks pour concevoir une gamme d'échantillons afin de répondre à nos besoins de test, notamment en flexion, traction et compression, nous les avons matérialisés par impression 3D. Ensuite, nous nous sommes rendus au laboratoire pour réaliser les tests correspondants et obtenir les données requises sous forme de résultats et de courbes. À présent,

nous avançons vers la phase de simulation en utilisant Abaqus. Actuellement, la simulation se concentre uniquement sur l'échantillon cellule nid d'abeille (CNA), car étendre les simulations à tous les échantillons demanderait beaucoup d'efforts et de temps.

IV.3. Les différentes phases pour simuler un test de flexion avec Abaqus se déroulent généralement comme suit

IV.3.1. Modélisation de la géométrie :

Dans cette phase, nous récupérons le modèle de l'échantillon en nid d'abeille (CNA) en accédant au menu "Fichier", puis en choisissant "Importer". Une fenêtre s'affiche, nous permettant de sélectionner le fichier à importer, que nous validons en cliquant sur "OK". Suite à cela, le modèle de l'échantillon apparaît dans la fenêtre d'Abaqus.

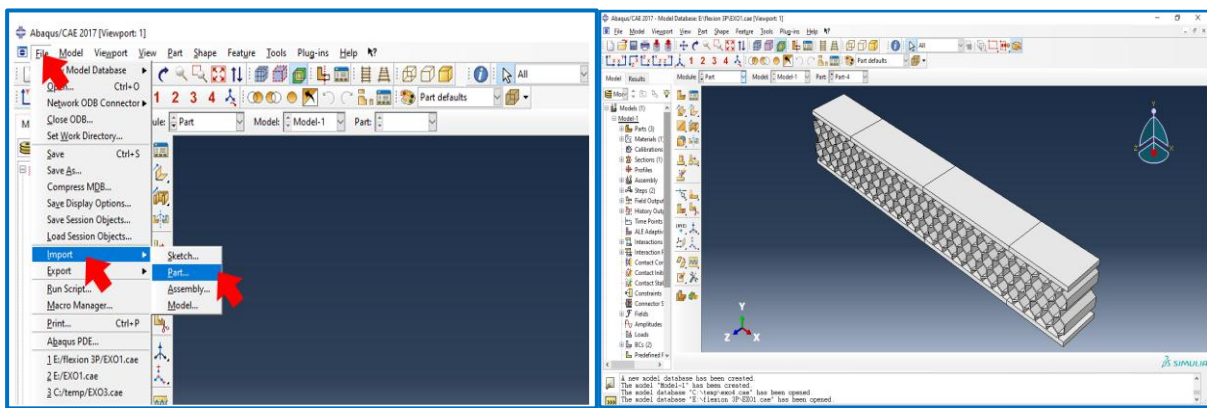


Figure IV.2: Import d'éprouvette CNA

Abaqus, bien qu'il soit principalement connu pour ses fonctionnalités d'analyse et de simulation, intègre également des outils de modélisation.

Lorsque vous lancez Abaqus, vous pouvez ouvrir un nouveau formulaire et choisir l'unité de modélisation appropriée selon le type de conception envisagé. Ensuite, en utilisant une gamme d'outils de modélisation disponibles, vous créez votre échantillon en façonnant des solides, des surfaces, et d'autres géométries nécessaires. Une fois la modélisation terminée, vous pouvez passer à l'analyse en définissant les matériaux, les conditions aux limites, et en appliquant les charges pertinentes.

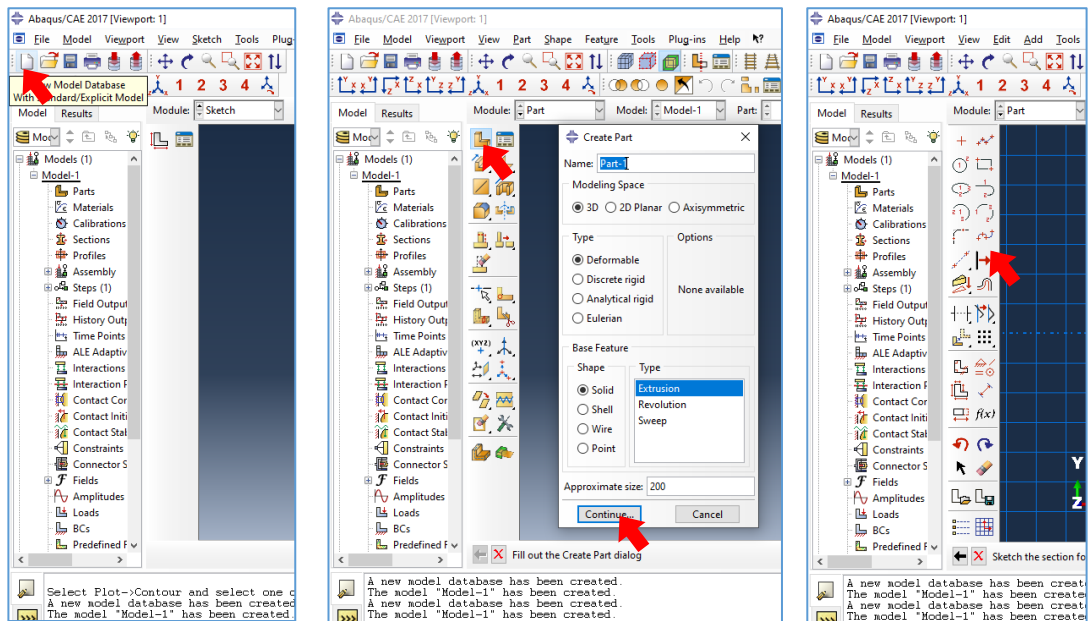



Figure IV.3: Modélisation par Abaqus


IV.3.2. Définition des matériaux :

Le module de Young et le coefficient de Poisson sont deux paramètres essentiels dans la modélisation numérique des matériaux pour les calculs élastiques.

