

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université 8 Mai 1945 Guelma
Faculté des Sciences et Technologie
Département de Génie Mécanique

Mémoire de Fin de Cycle
En vue de l'obtention du diplôme

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction mécanique

Thème

**Conception, élaboration et caractérisation
mécanique de structures tubulaire**

Présenté par :

DEKHILI Akram Mohamed Badis

Sous la direction de :

Pr. BEZAZI Abderrezak

Année universitaire: 2023/2024

Remerciements

Je tiens tout d'abord à adresser mes sincères remerciements à Dieu, le Tout-Puissant, pour la santé, la force et les capacités qu'il m'a accordées pour mener à bien ce projet de recherche dans le cadre de mon projet de fin d'étude de Master.

Je tiens également à exprimer ma profonde gratitude à mon encadreur, Monsieur BEZAZI Abderrezak, Professeur à l'Université 8 Mai 1945 Guelma, pour son soutien indéfectible, ses précieux conseils et sa patience tout au long de ce projet de fin d'étude. Sa guidance et son expertise ont été des atouts précieux pour la réalisation de ce mémoire.

Je remercie également les membres du jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant d'évaluer mon travail.

Mes remerciements s'adressent également à Dr BELBAH Ahmed et BETAYEB Mohamed pour leur aide et les corrections apportées à ce mémoire de PFE.

Je remercie l'ensemble des enseignants et tout le personnel du département de Génie Mécanique de l'Université 8 Mai 1945 Guelma pour leur soutien et leur contribution à ma formation.

Enfin, je remercie ma famille notamment mon frère et ma mère et aussi mes collègues et mes amis pour leur soutien indéfectible, leur encouragement et leur compréhension tout au long de mes études.

Dédicace

Ce travail de fin d'études est le fruit de longues années d'efforts et de persévérance, est dédié à :

Ma mère, pilier indéfectible de ma vie, dont l'amour inconditionnel, le soutien sans faille et les encouragements constants ont été mon moteur tout au long de mon parcours. Merci pour ta confiance inébranlable en mes capacités, même lorsque je doutais.

Mon frère et ma famille, pour votre présence bienveillante, vos mots d'encouragement et votre soutien indéfectible dans les moments difficiles. Votre amour a été mon refuge et votre confiance, mon carburant.

Mes amis, pour votre soutien indéfectible, vos encouragements et les moments de joie partagés qui ont illuminé mon parcours. Merci d'avoir cru en moi et en mes rêves.

Tous ceux qui, de près ou de loin, m'ont accompagné et soutenu durant mes études. Professeurs, mentors, camarades de classe, chaque rencontre a contribué à faire de moi la personne que je suis aujourd'hui.

Ce modeste travail est le reflet de mon engagement et de ma détermination à atteindre mes objectifs. Que cette réussite soit le début d'une nouvelle aventure pleine de promesses et d'accomplissements.

Liste des figures

Titre des figures		Page
Figure 1.1	Exemples d'éléments de poutre et de surface dans la nature	6
Figure 1.2	Exemple de cellules ouvertes et cellules fermées	7
Figure 1.3	Exemple d'une Nid d'abeilles	8
Figure 1.4	Exemple d'une Mousse	8
Figure 1.5	Exemple d'un Treillis	8
Figure 1.6	Exemple d'une structure Auxétique [13]	9
Figure 1.7	Structures représentatives en nid d'abeille [14]	10
Figure 1.8	Échantillon de cellules chirales hexagonales fabriqué à partir de plastiques ABS [15]	10
Figure 1.9	Applications des matériaux en nid d'abeille	12
Figure 1.10	Exemples de tubes en nids d'abeilles	13
Figure 1.11	La fusion laser sélective (SLM)	15
Figure 1.12	La stéréolithographie (SLA)	15
Figure 1.13	Modelage par dépôt de fil fondu (FDM)	16
Figure 1.14	Nids d'abeilles périodiques avec différentes formes de cellules	18
Figure 1.15	Trois groupes (rangées) de modèles de disposition de trous circulaires pour nids d'abeilles, où chaque rangée est limitée à quatre configurations données : (A) carré ; (B) structures poreuses expansées non déformées (régions ombrées en vert) et (C) compactes (bouclées) (indiquées en vert) structures poreuses causées	19
Figure 1.16	Relation entre la densité du matériau et les performances mécaniques de : (A) rigidité/résistance à la compression et (B) rigidité/résistance au cisaillement résumée par Ashby	20
Figure 1.17	Les BHTNS inspirés de la structure du bambou : (a) Structure entière du bambou ; (b) Coupe transversale de bambou ; (c) Microstructure SEM du bambou ; (d) spécimen BHTNS ; (e) Crash box du véhicule avec BHTNS.	21

Figure 1.18	Courbe d'écrasement force/déplacement du BHTNS sous expérience de chute de poids	22
Figure 1.19	Comparaison des courbes force d'écrasement/déplacement obtenues expériences et celle de la simulation numérique.	22
Figure 1.20	Noyau BH avec différentes amplitudes d'ondes et numéros d'onde : une autre amplitude des vagues et b différents nombres d'ondes	23
Figure 1.21	Courbes force-déplacement pour le BHSP et le CHSP	24
Figure 1.22	Images optiques de structures en nid d'abeilles (a) carrées, (b) hexagonales et (c) triangulaires composées d'époxy rempli de SiC. Courbes représentatives de contrainte de compression et de déformation pour un nid d'abeille triangulaire imprimé structures sur une gamme de densités relatives	25
Figure 2.1	Nid d'Abeilles plat Hexagonales disposé horizontalement	29
Figure 2.2	Nid d'Abeilles plat hexagonales disposé verticalement	29
Figure 2.3	Nid d'Abeilles plat carrée	30
Figure 2.4	Structures Tubulaires : a) Hexagonal disposé horizontalement ou b) Verticalement et c) Carré	30
Figure 2.5	Filament PLA utilisé	32
Figure 2.6	Imprimante 3D Ultimaker 2	33
Figure 2.7	Les étapes d'impression	34
Figure 2.8	Pièces avant et après nettoyage	35
Figure 2.9	Les structures imprimer en 3D, a) Nid d'Abeilles carée b) Nid d'Abeilles Hexagonal horizontal c) Nid d'Abeilles Hexagonal vertical d) les 3 structure en tube	36
Figure 2.10	Machine d'essai de compression	37
Figure 2.11	Composants de machine de test	38
Figure 2.12	Placement des éprouvettes	40
Figure 3.1	Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NC testés en compression axiale avec une vitesse V_1 .	44
Figure 3.2	Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NC testés en compression axiale avec une vitesse V_2 .	45

Figure 3.3	Photos de l'évolution des déformations des tubes NC de l'éprouvette 1 testée en compression axiale avec une vitesse V_1 .	47
Figure 3.4	Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NH testées en compression axiale avec une vitesse V_1	48
Figure 3.5	Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NH testés en compression axiale avec une vitesse V_2	49
Figure 3.6	Photos de l'évolution des déformations des tubes NH de l'éprouvette 1 testée en compression axiale avec une vitesse V_1 .	51
Figure 3.7	Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NV testés en compression axiale avec une vitesse V_1 .	52
Figure 3.8	Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NV testés en compression axiale avec une vitesse V_1 .	52
Figure 3.9	Photos de l'évolution des déformations des tubes NV de l'éprouvette 1 testée en compression axiale avec une vitesse V_1 .	54
Figure 3.10	Courbe type pour les 3 structures tubulaire.	55
Figure 3.11	Courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NC_E8.	57
Figure 3.12	Faciès de rupture des structures plate en Nid d'abeille carré (NC_E8) lors des essais de compression.	58
Figure 3.13	Courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NH_E8.	59
Figure 3.14	Faciès de rupture des structures plate en Nid d'abeille hexagonale (NH_E8) lors des essais de compression.	60
Figure 3.15	Évolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NV_E8.	61
Figure 3.16	Courbe type de structures plats	62
Figure 1.17	Faciès de rupture des structures plate en Nid d'abeille hexagonale (NV_E8) lors des essais de compression.	63

Liste des tableaux

Numéro du tableau	Titre du tableau	Page
Tableau 2.1	Paramètres d'impression	34
Tableau 3.1	Tableau des valeurs des résultats des tests obtenus pour la structure tubulaires NC.	46
Tableau 3.2	Tableau des valeurs des résultats des tests obtenus pour la structure tubulaire NH.	51
Tableau 3.3	Tableau des valeurs des résultats des tests obtenus pour la structure tubulaire NV.	53
Tableau 3.4	Tableau récapitulatif des valeurs de la force et du déplacement de la structure plate NC_E8 testée en compression.	57
Tableau 3.5	Tableau récapitulatif des valeurs de la force et du déplacement de la structure plate NH_E8 testée en compression.	59
Tableau 3.6	Tableau récapitulatif des valeurs de la force et du déplacement de la structure plate NV_E8 testée en compression.	62

Table des matières

Liste des figures		
Liste des tableaux		
Résumé		
Introduction Générale		2
Chapitre 1 : Généralité sur les matériaux cellulaires, structures en nid d'abeille et état de l'art		
1.1	Introduction	5
1.2	Définition des structures cellulaires	5
1.3	Classification des matériaux cellulaires	6
1.3.1	<i>Structure cellulaire</i>	6
1.3.2	<i>Matériau de base</i>	7
1.3.3	Géométrie	7
1.4	Propriétés des matériaux cellulaires	9
1.5	Structures en nid d'abeilles	9
1.5.1	Définition des géométries en nid d'abeilles	9
1.5.2	Comportement mécanique	11
1.5.3	Fabrication	11
1.5.4	Applications	11
1.6	Nid d'abeille en forme de tube	12
1.6.1	Propriétés et avantages des structures tubulaires en nid d'abeille	13
1.6.2	Applications des tubes en nid d'abeille	13
1.6.3	Fabrication de structures et tube en nid d'abeille avec l'impression 3D	14
1.6.4	Impression 3D de structures en nid d'abeilles avec du PLA	16

1.7	Etat de l'art	17
1.8	Conclusion	27
Chapitre 2 : Méthodologie et Matériaux		
2.1	Introduction	28
2.2	Conception et Modélisation	28
2.2.1	Panneaux plats en Nid d'Abeilles	29
2.1.2	Structures Tubulaires	30
2.1.3	Paramètres de Conception	31
2.2	Sélection des Matériaux	31
2.3	Elaboration des panneaux et tubes nid d'abeille	32
2.3.1	Paramètres d'impression	33
2.3.2	Impression des pièces	34
2.3.3	Post-traitement	35
2.4	Machine de traction	36
2.4.1	Présentation du système	38
2.4.2	Essais Mécaniques	39
2.4.3	Analyse	40
2.5	Conclusion	41
Chapitre 3 : Analyse des Résultats Expérimentaux de la Compression des Structures en Nid d'Abeille		
3.1	Introduction	43
3.2	Essais de compression axiale	43
3.3	Analyse des résultats pour les structures tubulaires	43
3.3.1	Structures Carrées (NC)	43
3.3.2	Structures hexagonales horizontales (NH)	48

3.3.3	Structures Hexagonales Verticales (NV)	52
3.4	Analyse des résultats pour les structures plates	55
3.4.1	Nid d'abeille carré (NC_E8)	56
3.4.2	Nid d'abeille hexagonal horizontal (NH_E8)	58
3.4.3	Nid d'abeille hexagonal vertical (NV_E8)	61
3.5	Conclusion	64
Conclusion Générale		66
Références bibliographiques		68

Résumé

Ce mémoire de fin d'études porte sur la conception, l'élaboration de structures plate et tubulaire en nid d'abeilles fabriquées par impression 3D à partir d'acide poly-lactique (PLA) et l'étude des performances mécaniques sous chargement en compression axiale statique. L'objectif principal est d'évaluer l'influence de la géométrie des structures cellulaires (carrée et hexagonale ayant les cellules disposées horizontalement et verticalement) et de la vitesse de chargement sur leur résistance à la compression monotone. Les résultats expérimentaux montrent que la géométrie des cellules influence significativement la résistance la compression ainsi que le mode d'endommagement des structures. L'augmentation de la vitesse de déformation a entraîné une légère diminution de la résistance à la compression, mettant en évidence le comportement viscoélastique du PLA.

Abstract

This Master thesis focuses on the design and development of flat and tubular honeycomb structures manufactured by 3D printing from poly-lactic acid (PLA) and the study of mechanical performances under loading in static axial compression. The main objective is to evaluate the influence of the geometry of the cellular structures (square and hexagonal having the cells arranged horizontally and vertically) and the loading speed on their resistance to monotonic compression. The experimental results show that the geometry of the cells significantly influences the compressive strength as well as the mode of damage of the structures. Increasing the strain rate resulted in a slight decrease in compressive strength, highlighting the viscoelastic behavior of PLA.

ملخص

تركز هذه الدراسة على تصميم وتطوير هياكل قرص العسل لعينات مسطحة وانبوبية مصنعة بواسطة طباعة ثلاثية الأبعاد، بمادة حمض البولولي لاكتيك (PLA) تحت التحميل في الضغط المحوري الثابت وتقوم على دراسة الأداء الميكانيكي وتقييم تأثير هندسة الهياكل الخلوية (المربعة والسداسية التي تحتوي على خلايا مرتبة أفقيًا وعموديًا) وسرعة التحميل على مقاومتها للضغط الرتيب. حيث أظهرت النتائج التجريبية أن هندسة الخلايا تؤثر بشكل كبير على قوة الضغط وكذلك طريقة تلف الهياكل، مما أدى الى زيادة معدل الانفعال الذي أظهر انخفاض طفيف في قوة الضغط، وهذا ما يسلط الضوء على السلوك اللزج المرن لـ PLA.

*Introduction
Générale*

Introduction Générale

À l'ère moderne, la quête incessante de l'optimisation des performances, propulse la recherche et le développement de matériaux et de structure innovants. Dans ce contexte, les structures cellulaires, caractérisés par leur formes interne aérée (contenant du vide), s'imposent comme une solution prometteuse. Inspirés par la nature, où l'efficacité et la légèreté sont primordiales les structures cellulaires offrent un rapport résistance/poids exceptionnel, ainsi que des propriétés d'isolation thermique et acoustique remarquables. Parmi la variété de structures cellulaires existantes, celle des en nid d'abeille ayant une forme hexagonale distinctive, suscitent un intérêt croissant dans de nombreux domaines d'application. De l'aérospatiale à l'automobile, en passant par la construction et le biomédical, leur capacité à allier légèreté, résistance mécanique et absorption d'énergie en fait des candidats de choix pour des applications innovantes et durables.

L'essor des technologies de fabrication additive, notamment l'impression 3D, a considérablement élargi le champ des possibles en matière de conception et de fabrication de structures en nid d'abeille. La possibilité de créer des géométries complexes avec un contrôle précis de la microstructure qui ouvre la voie à des structures aux propriétés mécaniques et fonctionnelles optimisées.

Ce mémoire de fin d'études de Master s'inscrit dans cette dynamique de recherche et d'innovation. L'étude se focalise sur les performances mécaniques de structures en nid d'abeille fabriquées par impression 3D à partir d'acide poly-lactique (PLA), un bioplastique biodégradable et biosourcé. L'objectif principal de ce travail est d'évaluer l'influence de la géométrie des cellules (carrée, hexagonale horizontale, hexagonale verticale) conçue sous forme de structures tubulaires et plates et de la vitesse de chargement sur la résistance en compression. Une attention particulière sera portée sur l'analyse des modes de d'endommagement et sur la comparaison des performances des différentes configurations étudiées.

En plus d'une introduction générale et une conclusion générale, ce mémoire est constitué de trois chapitres :

- Le chapitre 1 est consacré à une étude bibliographique assez approfondie sur les structures cellulaires et en particulier sur les nids d'abeille. Il présente leurs différentes classifications, leurs propriétés, leurs méthodes de fabrication et leurs applications, tout en mettant l'accent sur les avancées récentes dans ce domaine.

Introduction Générale

- Dans le chapitre 2 décrit en détail la méthodologie utilisée dans le cadre de cette recherche. Il présente les différentes étapes de conception, de modélisation, de fabrication et d'essai des structures en nid d'abeille étudiées.

