

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**Université Ferhat Abbas- Sétif 1**

**Institut : Optique et Mécanique de Précision**

**Département : Optique et Mécanique de Précision**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Optique et Mécanique de Précision**

**Spécialité : Mécanique des Matériaux**

**Mémoire de Master**

# **Etude du comportement mécanique des matériaux cellulaires obtenus par impression 3D**

**Etudié par : Mahdaoui Manal**

**Dirigé Par : Dr .A. Zegadi**

Devant le jury :

Pr.L. Smata

Dr.S. Tebbane

Dr.A. Zegadi

(Président)

(Examineur)

(Encadreur)

**Soutenue le : 03/07/2023**

## Résumé :

Les matériaux cellulaires se distinguent par leurs propriétés mécaniques et physiques exceptionnelles, ainsi que par leur capacité remarquable d'absorption d'énergie. Les structures cellulaires utilisées pour la dissipation d'énergie jouent un rôle crucial dans l'ingénierie, permettant d'amortir les chocs, les vibrations et les contraintes mécaniques. Dans ce travail, une structure inspirée de la plante de bambou a été étudiée. La structure a été conçue à l'aide du logiciel SolidWorks en utilisant différents nombres de renforcements afin d'investiguer la relation entre le renforcement et la dissipation d'énergie. Ces pièces ont été fabriquées en utilisant la technologie de l'impression 3D. Les résultats obtenus par des tests de compression quasi-statique démontrent que la résistance des structures peut être ajustée en modulant le nombre de renforts. L'échantillon de 12 nervures doublées présente la contrainte plateau la plus élevée d'environ 11.25 MPa, tandis que l'échantillon de 6 nervures doublées est identifié comme la structure optimale en termes d'absorption d'énergie et de densification. Les résultats obtenus concordent bien avec plusieurs recherches scientifiques.

**Mots clés :** Cellulaire ; Bio inspirée ; Bambou ; Absorption d'énergie ; Quasi-statique ; Plateau ; Densification ; SolidWorks ; Impression 3D ; Nervures ; Nombre de renforcement.

## Abstract:

Cellular materials are distinguished by their exceptional mechanical and physical properties, as well as their remarkable energy absorption capacity. Cellular structures used for energy dissipation play a crucial role in engineering, allowing for the damping of shocks, vibrations, and mechanical stresses. In this study, a structure inspired by the bamboo plant was investigated. The structure was designed using SolidWorks software, employing different numbers of reinforcements to investigate the relationship between reinforcement and energy dissipation. These components were manufactured using 3D printing technology. The results obtained from quasi-static compression tests demonstrate that the strength of the structures can be adjusted by modulating the number of reinforcements. The sample with 12 doubled ribs exhibits the highest plateau stress of approximately 11.25 MPa, while the sample with 6 doubled ribs is identified as the optimal structure in terms of energy absorption and densification. These findings align well with multiple scientific research studies.

**Key words:** Cellular; Bio-inspired; Bamboo; Energy Absorption; Quasi-static; Plateau; Densification; SolidWorks; 3D printing; Ribs; Reinforcement number.

# Sommaire

|                            |   |
|----------------------------|---|
| Résumé : .....             |   |
| INTRODUCTION GENERALE..... | 1 |

## CHAPITRE I

|                                                      |    |
|------------------------------------------------------|----|
| I-1-Introduction .....                               | 3  |
| I-2-Définition des matériaux cellulaires.....        | 3  |
| I-3-Classification des matériaux cellulaires .....   | 4  |
| I-3-1-Nid d’abeilles .....                           | 4  |
| I-3-2- Mousses métalliques .....                     | 5  |
| I-3-3-Lattices “treillis” .....                      | 5  |
| I-3-4-Matériaux pliés.....                           | 6  |
| I-3-5-Structures à parois minces bio-inspirées ..... | 7  |
| I-4-Propriétés et avantages .....                    | 9  |
| I-5-Application .....                                | 11 |
| I-5-1-Domaine médicale .....                         | 11 |
| I-5-2-Domaine d’automobile.....                      | 13 |
| I-5-3-Domaine aéronautique et aérospatial .....      | 14 |
| I-5-4-Domaine de construction .....                  | 15 |
| I-5-5-Autres domaines d’application.....             | 17 |
| I-6-Conclusion.....                                  | 18 |