En utilisant ces deux paramètres, on peut caractériser de manière assez précise le comportement élastique d'un matériau dans un modèle numérique. Ces informations sont cruciales pour simuler avec précision la réponse d'un objet ou d'une structure soumise à des charges ou à des déformations dans le cadre de la modélisation numérique

Créer le matériau 

1. Créer les sections sur lesquelles appliquer ces matériaux 

2. Affecter (assimiler) les matériaux aux sections correspondantes 

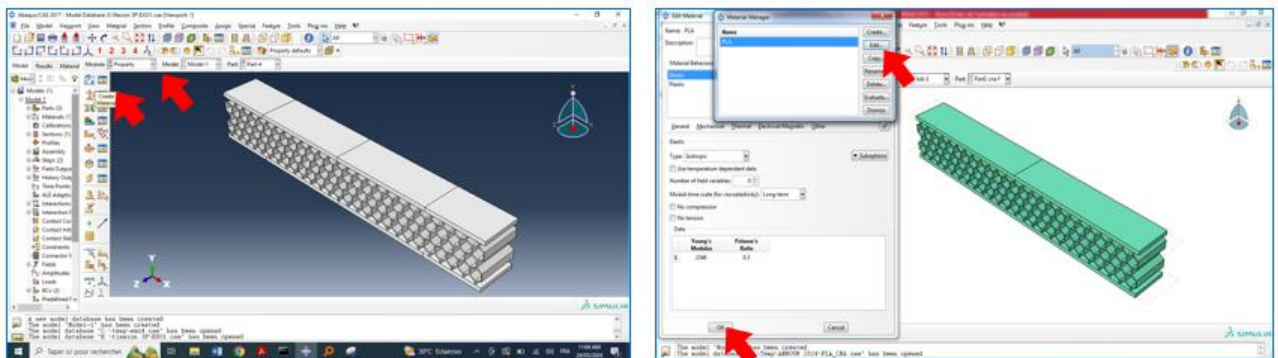


Figure IV.4: Définir la propriété mécanique de matériaux

IV.3.3. III.6.3 Assembler le modèle (module ASSEMBLY)

Nous importons les composants préalablement créés et les assemblons à l'aide de la fonction "Create an instance". Nous pouvons ensuite répliquer chaque pièce autant de fois que nécessaire, en effectuant des translations et des rotations selon les besoins, afin de parvenir au modèle souhaité.

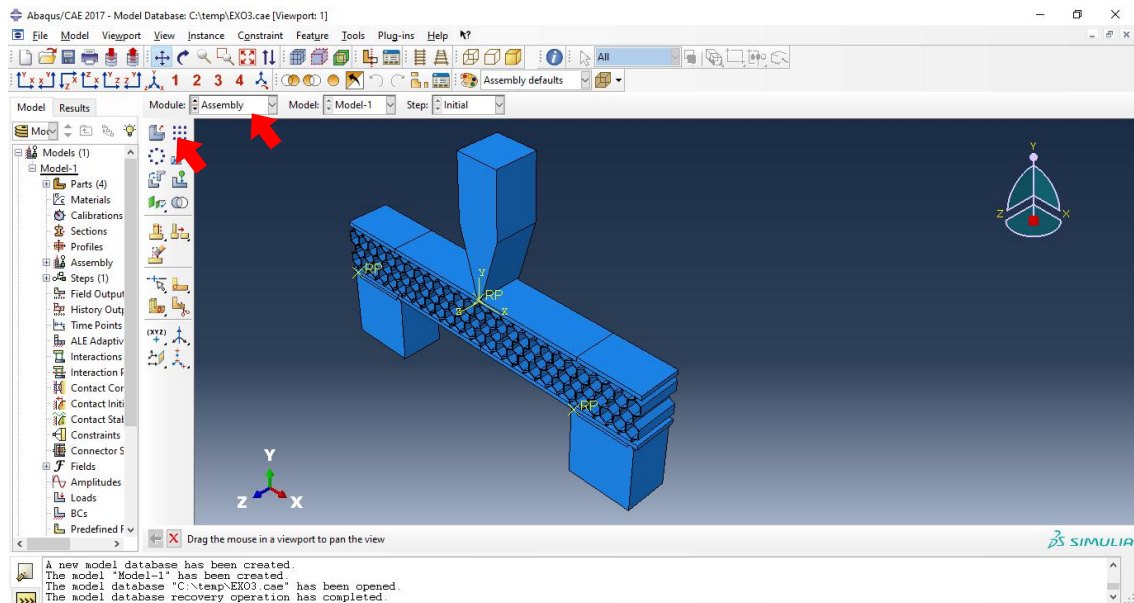


Figure IV.5: Génération des instances à assembler.

IV.3.4. Définition du « Step » et des variables à calculer (le module step)

Ce module facilite la définition des étapes d'analyse en créant une procédure générale. Un aspect crucial de cette simulation est de précisément déterminer le temps de calcul et l'incrémentation. Pour cette simulation spécifique, nous avons opté pour un calcul "statique général" avec une durée de simulation fixée à 1 seconde.

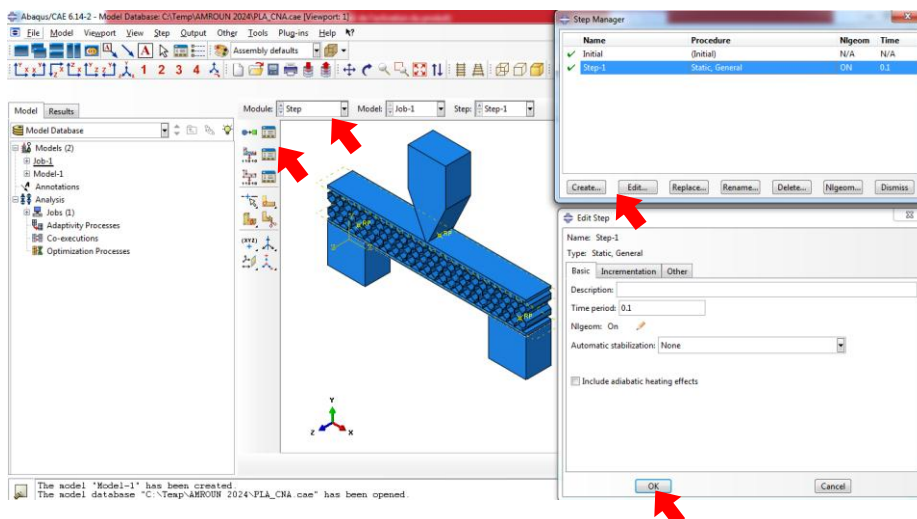


Figure IV.6: Création du STEP pour un chargement statique.

IV.3.5. Définition des conditions aux limites et chargement (Module Load):

Le module LOAD permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs.

- **Create Boundary Condition(Bcs):** l'étape de création des conditions aux limites.
- **Create Load (load):** regroupe l'ensemble des forces auxquelles le système est soumis.