- Le dernier chapitre est dédié à la présentation et à la discussion des résultats expérimentaux obtenus lors des tests de compression des structures nids d'abeilles tubulaires et plate élaborés. Il met en lumière l'influence de la géométrie des cellules et de la vitesse de chargement sur la résistance en compression. De plus, une comparaison des performances des différentes configurations de structures en nids d'abeilles a été aussi discutés.

En conclusion, ce mémoire de fin d'études vise à apporter une contribution à la compréhension du comportement mécanique des structures en nid d'abeille imprimées par une imprimante 3D. Les résultats obtenus permettront d'orienter la conception et l'optimisation de ces structures prometteurs pour des applications innovantes dans divers domaines.

Chapitre 1

**Généralité sur les matériaux cellulaires, structures
en nid d'abeille et état de l'art**

1. Introduction

Les matériaux cellulaires, caractérisés par leur structure internes composées de cellules ou de vides, présentent un intérêt grandissant dans de nombreux domaines d'application. Leur légèreté, leur capacité d'absorption d'énergie et leurs propriétés d'isolation thermiques et acoustiques en font des candidats de choix pour des secteurs aussi variés que l'aérospatial, l'automobile, la construction ou encore le biomédical.

Parmi ces structures en nid d'abeilles ceux inspirées par la nature, se distinguent par leur polyvalence et leur excellent rapport résistance/poids. Les avancées récentes dans les techniques de fabrication, notamment par l'impression 3D, ont permis d'élargir encore leurs champs d'applications par l'utilisation possibles de plusieurs variétés de matière ayant des propriétés mécaniques intéressantes et aussi par les diverses possibilités de conception géométrique de structures ayant des formes complexes.

Ce chapitre est consacré à une revue de littérature approfondie sur les structures cellulaires, en mettant l'accent sur ceux en forme de nid d'abeilles. Après avoir défini ces structures et présenté leurs principales caractéristiques, les différentes géométries de nids d'abeilles, leurs propriétés mécaniques et leurs applications ont été aussi présentées. Une attention particulière est portée aux nids d'abeilles en forme de tube, qui offrent des avantages uniques en termes de résistance, de légèreté et d'absorption d'énergie. Enfin, un état de l'art des recherches récentes dans ce domaine est effectué en s'appuyant sur des publications scientifiques.

L'objectif de ce chapitre est de fournir une compréhension globale de ces structures cellulaires en soulignant leur potentiel pour répondre aux défis technologiques actuels et futurs.

1.2 Définition des structures cellulaires

Les structures cellulaires, également appelés solides cellulaires, sont une classe de matériaux caractérisés par une structure contenant de nombreuses cellules ou vides [1]. Ces cellules peuvent être ouvertes, interconnectées et remplies de gaz ou de fluide, ou encore fermées et séparées les unes des autres [2]. L'agencement et la géométrie de ces cellules, ainsi que les propriétés du matériau de base, déterminent les propriétés mécaniques, thermiques et acoustiques uniques des matériaux cellulaires [3] (Figure 1.1).

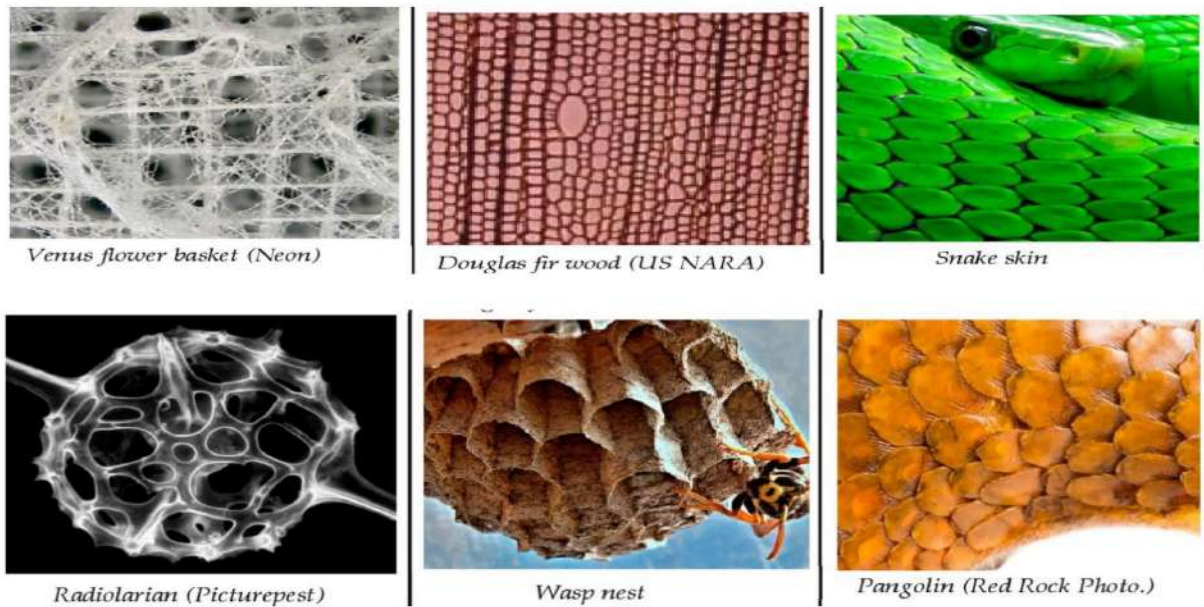


Figure 1.1 : Exemples d'éléments de poutre et de surface dans la nature [4].

1.3 Classification des matériaux cellulaires

Les matériaux cellulaires peuvent être classés en fonction de divers facteurs, à savoir par : structure cellulaire, matériau de base ou par géométrie.

1.3.1 Structure cellulaire

Un des aspects importants de la classification des matériaux cellulaires est la distinction entre cellules fermées et cellules ouvertes (Figure 1.2).

- **Cellules ouvertes** : Les cellules interconnectées permettent le passage des fluides et des gaz, ce qui rend ces matériaux légers et souvent bons pour la filtration ou l'absorption acoustique [2]. Les mousses et les éponges en sont des exemples.
- **Cellules fermées** : Les cellules sont enfermées par des parois, empêchant la circulation des fluides ou des gaz. Cela se traduit par une résistance et une rigidité plus élevée par rapport aux structures à cellules ouvertes [2]. Des exemples de ceci incluent certains types de mousses et de nids d'abeilles.

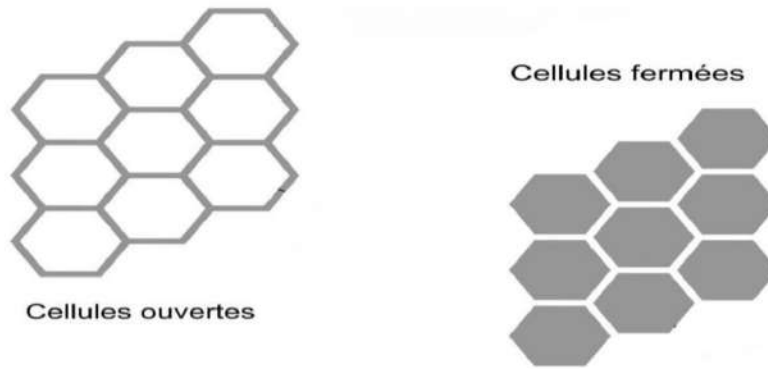


Figure 1.2 : Exemple de cellules ouvertes et cellules fermées [5].

1.3.2 Matériau de base

Le choix du matériau de base influence fortement les propriétés des structures cellulaires final. Ces structures sont généralement fabriquées en polymères, métalliques, céramiques ou composites.

- **Polymères** : Largement utilisés pour leur polyvalence et leur facilité de traitement, les matériaux cellulaires à base de polymères se retrouvent dans diverses applications, de l'emballage aux dispositifs biomédicaux [6].
- **Métalliques** : Offrant une résistance et une rigidité élevées, les matériaux cellulaires métalliques (généralement en alliage d'aluminium) sont souvent utilisés dans des applications structurelles telles que les composants aérospatiaux et automobiles [7].
- **Céramiques** : Possédant une excellente résistance thermique et chimique, les matériaux cellulaires céramiques conviennent aux applications à haute température et aux systèmes de filtration [8].
- **Composites** : La combinaison de différents matériaux permet d'adapter des propriétés et des fonctionnalités spécifiques [9].

1.3.3 Géométrie

Le choix de la structure géométrique de base influence fortement les propriétés du matériau cellulaire final à savoir : Nid d'abeilles, mousses, treillis et Auxétique.

- **Nid d'abeilles** : Les cellules hexagonales régulières offrent un rapport résistance/poids élevé et une absorption d'énergie, ce qui les rend idéales pour les structures légères et la protection contre les chocs [1]. En d'autres termes, elles sont utilisées comme âme dans les panneaux sandwichs (Figure 1.3).



Figure 1.3 : Exemple d'une Nid d'abeilles [10].

- **Mousses** : Ces structures ayant des cellules réparties de manière aléatoire offrent une bonne isolation thermique et acoustique, couramment utilisées dans les applications de construction et d'emballage [2] (Figure 1.4).



Figure 1.4 : Exemple d'une Mousse [11].

- **Treillis** : L'agencement périodique de poutres interconnectées offre une rigidité et une résistance élevées, souvent utilisées dans les applications aérospatiales et biomédicales [3] (Figure 1.5).



Figure 1.5 : Exemple d'un Treillis [12].

- **Auxétique** : Les structures avec un coefficient de Poisson négatif, connue encore sous le nom « Auxétique », présentent un comportement contre-intuitif, se dilatant latéralement lorsqu'elles sont étirées et se contractant lorsqu'elles sont comprimées [2]. Elles offrent un potentiel dans des applications telles que la protection contre les chocs, les capteurs et les dispositifs médicaux (Figure 1.6).



Figure 1.6 : Exemple d'une structure Auxétique [13].

1.4 Propriétés des matériaux cellulaires

Les matériaux cellulaires offrent une large gamme de propriétés intéressantes pour des applications variées à s'avoir :

Structures légères : Leur faible densité les rend idéales pour les applications où la réduction du poids est cruciale, telles que l'aérospatiale et les véhicules de transports.

Absorption d'énergie : La capacité à se déformer et à absorber l'énergie les rend adaptés aux systèmes de protection contre les chocs dans les véhicules et les équipements de protection.

Isolation thermique : Utilisés dans l'isolation des bâtiments et les systèmes de gestion thermique en raison de leur faible conductivité thermique.

Isolation acoustique : La structure cellulaire atténue efficacement les ondes sonores, ce qui les rend utiles pour la réduction du bruit dans les bâtiments et les véhicules.

Applications biomédicales : Les matériaux cellulaires sont utilisés pour les échafaudages en ingénierie tissulaire et les systèmes d'administration de médicaments en raison de leur biocompatibilité et de leur porosité contrôlable.

1.5. Structures en nid d'abeilles

1.5.1 Définition des géométries en nid d'abeilles

Les structures en nid d'abeilles se distinguent par un motif répétitif de cellules hexagonales. Ces cellules peuvent être ouvertes (faces ouvertes) ou fermées (parois solides). La taille des

Chapitre 1

cellules, l'épaisseur des parois et les dimensions globales de la structure, c'est-à-dire sa géométrie, influencent directement sur les propriétés mécaniques. Outre, la configuration hexagonale régulière, on retrouve également des structures en nid d'abeilles carrées et triangulaires [14, 15].



Figure 1.7 : Structures représentatives en nid d'abeille [14].

Au-delà des formes classiques il y a :

Structures chirales : Les structures chirales sont composées d'éléments hélicoïdaux ou rotatifs interconnectés. Lorsqu'elles sont étirées, ces éléments tournent ou se déroulent, ce qui provoque une expansion latérale de la structure (Figure 1.8) [14, 15].

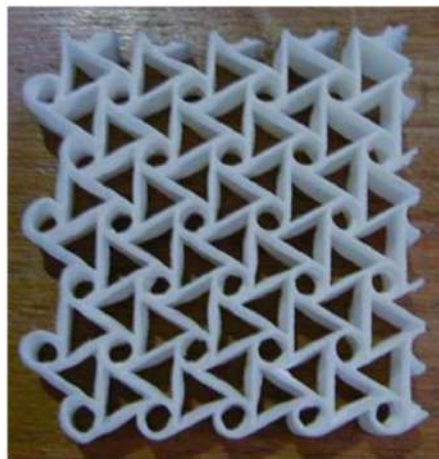


Figure 1.8 : Échantillon de cellules chirales hexagonales fabriqué à partir de plastiques ABS [15].

1.5.2 Comportement mécanique

Les structures en nid d'abeilles présentent d'excellentes propriétés mécaniques grâce à leur configuration cellulaire. Elles possèdent une rigidité et une résistance élevées par rapport à leur poids, ce qui les rend idéales pour les applications légères [14]. Elles possèdent donc une :

- Haute résistance à la compression et à la flexion : La structure en nid d'abeille est très résistante à la compression et à la flexion, ce qui en fait un matériau idéal pour les applications structurelles.
- Légèreté : La structure à parois minces permet de réduire le poids du matériau, ce qui est essentiel pour les applications aéronautiques et aérospatiales.
- Absorption d'énergie : La structure en nid d'abeilles peut absorber l'énergie des chocs et des vibrations, ce qui en fait un bon matériau pour les emballages et les protections.
- Isolation thermique et acoustique : Les cellules peuvent être remplies d'air, ce qui permet d'améliorer l'isolation thermique et acoustique du matériau [14, 16].

1.5.3. Fabrication

Les structures en nid d'abeilles peuvent être fabriqués à partir d'une variété de matériaux, tels que l'aluminium, le papier, le plastique, le bois et la céramique. Les procédés de fabrication peuvent inclure l'extrusion, l'expansion, le moulage ou la découpe par laser.

1.5.4 Applications

Les matériaux en nid d'abeilles, avec leurs structures fascinantes et leurs propriétés uniques, ont conquis une place de choix dans de nombreux domaines (Figure 1.9), tels que :

- *Aéronautique et aérospatiale* : Les matériaux en nid d'abeilles sont largement utilisés dans les avions, les satellites et les fusées pour leur légèreté et leur résistance ;
- *Construction* : Les matériaux en nid d'abeille sont utilisés comme éléments structuraux dans les bâtiments, les ponts et les panneaux solaires ;
- *Emballage* : Les structures en nid d'abeille sont utilisées pour emballer des produits fragiles.
- *Autres applications* : Ces structures sont également utilisées dans les sports (raquettes de tennis, skis), l'automobile (panneaux de carrosserie), les meubles et l'électronique Afin de les protéger contre les chocs (Figure 1.9) [14, 16].



Figure 1.9 : Applications des matériaux en nid d'abeille [14].

1.6 Nid d'abeille en forme de tube

Les nids d'abeille en forme de tube, aussi appelés "*tubes en nid d'abeilles*" ou "*structures tubulaires en nid d'abeilles*", sont une variante fascinante des structures classiques en nid d'abeilles. Ils combinent les avantages d'une structure en nid d'abeilles avec la géométrie d'un tube, offrant des propriétés uniques et de nouvelles possibilités d'applications (Figure 1.10) [14,16].

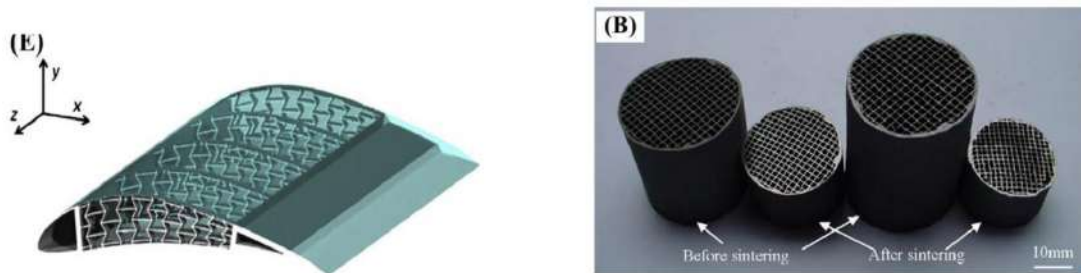


Figure 1.10 : Exemples de tubes en nids d'abeilles [14].

