

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
FACULTE DES SCIENCES APPLIQUEES
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

THÈSE

Présentée pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences

Spécialité : GENIE MECANIQUE

Par

CHERIEF Moncef

THÈME

**Conception et Caractérisation des Biosandwichs
Auxétiques à Hautes Performances avec Coefficient
de Poisson Négatif : Approche Numérique et
Expérimentale**

Soutenue publiquement le 04/07/2021 devant le jury :

AMEUR Toufik	MCA	Université d'Ouargla	Président
BOUAKBA Mustapha	Professeur	Université d'Ouargla	Rapporteur
BELAADI Ahmed	MCA	Université de Skikda	Co-Rapporteur
LAOUICI Hamdi	Professeur	ENST- Dergana	Examineur
GUEBAILIA Moussa	MCA	Université d'Ouargla	Examineur
AMROUNE Salah	MCA	Université de M'sila	Examineur

Année universitaire 2020-2021

Remerciements

Au terme de ces cinq années, l'aboutissement de ce mémoire marque une période dans ma vie, mais aussi le début d'une nouvelle. Je souhaiterais remercier toutes les personnes sans qui tout cela ce document n'aurait pas vu le jour.

Je remercie mon directeur et co-encadrant de thèse, Pr BOUAKBA Mustapha, et Dr BELAADI Ahmed, qui m'ont offert l'opportunité d'effectuer cette thèse au tout début de l'année 2016. Je leur suis reconnaissant de leur disponibilité pendant ces quatre années, ainsi que de leurs conseils avisés.

Ainsi je remercie infiniment les membres de jury composé de Pr LAOUICI Hamdi et Dr AMROUNE Salah et Dr GUEBAILIA Moussa.

Je voudrais également mentionner certaines des personnes qui ont contribué d'une manière ou d'une autre au travail accompli et au bon déroulement de ces cinq années. Tout d'abord Dr MEDDOUR Ikhlas, et Dr BOURCHAK Mostefa pour leur aide apportée au début de la thèse et aussi Dr BOUMAAZA Messaouda pour son aide pour la correction de la thèse.

J'adresse aussi mes remerciements à toutes les personnes de l'Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement de l'université de Boumerdes pour m'avoir permis de réaliser les tests mécaniques ainsi toute personne qui a contribué à la réalisation de cette thèse des Universités de Ouargla, Guelma et de Skikda.

De plus, je tiens à saluer également tout le personnel administratif, du de l'Université du KASDI MERBAH de Ouargla, pour leur nombreux services administratifs.

Cette thèse a également été l'occasion pour moi de diriger ou de participer à l'encadrement de projets de fin d'études réalisés auprès de l'Université de SKIKDA.

Mes pensées vont naturellement aussi tout à ma famille. Tout d'abord à mes parents, qui m'ont soutenu tout au long de mes études et m'ont toujours encouragé quel que soit la voie que je décidais de prendre. Je sais aujourd'hui encore que je pourrai compter sur leur soutien indéfectible pour tous mes choix pour l'avenir, que je souhaite poursuivre dans la recherche scientifique.

Résumé

L'objectif de cette thèse est la caractérisation du comportement mécanique et de l'endommagement d'un biocomposite constitué de fibres naturelles/époxy. Les fibres végétales constituent en effet un choix écologique intéressant par rapport aux fibres synthétiques qui sont les plus utilisées pour les pièces composites de grande diffusion principalement les fibres de verre. La géométrie (épaisseur paroi et angle d'inclinaison), types de fibres (lin, jute et sisal) et la variation de la structure (nid d'abeille, nid d'abeille re-entrant et silicomb) sont examinés. La caractérisation mécanique est menée avec trois types de chargement correspondant aux différents types de fibres. Les moules ont été produits en utilisant la technique d'impression 3D avec de l'acide polylactique (PLA). L'étude de la caractérisation des composites est réalisée en combinant les techniques suivantes : L'évolution des paramètres mécaniques via des essais de traction et de compression mais aussi des essais de flexion, la microscopie (MEB). De plus, des expériences basées sur la conception de Taguchi (L9) ont été menées pour déterminer l'effet de chaque facteur sur la contrainte de compression ultime, la déformation et l'énergie d'absorption. Afin d'étudier l'endommagement de la structure re-entrant, une étude numérique en mode de traction a été introduite basée sur la modélisation par éléments finis en utilisant le logiciel ANSYS version 15.0. Dans le cadre de cette étude, il a été constaté que l'épaisseur a un effet significatif sur les contraintes de compression et le comportement à la rupture. Tous ces résultats ont finalement permis de comprendre le comportement de chaque structure vis-à-vis des chargements appliqués et également le type de renfort adéquat pour l'optimisation des propriétés mécaniques.