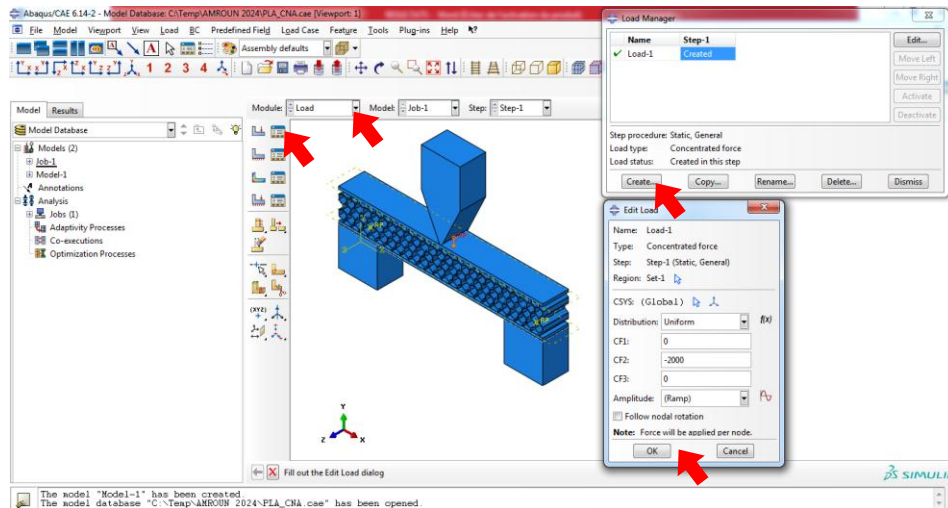


Figure IV.7: Conditions aux limites de module LOAD.

IV.3.6. Le maillage de modèle (module mesh)

Dans ce module, nous générons le maillage pour notre ensemble. Nous définissons les éléments du maillage à l'aide de l'outil "mesh".

L'art du maillage repose principalement sur deux critères : les types d'éléments de maillage (par exemple, hexaédriques, cubiques, tétraédriques dans "Mesh Control") et la complexité topologique de chaque pièce. Nous avons opté pour l'élément hexaédrique de premier ordre (avec des fonctions de forme linéaires) à 8 nœuds, car il offre de bonnes performances pour les problèmes avec une géométrie simple et permet une intégration réduite. Il est également possible de mailler une même pièce de différentes manières afin de mettre en évidence les surfaces les plus déformables.

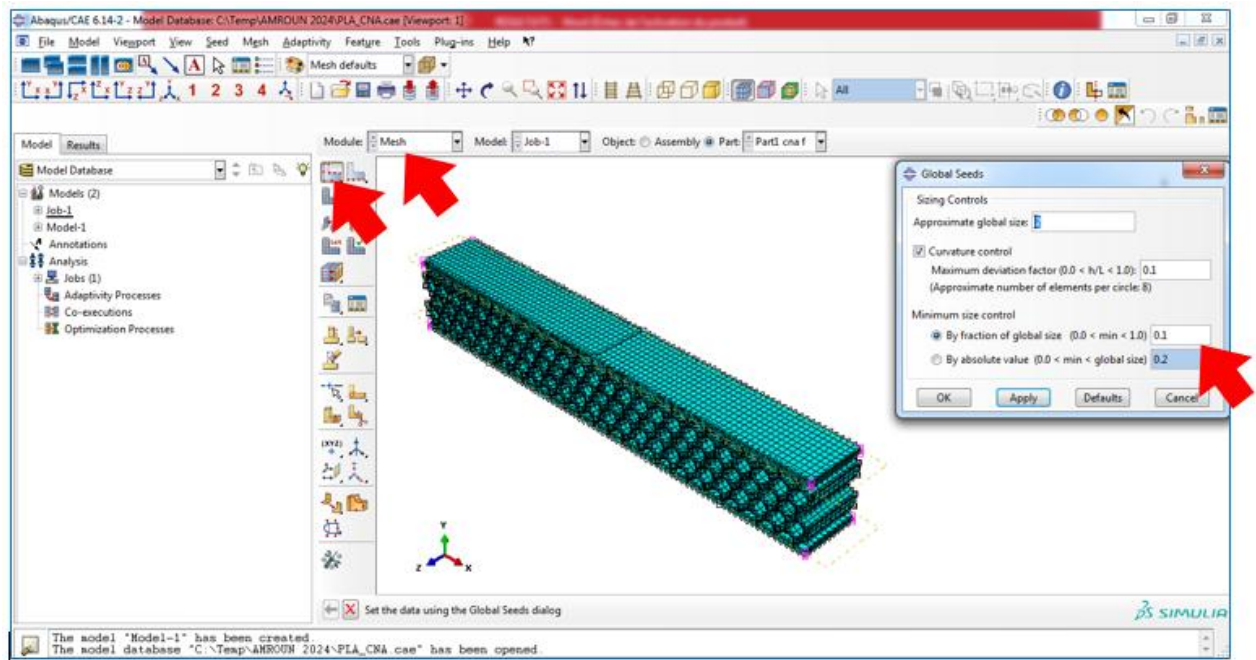


Figure IV.8: Présentation de maillage

IV.3.7. : Création du fichier résultats (Module Job)

La tâche de module « Job » est d'analyser le modèle à simuler bien définie Auparavant (géométrie, matériaux, lois de comportements, les chargements...). On lance le calcul après la création d'un fichier job, en cliquant sur « Submit » Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post-traite les résultats demandés.