1.6.1 Propriétés et avantages des structures tubulaires en nid d'abeilles

Ces structures offrent plusieurs avantages tels que :

- ✓ **Résistance accrue** : Ces structures tubulaire offrent une résistance accrue à la compression, à la flexion et à la torsion par rapport à un tube solide de même masse ;
- ✓ **Légèreté** : La structure à parois minces permet de réduire le poids du matériau, ce qui est un avantage pour les applications aéronautiques, aérospatiales et automobiles ;
- ✓ **Absorption d'énergie** : La structure en nid d'abeilles peut absorber l'énergie des chocs et des vibrations, ce qui en fait un bon matériau pour les protections et les amortisseurs ;
- ✓ **Flexibilité** : La structure tubulaire peut être conçue pour offrir une certaine flexibilité, ce qui peut être utile pour des applications nécessitant une déformation contrôlée.

1.6.2 Applications des tubes en nid d'abeilles

Les tubes en nid d'abeilles, possédant chacun des comportements mécaniques uniques, se sont taillés des niches distinctes dans une multitude d'applications.

- **Aéronautique et aérospatiale** : Les tubes en nid d'abeilles sont utilisés dans la construction d'avions, de satellites et de fusées pour leur légèreté et leur résistance ;
- **Automobile** : Ils sont utilisés pour les structures de carrosserie, les sièges et les protections anti-collision ;

- **Construction** : Ils sont utilisés pour les poutres, les colonnes, les panneaux de façade et les structures de soutien ;
- **Emballage** : Ils sont utilisés pour emballer des produits fragiles et pour créer des protections anti-chocs ;
- **Médical** : Ils sont utilisés dans la construction de prothèses, de supports et de dispositifs médicaux ;

Au-delà de ces principales applications, les tubes en nid d'abeilles offrent des fonctionnalités supplémentaires. Les tubes en nid d'abeilles, en raison de leur structure à cellules ouvertes, peuvent faciliter la circulation de l'air et la dissipation de la chaleur, ce qui les rend adaptés aux applications de gestion thermique, Ils sont aussi utilisés dans les sports, l'électronique et l'énergie [14,16].

1.6.3 Fabrication de structures et tube en nid d'abeilles avec l'impression 3D

La fabrication de structures et de tubes en nid d'abeille fait appel à une variété de techniques, allant des méthodes bien établies aux technologies d'impression 3D de pointe. Les approches traditionnelles pour les structures en nid d'abeille comprennent les procédés d'expansion, où une feuille de matériau est fendue et étirée pour former des cellules hexagonales, et les techniques de corrugation, où les feuilles sont collées en forme de vague. Cependant, les limites des méthodes traditionnelles pour obtenir des géométries complexes et des propriétés sur mesure ont conduit à l'adoption croissante des technologies d'impression 3D[14].

La fusion laser sélective (SLM) utilise un laser de haute puissance pour fusionner des poudres métalliques couche par couche, créant des structures de diverses formes complexes, y compris en nid d'abeilles en forme tubulaire ayant d'excellentes propriétés mécaniques (Figure 1.11).

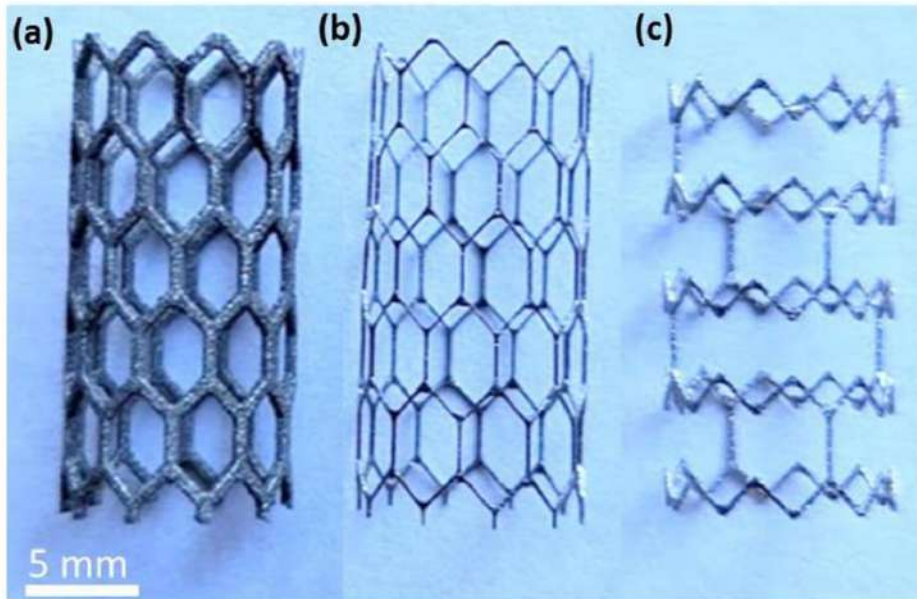


Figure 1.11 : La fusion laser sélective (SLM) [16].

La stéréolithographie (SLA) offre des capacités similaires pour les structures à base de polymères, permettant la création de conceptions légères avec une porosité et une flexibilité contrôlée [14,17]. La capacité de l'impression 3D à combiner plusieurs matériaux au sein d'une même structure élargie encore les possibilités, permettant la fabrication de conceptions bio-inspirées avec des caractéristiques hiérarchiques et une fonctionnalité améliorée [14, 17] (Figure 1.12).

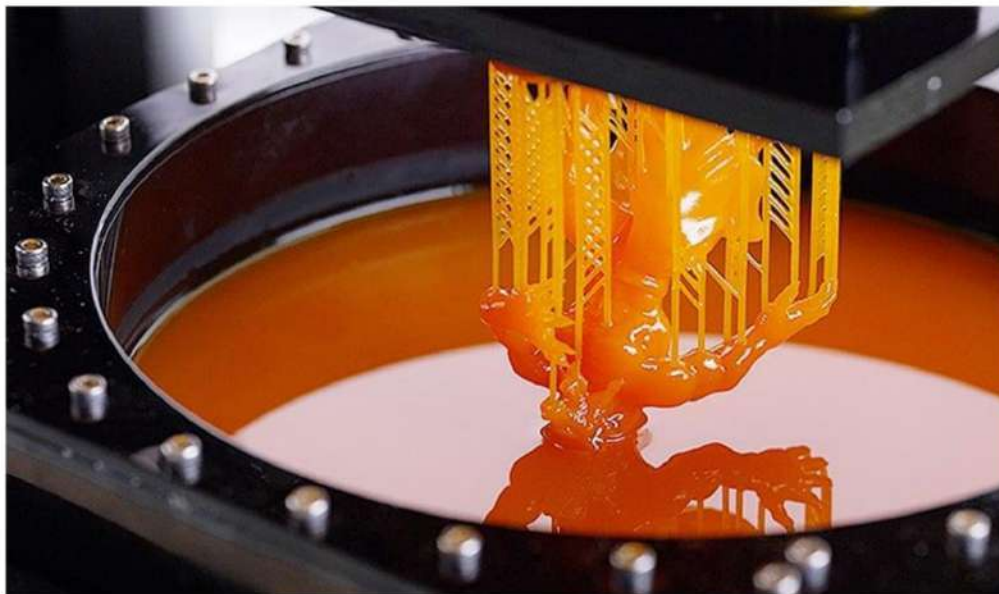


Figure 1.12 : La stéréolithographie (SLA) [17].

Chapitre 1

Le choix de la technique de fabrication dépend de plusieurs facteurs, notamment le matériau souhaité, la complexité de la conception, les propriétés mécaniques requises et les considérations de coût. Alors que les méthodes traditionnelles restent pertinentes pour certaines applications, l'impression 3D offre une liberté de conception et une personnalisation inégalée, stimulant l'innovation dans le domaine des structures et des tubes en nid d'abeilles.

Modelage par dépôt de fil fondu (FDM) : Le Modelage par Dépôt de Fil Fondu (FDM), également connu sous le nom de « *Fabrication par Filament Fondu (FFF)* », est une technique d'impression 3D largement répandue, qui consiste à extruder un filament thermoplastique chauffé à travers une buse, couche par couche, pour créer un objet tridimensionnel. Cette technique se distingue par sa simplicité d'utilisation, son coût relativement faible et sa compatibilité avec une variété de matériaux (Figure 1.13) [18 ,19].

Vu de nombreux avantages de la technique FDM, elle a été choisie comme méthode de fabrication pour ce projet de fin d'études.

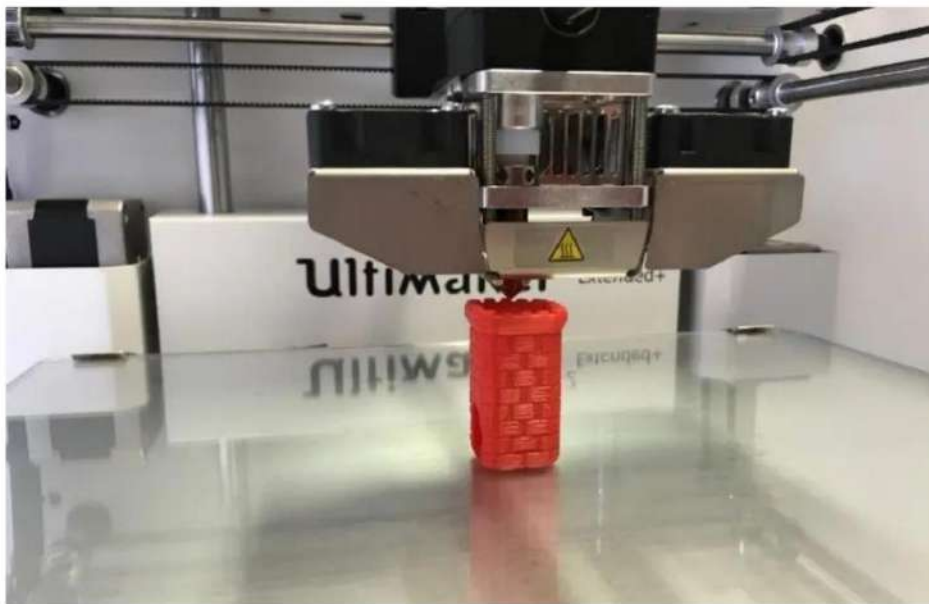


Figure 1.13 : *Modelage par dépôt de fil fondu (FDM)* [18].

1.6.4 Impression 3D de structures en nid d'abeilles avec du PLA

L'émergence des technologies d'impression 3D a révolutionné la fabrication de structures complexes, y compris les conceptions bio-inspirées telles que les nids d'abeilles et les structures auxétiques. Bien que des matériaux comme les métaux et les céramiques ont été

Chapitre 1

explorés, le PLA (acide poly lactique) offre une alternative intéressante en raison de sa durabilité, de sa biocompatibilité, prix modéré et de sa facilité d'impression [19-20].

Plusieurs chercheurs ont réussi à imprimer en 3D des structures en nid d'abeilles avec du PLA, obtenant ainsi des conceptions légères avec des rapports résistance/poids élevés et ayant de bonnes propriétés mécaniques. De plus, la capacité de contrôler la géométrie interne permet de créer des structures auxétiques avec des coefficients de Poisson négatifs, ce qui conduit à une meilleure absorption d'énergie, une résistance à l'indentation et d'autres comportements mécaniques [14, 20]. La polyvalence du PLA et la précision de l'impression 3D ouvrent la voie à l'exploration d'applications innovantes des structures en nid d'abeilles dans divers domaines, des composants structurels légers aux dispositifs biomédicaux.

Le PLA (acide poly-lactique) : Ce bioplastique, dérivé de ressources renouvelables comme l'amidon de maïs ou la canne à sucre, présente un bilan environnemental avantageux comparé aux plastiques traditionnels. En effet, le PLA est biodégradable sous certaines conditions et contribue ainsi à la réduction des déchets plastiques. Au-delà de son aspect écologique, le PLA séduit par sa facilité d'impression. Il est compatible avec la plupart des imprimantes 3D FDM et ne nécessite pas de plateau chauffant à haute température, ce qui simplifie son utilisation. De plus, il offre une bonne rigidité et une résistance mécanique suffisante pour de nombreuses applications, tout en présentant un faible taux de rétraction, ce qui limite les risques de déformation [20, 21].

Compte tenu de ses propriétés mécaniques adéquates, son faible impact environnemental et sa simplicité de mise en œuvre, le PLA s'avère être le matériau idéal pour concrétiser ma vision et mener à bien ce projet de fin d'études de Master.

1.7 Etat de l'art

Dans cet état de l'art quatre articles ont été choisis qui concernent la fabrication et la caractérisation de structures plates et tubulaire ayant des cellules en forme de nid d'abeilles.

Zhang et al., 2015 [14], propose dans leur recherche une revue complète des structures en nid d'abeille (Figure 1.14, 1.15), explorant leur polyvalence à travers différentes échelles (macro, micro et nano). L'analyse porte sur l'évolution des formes hexagonales classiques aux carrés, triangles et cercles, en réponse aux besoins spécifiques de chaque application. L'article met en lumière la relation étroite entre la structure topologique et les propriétés des matériaux, impactant leurs performances mécaniques, thermiques et acoustiques.

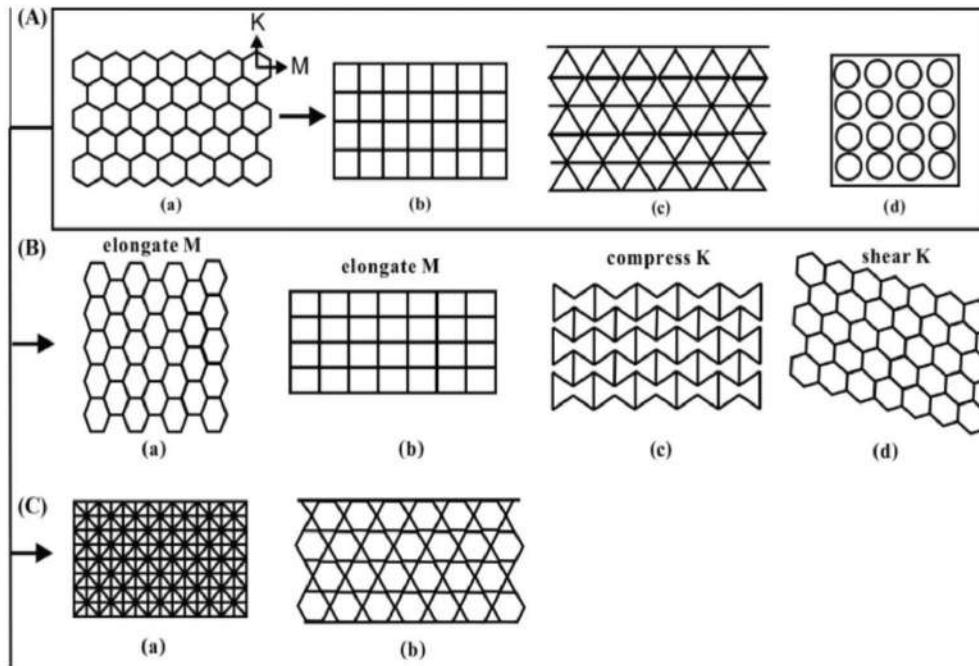


Figure 1.14 Nids d'abeilles périodiques avec différentes formes de cellules [14] .

La forme des cellules, la porosité et la densité influencent la résistance à la compression, au cisaillement et à la flexion, que ce soit pour des nids d'abeille polymériques ou biologiques (Figure 1.16). Les trois modes de transfert de chaleur sont également étudiés en détail, démontrant l'influence de la structure et des matériaux sur la conductivité, la convection et le rayonnement. En matière acoustique, l'article analyse les capacités d'isolation et d'absorption, soulignant le rôle crucial des mécanismes de résonance.

Différentes méthodes de fabrication sont ensuite présentées, allant des techniques traditionnelles pour l'architecture, le transport ou l'ingénierie, aux procédés de pointe de micro et nano fabrication pour l'opto-électronique et la micro-électronique. Leurs applications en biomédecine, notamment dans la culture cellulaire et l'ingénierie tissulaire, sont également mises en avant.