Mots clés :

Composites structurels ; Statistiques ; Propriétés mécaniques.

Abstract

The objective of this thesis is the characterization of the mechanical behaviour and damage of a biocomposites made of natural fibres/epoxy. Plant fibres are an interesting ecological choice compared to synthetic fibres, which are most used for mass-produced composite parts, mainly glass fibres.. The geometry (wall thickness and angle of inclination), types of fibres (flax, jute and sisal) and variation of the structure (honeycomb , honeycomb re-entrant and silicomb) are examined. The mechanical characterization is carried out with three types of loading corresponding to the different kind of fibres. The moulds were produced using the 3D printing technique with polylactic acid (PLA). The study of the characterization of composites is carried out by combining the following techniques: The evolution of mechanical parameters through tensile and compression tests but also flexion tests, microscopy (SEM). In addition, experiments based on the Taguchi (L9) design were conducted to determine the effect of each factor on ultimate compression stress, deformation and absorption energy. In order to study the damage to the re-entrant structure, a numerical tensile mode study was introduced based on finite element modelling using ANSYS version 15.0 software. In this study, thickness was found to have a significant effect on compressive stresses and fracture behaviour. All these results have finally made it possible to understand the behaviour of each structure vs the loads applied and the type of reinforcement suitable for the optimization of the mechanical properties.

Key Words:

Structural composites; Statistics ; Mechanical properties.

المخلص

الهدف من هذه الأطروحة هو دراسة السلوك الميكانيكي وضرر المواد المركبة البيوكومبوزيت المصنوعة من الألياف الطبيعية والايوكسي. تعتبر الألياف النباتية في الواقع خياراً بيئياً مثيراً للاهتمام مقارنةً بالألياف الاصطناعية الأكثر استخداماً للمواد المركبة للاستعمال الشامل، وخاصة الألياف الزجاجية. يتم فحص المعايير الهندسية (سمك جدار الهيكل وزاوية الميل)، وأنواع الألياف الطبيعية (الكتان والجوت والسيصال) والتباين في الهيكل (خلية النحل، خلية النحل ذات أضلع داخلية، والسيليكون). يتم إجراء الدراسة الميكانيكية بثلاثة أنواع من التحميل تتوافق مع أنواع الألياف المختلفة. تم إنتاج القوالب باستخدام تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد باستعمال مادة حمض البوليلكتيك (PLA). يتم إجراء دراسة المركبات من خلال الجمع بين التقنيات التالية: تطور الخصائص الميكانيكية عبر اختبارات الشد والضغط وكذلك اختبارات الانحناء والفحص المجهرى (MEB). بالإضافة إلى ذلك ، تم إجراء تجارب تعتمد على تصميم تا جوشي (L9) لتحديد تأثير كل عامل على إجهاد الضغط النهائي ، التغيير المورفولوجي ، وطاقة الامتصاص. من أجل دراسة الأضرار التي لحقت بهيكل خلية النحل ذات أضلع داخلية ، تم تقديم دراسة عددية باستخدام برنامج ANSYS الإصدار 15.0. كجزء من هذه الدراسة، وجد أن للسمك تأثير مباشر على الضغوط الضاغطة وسلوك الكسر. أتاحت كل هذه النتائج أخيراً فهم سلوك كل هيكل فيما يتعلق بالأحمال المطبقة وأيضاً نوع التعزيز المناسب لتحسين الخواص الميكانيكية.