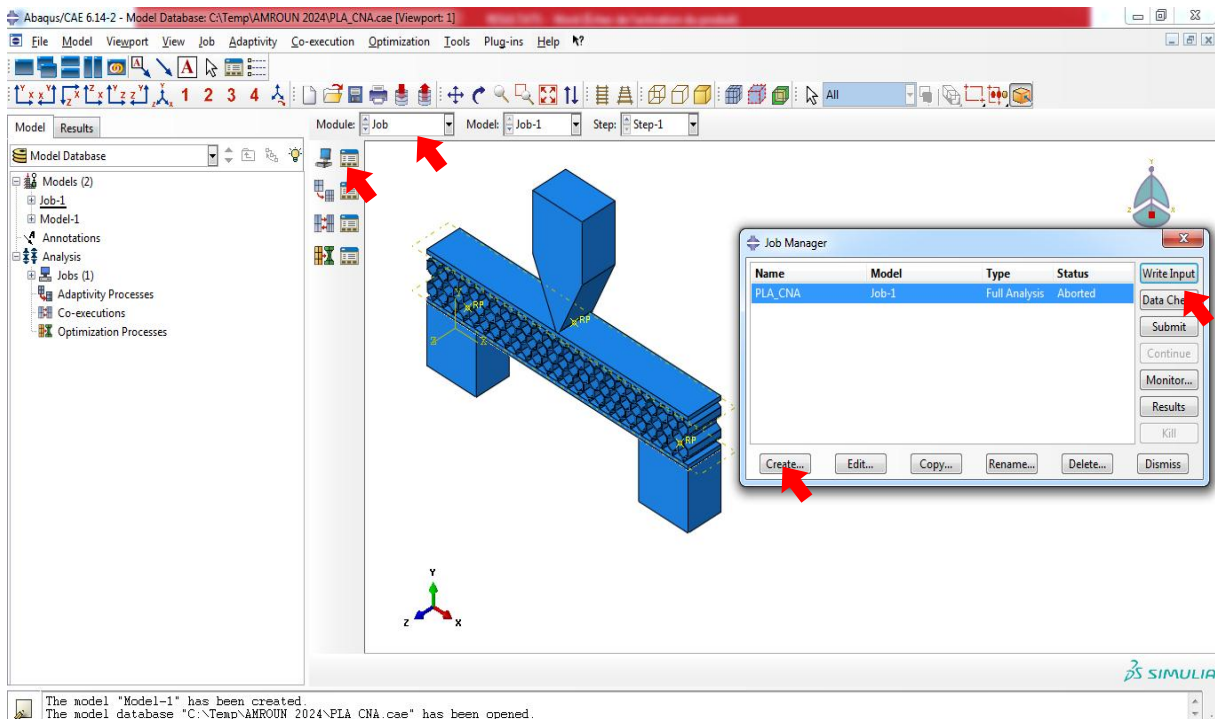




Figure IV.9: Création du fichier résultats (Module Job)

IV.3.8. Visualisation des résultats (Module visualisation):

Le module visualisation permet l'affichage graphique ou numérique des résultats. L'utilisateur voit le résultat du calcul numérique dans « Results » : soit par la visualisation des déformations dans « Field output » comme les déformations, les contraintes, la vitesse ou les force ; soit par les courbes dans « Historie Output » comme l'énergie cinétique ou l'énergie totale de l'ensemble du modèle, l'énergie de dissipation ou des déformations. On peut visualiser la forme