## CHAPITRE II

|                                                 |    |
|-------------------------------------------------|----|
| II-1-Introduction .....                         | 19 |
| II-2-La fabrication additive .....              | 19 |
| II-2-1-Principe .....                           | 19 |
| II-3-Les types de la fabrication additive.....  | 20 |
| II-4-Avantage et propriétés .....               | 23 |
| II-5-Application.....                           | 24 |
| II-5-1-L’aéronautique et l’aérospatiale .....   | 24 |
| II-5-2- L’architecture et la Construction ..... | 26 |
| II-5-3- La médecine .....                       | 26 |
| II-5-4-Le sport .....                           | 27 |
| II-5-5-Le domaine militaire.....                | 29 |
| II-6-Conclusion .....                           | 30 |

### **CHAPITRE III**

|                                                              |    |
|--------------------------------------------------------------|----|
| III-1-Introduction .....                                     | 31 |
| III-2- Réalisation des structures .....                      | 31 |
| III-2-1- Conception .....                                    | 31 |
| A- Les structures du premier ordre.....                      | 33 |
| B- Les structures du deuxième ordre.....                     | 34 |
| III-2-2- Impression 3D des structure désignée .....          | 35 |
| A - Paramètres d'impression .....                            | 36 |
| B- Equipements utilisés.....                                 | 36 |
| III-3- Evolution de la densité des structures imprimées..... | 39 |
| III-4-Interprétation et conclusion .....                     | 42 |

### **CHAPITRE IV**

|                                                                |    |
|----------------------------------------------------------------|----|
| IV-1-Introduction .....                                        | 44 |
| IV-2-Comportement mécanique en compression.....                | 44 |
| IV-2-1-Mode de l'essai .....                                   | 44 |
| IV-2-2-Résultats .....                                         | 45 |
| A. Comportement mécanique de l'échantillon vide .....          | 45 |
| B. L'effet du renforcement sur le comportement mécanique ..... | 47 |
| C. Progression de la contrainte plateau.....                   | 50 |
| D. Evolution de la déformation à densification .....           | 51 |
| E. Capacité d'absorption d'énergie .....                       | 52 |
| IV-3- Etat de l'art .....                                      | 54 |
| IV-4- Discussion des résultats.....                            | 55 |
| IV-5-Conclusion.....                                           | 56 |
| CONCLUSION GENERALE .....                                      | 57 |