الكلمات المفتاحية:

; مركبات هيكلية; احصائيات; الخصائص الميكانيكية;

TABLE DES MATIERES

Résume	III
Listes des figures	IV
Listes des tableaux	V
Nomenclature	VI
Introduction générale	1
CHAPITRE I : GENERALITE ETAT DE L'ART	
I.1.Introduction	4
I.2. Généralité sur les Composites	4
I.2.1. Marché des matériaux composites	6
I.3. Polymères	8
I.3.1. Généralités	8
I.4. Les fibres naturelles	11
I.4.1. Classification et type de fibre	11
I.4.1.1. Le lin	12
I.4.1.2. Le jute	13
I.4.1.3 Le sisal	14
I.4.2. Comportement mécanique	15
I.5.Composite à fibres végétales	17
I.5.1. Comportement mécanique	17
I.6.Conclusion	24
I.7.Références	25
CHAPITRE II : COMPORTEMENT EN COMPRESSION DES STRUCTURES BIOCOMPOSITES A RENFORT EN FIBRES NATURELLES : APPLICATION AUX BIOCOMPOSITES SANDWICHES	
II.1. Introduction	30
II.2. Préparation des structures sandwich	32
II.3. Plan d'expérience et méthode de Taguchi	35
II.4. Résultats et discussion	36
II.4.1. Contrainte de compression	42

II.4.2. Déformation en compression	43
II.4.3. Energie d'absorption	43
II.5. Conclusion	46
II.6.Reference	47

CHAPITRE III : ETUDE DES STRUCTURES BIOCOSITES EN FLEXION 3-POINT

III.1. Introduction	49
III.2. Préparation des matériaux et des spécimens	51
III.3. Approche expérimentale de la méthode du Taguchi	53
III.4. Résultats et discussion	54
III.4.1. Contrainte en flexion 3-points	63
III.4.2. Déplacement en flexion 3-points	63
III.4.3. Module de flexion	66
III.5. Conclusion	68
III.6.References	69

CHAPITRE IV : SIMULATION EN TRACTION STATIQUE DES STRUCTURES AUXÉTIQUES EN BIOPOLYMERE

IV.1. Introduction	72
IV.2. Simulation des procédés expérimentaux	74
IV.2.1. Modélisation des paramètres de la structure étudiée	74
IV.2.2. Elaboration des matériaux	74
IV.2.3. Impression 3D	74
IV.2.4. Caractérisation des structures en traction	74
IV.2.5. Modélisation par éléments finis	75
IV.2.6. Approche de conception expérimentale de Taguchi	75
IV.3. Résultats et discussion	78
IV.3.1. Comportement auxétique de la structure re-entrant	78
IV.3.2. L'effet des paramètres géométriques sur le comportement auxétique	79
IV.3.2.1. Comportement du coefficient de poisson de la structure re-entrant	79
IV.3.2.2. Comportement de la contrainte de traction de la structure re-entrant	80
IV.3.2.3. Comportement du module de cisaillement de la structure re-entrant	82