déformée du modèle, en cliquant sur les outils :  ou 

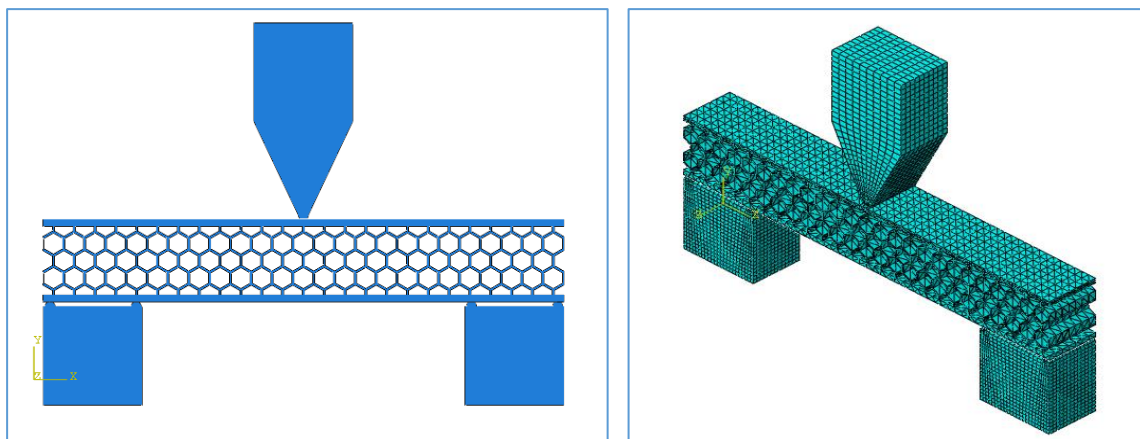


Figure IV.10: Modèle d'essai de flexion en trois points sur Abaqus

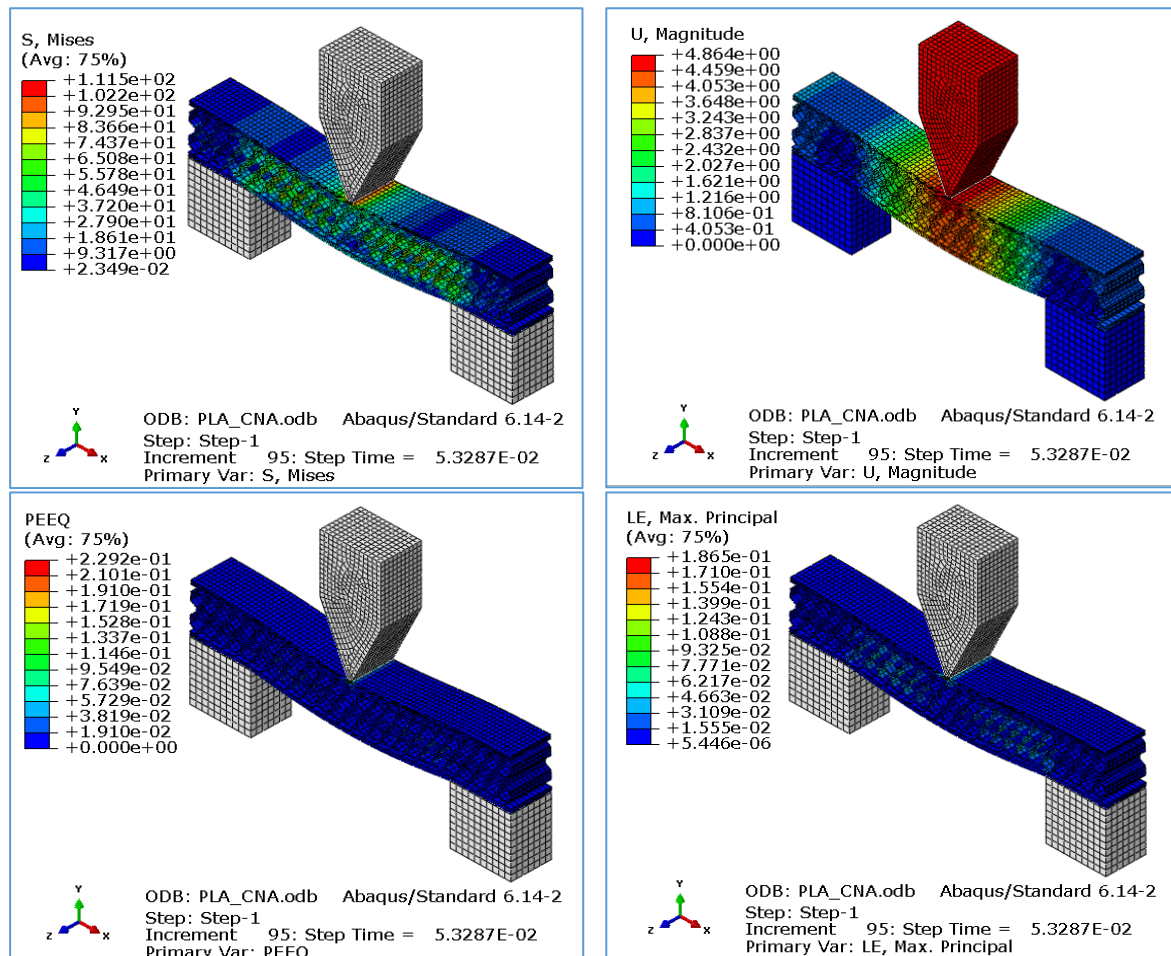


Figure IV.11: Visualisation et exploitation des résultats.

IV.3.9. Conclusion:

La simulation d'un test de flexion avec Abaqus suit un processus méthodique, qui comprend plusieurs étapes clés. Tout d'abord, il faut modéliser la géométrie de manière précise. Ensuite, il est nécessaire de définir les matériaux utilisés dans la simulation. Après cela, il faut procéder au maillage de la géométrie pour préparer le modèle pour l'analyse. Une fois le maillage effectué, il est crucial de déterminer les conditions aux limites et le chargement qui seront appliqués à la simulation.

Après la configuration de la simulation, il est temps d'exécuter le modèle et de recueillir les données résultantes. Ensuite, une analyse des résultats est effectuée pour interpréter les réponses du modèle. Enfin, il est nécessaire de valider les résultats obtenus en les comparant à des données expérimentales ou analytiques afin d'évaluer l'exactitude du modèle et de l'approche de simulation. En suivant ces étapes avec précision, il est possible d'obtenir des résultats fiables et significatifs.

V. Conclusion général:

Dans cette étude, notre focalisation s'est portée sur la sélection de matériaux appropriés pour l'impression 3D, avec un accent particulier sur la conception et la fabrication de structures de panneaux isolants par cette méthode. Notre objectif principal était d'intégrer ces cellules en nid d'abeilles, incluant des structures réentrantes et tétrachirales, offrant ainsi des produits solides, légers et économiques, adaptés aux diverses exigences des secteurs de la construction et de l'industrie.

Ce qui rend cette approche distinctive, c'est l'utilisation de filaments de PLA fondu, un polymère biodégradable issu de ressources renouvelables telles que les déchets alimentaires ou les résidus de canne à sucre. Cette décision vise à garantir la durabilité et la résistance environnementale des panneaux, contribuant ainsi à réduire l'empreinte carbone associée à leur cycle de vie, de la production à l'utilisation. En favorisant les matériaux respectueux de l'environnement, cette démarche s'inscrit dans les exigences contemporaines de durabilité et de responsabilité environnementale.

LES REFERENCES

1. A.CHEMAMI, *Etude de la Performance des Matériaux Composites Sandwichs - Application en Fatigue, Mémoire doctorat Université Badji Mokhtar – Annaba 2012.*
2. Achilles Petras *Design of Sandwich Structures, Dissertation of Doctorat Cambridge University Engineering Department, December 1998.*
3. N.KAOUCHE, *Prise en Compte Du Vieillissement et De L'endommagement Dans Le Dimensionnement De Structures En Matériaux Composites, Mémoire Magister Université Oran Mohamed Boudiaf 2017.*
4. A.CHERIF MOUAKI, *comportement mécanique d'un matériau composite sandwich, Mémoire de Master Université Mohamed Kheider-Biskra 2017.*
5. F.BOUROUIS, *'Etude Du Comportement Mécanique De Structures Sandwiches a Différents Matériaux De Revêtements, Mémoire de Magister, ' Université Mntouri – Constantine.*
6. A.GUERMITE, *'Etude expérimentale des structures sandwiches à base des bio-sources, Mémoire de master Université Mohamed Kheider-Biskra 2018.*
7. K.BENFADEL, *Élaboration et caractérisation de panneaux Sandwichs à matrice cimentaire destinés à la construction, Mémoire de Magister, 'Université M'hamed Bougara- Boumerdes 2015.*
8. H.DJEMAI, *'Contribution à l'étude de l'endommagement dans les matériaux composites sandwiches, Mémoire Doctorat, ' Université Mohamed Kheider-Biskra 2017.*
9. Slamani, M., S. Amroune, R. Benyettou, H. Fouad, M. Jawaid, and R. Khiari, *Water Absorption Behavior of Date Palm Fruit Branches Fiber (DPF) Composites: Experimental and Statistical Analyses. Journal of Natural Fibers, 2024. 21(1): p. 2375530.*
10. M.MOUSSAOUI, *' Analyse de la rupture des tubes en matériaux composites sous pression, Mémoire de Master Université Mohamed Kheider-Biskra 2018.*
11. J.M. Bertholot, *" Mécanique des Matériaux et Structures Composites" ISMANS Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, Le Mans, France, Septembre 2013.*
12. www.castrocompositesshop.com 08/07/2019
13. A.LACHGUER, M.AKYOUD, *'les matériaux sandwich et les risques d'instabilités géométriques locales,' Ecole Des Mines De Douai, 2013.*
14. www.spi-groupe.com, 08/07/2019