# Liste des figures

## CHAPITRE I

|                                                                                                                                                                                                                                           |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure I. 1 :</b> Exemples de matériaux cellulaires. ....                                                                                                                                                                              | 4  |
| <b>Figure I. 2 :</b> Exemples des matériaux nid d'abeille. ....                                                                                                                                                                           | 4  |
| <b>Figure I. 3 :</b> Mousses métalliques ; <b>(a)</b> Avec une porosité fermée ; <b>(b)</b> Avec une porosité ouverte. ....                                                                                                               | 5  |
| <b>Figure I. 4 :</b> Quelques exemples sur les matériaux lattices : <b>(a)</b> Un treillis en titane, basé sur la structure du diamant, fabriqué par EBM ; <b>(b)</b> Photographie d'un treillis tridimensionnel en aluminium. ....       | 6  |
| <b>Figure I. 5 :</b> La grande variété de matériaux d'origami architecturés à différentes échelles de longueur. ....                                                                                                                      | 7  |
| <b>Figure I. 6 :</b> <b>(a)</b> Structures inspirées du bambou; <b>(b)</b> Coupe transversale de bambou une image générale et microscopique. ....                                                                                         | 8  |
| <b>Figure I. 7 :</b> Conception tubulaire bionique en bambou. ....                                                                                                                                                                        | 8  |
| <b>Figure I. 8 :</b> Comparaison de la capacité d'absorption d'énergie entre les structures d'ingénierie actuellement largement utilisées et les structures bio-inspirées représentatives. ...                                            | 9  |
| <b>Figure I. 9 :</b> La gamme de propriétés disponibles pour l'ingénieur grâce au moussage : <b>(a)</b> densité ; <b>(b)</b> conductivité thermique ; <b>(c)</b> module de Young; <b>(d)</b> résistance à la compression. ....            | 10 |
| <b>Figure I. 10 :</b> Courbe de contrainte-déformation typiques de matériaux cellulaires. ....                                                                                                                                            | 11 |
| <b>Figure I. 11 :</b> (a) Tomographie d'un implant dentaire poreux à base de Ti pour l'amélioration de l'ostéointégration ; (b) produits de tige de hanche CP Ti poreux fonctionnels en forme de filet avec jusqu'à 20% de porosité. .... | 12 |
| <b>Figure I. 12 :</b> Revêtement en titane poreux sur une cupule acétabulaire pour remplacement de la hanche (Avec l'aimable autorisation du Conseil national de recherches Canada, Institut des matériaux industriels). ....             | 12 |
| <b>Figure I. 13 :</b> Matériaux en mousse structurelle utilisés sur l'Audi A8. ....                                                                                                                                                       | 13 |
| <b>Figure I. 14 :</b> <b>(a)</b> CrashBox avec une mousse métallique en aluminium ; <b>(b)</b> Un petit élément absorbant les chocs pour l'Audi Q7. ....                                                                                  | 13 |
| <b>Figure I. 15 :</b> <b>(a)</b> Un prototype de train à grande vitesse allemand constitué d'un sandwich en aluminium soudé ; <b>(b)</b> Une vue de l'intérieur avec le nombre réduit de composants requis. ....                          | 14 |
| <b>Figure I. 16 :</b> Prototype de cône de fusée Ariane 65 en AFS. L'image de gauche montre l'emplacement de la pièce dans la fusée. ....                                                                                                 | 14 |
| <b>Figure I. 17 :</b> <b>(a)</b> Composants légers avec structure en treillis pour un hélicoptère. ; <b>(b)</b> Partie de l'inverseur de poussée sur Boeing. ....                                                                         | 15 |
| <b>Figure I. 18 :</b> Forme d'un fuselage central type A320 avec la structure du plancher. ....                                                                                                                                           | 15 |
| <b>Figure I. 19 :</b> <b>(a)</b> Musée du Louvre à Abu Dhabi ; <b>(b)</b> L'architecture de leur dôme. ....                                                                                                                               | 16 |
| <b>Figure I. 20 :</b> Structure en nid d'abeille du Centre de Recherche et d'Études Pétrolières du Roi Abdullah à Riyad. ....                                                                                                             | 16 |
| <b>Figure I. 21 :</b> <b>(a)</b> Un béton cellulaire ; <b>(b)</b> Décoration avec du béton cellulaire ; <b>(c)</b> La construction d'une maison en béton cellulaire. ....                                                                 | 17 |
| <b>Figure I. 22 :</b> Applications commerciales des matériaux cellulaires. ....                                                                                                                                                           | 18 |

## CHAPITRE II

|                                                                                                                                                                                                                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure II. 1 :</b> Étapes de fabrication additive.....                                                                                                                                                                                                                                   | 20 |
| <b>Figure II. 2 :</b> Divers schémas montrent les différentes techniques de la fabrication additive : <b>(a)</b> Technique de FDM; <b>(b)</b> Technique de SLA ; <b>(c)</b> Technique de SLM ; <b>(d)</b> Technique de SLS ; <b>(e)</b> Technique de EBM ; <b>(f)</b> Technique de FEF..... | 23 |
| <b>Figure II. 3 :</b> Avantages de l'impression 3D du point de vue du traitement, de la propriété et du produit. ....                                                                                                                                                                       | 24 |
| <b>Figure II. 4 :</b> Corps refroidisseur pour la section aéronautique utilisant la technique EBM .                                                                                                                                                                                         | 25 |
| <b>Figure II. 5 :</b> L'utilisation de l'impression 3D dans la fabrication de diverses pièces et composants d'avions. ....                                                                                                                                                                  | 25 |
| <b>Figure II. 6 :</b> <b>(a)</b> Composants d'un drone imprimés en 3D utilisant la technologie FDM ; <b>(b)</b> Drone quadricoptère imprimé en 3D.....                                                                                                                                      | 25 |
| <b>Figure II. 7 :</b> Impression 3D de structures architecturales avancées .....                                                                                                                                                                                                            | 26 |
| <b>Figure II. 8 :</b> Révolution de la fabrication additive dans le domaine médical par l'impression de dispositifs et de modèles anatomiques avancés. ....                                                                                                                                 | 27 |
| <b>Figure II. 9 :</b> L'impact de la fabrication additive dans le domaine du sport et l'innovation de matériel sportif avancé. ....                                                                                                                                                         | 28 |
| <b>Figure II. 10 :</b> Le potentiel de la fabrication additive dans le secteur militaire par l'impression de matériel tactique pour une supériorité opérationnelle. ....                                                                                                                    | 29 |