IV.4. CONCLUSION	84
IV.5.Références	85
Conclusion générale	87
Annexe 1	89

LISTES DES FIGURES

Figure I-1. Principaux types de renforts utilisés pour les matériaux composites	4
Figure I-2. Principaux types de fibres naturelles	5
Figure I-3. Demande mondiale de fibres de carbone en 1000 tonnes de 2012 à 2022 (* estimation)	7
Figure I-4. Nombre de publications sur Science Direct portant les mots-clés « composite » et « natural fibers & composite »	8
Figure I-5. Structure des polymères semi-cristallin	9
Figure I-6. Mise en évidence de la température de transition vitreuse	10
Figure I-7. Classification des fibres naturelles	11
Figure I-8. Courbes de traction obtenue sur le fil et le tissu de jute	14
Figure I-9. Courbe de traction d'une fibre de lin unitaire	17
Figure I-10. Comparaison des propriétés mécaniques réduites de différents composites renforcés de fibres végétales.	18
Figure I-11. Essai de traction (a), le masque et la zone marquée (b)	19
Figure I-12. Schémas de (a) structures en treillis, (b) structures composites renforcées en treillis et (c) spécimens composites renforcés en treillis imprimés en 3D composés de 4x4 cellules unitaires avec nœud d'abeille re-entrant, cellule chirales, nœud d'abeille et structures en treillis	20
Figure I-13. Conception de la cellule élémentaire des structures truss, du nid d'abeille conventionnel et de la structure en nid d'abeille re-entrant.	21
Figure I-14. Effet de MAPP : NF sur (a,b) Rigidité (c,d) Résistance (e,f) Allongement (g,h) Impact	22
Figure I-15. Noyau en nid d'abeille fabriqué à l'aide du moule avec les inserts fixes	23
Figure I-16. Défaillances séquentielles du structure en nid d'abeilles en sisal-PP : (a) début de l'essai et (b) formation de charnières en plastique pointées par les flèches	23
Figure II-1. Micrographies des fibres naturelles ainsi que leur morphologie de surface : (a) aperçu général, (b) sisal, (c) lin et (d) fibres de jute.	34
Figure II-2. Étapes de fabrication des structures en nid d'abeille, en re-entrant et en silicomb : (a) Dessin de structure numérique (silicomb) avec le logiciel Solid Works, (b) structures obtenues par impression 3D, (c) moule en résine de silicone (d) structures finales, (e) structure en nid d'abeille finale (f) structure finale en re-entrant et (g) structure finale en silicomb....	35
Figure II-3. Courbes de force vs déformation des structures en nid d'abeille, en nid d'abeille re-entrant et en silicomb renforcés par de courtes fibres naturelles.	41

Figure II-4. (a) Courbe de compression de structure en nid d'abeille soumise à un essai de compression et (b) le mécanisme de flambage et de rupture.....	41
Figure II-5. Échantillons de structures de silicomb de 10 mm (a) avant l'essai de choc et (b, c) après l'essai de choc.....	42
Figure II-6. Diagramme des valeurs individuelles de (a)contrainte de compression, (b) déformation de compression et (c) absorption d'énergie pour toutes les structures renforcées avec des fibres et des épaisseurs différentes.....	45
Figure III-1. Étapes d'élaboration des structures en nid d'abeille, re-entrant et en silicomb : (a) Elaboration de la structure numérique (toutes les structures) avec le logiciel Solid Works (b) Structure (biocomposites) finale.....	52
Figure III-2. Courbe force en fonction du déplacement des structures nid d'abeille, re-entrant et silicomb renforcé avec des fibres naturelles courtes sollicitées en flexion 3 points.....	60
Figure III-3. Graphe des valeurs individuelles de la variation de la contrainte de flexion des structures (a) nid d'abeille (b) re-entrant (c) silicomb par rapport au type et fraction volumique de fibre.....	64
Figure III-4. Graphe des valeurs individuelles de la variation du déplacement en flexion des structures (a) nid d'abeille (b) re-entrant (c) silicomb par rapport au type et fraction volumique des fibres.....	65
Figure III-5. Graphe des valeurs individuelles de variation de module de flexion des structures (a)nid d'abeille (b) re-entrant (c) silicomb par rapport au type et fraction volumique de fibre.....	67
Figure IV-1. Cellule unitaire de la structure re-entrant	74
Figure IV-2. Structure re-entrant maillée	75
Figure IV-3. Affichage des allongements dans les essais de traction	79
Figure IV-4. Variation du coefficient de poisson en fonction des paramètres géométriques (angle et épaisseur).....	80
Figure IV-5. Variation de la contrainte de traction en fonction des paramètres géométriques (angle et épaisseur).....	81
Figure IV-6. Etude numérique de la structure re-entrant en mode de traction en fonction des paramètres géométriques ($\Theta = 65^\circ$ et $t=3$ mm), (donné de sortie contrainte de traction)	81
Figure IV-7. Variation de Module du cisaillement en fonction des paramètres géométriques (angle et épaisseur).....	82
Figure IV-8. Etude numérique de la structure re-entrant en mode de cisaillement en fonction des paramètres géométriques ($\Theta = 65^\circ$ et $t=3$ mm), (donné de sortie contrainte de cisaillement)	83