15. M. Xia, K. Kemmochi, H. Takayanagi, 'Analysis of filament-wound fiber-reinforced sandwich pipe under combined internal pressure and thermo mechanical loading,' *Composite Structures* 51 (2001) 273-283 article.
16. Amroune, S., A. Belaadi, M. Zaoui, N. Menaseri, B. Mohamad, K. Saada, and R. Benyettou, *Manufacturing of rapid prototypes of mechanical parts using reverse engineering and 3D Printing. J. Serbian Soc. Comput. Mech*, 2021. 15(1): p. 167-176.
17. ZERGANE, S., S. AMROUNE, M. SLAMANI, K. SAADA, M. ZAOU, C. FARSI, and A. BAKHTI, INVESTIGATION FOR THE AUTOMATED GENERATION OF TOOLPATHS ON A 3AXIS CNC MACHINE. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2024. 22(1).
18. <http://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archivesth12/archives-travail-des-metiaux-assemblage-tiabt/archive-1/prototypagerapide-bm7017/definition-du-prototypagerapide-bm7017niv10002.html>
19. Tablit, S., R. Krache, S. Amroune, M. Jawaid, A. Hachaichi, A.S. Ismail, and A. Meraj, *Effect of chemical treatments of arundo donax L. fibre on mechanical and thermal properties of the PLA/PP blend composite filament for FDM 3D printing. Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2024. 152: p.
20. 106438. <https://formlabs.com/fr/blog/materiaux-impression-3d/>
21. <https://www.3ds.com/fr/make/solutions/blog/pros-and-cons-3d-printing>
22. Sebastian Marian Zaharia I,* , Mihai Alin Pop, Department of Manufacturing Engineering, Transilvania University of Brasov, 500036 Brasov, Romania.
23. Kui Wang , Depeng Wang, Yisen Liu *, Huijing Gao, Chengxing Yang * and Yong Peng, Key Laboratory of Traffic Safety on Track of Ministry of Education, School of Traffic & Transportation Engineering, Central South University, Changsha 410075, China; kui.wang@csu.edu.cn (K.W.); wangdepeng@csu.edu.cn (D.W.); ghjghj@csu.edu.cn (H.G.); yong_peng@csu.edu.cn (Y.P.)
24. Tiantian Li, Lifeng Wang ; Department of Mechanical Engineering, State University of New York at Stony Brook, Stony Brook, NY 11794, USA
25. Mohammadreza Mohammadnejad , Amin Montazeri , Ehsan Bahmanpour, Maryam Mahnama, School of Mechanical Engineering, College of Engineering, University of Tehran, Tehran, Iran
26. C393/C393M – 20 Standard Test Method for Core Shear Properties of Sandwich Constructions by Beam Flexure I

27. Andrei Ioan Indres, | Dan Mihai Constantinescu | Oana Alexandra Mocian, *Bending behavior of 3D printed sandwich beams with different core topologies*, Department of Strength of Materials, University POLITEHNICA of Bucharest, Bucharest, Romania.
28. ISO 178:2019; *plastics – determination of flexural properties*
29. ASTM D790 *Essai de flexion 3 points Plastique*.
30. H. Yazdani Sarvestani¹, A.H. Akbarzadeh^{1, 2*}, H. Niknam¹, K. Hermenean³ *IAM3L Laboratory, Department of Bioresource Engineering, McGill University, Island of Montreal, QC H9X 3V9 Canada.*
31. Amroune, S., Belaadi, A., Dalmis, R., Seki, Y., Makhlouf, A., & Satha, H. (2022). *Quantitatively investigating the effects of fiber parameters on tensile and flexural response of flax/epoxy biocomposites*. *Journal of Natural Fibers*, 19(6), 2366-2381..
32. ISO 527-1:2012, *Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles*.
33. ISO 604:2002, *Plastiques — Détermination des propriétés en compression*.
34. Amroune, S., A. Bezazi, A. Belaadi, C. Zhu, F. Scarpa, S. Rahatekar, and A. Imad, *Tensile mechanical properties and surface chemical sensitivity of technical fibres from date palm fruit branches (Phoenix dactylifera L.)*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2015. 71: p. 95-106.
35. Lekrine, A., A. Belaadi, A. Makhlouf, S. Amroune, M. Bouchak, H. Satha, and M. Jawaid, *Structural, thermal, mechanical and physical properties of Washingtonia filifera fibres reinforced thermoplastic biocomposites*. *Materials Today Communications*, 2022. 31: p. 103574.
36. Amroune, S., A. Belaadi, M. Bouchak, A. Makhlouf, and H. Satha, *Statistical and experimental analysis of the mechanical properties of flax fibers*. *Journal of Natural Fibers*, 2022. 19(4): p. 1387-1401.
37. Saada, K., Amroune, S., & Zaoui, M. , *Prediction of mechanical behavior of epoxy polymer using Artificial Neural Networks (ANN) and Response Surface Methodology (RSM)*. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2023. 17(66): p. 191-206.
38. Siguerdjidjene, H., A. Houari, K. Madani, S. Amroune, M. Mokhtari, B. Mohamad, C. Ahmed, A. Merah, and R. Campilho, *Predicting damage in notched functionally graded materials plates through extended finite element method based on computational simulations*. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 2024. 18(70): p. 1-23.
39. Elhadi, A., M. Slamani, S. Amroune, M. Arslane, J.-F. Chatelain, M. Jawaid, and T. Bidi, *Precision drilling optimization in jute/palm fiber reinforced hybrid composites*. *Measurement*, 2024: p. 115066.
40. Saada, K., S. Amroune, M. Zaoui, M. Jawaid, M. Benarioua, and C. Farsi, *Optimizing water Absorption's influence on composite mechanics through response surface methodology*. *Journal of Composite Materials*, 2024: p. 00219983241264357.
41. Houari, A., K. Madani, S. Amroune, L. Zouambi, and M. Elajrami, *Numerical study of the mechanical behaviour and damage of fgm bent pipes under internal pressure and combined bending moment*. *acta mechanica et automatica*, 2023. 17(3): p. 460-468.