Zhang et al. ont conclu en soulignant le potentiel immense des structures en nid d'abeille pour des applications multifonctionnelles, notamment hiérarchiques/hybrides, et en insistant sur l'importance de la bio-inspiration pour le développement de matériaux et dispositifs novateurs.

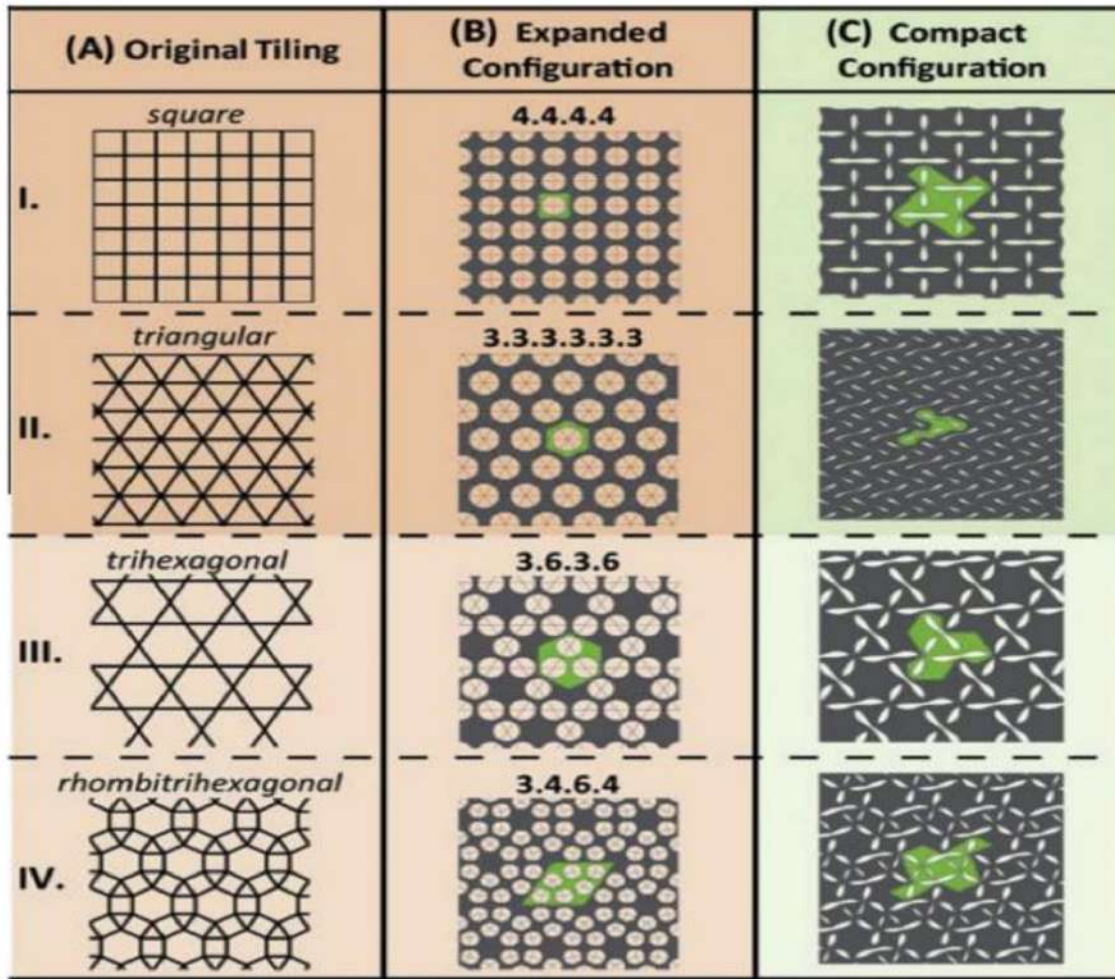


Figure 1.15 : Trois groupes (rangées) de modèles de disposition de trous circulaires pour nids d'abeilles, où chaque rangée est limitée à quatre configurations données : (A) carré ; (B) structures poreuses expansées non déformées (régions ombrées en vert) et (C) compactes (bouclées) (indiquées en vert) structures poreuses causées [14].

une grande liberté de conception et permet de reproduire la complexité de ces structures naturelles. L'article présente des exemples concrets, allant des sabots de cheval aux toiles d'araignée, démontrant l'application de ce concept. Bien que prometteuse, cette technologie fait face à des défis liés à la fabrication de structures multi-échelles et aux limitations de résolution des imprimantes 3D. Malgré ces obstacles, la recherche continue d'explorer le potentiel des structures bio-inspirées pour le développement de matériaux légers et résistants aux chocs, ouvrant la voie à des applications industrielles durables.

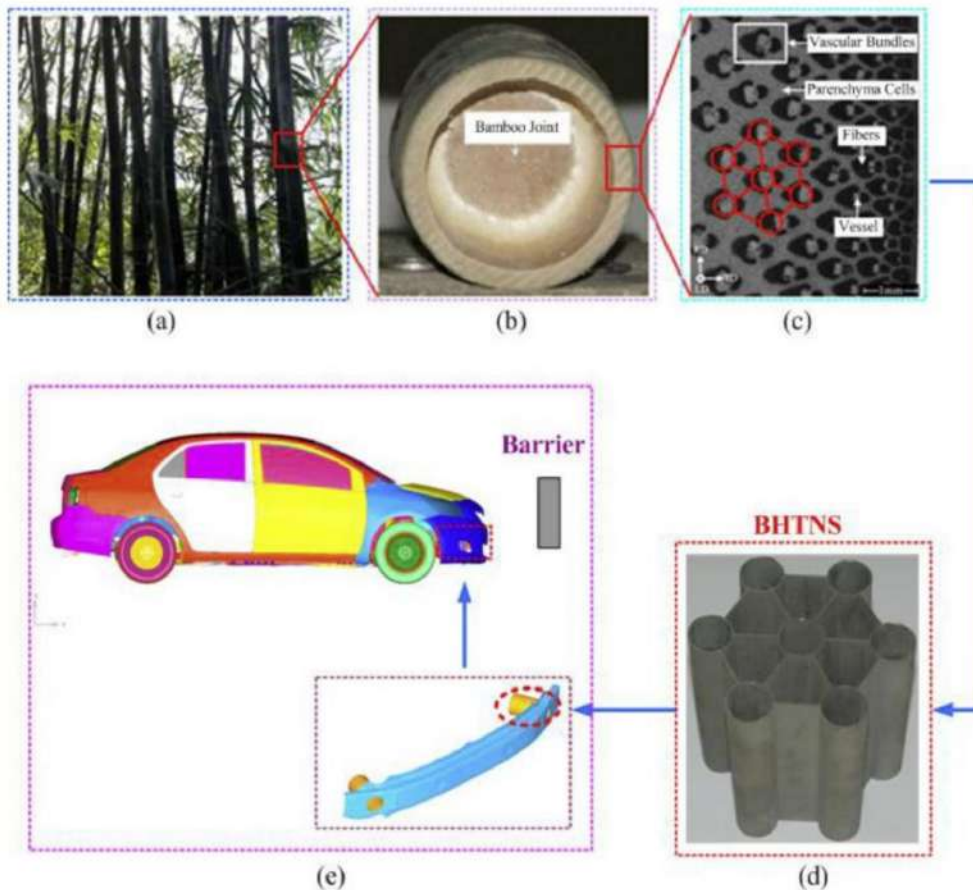


Figure 1.17 : Les BHTNS inspirés de la structure du bambou : (a) Structure entière du bambou ; (b) Coupe transversale de bambou ; (c) Microstructure SEM du bambou ; (d) spécimen BHTNS ; (e) Crash box du véhicule avec BHTNS [22].

Les courbes force d'écrasement/déplacement de deux échantillons sont présentées sur la figure 1.18, ainsi que l'absorption d'énergie correspondante. Les deux spécimens présentaient un comportement de déformation assez similaire avec une bonne répétabilité.

La figure 1.19 montre que la courbe de la force d'écrasement/déplacement obtenue à partir des résultats de la simulation numérique était proche de celles obtenues expérimentalement, même s'il y avait quelques légères différences.

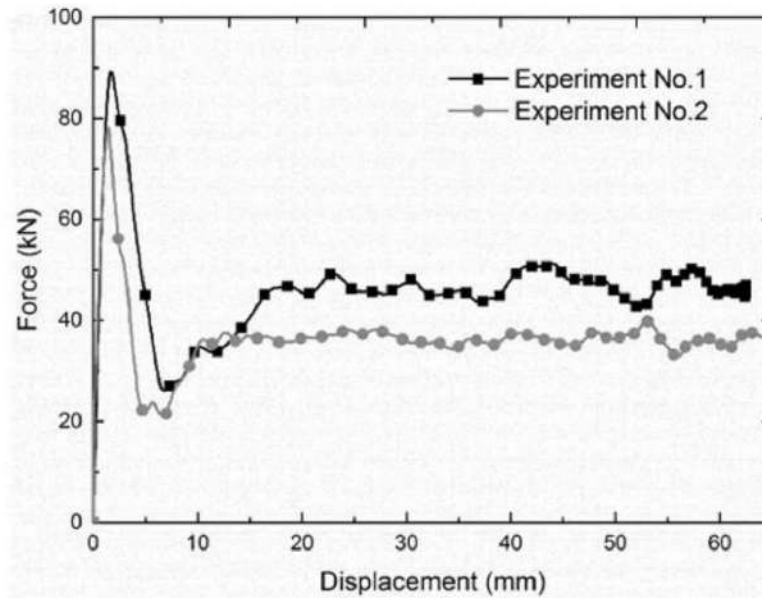


Figure 1.18 : Courbe d'écrasement force/déplacement du BHTNS sous expérience de chute de poids [22].

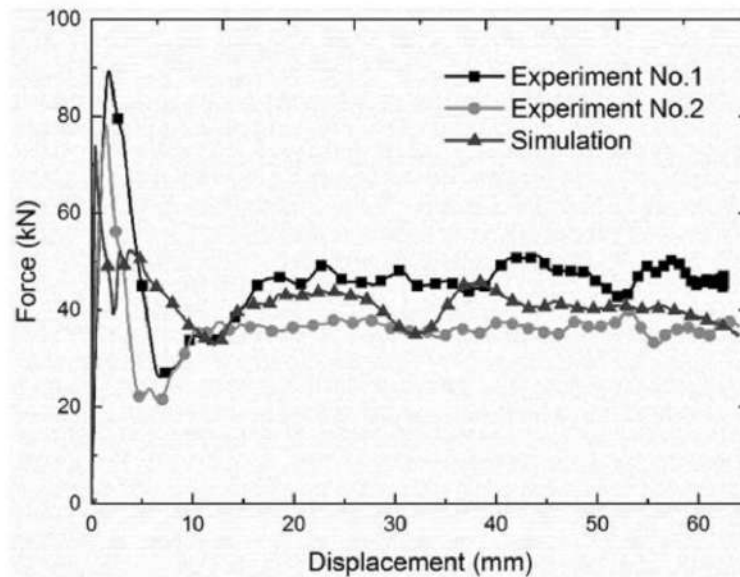


Figure 1.19 : Comparaison des courbes force d'écrasement/déplacement obtenues expériences et celle de la simulation numérique [22].

Ha et al. [23] ont développé un nouveau type de panneau sandwich en nid d'abeille, inspiré de la microstructure du bec du pic, présente une capacité d'absorption d'énergie

supérieure à celle des panneaux classiques (Figure 1.20). Ce panneau bio-inspiré (BHSP), caractérisé par des parois cellulaires ondulées, surpasse les panneaux classiques (CHSP) en absorbant jusqu'à 125% d'énergie supplémentaire pour une même épaisseur de noyau. Cette performance est attribuée à trois modes de déformation distincts observés lors de l'écrasement : le pliage complet, le flambement transitoire et le flambement global. L'étude a également démontré que la géométrie du noyau, notamment l'amplitude et le nombre d'ondes, influence significativement l'absorption d'énergie, de même que l'épaisseur des parois cellulaires, qui jouent un rôle crucial pour les noyaux à géométrie plus complexe.

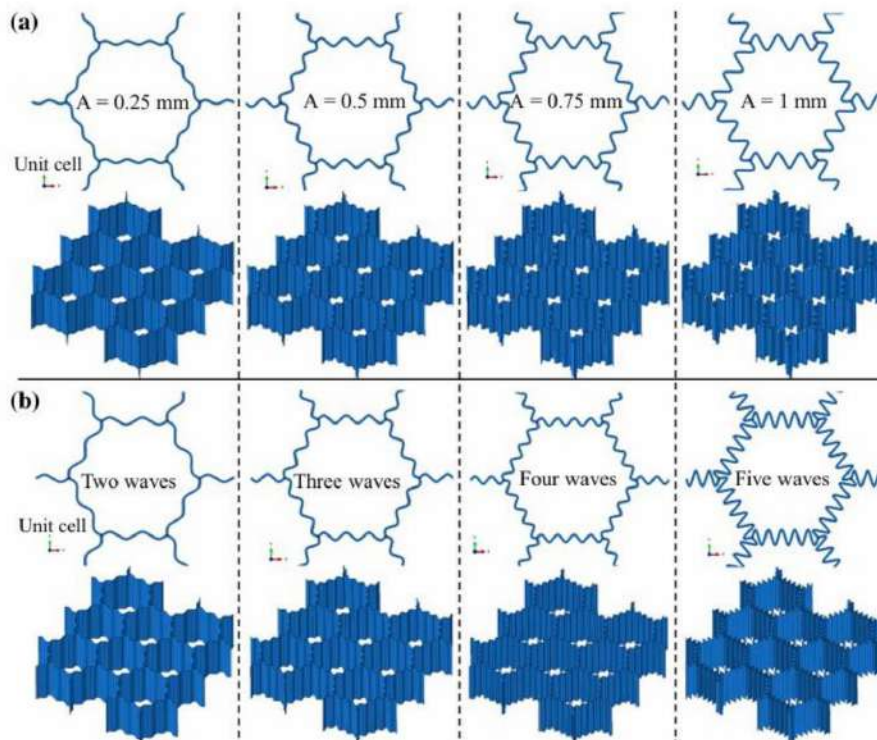


Figure 1.20 : Noyau BH avec différentes amplitudes d'ondes et numéros d'onde : une autre amplitude des vagues et b différents nombres d'ondes [23].

La figure 1.21 montre que le BHSP nécessite des forces plus élevées pour l'écraser, par rapport au CHSP-1 et au CHSP-2.

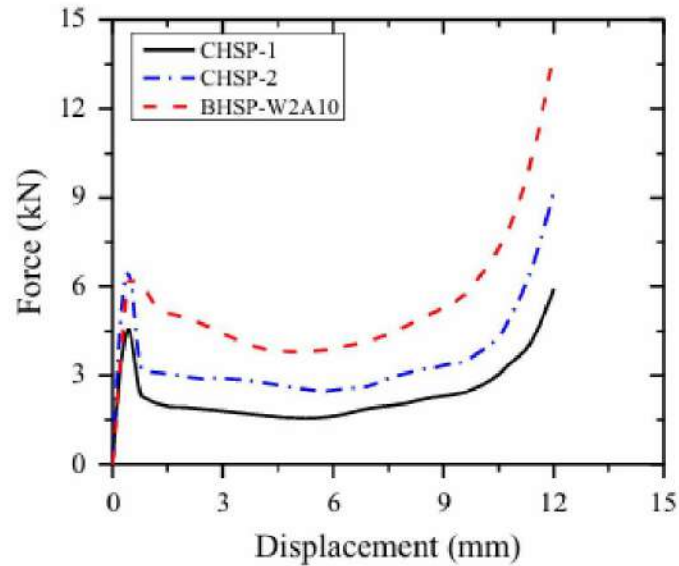


Figure 1.21 : Courbes force-déplacement pour le BHSP et le CHSP [23].