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1. Caractéristiques des renforts courants	12
Tableau II-1. Paramètres d'impression 3D utilisés pour la fabrication des échantillons testés dans cette étude.....	35
Tableau II-2. Facteurs de niveaux pour l'élaboration de structures en nid d'abeilles, re-entrant et en silicomb.....	36
Tableau II-3. Résultats expérimentaux de la conception de Taguchi pour les trois structures utilisées dans cette étude.....	37
Tableau II-4. Valeurs rapport S/N	39
Tableau II-5. Test ANOVA pour les propriétés mécaniques de différentes structures élaborées avec un niveau de confiance 95%.....	40
Tableau III-1. Propriétés mécaniques des fibres naturelles utilisées dans cette étude	52
Tableau III-2. Niveau de facteurs pour nid d'abeille, re-entrant et silicomb des structures ..	53
Tableau III-3. Résultats expérimentaux de la conception Taguchi pour la structure nid d'abeille.....	55
Tableau III-4. Résultats expérimentaux de la conception Taguchi pour la structure Re-entrant nid d'abeille	56
Tableau III-5. Résultats expérimentaux de la conception Taguchi pour la structure Silicomb	57
Tableau III-6. Résultats expérimentaux de la conception Taguchi pour la structure nid d'abeille.....	57
Tableau III-7. Résultats expérimentaux de la conception Taguchi pour la structure Silicomb	58
Tableau III-8. Valeurs fraction S/N pour la structure Silicomb	58
Tableau III-9. Test ANOVA pour les données de contrainte de flexion des structures au niveau de confiance 95%.	61
Tableau III-10. Test ANOVA pour les données de déplacement des structures au niveau de confiance 95%.....	61
Tableau III-11. Test ANOVA pour les données de module de flexion des structures au niveau de confiance 95%.....	62
Tableau IV-1. Les différents paramètres géométriques (angle, épaisseur de paroi)	76
Tableau IV-2. Les résultats de la contrainte de traction, module de cisaillement et coefficient de poisson pour le nid d'abeille re-entrant	76
Tableau IV-3. Rapport de réponses S/N.....	78

Nomenclature

Symbole :

- A_r et ε : Déformation à la rupture (%)
 b : Largeur de l'éprouvette (mm)
 E_f : Module de flexion (GPa)
 E : Module de Young (GPa)
 G : Module de cisaillement (GPa)
 G_t : Module de cisaillement (N/mm^2)
 H : La longueur des parois cellulaires verticales (mm)
 h : Epaisseur de l'éprouvette (mm)
 L : La longueur des parois cellulaires inclinées,
 L : Distance entre appuis (mm)
 T_v : Température de transition de verre
 T_f ; Température de fusion (degré Celsius °)
 t : Epaisseur des parois cellulaires (mm)
 σ_r : Contrainte à la rupture (MPa)
 Θ : l'angle entre les parois de cellule inclinées (dégrée)
 σ_f : Contrainte de flexion (MPa)
 σ_t : Contrainte de traction (MPa)
 σ_{max} : Contrainte max a la rupture (MPa)

Abréviation

- ANOVA : Analyses of variance (Analyse de la variance)
HN : Honeycomb structure (Structure nid d'abeille)
MEB : Microscope Electronique à Balayage
PE : Polyéthylène
PVC : Polychlorure de vinyle
PC : Polycarbonate
PE : Polyéthylène
PP : Polypropylène
PS : polystyrène
PLA : Polylactique acide
RE-HN : Re-entrant honeycomb structure (Structure nid d'abeille Re-entrant)