## CHAPITRE III

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure III. 1 :</b> Schéma de conception détaillée d'un échantillon.....                                                                                                                                                                                                                                                                           | 32 |
| <b>Figure III. 2 :</b> L'extrusion du profil initial à la forme finale obtenue.....                                                                                                                                                                                                                                                                   | 32 |
| <b>Figure III. 3 :</b> Conception des pièces du premier ordre et du tube vide : <b>(a)</b> Tube vide, <b>(b)</b> Structure simple de quatre nervures , <b>(c)</b> Structure simple de six nervures , <b>(d)</b> Structure simple de huit nervures , <b>(e)</b> Structure simple de dix nervures , <b>(f)</b> Structure simple de douze nervures. .... | 34 |
| <b>Figure III. 4 :</b> Conception des pièces du deuxième ordre: <b>(a)</b> Structure de quatre nervures doublées , <b>(b)</b> Structure de six nervures doublées , <b>(c)</b> Structure de huit nervures doublées , <b>(d)</b> Structure de dix nervures doublées , <b>(e)</b> Structure de douze nervures doublées. ....                             | 35 |
| <b>Figure III. 5 :</b> Modèle de notre échantillon dans Cura Ultimaker. ....                                                                                                                                                                                                                                                                          | 36 |
| <b>Figure III. 6 :</b> Imprimante 3D Creality Ender- 3 Pro. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 37 |
| <b>Figure III. 7 :</b> Filament PLA utilisé. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 37 |
| <b>Figure III. 8 :</b> Forme finale après l'impression 3D des structures de premier ordre et du tube vide. ....                                                                                                                                                                                                                                       | 38 |
| <b>Figure III. 9 :</b> La forme finale après l'impression 3D des structures du deuxième ordre.....                                                                                                                                                                                                                                                    | 39 |
| <b>Figure III. 10 :</b> L'évolution de la densité numérique et expérimentale en fonction de nombre de renforcement pour les structures de premier ordre. ....                                                                                                                                                                                         | 41 |
| <b>Figure III. 11 :</b> L'évolution de la densité numérique et expérimentale en fonction de nombre de renforcement pour les structures de deuxième ordre. ....                                                                                                                                                                                        | 42 |

## CHAPITRE IV

|                                                                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Figure IV. 1 : (a) Machine de compression Zwick/Roell Z050 et (b) Plateau supérieure et inférieure de compression.</b> .....                                        | 45 |
| <b>Figure IV. 2 : L'évolution de la contrainte en compression en fonction de la déformation de tube vide imprimé.</b> .....                                            | 45 |
| <b>Figure IV. 3 : Mode de déformation de notre échantillon vide sous compression.</b> .....                                                                            | 46 |
| <b>Figure IV. 4 : L'évolution de comportement mécanique en compression pour les échantillons de premier ordre.</b> .....                                               | 47 |
| <b>Figure IV. 5 : Mode de déformation des échantillons du premier ordre.</b> .....                                                                                     | 48 |
| <b>Figure IV. 6 : L'évolution de comportement mécanique en compression pour les échantillons de deuxième ordre.</b> .....                                              | 49 |
| <b>Figure IV. 7 : Le mode de déformation des échantillons de deuxième ordre.</b> .....                                                                                 | 50 |
| <b>Figure IV. 8 : L'évolution de la contrainte du plateau en fonction du nombre de renforcement pour les deux types de structures premier et deuxième ordre.</b> ..... | 51 |
| <b>Figure IV. 9 : L'évolution de la déformation à densification en fonction de nombres de renforcement pour les deux types de structures.</b> .....                    | 52 |
| <b>Figure IV. 10 : L'évolution de l'énergie absorbée en fonction de nombres de renforcement.</b> .....                                                                 | 53 |

## Liste des tableaux

### CHAPITRE II

|                                                                                |    |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau II. 1 : Catégories de techniques de fabrication additive.</b> ..... | 21 |
|--------------------------------------------------------------------------------|----|

### CHAPITRE III

|                                                                                                                        |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau III. 1 : Dimensionnements des pièces.</b> .....                                                             | 33 |
| <b>Tableau III. 2 : Les paramètres d'impression utilisés lors du processus d'impression de nos échantillons.</b> ..... | 36 |
| <b>Tableau III. 3 : Différentes propriétés du filament PLA utilisé pour l'impression 3D.</b> .....                     | 38 |
| <b>Tableau III. 4 : Les paramètres de la densité numérique des échantillons de premier ordre.</b> .....                | 40 |
| <b>Tableau III. 5 : Les paramètres de la densité expérimentale des échantillons de premier ordre.</b> .....            | 40 |
| <b>Tableau III. 6 : Les paramètres de la densité numérique des échantillons du deuxième ordre.</b> .....               | 40 |
| <b>Tableau III. 7 : Les paramètres de la densité expérimentale des échantillons du deuxième ordre.</b> .....           | 41 |