42. AMAR, A.A., A. BERKACHE, S. AMROUNE, B. NOURA, and A. BOUMEHANI, NUMERICAL MODELING OF DYNAMIC STALL IN A VERTICAL AXIS WIND TURBINE. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2022. 20(4).
43. Abdelkader, D., E. Mohamed, K. Nadia, A. Houari, S. Amroune, and K. Madani, Numerical analysis reveals cold expansion's influence on rivet hole stress and j-integral values. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2024. 22(2).
44. Elhadi, A., S. Amroune, A. Houari, and M. Kouder, Normal Temperature Mechanical Properties of 6082 Aluminium Alloy as a Function of Tempering Temperature: Experimental and Numerical Approach. *acta mechanica et automatica*, 2024. 18(3): p. 385-392.
45. Zergane, S., C. Farsi, S. Amroune, S. Benkherbache, and N. Menasri, A New Study on the Effect of the Partial Wake Generated in a Wind Farm. *Energies*, 2024. 17(6): p. 1498.
46. Amroune, S., A. Belaadi, N. Menasri, M. Zaoui, B. Mohamad, and H. Amin, New approach for computer-aided static balancing of turbines rotors. *Diagnostyka*, 2019. 20(4): p. 95-101.
47. Benyettou, R., S. Amroune, M. Slamani, K. Saada, H. Fouad, M. Jawaid, and S. Sikdar, Modelling and optimization of the absorption rate of date palm fiber reinforced composite using response surface methodology. *Alexandria Engineering Journal*, 2023. 79: p. 545-555.
48. Ferfari, O., A. Belaadi, M. Boumaaza, S. Amroune, H. Alshahrani, and M. Ka Khan, Mechanical properties and statistical analysis of *Syagrus Romanzoffiana* palm cellulose fibers. *Journal of Composite Materials*, 2024. 58(6): p. 755-778.
49. Belaadi, A., M. Boumaaza, S. Amroune, and M. Bouchak, Mechanical characterization and optimization of delamination factor in drilling bidirectional jute fibre-reinforced polymer biocomposites. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. 111: p. 2073-2094.
50. Amroune, S., A. Bezazi, A. Dufresne, F. Scarpa, and A. Imad, Investigation on Microstructure, Tensile Properties and Fatigue Characterization of Porous Date Palm Fiber. *Journal of Natural Fibers*, 2022. 19(17): p. 15751-15764.
51. Amroune, S., A. Bezazi, A. Dufresne, F. Scarpa, and A. Imad, Investigation of the date palm fiber for green composites reinforcement: thermo-physical and mechanical properties of the fiber. *Journal of Natural Fibers*, 2021. 18(5): p. 717-734.
52. Bezazi, A., S. Amroune, F. Scarpa, A. Dufresne, and A. Imad, Investigation of the date palm fiber for green composites reinforcement: Quasi-static and fatigue characterization of the fiber. *Industrial Crops and Products*, 2020. 146: p. 112135.
53. Mohamad, B., J. Karoly, A. Zelentsov, and S. Amroune, Investigation of perforated tube configuration effect on the performance of exhaust mufflers with mean flow based on three-dimensional analysis. *Archives of Acoustics*, 2021: p. 561-566-561-566.
54. Laifa, F., M. Rokbi, S. Amroune, M. Zaoui, and Y. Seki, Investigation of mechanical, physicochemical, and thermal properties of new fiber from *Silybum marianum* bark fiber. *Journal of Composite Materials*, 2022. 56(14): p. 2227-2238.
55. Benyettou, R., S. Amroune, M. Slamani, and A. KILIÇ, Investigation of machinability of biocomposites: modeling and ANN optimization. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2023. 21(1).
56. Berkache, A., S. Amroune, M. Jawaid, and B. Singh, Investigating crossflow interactions in multi-perforation cooling systems: Experimental and numerical insights. *Applied Thermal Engineering*, 2024. 252: p. 123681.
57. FARSI, C., S. AMROUNE, M. SILEM, M. LATRACH, and S. ZERGANÉ, INFLUENCE OF THE ROTATION SPEED OF ROTARY FRICTION WELDING ON THE MICRO-HARDNESS OF FIXED AND MOBILE WELDED PARTS. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2024. 22(2).
58. Bedjaoui, A., A. Belaadi, S. Amroune, and B. Madi, Impact of surface treatment of flax fibers on tensile mechanical properties accompanied by a statistical study. *International Journal of Integrated Engineering*, 2019. 11(6): p. 10-17.

59. Moussaoui, N., L. Benhamadouche, Y. Seki, S. Amroune, A. Dufresne, M. Jawaid, and H. Fouad, The impact of physicochemical treatments on the characteristics of *Ampelodesmos mauritanicus* plant fibers. *Cellulose*, 2023. 30(12): p. 7479-7495.
60. Mohamad, B., J. Karoly, A. Zelentsov, and S. Amroune, A hybrid method technique for design and optimization of Formula race car exhaust muffler. *International Review of Applied Sciences and Engineering*, 2020.
61. Farsi, C., S. Amroune, M. Moussaoui, B. Mohamad, and H. Benkherbache, High-Gradient Magnetic Separation Method for Weakly Magnetic Particles: an Industrial Application. *Metallophysics & Advanced Technologies/Metallofizika i Novejsie Tehnologii*, 2019. 41(8).
62. ZERGANE, S., S. AMROUNE, M. SLAMANI, M. ZAOU, C. FARSI, K. SAADA, and A. BAKHTI, G-CODE GENERATION FOR MACHINING SPUR GEAR IN CNC MACHINES USING THE IMACHINING STRATEGY. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2023. 21(4).
63. Mohamad, B., M.Q. Ali, H.A. Neamah, A. Zelentsov, and S. Amroune, Fluid dynamic and acoustic optimization methodology of a formula-student race car engine exhaust system using multilevel numerical CFD models. *Diagnostyka*, 2020. 21.
64. Farsi, C., S. Amroune, M. Slamani, M. Zaoui, A. Houari, M. Kouder, and D. Boujemaa, FABRICATING A MOLD USING CNC TECHNOLOGY FOR COMPOSITE MATERIAL TENSILE TEST SAMPLES. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2024. 22(2).
65. Belaadi, A., S. Amroune, Y. Seki, O.Y. Keskin, S. Köktaş, M. Bourchak, A. Dufresne, H. Fouad, and M. Jawaid, Extraction and characterization of a new lignocellulosic fiber from *Yucca Treculeana* L. leaf as potential reinforcement for industrial biocomposites. *Journal of Natural Fibers*, 2022. 19(15): p. 12235-12250.
66. BERKACHE, A. and S. AMROUNE, EXPLORATION OF THE COMPUTATIONAL CLOSURE TECHNIQUES APPLIED TO ANALYZE THE FILM COOLING PROCESS OF THE TURBINE BLADES. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2024. 22(1).
67. Abdelmalek, E., A. Salah, Z. Moussa, B. Mohamad, and B. Ali, Experimental investigations of surface wear by dry sliding and induced damage of medium carbon steel. *Diagnostyka*, 2021. 22(2): p. 3-10.
68. Benyettou, R., S. Amroune, S. Mohamed, Y. Seki, and A. Dufresne, Experimental investigation of the absorption behavior of date palm fiber reinforced iso-polyester composites: artificial neuron network (ANN) modeling. *Journal of Natural Fibers*, 2022. 19(17): p. 15902-15918.
69. Merah, A., A. Houari, K. Madani, M. Belhouari, S. Amroune, C. Ahmed, C. Zineelabidine, and R. Yahj, Experimental investigation into the tensile strength post-repair on damaged Aluminium 2024-T3 plate using hybrid bonding/riveting.
70. ELHADI, A., S. AMROUNE, A. HOUARI, M. SLAMANI, and M. KOUIDER, EXPERIMENTAL AND NUMERICAL STUDY OF THE INFLUENCE OF TEMPERING TEMPERATURE ON THE TENSILE BEHAVIOR OF LOW ALLOY STEEL AISI 4140.
71. Saada, K., S. Amroune, M. Zaoui, A. Houari, K. Madani, and A. Hachaichi, Experimental and numerical study of the effect of the presence of a geometric discontinuity of variable shape on the tensile strength of an epoxy polymer. *acta mechanica et automatica*, 2023. 17(2).
72. Berkache, A., S. Amroune, A. Golbaf, and B. Mohamad, Experimental and numerical investigations of a turbulent boundary layer under variable temperature gradients. *Journal of the Serbian Society for Computational Mechanics*, 2022. 16(1): p. 1-15.
73. Saada, K., C. Farsi, S. Amroune, M. Fnides, M. Zaoui, and H. Heraiz, Examining the bending test properties of bio-composites strengthened with fibers through a combination of experimental and modeling approaches. *Journal of Composite Materials*, 2024. 58(12): p. 1483-1499.
74. Farsi, C., S. Amroune, M. Slamani, M. Zaoui, A. Houari, K. Zouaoui, M. Kouder, S. Zergane, and B. Nasserredine, Examining and developing a medically relevant component through reverse engineering. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2024. 22(2).