SILICO : Silicomb structure (Structure Silicomb)

S/N : Signal/Noise

3D : Trois dimensions

TPS : Polysaccharose naturel

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

La technologie n'a aujourd'hui pratiquement plus de limites, sauf pour les ressources fossiles dont les réserves diminuent chaque jour, et l'environnement qui est perturbé par les fortes émissions de gaz à effet de serre produites par l'industrie. En effet, les industriels et les chercheurs ont pris conscience de ce fait, c'est pourquoi leur défi est de développer des solutions qui consomment moins d'énergie, ainsi que de réduire l'impact environnemental en améliorant notamment la recyclabilité des produits.

La conception des matériaux composites et des structures sandwich s'est principalement destinée pour les secteurs d'activités nécessitant des performances élevées comme l'aéronautique, l'aérospatiale, l'automobile ou le sport. Leurs hautes propriétés mécaniques ainsi que leur faible densité leur permettent en effet d'obtenir des propriétés bien supérieures à celles des aciers. Aujourd'hui, leurs faibles densités intéressent de plus en plus le secteur du transport qui cherche au maximum à alléger les véhicules afin de réduire leur consommation et par conséquent les émissions de gaz à effet de serre. Les fibres de verre, de carbone et kevlar, lin, jute et sisal représentent la grande majorité des renforts utilisés en association avec des matrices thermodurcissables telles que l'époxy, le vinylester ou le polyester. Cependant, le souci de l'environnement incite de plus en plus les industriels à se diriger plutôt vers des matrices thermoplastiques à hautes performances pour privilégier les ressources renouvelables et recyclables.

Le développement des fibres végétales à des fins techniques est une pratique qui n'est pas récente. Ce sont des ressources naturelles qui ont servi à la fabrication des premiers outils et des premières maisons. Bien que la sidérurgie ait fait son apparition, le bois est resté pendant longtemps le matériau de construction par excellence pour les constructions navales et armées. Au cours des dernières années, le recours aux fibres naturelles ne cesse de croître. Dans l'industrie automobile par exemple, les fibres naturelles telles que le chanvre ou le sisal entrent aujourd'hui dans la composition de nombreuses pièces de carrosserie de véhicules, comme les pare-chocs ou les rétroviseurs, ou encore dans l'habitacle avec les tableaux de bord. Cette

initiative est encouragée par l'union européenne qui avec sa directive 2000/53/CE impose au constructeur que 85% de la masse d'un véhicule soit recyclable et 10% revalorisable.

Ces fibres offrent un intérêt indéniable comparativement aux fibres synthétiques. En plus de leurs propriétés spécifiques élevées, il convient de mettre en avant leur faible coût de production, leur biodégradabilité et leurs qualités d'isolation thermique et phonique. Le développement de pièces plus spécifiques renforcées par des fibres naturelles se heurte toutefois à deux obstacles majeurs. Le premier réside dans leur incompatibilité avec la plupart des matrices polymères, entraînant une mauvaise cohésion des fibres et de la matrice. De nouvelles matrices ou de nouveaux agents de sont déjà à l'étude afin d'accroître cette compatibilité et donc la résistance de ces structures composites. Le second obstacle concerne la sensibilité à l'humidité des fibres naturelles qui engendre une baisse rapide de ses propriétés mécaniques. En outre, l'Algérie est un producteur de tissus de jute et le développement d'une filière de composites renforcés par des fibres de jute permet ainsi la valorisation d'une ressource naturelle locale.

Beaucoup de travaux se sont intéressés à la caractérisation mécanique des biocomposites renforcés par des fibres naturelles. Un grand nombre d'entre eux concerne la caractérisation mécanique quasi-statique. En outre, l'effet de structure ainsi type et taux de fibres sur le comportement mécanique a été étudié.

Pendant peu d'études se sont faites sur ces structures (nid d'abeille, re-entrant et silicomb) afin de déterminer et de suivre leur comportement envers les chargements appliqués.