Cette recherche fournit des informations précieuses pour la conception de panneaux sandwich légers dotés de capacités d'absorption d'énergie exceptionnelles. La conception bio-inspirée, s'inspirant du bec du pic, offre une approche prometteuse pour améliorer les performances des structures sandwich pour des applications dans diverses industries, notamment l'aérospatiale, l'automobile et les transports.

Brett G. Compton and Jennifer A. Lewis, 2014 [24]

Impression 3D de composites cellulaires légers : apports et limites des encres époxy à fibres alignées (Compton & Lewis, 2014).

Dans leur publication de 2014, Compton et Lewis explorent une approche novatrice pour l'impression 3D de composites cellulaires légers haute performance en s'inspirant des structures naturelles comme le bois de balsa.

Leur innovation majeure réside dans la formulation d'une encre époxy unique :

En intégrant des plaquettes de nano-argile, ils obtiennent un comportement rhéologique optimisé pour l'extrusion et la structuration 3D.

L'ajout de whiskers de carbure de silicium et de fibres de carbone assure un renforcement multi-échelles, tandis qu'un agent de durcissement latent offre une large fenêtre de manipulation avant la polymérisation.

Chapitre 1

Ce procédé permet d'induire un alignement contrôlé des fibres lors de l'extrusion, conférant ainsi une anisotropie directionnelle aux propriétés mécaniques. Les composites imprimés présentent un module d'Young jusqu'à 9 fois supérieur à celui d'une résine époxy pure, notamment lorsque l'impression est réalisée dans le sens longitudinal.

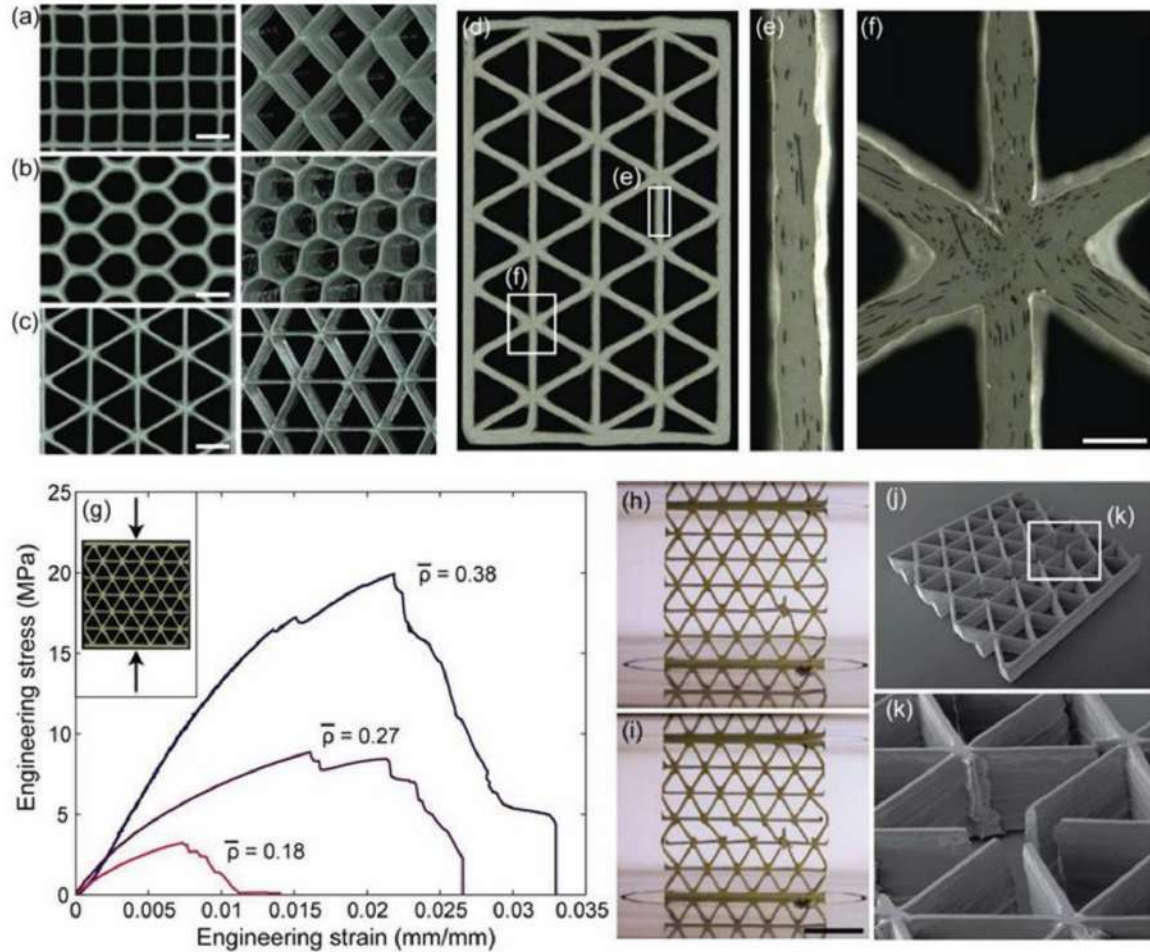


Figure 1.22 : Images optiques de structures en nid d'abeilles (a) carrées, (b) hexagonales et (c) triangulaires composées d'époxy rempli de SiC. Courbes représentatives de contrainte de compression et de déformation pour un nid d'abeille triangulaire imprimé structures sur une gamme de densités relatives [24].

Les auteurs démontrent également la possibilité de fabriquer différentes structures cellulaires (nids d'abeilles) dont les propriétés mécaniques suivent les lois d'échelle établies. Cependant, certaines imperfections géométriques (défauts d'alignement, ondulations) sont observées et impactent les performances globales.

Chapitre 1

Cette étude pionnière ouvre la voie à l'impression 3D de structures composites légères et résistantes, offrant une grande liberté de conception et d'optimisation. Néanmoins, la maîtrise des imperfections géométriques et l'exploration de designs cellulaires plus complexes constituent des axes de recherche futurs prometteurs.

1.8 Conclusion

Ce premier chapitre nous a permis d'explorer l'univers fascinant des matériaux cellulaires, et plus particulièrement des structures en nid d'abeilles. Inspirées par la nature, ces structures se démarquent par leur légèreté, leur résistance mécanique élevée et leurs propriétés uniques d'absorption d'énergie et d'isolation.

Nous avons vu que les matériaux cellulaires se déclinent en une variété de formes et de matériaux, chacun présentant des avantages spécifiques pour des applications diverses. Les nids d'abeille, avec leur géométrie hexagonale caractéristique, se sont imposés comme des éléments clés dans des domaines tels que l'aérospatiale, l'automobile et la construction.

L'émergence de l'impression 3D a révolutionné la fabrication de structures en nid d'abeille, permettant la création de géométries complexes et l'utilisation de matériaux innovants comme le PLA.

L'analyse de l'état de l'art met en lumière le potentiel immense des structures en nid d'abeille et l'intérêt croissant de la recherche pour ces matériaux. Les avancées technologiques, notamment dans le domaine de la bio-inspiration, laissent entrevoir des perspectives prometteuses pour le développement de structures toujours plus performantes et durables.

Le chapitre suivant se focalisera sur la conception des structures en nid d'abeille.

Chapitre 2 :

Méthodologie et Matériaux

Chapitre 2 : Méthodologie et Matériaux

2.1 Introduction

Les structures en nid d'abeilles sont des matériaux légers mais incroyablement résistants, imitant le motif hexagonal trouvé dans les ruches. Cette conception géométrique, avec ses cellules interconnectées, permet une distribution efficace des contraintes, maximisant la résistance et minimisant le poids. Les structures en nid d'abeilles sont utilisées dans une large gamme d'applications, allant des composants d'avions et des vaisseaux spatiaux aux meubles et aux emballages, offrant une excellente résistance aux chocs, une isolation thermique et de bonnes propriétés acoustiques.

Ce chapitre présente en détail les méthodologies et le matériau utilisés dans cette recherche pour étudier la conception des structures tubulaires et plates en nid d'abeilles, leurs fabrications ainsi que leurs tests. L'accent est mis sur :

- La conception effectuée par le logiciel Solid Works 2019
- Choix du matériau utilisé pour la fabrication des structures en nid d'abeilles
- Description de l'imprimante 3D utilisée pour la fabrication des éprouvettes
- Machine utilisée et les conditions de tests de compression des structures nid d'abeilles
- Les méthodes et les outils spécifiques utilisés pour atteindre les objectifs de la recherche.

2.2 Conception et Modélisation

La phase de conception a impliqué la création de modèles 3D de différentes structures tubulaires en nid d'abeilles à l'aide du logiciel SOLID WORKS 2019. L'étude s'est concentrée sur deux géométries principales de nid d'abeilles : hexagonale (disposée horizontalement et verticalement) et carrée, tous deux sous forme plate et tubulaire. Les panneaux cellulaires sont conçus avec une longueur, largeur et épaisseur moyennes respectivement égale a : 90 x 60 x 8 mm. Les tubes nid d'abeille sont conçus avec des diamètres extérieurs moyens de 30 mm et une longueur de 60 mm.

Chapitre 2

2.2.1 Panneaux plats en Nid d'Abeilles

Nid d'Abeilles Hexagonal (Figure 2.1): Cette conception a reproduit la structure classique du nid d'abeilles trouvée dans la nature, avec des cellules hexagonales régulières et une épaisseur de paroi uniforme. Deux types de panneaux ont été conçus, le premier ayant les cellules hexagonales disposées horizontalement (Figure 2.1) et le deuxième verticalement (Figure 2.2).

Figure 2.1 : Nid d'Abeilles Hexagonale disposé horizontalement.

Figure 2.2 : Nid d'Abeilles hexagonale disposé verticalement.

Nid d'Abeilles Carré : Cette conception a utilisé des cellules carrées avec une épaisseur de paroi uniforme ((Figure 2.3), offrant une géométrie de cellule différente pour la comparaison avec la configuration hexagonale.

Figure 2.3 : Nid d'Abeilles carré.

2.1.2 Structures Tubulaires

Les deux géométries de nid d'abeilles hexagonales et carrées ont été faites en formes tubulaires avec des épaisseurs de paroi et des dimensions globales très proches (Figure 2.4). Cela a permis d'étudier l'influence de la géométrie sur les performances mécaniques des structures en compression.

Figure 2.4 : Structures Tubulaires : a) Hexagonale disposée horizontalement ou b) Verticalement et c) Carrée.

2.1.3 Paramètres de Conception

Plusieurs paramètres de conception peuvent être pris en compte et variés au cours du processus de modélisation à savoir :

Taille des cellules : Les dimensions des cellules individuelles au sein de la structure en nid d'abeilles sont les mêmes

Épaisseur des parois : L'épaisseur des parois formant les cellules nid d'abeilles est la même.

Diamètre du tube : Le diamètre extérieur des structures tubulaires est presque le même.

Longueur du tube : La longueur totale des structures tubulaires sont presque les mêmes.

La variation de ces paramètres permet de comprendre leur impact sur la résistance à la compression, l'absorption d'énergie et le comportement de déformation des structures.

2.2 Sélection des Matériaux

L'acide poly-lactique (PLA) a été choisi comme matériau principal pour la fabrication des structures en nid d'abeilles en raison de sa disponibilité au laboratoire de mécanique appliquée des nouveaux matériaux (LMANM) de l'Université 8 Mai 1945 de Guelma et à cause de ses propriétés avantageuses à savoir [19 ;20]:

- ✓ Durabilité : Le PLA présente une bonne résistance et une bonne rigidité, ce qui le rend approprié pour la création de structures avec des performances mécaniques adéquates.
- ✓ Biocompatibilité : La nature biocompatible du PLA ouvre des possibilités pour de futures applications dans les domaines biomédicaux.
- ✓ Facilité d'impression : Le PLA est un matériau largement utilisé et facilement disponible pour l'impression 3D, offrant une bonne imprimabilité et une bonne adhérence.

Le filament PLA utilisé est de diamètre 3 mm de marque ESUN (Figure 2.5).



Figure 2.5 : Filament PLA utilisé.

2.3 Elaboration des panneaux et tubes nid d'abeilles

L'impression 3D par dépôt de matière fondue (FDM) est un processus de fabrication additif qui construit des objets couche par couche de bas en haut. Cela commence par un modèle numérique 3D découpé en fines couches par un logiciel. L'imprimante chauffe un filament thermoplastique jusqu'à ce qu'il fonde. Le plastique semi-liquide est ensuite extrudé à travers une buse sur une plate-forme de construction. La buse se déplace avec précision, suivant le modèle découpé, déposant et fusionnant des lignes de plastique pour créer chaque couche. Au fur et à mesure que chaque couche se refroidit et se solidifie, la plate-forme de construction s'abaisse, permettant à la couche suivante d'être imprimée par-dessus. Ce processus se poursuit, couche par couche, jusqu'à ce que l'objet 3D entier soit terminé.

Les structures conçues (Figure 2.1, 2.2, 2.3 et 2.4) ont été fabriquées à l'aide d'une imprimante 3D Ultimaker² (Figure 2.6). Cette imprimante à modélisation par dépôt de fil fondu (FDM) permet un contrôle précis des paramètres d'impression et garantit une fabrication cohérente des géométries complexes du nid d'abeilles.



Figure 2.6 : Imprimante 3D Ultimaker².

Les spécifications techniques de l'imprimante 3D Ultimaker² sont les suivantes [25] :

- Volume de construction : 223 × 223 × 205 mm
- Résolution des couches : 20 – 200 microns
- Dimensions des machines : 342 × 357 × 388
- Épaisseur de couche : 0,15 mm
- Diamètre de la buse : 0,4mm
- Diamètre du filament PLA : 3 mm
- Poids de la machine : 11,2 kg
- Compatibilité des filaments : PLA, ABS, TPU, TPE, PVA, filament rempli de bois, ABS Pro, Filament Flexible, Perle et PP.

2.3.1 Paramètres d'impression

Plusieurs paramètres d'impression clés (Tab1) ont été utilisés pour obtenir des impressions de haute qualité avec une bonne précision dimensionnelle et une bonne intégrité structurelle :

Tableau 2.1 : Paramètres d'impression.

Hauteur de couches	<ul style="list-style-type: none">• Hauteur de couche : 0.15 mm• Hauteur de la première couche : 0.8 mm
Remplissage	<ul style="list-style-type: none">• Densité de remplissage : 100%• Motif de remplissage : linges
Vitesse	<ul style="list-style-type: none">• Vitesse d'impression : 60 mm/s• Vitesse de voyage : 60 mm/s
Température	<ul style="list-style-type: none">• Extrudeuse : 210 °C• Plateau de construction : 60 °C

2.3.2 Impression des pièces

La figure 2.7 représente les premières étapes d'impressions des panneaux et des tubes nid d'abeilles.



Figure 2.7 : Les étapes d'impression.

2.3.3 Post-traitement

Après l'impression, les structures imprimées ont subi un post-traitement qui consistait à enlever les brins indésirables apparaissant sur l'impression notamment pour les structures tubulaires (Figure 2.8) et à s'assurer que les échantillons étaient exempts de tout défaut d'impression.

Avant

Après

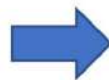


Figure 2.8 : Pièces avant et après nettoyage.

Un modèle de chaque structure plate ou tubulaire imprimée est présenté dans la (figure 2.9).

Figure 2.9 : Les structures imprimer en 3D, a) Nid d’Abeilles carré b) Nid d’Abeilles Hexagonale horizontale c) Nid d’Abeilles Hexagonale verticale d) les 3 structure en tube.

2.4. Machine de traction

Les tests de compression des éprouvettes des structures plates ou tubulaires élaborées sont effectués à température ambiante sur une machine de traction universelle de type Walter & Bai (Figure 2.10) au niveau du Laboratoire de Mécanique Appliquée des Nouveaux Matériaux (LMANM) de l’université 8 Mai 1945 Guelma. Cette machine est dotée d’une cellule de charge de capacité 100 kN et une autre de kN [26].

Les trois structures plates élaborées ont été testées en compression avec une vitesse de chargement de 2 mm/min, (Figure 2.9a, 2.9b et 2.9c). Les trois configurations des tubes élaborés (Figure 2.9d) ont été testés en compression axiale avec deux vitesses de chargement 1 et 2 mm/min. Il est important de noter aussi qu’au moins cinq tests de compression ont été effectués pour chaque type de structures plates ou tubulaires.