75. Elhadi, A., S. Amroune, M. Slamani, M. Jawaid, U. Koklu, and T. Bidi, Evaluation of drilling by induced delamination of hybrid biocomposites reinforced with natural fibers: A statistical analysis by RSM. *Journal of Composite Materials*, 2024: p. 00219983241271035.
76. Moussaoui, M., S. Amroune, A. Tahiri, and B.K. Hachi, Engineering Solid Mechanics. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 2020.
77. Makhoulouf, A., A. Belaadi, S. Amroune, M. Bourchak, and H. Satha, Elaboration and characterization of flax fiber reinforced high density polyethylene biocomposite: effect of the heating rate on thermo-mechanical properties. *Journal of Natural Fibers*, 2022. 19(10): p. 3928-3941.
78. Mohamed, E., Mohamed, B., Houari, A., Amroune, S., & Campilho, R. D. S. G., Effect of modifying the thickness of the plate at the level of the overlap length in the presence of bonding defects on the strength of an adhesive joint. *Advances in Aircraft and Spacecraft Science*, 2024. 11(1): p. 83.
79. Belaadi, A., S. Amroune, and M. Bourchak, Effect of eco-friendly chemical sodium bicarbonate treatment on the mechanical properties of flax fibres: Weibull statistics. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2020. 106(5): p. 1753-1774.
80. Amroune, S., A. Belaadi, and B. Mohamad. Effect of alkaline treatments and volume fractions on the mechanical and physico-chemical properties of HDPE/SPDF green composites. in *The 8th International Conference on Structural Analysis of Advanced Materials*. 2018.
81. Hachaichi, A., S. Nekkaa, S. Amroune, M. Jawaid, O.Y. Althman, and A. Dufresne, Effect of alkali surface treatment and compatibilizer agent on tensile and morphological properties of date palm fibers-based high density polyethylene biocomposites. *Polymer Composites*, 2022. 43(10): p. 7211-7221.
82. Amroune, S., *Dessin Assisté par Ordinateur DAO2018: Éditions universitaires européennes*.
83. Mohamad, B., J. Karoly, A. Zelentsov, and S. Amroune, A Comparison Between Hybrid Method Technique and Transfer Matrix Method for Design Optimization of Vehicle Muffler. *FME Transactions*, 2021. 49(2).
84. Maache, M., A. Bezazi, S. Amroune, F. Scarpa, and A. Dufresne, Characterization of a novel natural cellulosic fiber from *Juncus effusus* L. *Carbohydrate polymers*, 2017. 171: p. 163-172.
85. AMROUNE, S., *Caractérisations mécaniques et étude de l'endommagement des matériaux composites renforcés par des fibres de palmier*, 2016.
86. Moussaoui, M., S. Amroune, A. Tahiri, and B. Hachi, Brittle fracture investigation from disc specimen weakened by U-notch in mixed mode I+ II. *Engineering Solid Mechanics*, 2020. 8(4): p. 337-352.
87. Heraiz, H., C. Farsi, H. Makri, S. Amroune, A. Belaadi, K. Saada, M. Zaoui, and M.I. Beddiar, Assessment of mechanical and physicochemical properties of palm fiber composites: Effect of alkaline treatment and volume alterations. *Journal of Composite Materials*, 2024. 58(15): p. 1789-1800.
88. Benyettou, R., S. Amroune, M. Slamani, Y. Seki, A. Dufresne, M. Jawaid, and S. Alamery, Assessment of induced delamination drilling of natural fiber reinforced composites: a statistical analysis. *journal of materials research and technology*, 2022. 21: p. 131-152.
89. Elhadi, A., S. Amroune, M. Slamani, M. Arslane, and M. Jawaid, Assessment and analysis of drilling-induced damage in jute/palm date fiber-reinforced polyester hybrid composite. *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2024: p. 1-16.
90. AMROUNE, S. and M. SLAMANI, ANALYSIS AND MODELING OF THERMALLY INDUCED POSITIONING ERRORS BASED ON LASER INTERFEROMETER MEASUREMENTS. *Academic Journal of Manufacturing Engineering*, 2023. 21(3).
91. Bezazi, A., S. Amroune, and F. Scarpa, Analyse statistique et effet des traitements chimique sur le comportement physico-mécanique des fibres des bras de grappe des palmiers dattier. *Synthèse: Revue des Sciences et de la Technologie*, 2015. 31: p. 108-120.

92. HOUARI, A., S. AMROUNE, A. CHELLIL, K. MADANI, K. SAADA, and C. FARSI, AN ALGORITHMIC APPROACH FOR THE DISTRIBUTION OF THE BLADES OF A GAS TURBINE ROTOR. Academic Journal of Manufacturing Engineering, 2024. 22(2).