Un certain nombre de techniques ont été utilisées. On peut notamment citer le suivi de l'évolution des paramètres mécaniques, les observations microstructurales, le modèle mathématique de Taguchi et la simulation numérique avec le logiciel ANSYS 15.0.

Généralement, ces techniques sont utilisées de manière individuelle et relativement peu d'études s'appuyant sur la combinaison de toutes ces techniques ont été réalisées.

L'objectif de cette thèse est d'étudier l'évolution du comportement mécanique d'un composite renforcé de fibres végétales soumis à des essais de traction, de compression et de flexion, puis de le reproduire par simulation aux fins de prédire l'évolution de ses propriétés à long terme. Dans le cadre de cette étude, les fibres naturelles choisies sont le lin, le jute et le sisal, en raison de leurs propriétés mécaniques élevées. Ce travail de thèse est structuré en quatre chapitres.

Le chapitre I définit de manière générale le composite tout en précisant le rôle et les propriétés de leurs constituants à savoir les fibres et la matrice. L'accent est mis plus

particulièrement sur les fibres végétales : un bilan bibliographique est effectué afin de cerner les problèmes qu'elles peuvent générer. Ce chapitre nous permet ainsi de définir notre problématique tout en rappelant les notions fondamentales en vue de la réalisation de cette thèse. De nombreuses matrices peuvent être utilisées en association avec ces fibres naturelles. Les plus intéressants sont les thermoplastiques dans la mesure où elles préservent l'aspect écoresponsable apporté par les fibres.

Le chapitre II décrit les propriétés mécaniques des trois structures composites en nid d'abeille, re-entrant et silicomb renforcés par des fibres de lin, de jute et de sisal au moyen de résine époxy. Ces structures ont été réalisées par des procédés de moulage. Le recours à la méthode d'optimisation des résultats, connue sous le nom de Taguchi, vise à identifier le type de fibre présentant le plus grand potentiel d'utilisation dans des applications structurelles, et en même temps à déterminer les réponses du composite à différentes sollicitations (contrainte de compression, déformation et l'énergie d'absorption).

Le chapitre III est consacré à l'étude des trois structures en flexion. La réalisation d'essais de flexion sur les trois structures en fonction des différents types de fibres et de leur fraction volumique a permis de suivre l'évolution du comportement mécanique (contrainte de flexion, déplacement et module de flexion).

Enfin le chapitre IV est dévoué à l'étude de la structure re-entrant en mode traction du composite basée sur la modélisation par éléments finis en utilisant le logiciel ANSYS version 15.0 et également pour appréhender le phénomène d'auxétisme de ces structures de nature non conventionnelle ainsi que leur comportement (coefficient de poisson négative). En effet, des essais de traction réalisés sur celle-ci pour différentes épaisseurs de paroi et leurs angles d'inclinaison permettent de suivre l'évolution du comportement mécanique vis-à-vis ce chargement et également de déterminer les réponses du composite (contrainte de traction, module de cisaillement et coefficient de poisson). A la lumière des résultats obtenus, la pertinence des composites renforcés de fibres naturelles pour des applications structurelles pourra éventuellement être discutée.

Chacun de ces chapitres est terminé par une conclusion partielle, dont le bilan est effectué en conclusion générale de la présente étude, et qui permet d'envisager des perspectives pour des travaux futurs.

Chapitre I.