Figure 2.10 : Machine d'essai de compression.

Les machines séries LFV servo-hydrauliques polyvalentes sont des systèmes de test polyvalents et hautes performances, disponibles dans différentes configurations robustes couvrant une large gamme d'applications monotones, dynamiques, de fatigue dans les secteurs de l'aéronautique, de l'aérospatiale, de l'automobile, du biomédical, de l'acier, des fixations, du ferroviaire ou de la marine, laboratoires d'essais de génie civil et de R&D dans le monde entier. Ces systèmes servo-hydrauliques sont des unités indispensables dans de nombreux laboratoires dans le domaine du contrôle qualité, du développement de produits ou de la recherche scientifique.

Tous les systèmes servo-hydrauliques LFV intègrent un actionnement hydraulique servo-commandé Walter&bai fiable avec des commandes numériques en boucle fermée haute résolution et haute vitesse, une large gamme d'accessoires complémentaires et des progiciels d'application Dion7 complets, ce qui rend ces systèmes adaptés à large spectre d'applications statiques et des tests dynamiques comprenant :

- Tension
- Pliant

Chapitre 2

- Fatigue cyclique élevée
- Propagation d'une fissure
- Durabilité des composants
- Fatigue Thermo Mécanique (TMF)
- Croissance de fissures de fatigue
- Relaxation du stress et des tensions
- Résistance à la rupture
- Tests environnementaux
- Compression
- Faible fatigue cyclique (LCF)
- K1C/J1C
- Résistance des composants

2.4.1 Présentation du système

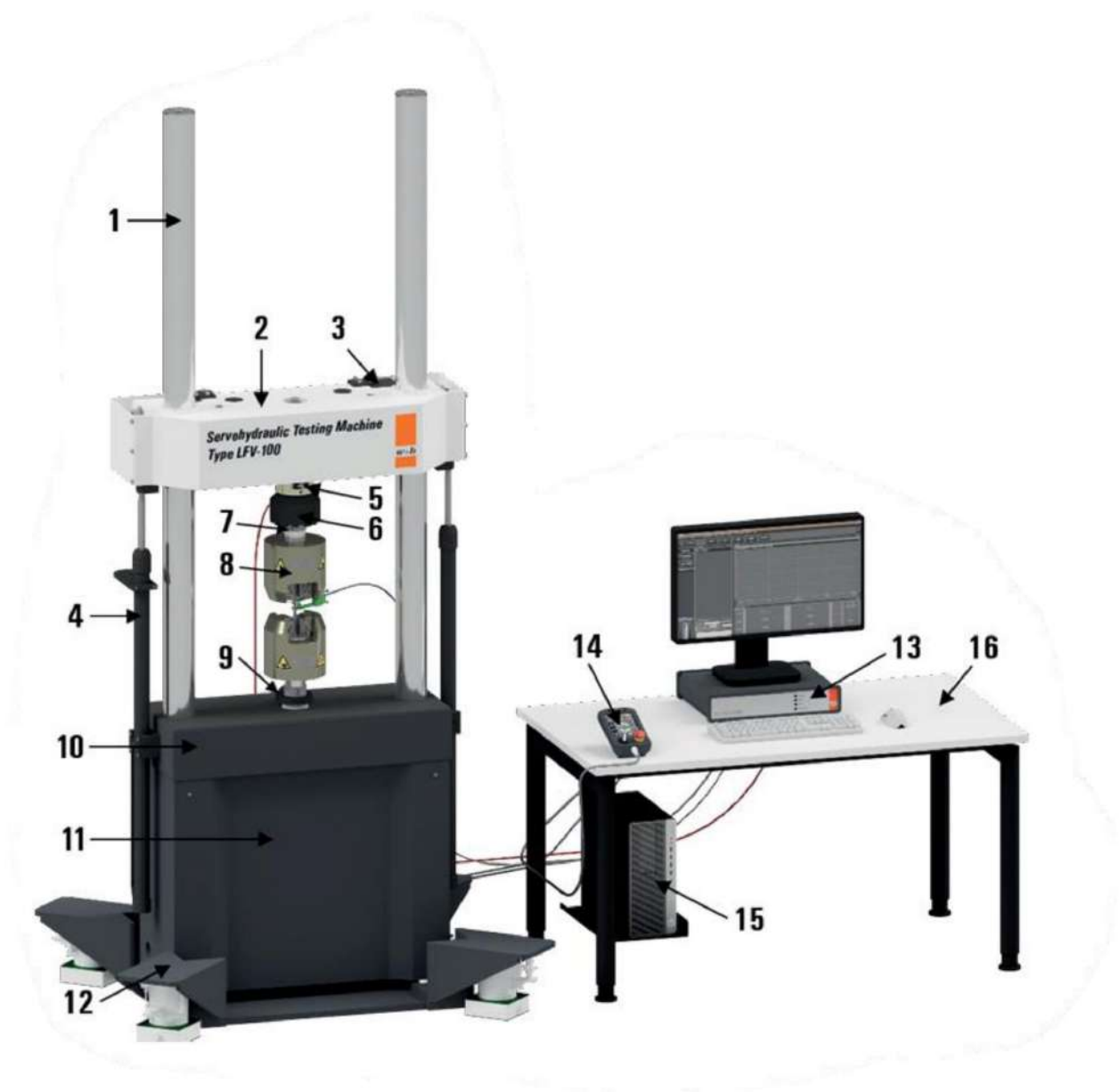


Figure 2.11 : Composants de machine de test [26].

Chapitre 2

- 1 : Colonnes solides trempées par induction et chromées
- 2 : Traverse en acier mobile solide conçue pour une fréquence propre élevée
- 3 : Système de serrage passif de la traverse
- 4 : Actionneurs pour traverses de levage ; soulever et abaisser la traverse hydrauliquement via les deux actionneurs différentiels pour s'adapter aux différentes hauteurs d'essai
- 5 : Dispositif d'alignement
- 6 : Transducteur de force avec base ; mesure les forces axiales appliquées à l'échantillon utilisé pour l'acquisition de données et le signal de contrôle en boucle fermée
- 7 : Connexion dynamique (rondelle)
- 8 : Poignées et fixations
- 9 : Le dispositif anti-rotation amovible évite la tendance naturelle à la rotation de l'actionneur.
- 10 : Plateau de base solide
- 11 : Actionneur hydraulique intégré avec capteur de course de piston, servovalves et accumulateurs à couplage fermé
- 12 : Système d'amortissement d'air actif en option fourni avec système de régulation.
- 13 : Contrôleur numérique PCS8000
- 14 : Combiné : combiné numérique portable avec arrêt d'urgence
- 15 : Ordinateur personnel avec logiciel d'application Dion7
- 16 : Table de travail.

2.4.2 Essais Mécaniques

Les structures en nid d'abeilles fabriquées ont été soumises à des essais de compression à l'aide d'une machine de compression hydraulique. Cela a permis d'appliquer des déplacements avec une vitesse contrôlée aux structures et de mesurer leur réponses (Force en fonction du déplacement).

Essais de Compression Axiale

Cette section détaille le type d'essais de compression effectués sur les structures tubulaires et plates. Les structures sont placées entre les plateaux de la machine de compression.

Chapitre 2

Un déplacement contrôlé est appliqué progressivement provoquant une force de compression jusqu'à ce que la structure atteigne son point de rupture (Figure 2.12).

Durant le chargement, un téléphone portable est placé sur un tripier permettant de faire d'une part l'enregistrement vidéo, et d'autre part la capture de photos toutes les trois secondes, ceci permettra d'identifier l'évolution des déformations de la structure testée en compression jusqu'à sa rupture.

Figure 2.12 : placement des éprouvettes.

L'objectif principal de cette étude est d'évaluer la résistance et le comportement de la structure sous un chargement en compression. Nous chercherons à déterminer la charge maximale que la structure peut supporter avant de céder. De plus, nous analyserons en détail comment la structure se déforme sous l'effet de la charge, ce qui nous permettra de comprendre ses mécanismes de rupture et d'identifier des pistes pour optimiser sa conception et sa résistance.

2.4. 3 Analyse

Les données collectées de la machine sont des fichiers *csv* et *xlsx* qui permettent de tracer les courbes de comportement de la force en fonction du déplacement et l'analyse du test de compression permet d'évaluer les aspects suivants :

- ✓ Résistance à la compression : La charge maximale que les structures peuvent supporter avant leur rupture ;
- ✓ Mécanismes de déformation : Analyse des modes de rupture et des schémas de déformation présentés par les structures en compression ;

Chapitre 2

- ✓ Influence de la géométrie et de la vitesse : Comparaison des performances mécaniques des différentes géométries de nid d'abeilles et l'identification de l'effet de la vitesse de chargement.

2.5 Conclusion

Ce chapitre a permis de :

- Décrire la méthodologie globale employée dans la recherche, englobant la conception, la sélection des matériaux, la fabrication et les essais des structures nid d'abeilles plates et tubulaires.
- L'utilisation d'outils avancés tels que SOLIDWORKS pour la conception précise des structures nid d'abeilles et l'imprimante 3D Ultimaker² pour leur fabrication efficace.
- Description de la machine de traction universel utilisé et les conditions des essais de compression des structures nid d'abeilles élaborées.
- Les analyses ultérieures qui peuvent fournir des informations précieuses sur le comportement mécanique et les performances de ces structures, ouvrant la voie à une exploration et à une optimisation plus poussée.

Chapitre 3 :

Analyse des Résultats Expérimentaux de la Compression des Structures en Nid d'Abeilles

Chapitre 3 : Analyse des Résultats Expérimentaux de la Compression des Structures en Nid d'Abeilles

3.1 Introduction

Ce chapitre concerne l'analyse des résultats des tests de compression effectués sur des structures en nid d'abeilles, examinant l'impact de la géométrie et de la vitesse de déformation sur leurs propriétés mécaniques. Les résultats révèlent que l'orientation des cellules influence également la direction de la résistance. De plus, des vitesses de déformation élevées provoquent des effets dynamiques qui modifient la résistance et la déformation. L'analyse identifie la force maximale supportée, les modes de déformation (pliage, écrasement, flambage) et quantifie l'influence de la géométrie et de la vitesse. Ces résultats contribuent à une meilleure compréhension du comportement mécanique des structures en nid d'abeilles sous compression, éclairant ainsi leur conception et leur optimisation pour diverses applications.

3.2 Essais de compression axiale

Les différentes configurations des éprouvettes plates et tubulaires en nid d'abeilles élaborées en PLA par une impression 3D ont été testées par des essais de compression axiale afin d'évaluer leurs résistances. Trois configurations distinctes de nids d'abeille ont été étudiées ayant des cellules : carrée (*NC*), hexagonale disposée horizontalement (*NH*) et verticalement (*NV*). Pour chaque configuration, cinq échantillons pour chaque vitesse de chargement, soit 1 *mm/min* et 2 *mm/min*, ont été soumis à des tests de compression axiale. Lors de ces tests, l'évolution de la force en fonction du déplacement a été enregistrée.

3.3 Analyse des résultats des structures tubulaires

Les courbes force-déplacement obtenues pour chaque géométrie et vitesse d'essai révèlent des informations cruciales sur le comportement mécanique des structures.

3.3.1 Structures Carrées (*NC*)

Les courbes force-déplacement des structures *NC* testées en compression axiale avec une vitesse de déplacement de 1 *mm/min* (Figure 3.1) et 2 *mm/min* (Figure 3.2), ont des allures assez similaires et se caractérisent par des évolutions en trois étapes :

- ✓ La première quasi-linéaire dans le domaine élastique,

Chapitre 3

- ✓ Puis un changement de la pente provoquant des déformations plastiques, avec ou sans perturbation, jusqu'à l'atteinte de la charge maximale.
- ✓ Enfin, la dernière étape se caractérise soit par une diminution brutale de la force (éprouvettes 3 et 5 de la figure 3.1) ou parfois graduelle (éprouvettes 1 et 4 de la figure 3.1).

La phase élastique correspond à la déformation réversible du matériau constitutif des parois cellulaires. Le changement de pente est associé à l'écrasement progressif des cellules, permettant une absorption d'énergie significative. La rupture finale intervient lorsque les parois cellulaires ne peuvent plus supporter la charge appliquée.

L'augmentation de la vitesse d'essai de 1 à 2 mm/min induit une réduction moyenne de la force maximale de 10,6 %. Cet effet, bien qu'assez faible, peut être attribué à l'inertie de la structure et à une augmentation de la rigidité apparente du matériau à des vitesses de chargement plus élevées.

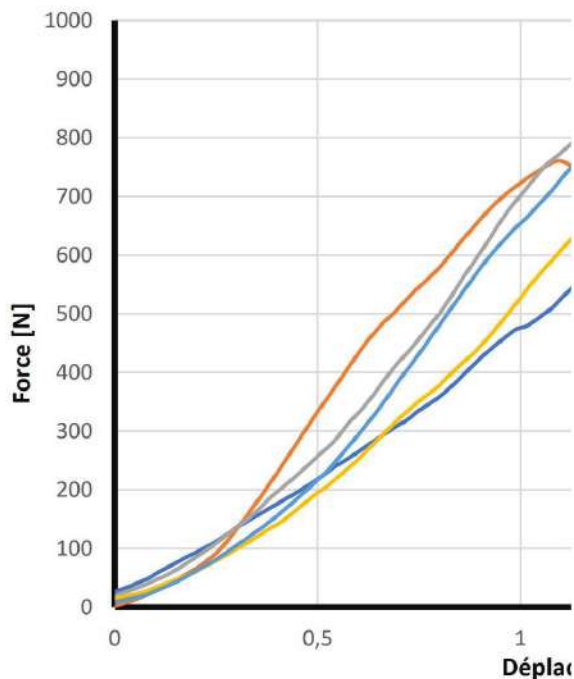


Figure 3.1 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NC testées en compression axiale avec une vitesse V_1 .

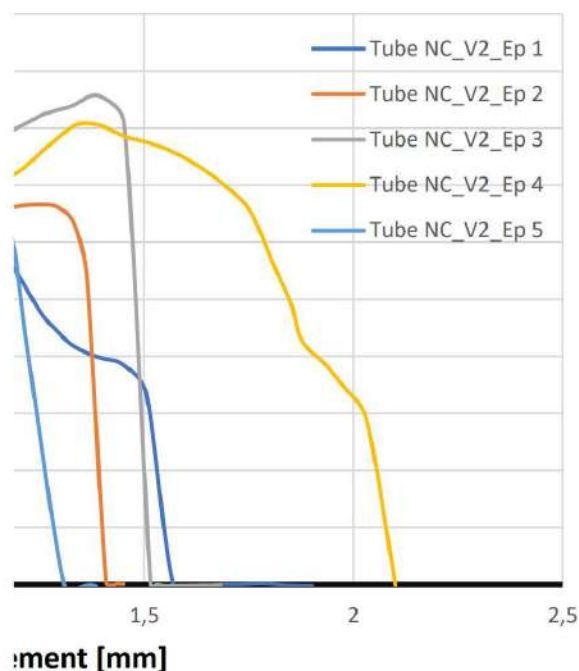


Figure 3.2 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NC testés en compression axiale avec une vitesse V_2 .

Le Tableau 3.1 récapitule les résultats des valeurs obtenues des forces maximales et des déplacements ultimes des éprouvettes NC testées. Il démontre que la force maximale supportée par les éprouvettes NC (carré) testées avec V_1 (1 mm/min) varie entre 591 et 857 N, avec une moyenne de 777 N et entre 571,94 et 856,84 pour celles testées avec 2 mm/min avec une valeur moyenne de 703 N. Il est à noter aussi que les résultats se caractérisent par des dispersions assez importantes qui est due principalement à la qualité d'impression notamment les structures internes des échantillons.

Malgré les dispersions dans les résultats obtenus, l'analyse du Tableau 3.1 montre une faible variation de l'ordre de 4% des déplacements ultimes entre les éprouvettes testées à 1 mm/min ($1,31 \pm 0,08$) et celles testées à 2 mm/min ($1,26 \pm 0,52$). Cette faible variation dans les déplacements moyennes, malgré la différence de vitesse de test, indiquant une bonne homogénéité des échantillons.