### CHAPITRE IV

|                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tableau IV. 1 : Paramètres d'absorption d'énergie pour les structures de premier ordre.</b> ..... | 48 |
| <b>Tableau IV. 2 : Paramètres d'absorption d'énergie pour les structures de deuxième ordre.</b> ...  | 49 |

## Liste des symboles

| Signes       | Signification                                       |
|--------------|-----------------------------------------------------|
| FDM          | Modélisation par dépôt de matière fondue            |
| FFF          | Fabrication par Filament Fondu                      |
| EBM          | Fusion par faisceau d'électrons                     |
| SLS          | Frittage sélectif par laser                         |
| SLM          | Fusion sélective par laser                          |
| DLP          | Traitement numérique de la lumière                  |
| LENS         | Formation de structure par faisceau laser           |
| LOM          | Fabrication d'objets stratifiés                     |
| FEF          | Fabrication par extrusion à froid                   |
| CP Ti        | Titane commercialement pur                          |
| AFS          | Panneau sandwich en mousse d'aluminium              |
| LED          | Diode électroluminescente                           |
| FA           | Fabrication additive                                |
| CAO          | Conception Assistée par Ordinateur                  |
| STL          | Langage de Tessellation Standard                    |
| ASTM         | Société américaine pour les essais et les matériaux |
| ISO          | Organisation internationale de normalisation        |
| SAV          | Service Après-Vente                                 |
| PLA          | Acide polylactique                                  |
| BMT          | Tube multicellulaire bio-inspiré                    |
| $\epsilon_d$ | Déformation à densification                         |
| $\sigma$     | Contrainte plateau                                  |



## INTRODUCTION GENERALE

La demande augmente pour des structures légères à haute résistance mécanique pour des applications d'absorption d'énergie. En utilisant des matériaux cellulaires biomimétiques, les ingénieurs sont en mesure de concevoir des structures légères, mais robustes, qui peuvent absorber l'énergie lors d'impacts ou de charges importantes. Cela ouvre la voie à de nouvelles applications dans des domaines tels que l'aérospatiale, le transport, les réacteurs nucléaires et le génie civil, où la sécurité et la protection contre les impacts sont des priorités.

L'approche biomimétique a été appliquée pour la première fois dans une application d'absorption d'énergie en 2000.[1] Depuis cette première application, la recherche dans le domaine de l'absorption d'énergie biomimétique a continué à progresser, offrant des avancées et des innovations constantes pour développer des matériaux et des structures encore plus performants et adaptés aux besoins spécifiques de chaque domaine d'application. Ces matériaux sont généralement fabriqués par des méthodes conventionnelles telles que le moulage qui limitent leurs performances. Récemment, l'impression additive a offert une approche moderne pour créer ces structures. Cette technologie permet une personnalisation précise et la reproduction fidèle de modèles complexes inspirés de la nature.

Ce travail consiste à concevoir des tubes multicellulaires bio inspirés de la plante de bambou, ainsi qu'à les fabriquer à l'aide d'une technologie d'impression 3D basée sur la modélisation par dépôt de matière fondue (FDM).

Pour atteindre ces objectifs, cette étude est divisée en quatre chapitres :

Le premier chapitre de ce manuscrit présente les matériaux cellulaires dans leurs généralités et leur classification, et aborde également les notions relatives aux matériaux cellulaires bio-inspirés, en mettant l'accent sur la structure du bambou et ses principales applications.

Le deuxième chapitre se concentre spécifiquement sur la fabrication additive, en abordant ses différents types et applications, dans le but de permettre au lecteur de mieux comprendre la suite de ce travail.

Le troisième chapitre se consacre à l'étude de la conception et de la réalisation des échantillons multicellulaires bio-inspirés. Il met ensuite l'accent sur le comportement en compression quasi-statique de ces échantillons.

Le quatrième chapitre illustre les résultats expérimentaux significatifs et leurs interprétations. Enfin les renseignements essentiels tirés de cette étude vont être résumés dans une conclusion générale. A la fin nous proposerons quelques perspectives pour notre travail.