Tableau 3.1 : Tableau des valeurs des résultats des tests obtenus pour la structure tubulaires NC.

NC	Eprouvette numéro	$V_1 = 1 \text{ mm/min}$		$V_2 = 2 \text{ mm/min}$	
		Force maximale [N]	Déplacement ultime [mm]	Force maximale [N]	Déplacement ultime [mm]
	1	591,06	1,23	571,94	1,16
2	786,14	1,28	665,65	1,29	

Modes de déformation et de rupture des Nids d'abeilles carrés (NC) :

L'identification des modes de rupture des éprouvettes lors des tests de compression axiale est effectuée par l'analyse des photos de la structure, prises avec un téléphone portable toutes les trois secondes.

A titre d'exemple, l'observation de l'évolution des déformations de l'éprouvette NC_V1_Ep1 (Figure 3.3) montre que l'augmentation du déplacement provoque l'apparition d'un flambement de ligament verticaux et son développement crée un plan de cisaillement qui conduit à la rupture de l'éprouvette.

Figure 3.3 : Photos de l'évolution des déformations des tubes NC de l'éprouvette 1 testée en compression axiale avec une vitesse V_1 .

3.3.2 Structures hexagonales horizontales (NH)

Les courbes d'évolution force-déplacement des structures NH (NH_V₁ et NH_V₂) testées en compression axiale avec deux vitesses de déplacement (V₁ et V₂) montrent que le comportement se déroule en trois phases (Figure 3.4 et 3.5). L'augmentation de la force en fonction du déplacement d'une manière quasi-linéaire élastique dans la première phase, suivi par une phase plastique non linéaire jusqu'à l'atteinte de la force maximale. Enfin, la force diminue avec l'augmentation du déplacement d'une manière fortement non linéaire.

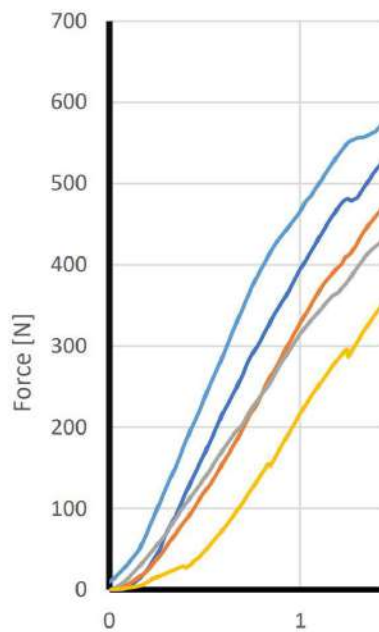


Figure 3.4 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NH testées en compression axiale avec une vitesse V₁.

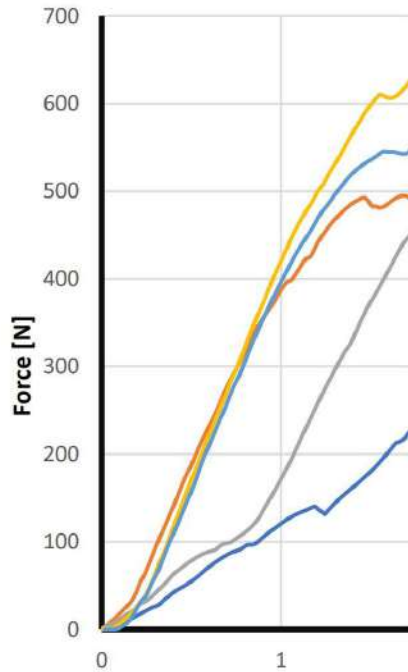


Figure 3.5 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NH testés en compression axiale avec une vitesse V_2 .

L'analyse du Tableau 3.2 montre que l'augmentation de la vitesse de chargement de V_1 à V_2 permet une augmentation de la force ultime moyenne de 519,59 N à 547,49 N soit une augmentation de 5,36 % et le déplacement ultime moyen varie de 1,94 mm à 2,06 mm correspondant à un accroissement de 6,19 %. Ces faibles variations démontrent que la vitesse de chargement, dans plage de 1 à 2 mm, n'a pas une grande influence sur les propriétés de la structure.

Les valeurs des forces ultimes moyennes égales 519,59 N à 547,49 N obtenues respectivement avec les vitesses de chargement V_1 et V_2 des structures hexagonales disposées horizontalement NH (Tableau 3.2) sont relativement faibles par rapport à celles obtenues pour la structure carrée (NC) obtenues respectivement égale à 777,14 et 702,90 N (Tableau 3.1) soit des réductions respectives de 33,14 % et 22,11 %.

Par contre, les valeurs des déplacements moyens égales 1,94 mm à 2,06 mm obtenues respectivement avec les vitesses de chargement V_1 et V_2 des NH (Tableau 3.2) sont nettement plus grandes par rapport à celles obtenues pour les NC sont respectivement égales à 1,31 mm et 1,26 mm (Tableau 3.1) soit des réductions respectives de 32,47 % et 38,83 %.

Tableau 3.2 : Tableau des valeurs des résultats des tests obtenus pour la structure tubulaire NH.

	Eprouvette N°	$V_1 = 1 \text{ mm/min}$		$V_2 = 2 \text{ mm/min}$	
		Force max [N]	Déplacement ultime [mm]	Force max [N]	Déplacement ultime [mm]
NH	1	576,34	1,92	485,18	2,78
	2	513,38	1,88	492,72	1,63

Modes de déformation et de rupture des Nids d’abeilles hexagonales disposés horizontalement (NH) :

La même technique d’identification des modes de rupture des éprouvettes lors des tests de compression axiale utilisé pour le NC a été utilisée pour le NH au moyen de l’analyse des photos de la structure, prises avec un téléphone portable toutes les trois secondes.

A titre d’exemple, l’observation de l’évolution des déformations de l’éprouvette NH_V1_Ep1 (Figure 3.6) montre que l’augmentation du déplacement provoque :

- ✓ L’apparition d’un flambement des ligaments en V de la partie inférieure du tube, ceci se produit dans la première phase des courbes force-déplacement.
- ✓ Suivi par des ruptures dans les jonctions verticales suivant une ligne inclinée dans le sens du bas de l’éprouvette, ceci concerne la deuxième phase des courbes forces déplacement.
- ✓ Enfin, le développement des ruptures dans les jonctions provoque la rupture par cisaillement de l’éprouvette.

Cette structure présente un mode de déformation progressif plus ou moins ductile, caractérisé par un flambage et un écrasement successif des cellules du nid d’abeilles. La présence de nombreuses perturbations sur les courbes force-déplacement témoigne de ce comportement.

Figure 3.6 : Photos de l'évolution des déformations des tubes NH de l'éprouvette 1 testée en compression axiale avec une vitesse V_1 .

3.3.3 Structures Hexagonales Verticales (NV)

Les courbes d'évolution force-déplacement des structures NV (NV_V₁, NV_V₂) présentées dans les Figures 3.7 et 3.8 sont similaire à celle des NH (Figure 3.4 et 3.5).

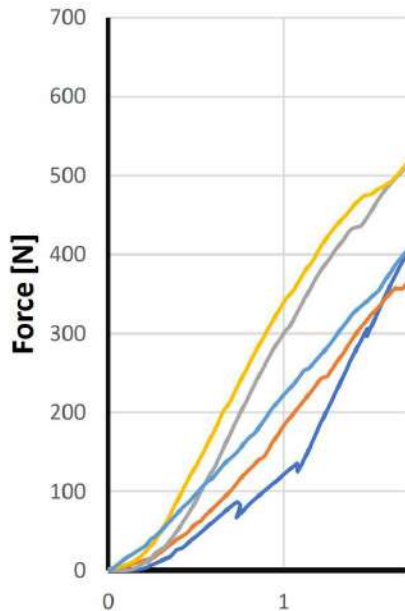


Figure 3.7 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NV testées en compression axiale avec une vitesse V_1 .

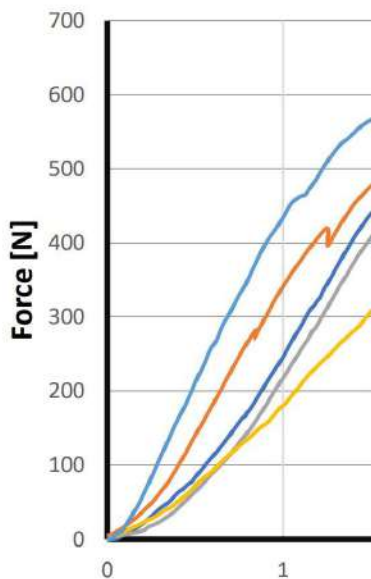


Figure 3.8 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NV testées en compression axiale avec une vitesse V_1 .

Le Tableau 3.3 récapitule les résultats obtenus pour les structures NV et son analyse montre que l'augmentation de la vitesse de chargement de V_1 à V_2 permet une augmentation de la force ultime moyenne de 527,5 N à 541,37 N soit une augmentation de 2,63 % et le déplacement ultime moyen variant de 1,80 mm à 2,21 mm correspondant à un accroissement de 22,78 %. Ces variations démontrent que la vitesse de chargement, dans plage de 1 à 2 mm, n'a pas presque pas d'influence sur la force ultime mais un déplacement plus grand est enregistré ce qui conduit à une flexibilité plus grande de la structure due à l'orientation des cellules hexagonales.

Tableau 3.3: Tableau des valeurs des résultats des tests obtenus pour la structure tubulaire NV.

	Eprouvette N°	$V_1 = 1 \text{ mm/min}$		$V_2 = 2 \text{ mm/min}$	
		Force max [N]	Déplacement ultime [mm]	Force max [N]	Déplacement ultime [mm]
NV	1	589,45	2,56	557,93	2,23

Modes de déformation et de rupture des Nids d'abeilles hexagonales disposée verticalement (NV) :

La même technique d'identification des modes de rupture des éprouvettes lors des tests de compression axiales utilisés pour le NC et NH a été utilisée pour le NV au moyen de l'analyse des photos de la structure, prises avec un téléphone portable toutes les trois secondes.

A titre d'exemple, l'observation de l'évolution des déformations de l'éprouvette NV_V1_Ep1 (Figure 3.9) montre que l'augmentation du déplacement provoque le gonflement du tube dans la partie supérieure suite au flambement des ligaments verticaux. L'augmentation du déplacement conduit à la rupture des ligaments verticaux et par conséquent à la rupture de l'éprouvette.

Figure 3.9 : Photos de l'évolution des déformations des tubes NV de l'éprouvette 1 testée en compression axiale avec une vitesse V_1 .

Chapitre 3

La figure 3.10 représente les courbes représentatives des trois structures tubulaires NC, NH et NV tests aux vues de leur comparaisons qui ressort ce qui suit :

- ✓ Les valeurs des forces ultime moyenne égale à 527,5 N à 541,37 N (Tableau 3.3) obtenue pour NV sont très proche de celle de NH qui sont égale à 519,59 N à 547,49 N (Tableau 3.2) obtenues respectivement avec les vitesses de chargement V_1 et V_2 soit de très faibles variations ; respectivement une réduction de 1,52 % et une augmentation 1,13 %. Par contre, celles obtenues pour les NC égale respectivement à 777,14 et 702,90 N (Tableau 3.1) soit de grandes réductions respectives de 47,33 % et 29,84 % ont été enregistrées.
- ✓ Les déplacements moyens égale 1,80 mm à 2,21 mm (Tableau 3.3) obtenus pour la structure NV obtenues respectivement avec les vitesses de chargement V_1 et V_2 sont comparable à celles obtenus pour NH respectivement égales à 1,94 mm à 2,06 mm (Tableau 3.2) soit des variations assez importantes ; respectivement augmentation de 7,78 % et réduction de 7,28 %. Par contre, les valeurs obtenues pour NV sont nettement plus grandes par rapport à celles obtenus les NC respectivement égale à 1,31 mm et 1,26 mm (Tableau 3.1) soit de grandes diminutions respectives de 37,40 % et 75,40 % ont été enregistré.

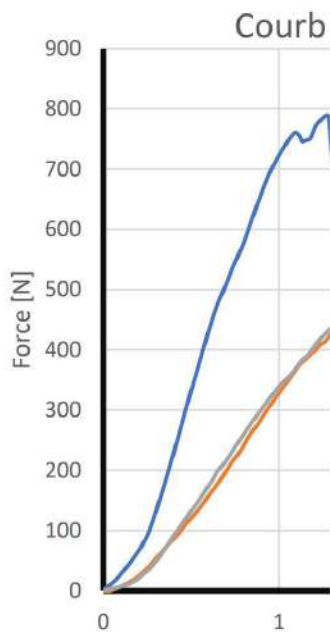


Figure 3.10 : Courbe type pour les 3 structures tubulaire.

3.4 Analyse des résultats pour les structures plates

Trois structures plates ont été conçues, élaborées en PLA par imprimante 3D à savoir :

- *Nid d'abeille carré (NC_E8)*
- *Nid d'abeille hexagonale horizontale (NH_E8)*
- *Nid d'abeille hexagonale verticale (NV_E8)*

3.4.1 Nid d'abeille carré (NC_E8)

Le comportement force-déplacement de *NC_E8* se déroule en trois étapes principale (Figure 3.11). La première quasi-linéaire jusqu'à l'atteinte de la force maximale, moyennement égale à 3228 N obtenu pour un déplacement moyen de 0,94 mm (Tableau 3.5), suivi par un comportement non linéaire avec une chute brutale de la force et enfin la troisième étape non linéaire avec une diminution graduelle de force.

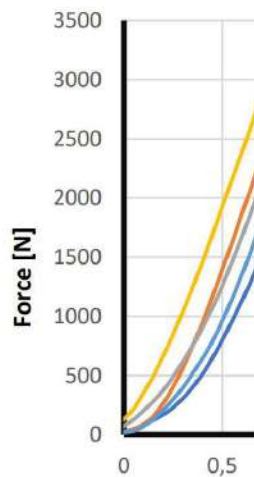


Figure 3.11 : Courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NC_E8.

Les résultats obtenus des cinq éprouvettes sont récapitulés dans le Tableau 3.5 qui démontre que la force maximale moyenne de 3229 N avec une dispersion de 3,2 % est significativement plus élevée que pour les structures tubulaires (NC, NH et NV). Tandis que, le déplacement moyen est égal à 0,94 mm, avec une dispersion plus grande 12,77 %, qui est égale à environ la moitié des déplacements des NC, NH et NV.

Tableau 3.5 : Tableau récapitulatif des valeurs de la force et du déplacement de la structure plate NC_E8 testée en compression.

La vitesse d'essai	Eprouvette n°	NC_E8	
		Force max [N]	Déplacement ultime [mm]
n/min	1	3208,11	1,11
	2	3171,075	0,87

L'analyse des faciès de rupture est effectuée par l'analyse de vidéo et de photos prise toutes les trois secondes à l'aide d'un téléphone portable.

A titre d'exemple, l'observation de l'évolution des déformations de l'éprouvette NC_E8_Ep2 (Figure 3.12) montre que l'augmentation du déplacement provoque le flambement des cellules dans la partie supérieure de l'éprouvette suite au flambement des ligaments verticaux dans le sens perpendiculaire au chargement. L'augmentation du déplacement conduit à un désalignement de la ligne des cellules et son développement provoque par conséquent la rupture par cisaillement de l'éprouvette.

Figure 3.12 : Faciès de rupture des structures plate en Nid d’abeille carré (NC_E8) lors des essais de compression.

3.4.2 Nid d’abeille hexagonal horizontal (NH_E8)

Le comportement force-déplacement de *NH_E8* se déroule en trois étapes principale (Figure 3.13) et se caractérise de dispersions plus faibles par rapport à la structure *NC_E8* notamment dans la première étape ayant un comportement linéaire élastique. La deuxième étape se caractérise par un comportement non linéaire jusqu’à l’atteinte de la force maximale, suivi par une chute brutale de la force dans la troisième étape provoquant ainsi une rupture brutale par cisaillement dans le plan de chargement de l’éprouvette.

La force maximale moyenne trouver pour *NH_E8* est égale à 1523,43 N (Tableau 3.6) qui est largement inférieur à 3228,73 N obtenue pour *NC_E8*, soit une réduction de 52,82 %. Tandis que, le déplacement obtenu est de 1,83 mm qui est largement supérieur à 0,94 obtenu pour *NC_E8* soit une diminution de 48,63 %. En d’autres termes, la structure hexagonale *NH_E8* présente une résistance à la compression inférieures à celles de la structure carrée *NC_E8*, mais elle est plus flexible par rapport à cette dernière.

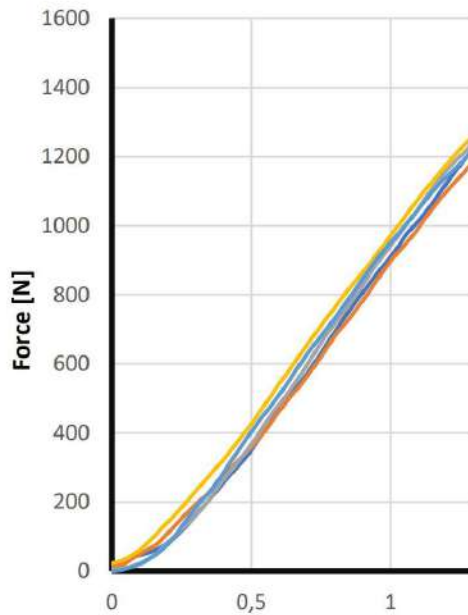


Figure 3.13 : Courbes d'évolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes NH_E8.

Tableau 3.6 : Tableau récapitulatif des valeurs de la force et du déplacement de la structure plate NH_E8 testée en compression.

La vitesse d'essai	Eprouvette n°	NH_E8	
		Force max [N]	Déplacement ultime [mm]
nm/min	1	1547,147	1,87
	2	1547,402	1,87
	3	1558.143	1.92

L'analyse des faciès de rupture est effectuée par l'analyse de vidéo et de photos prise toutes les trois secondes à l'aide d'un téléphone portable.

A titre d'exemple, l'observation de l'évolution des déformations de l'éprouvette NH_E8_Ep1 (Figure 3.14) montre que l'augmentation du déplacement conduit à un mécanisme d'écrasement progressif des cellules permettant une absorption d'énergie, suivie par leurs désalignements dans le

Chapitre 3

sens horizontale et son développement provoque par conséquent la rupture par cisaillement de l'éprouvette dans le plan du chargement.

Figure 3.14 : Faciès de rupture des structures plate en Nid d'abeille hexagonale (NH_E8) lors des essais de compression.

3.4.3 Nid d'abeille hexagonal vertical (NV_E8)

Le comportement force-déplacement de *NV_E8* se déroule en trois étapes principales (Figure 3.15). La première est quasi-élastique linéaire et la deuxième étape se caractérise d'une part par un comportement non linéaire, jusqu'à l'atteinte de la force maximale et d'autre part par des dispersions plus grandes, notamment dans la force ultime, par rapport à la structure *NH_E8*. Enfin, la dernière étape montre une chute brutale de la force, comparativement à la structure *NH_E8*, provoquant ainsi une rupture fragile par cisaillement dans le plan de chargement de l'éprouvette.

La force maximale moyenne trouvée pour *NV_E8* est égale à 1379,089 N (Tableau 3.7), est légèrement inférieure à celle obtenue pour *NH_E8* qui est égale à 1523,43 N (Tableau 3.6) et largement inférieure à 3228,73 N obtenue pour *NC_E8*, soit des réductions respectives de 9,47 % et 57,29 %. Tandis que, le déplacement obtenu est de 2,28 mm, qui est supérieur à 1,83 mm obtenu pour *NH_E8* et qui est largement supérieur à 0,94 mm obtenu pour *NC_E8* soit des augmentations respectives de 24,59 % et 242,55 %.

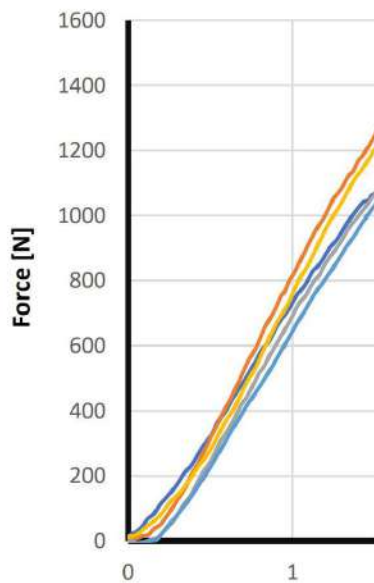


Figure 3.15 : Evolution de la force en fonction du déplacement des éprouvettes *NV_E8*

La figure 3.16 montre une courbe représentative par type des trois structures étudiées. L'analyse de cette figure montre que la structure hexagonale *NV_E8* présente la rigidité et la résistance à la compression les plus faibles par rapport aux structures *NC_E8* et *NH_E8* mais elle possède le déplacement le plus élevé ce qui la rend la plus flexible.

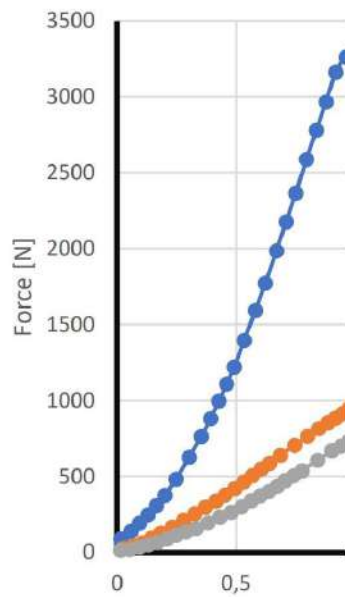


Figure 3.16: Courbe type de structures plats

Tableau 3.7 : Tableau récapitulatif des valeurs de la force et du déplacement de la structure plate NV_E8 testée en compression.

La vitesse d'essai	Eprouvette n°	NV_E8	
		Force max [N]	Déplacement ultime [mm]
mm/min	1	1314,196	2,35
	2	1500,042	2,30
	3	1290,971	2,35

L'analyse des faciès de rupture est effectuée par l'analyse de vidéo et de photos prise toutes les trois secondes à l'aide d'un téléphone portable.

A titre d'exemple, l'observation de l'évolution des déformations de l'éprouvette NV_E8_Ep2 (Figure 3.17) montre que le mode d'endommagement final est la rupture par

Chapitre 3

cisaillement donc est similaire à celui obtenu pour NH_E8_Ep1, la différence réside dans le fait que cette dernière est plus ductile que la première.

Dans le cas de NV_E8_Ep2 l'augmentation du déplacement conduit à un mécanisme d'écrasement progressif des cellules conduisant à une rupture des ligaments en V permettant une absorption d'énergie, suivie par leurs désalignements dans le sens horizontal (déplacement de gauche vers la droite) et son développement provoque par conséquent la rupture brutale par cisaillement de l'éprouvette dans le plan du chargement.

Figure 3.17 : Faciès de rupture des structures plates en Nid d'abeille hexagonale (NV_E8) lors des essais de compression.

3.5 Conclusions

Dans ce chapitre est présenté une analyse approfondie des performances mécaniques de structures tubulaires et plates en nid d'abeille fabriquées par impression 3D à partir d'un file en PLA. Les tests de compression des structures élaborées ont mis en évidence l'influence significative de la géométrie du nid d'abeille et de la vitesse de déformation sur la résistance à la compression et le mode de ruptures. Les principales conclusions sont comme suit :

- Les résultats obtenus ont montré que les structures avec des cellules carrées (NC) en forme tubulaire ou plate présentent une résistance à la compression largement supérieure à celle des structures hexagonales. Tandis que, le déplacement à la rupture est le plus faible.
- Les cellules hexagonales horizontalement (NH) en forme de tube ou plates ont une résistance à la compression légèrement plus élevées que celle ayant leurs cellules disposées verticalement (NV).
- Les structures tubulaire NC et NH se rompent par cisaillement dans le plan du chargement, alors que la structure NV se rompt par flambement.
- Les structures plates carrée NC se rompent par cisaillement hors plans de chargement, alors que celles hexagonal NH, et NV la première se rompt par cisaillement brutalement dans le plan de chargement et la dernière similairement a la première mais elle est plus ductile.
- Des recherches futures pourraient se concentrer sur l'exploration de nouvelles géométries de cellules, leurs caractérisations plus approfondies notamment sur le comportement viscoélastique du PLA à différentes vitesses de déformation, et l'intégration de ces structures dans des applications concrètes, telles que l'emballage, l'absorption d'énergie et l'architecture légère.

Conclusion
générale

Conclusion générale

Ce mémoire de fin d'études a permis d'explorer le potentiel des structures en nid d'abeille fabriquées par impression 3D à partir d'acide poly-lactique (PLA) en tant que matériaux légers, performants et biodégradable. L'analyse approfondie des résultats expérimentaux des tests de compression axiale a mis en lumière l'influence significative de la géométrie des cellules et, dans une moindre mesure, de la vitesse de déformation sur la résistance mécanique de ces structures. Les principales conclusions sont comme suit :

- Il ressort clairement de cette étude que les structures tubulaires que plates en nid d'abeille carrées (NC) présentent une résistance à la compression supérieure à celle des structures hexagonales ayant des cellules disposées horizontalement (NH) ou verticalement (NV). Ceci peut être expliqué par les ligaments de la NC disposés verticalement donc dans la direction de la force appliquée ce qui leurs offrent une meilleure résistance au flambage et à l'écrasement.
- L'influence de la vitesse de déformation, bien que moins marquée, ne doit pas être négligée. Les essais ont montré une légère diminution de la résistance à la compression avec l'augmentation de la vitesse de sollicitation, soulignant ainsi le comportement viscoélastique du PLA.
- La géométrie des structures et la vitesse de chargement influe sur le mode d'endommagement des structures.
- Au-delà de ces conclusions principales au-dessus, ce travail a permis de confirmer l'intérêt de l'impression 3D pour la fabrication de structures en nids d'abeilles aux géométries complexes et contrôlées. L'utilisation du PLA, un bioplastique biosourcé et biodégradable, renforce l'aspect durable de ces matériaux.
- Ce travail ouvre également la voie à de futures pistes de recherches innovantes.
- Enfin, l'exploration d'applications concrètes pour ces matériaux, notamment dans les domaines de l'emballage, de l'absorption d'énergie ou de l'isolation thermique et acoustique, constituerait une suite logique à ce travail.

Enfin, l'exploration d'applications concrètes pour ces matériaux, notamment dans les domaines de l'emballage, de l'absorption d'énergie ou de l'isolation thermique et acoustique, constituerait une suite logique à ce travail.

En définitive, ce mémoire de fin d'études contribue à une meilleure compréhension des structures en nid d'abeille imprimées en 3D et souligne leur fort potentiel pour des applications innovantes et durables. Les résultats obtenus constituent une base solide pour la poursuite des recherches dans ce domaine en plein essor.

*Références
Bibliographiques*

Références :

- [1] Wadley, H. N. G. (2006). Multifunctional periodic cellular metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 364(1838), 31-68.
- [2] Ashby, M. F., Evans, A. G., Fleck, N. A., Gibson, L. J., Hutchinson, J. W., & Wadley, H. N. G. (2000). *Metal foams: A design guide*. Butterworth-Heinemann.
- [3] Evans, A. G., Hutchinson, J. W., & Ashby, M. F. (1998). Multifunctionality of cellular metal systems. *Progress in Materials Science*, 43(3), 171-221.
- [4] Bhate, D., Penick, C. A., Ferry, L. A., & Lee, C. (2019). Classification and selection of cellular materials in mechanical design: Engineering and biomimetic. *Progress in Materials Science*, 102, 250-327.
- [5] EUMAT. (n.d.). Cellular materials. <https://www.eumetrain.org/> (Accessed April 11, 2024)
- [6] Gibson, L. J., & Ashby, M. F. (1999). *Cellular solids: Structure and properties* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- [7] Banhart, J. (2001). Manufacture, characterization and application of cellular metals and metal foams. *Progress in Materials Science*, 46(6), 559-632.
- [8] Fukushima, M., Colombo, P., & Yoshizawa, Y. (2016). Processing and morphology control of porous ceramics. In S. Hampshire (Ed.), *Handbook of porous materials* (pp. 1-35). World Scientific.
- [9] Yoo, D. (2015). New paradigms in cellular material design and fabrication. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 16(12), 2577-2589.
- [10] Site web consulté pour la dernière fois le 10.4.2024 https://mahdisadjadi.com/project/cellular_materials/.
- [11] Precise Ceramic. (n.d.). Ceramic foams: Properties, manufacturing and uses. <https://www.preciseceramic.com/blog/ceramic-foams-properties-manufacturing-and-uses.html> (Accessed April 11, 2024)
- [12] Chu, J. (2022, August 10). New material can sense, adapt to movement. MIT News. <https://news.mit.edu/2022/materials-sense-movements-0810>
- [13] Rafsanjani, A., & Pasini, D. (2016). Bistable auxetic mechanical metamaterials inspired by ancient geometric motifs. *Extreme Mechanics Letters*, 9, 291-296.

Références

- [14] Zhang, Q., Yang, X., Li, P., Huang, G., Feng, S., Shen, C., ..., & Lu, T. J. (2015). Bioinspired engineering of honeycomb structure - Using nature to inspire human innovation. *Progress in Materials Science*, 74, 332-400.
- [15] Scarpa, F., Blain, S., Lew, T., Perrott, D., Ruzzene, M., & Yates, J. R. (2007). Elastic buckling of hexagonal chiral cell honeycombs. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 38(2), 280-289.
- [16] McGee, O. M., Geraghty, S., Hughes, C., Jamshidi, P., Kenny, D. P., Attallah, M. M., & Lally, C. (2022). An investigation into patient-specific 3D printed titanium stents and the use of etching to overcome Selective Laser Melting design constraints. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 134, 105388.
- [17] Site web consulté pour la dernière fois le 11.4.2024 3Dnatives. (N.d.). L'impression 3D par stéréolithographie : On vous explique tout ! <https://www.3dnatives.com/limpression-3d-par-stereolithographie-on-vous-explique-tout/>
- [18] Site web consulté pour la dernière fois le 20.4.2024 <https://amfg.ai/tag/desktop-3d-printing/>.
- [19] Acierno, D., & Patti, A. (2021). Fused deposition modelling (FDM) of thermoplastic-based filaments: Process and rheological properties - An overview. In A. Kumar (Ed.), *Extrusion-based additive manufacturing of polymers* (pp. 65-100). Elsevier.
- [20] Farah, S., Anderson, D. G., & Langer, R. (2016). Polylactic acid (PLA) bio composite: Processing, additive manufacturing and advanced applications. In S. Thomas & S. K. Nayak (Eds.), *Poly (lactic acid): Synthesis, characterization, processing, and applications* (pp. 181-215). John Wiley & Sons.
- [21] Rasheed, T., Bilal, S., Nabeel, A., & Iqbal, H. M. N. (2022). Critical review on polylactic acid: Properties, structure, processing, bio composites, and nanocomposites. *Polymères*, 14(15), 3009.
- [22] Hu, D., Wang, Y., Song, B., Dang, L., & Zhang, Z. (2019). Energy-absorption characteristics of a bionic honeycomb tubular nested structure inspired by bamboo under axial crushing. *Composites Part B: Engineering*, 162, 21-32.
- [23] Ha, N. S., Lu, G., & Xiang, X. (2019). Energy absorption of a bio-inspired honeycomb sandwich panel. *Journal of materials science*, 54, 6286-6300.
- [24] Compton, B. G., & Lewis, J. A. (2014). 3D-printing of lightweight cellular composites. *Advanced Materials*, 26(34), 5930-5935.
- [25] Site web consulté pour la dernière fois le 29.09.2024 <https://ultimaker.com/>
- [26] Site web consulté pour la dernière fois le 20.4.2024 : [LFV Biax Servohydraulic Systems \(walterbai.com\)](https://www.walterbai.com/)