GENERALITES ET ETAT DE L'ART

Contenu du chapitre	Page
I.1.Introduction	4
I.2. Généralités sur les composites	4
I.2.1. Marché des matériaux composites	6
I.3. Polymères	8
I.3.1. Généralités.....	8
I.4. Les fibres naturelles	11
I.4.1. Classification et type de fibre	11
I.4.1.1. Le lin	12
I.4.1.2. Le jute	13
I.4.1.3 Le sisal	14
I.4.2. Comportement mécanique	15
I.5.Composite à fibres végétales.....	17
I.5.1. Comportement mécanique	17
I.6.Conclusion.....	24
I.7.Références	25

Chapitre I :

ETAT DE L'ART : COMPOSITES

RENFORCES DE FIBRES NATURELLES

I.1. Introduction

Ce chapitre présente une synthèse bibliographique permettant de définir les matériaux composites et de comprendre leur structure à travers une description des différents constituants. Cette analyse présente les différentes fibres naturelles de renforcement disponibles ainsi que les différents types de matrices pouvant être utilisées. Enfin, un état descriptif des travaux de recherche réalisés sur le comportement mécanique est effectué en vue d'une bonne approche.

I.2. Généralités sur les composites

Un matériau composite est un ensemble de deux matériaux non miscibles, la matrice et le renfort. La matrice absorbe l'essentiel des efforts mécaniques dites renfort. Ce dernier possède des caractéristiques plus élevées que celles de la matrice. Son rôle est d'assurer principalement la rigidité du matériau composite. Les renforts sont classés selon leurs formes (fibres ou particules), leur nature (verre, carbone, métal, naturelles) et selon leur arrangement (mat ou tissus, etc.). Dans l'industrie, les fibres continues sont les renforts les plus utilisés. La Figure I.1 présente les principaux types de renforts fibreux utilisés dans les composites.

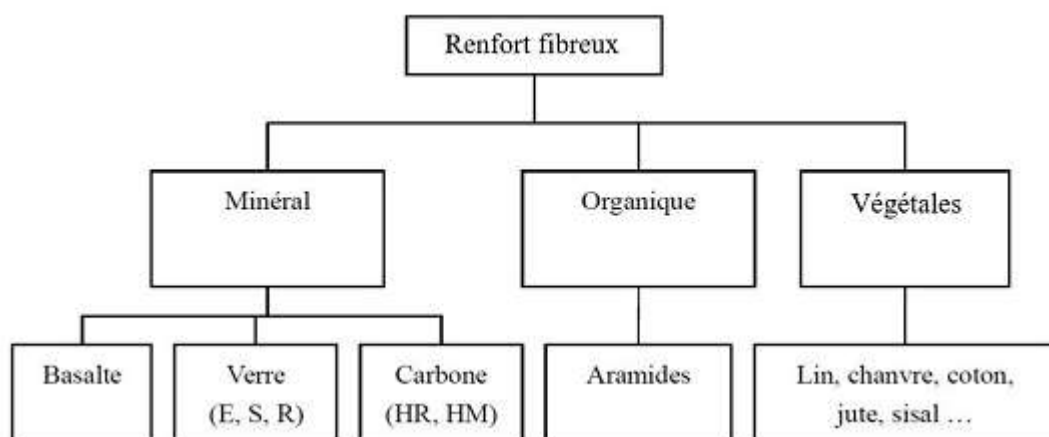


Figure I-1. Principaux types de renforts utilisés pour les matériaux composites[1].

Le rôle principale de la matrice est de transmettre les efforts mécaniques aux renforts, ainsi, les maintenant ainsi dans une orientation donnée et assurant la protection contre les

conditions environnementales [2]. Dans le secteur industriel, les matrices organiques sont souvent utilisées.

Les résines thermodurcissables et les thermoplastiques sont les résines les plus répandues. Les premières, se polymérisent et se transforment en matrice infusible empêchant leur recyclage, par contre, les thermoplastiques se ramollissent continuellement sous l'action de la chaleur. Les thermodurcissables possèdent en général des propriétés mécaniques plus élevées que celles des thermoplastiques pour des raisons de performances et de coût [2].

Les fibres de verre sont les plus utilisées dans les matériaux composites de grande diffusion. Plusieurs travaux ont montré que ces fibres possèdent des bonnes propriétés mécaniques [3][4]. Notons que les fibres de carbone possèdent des propriétés plus élevées que celles des fibres de verre [5] et sont plus largement utilisées dans les composites hautement performants. Au cours de ces dernières années, les fibres naturelles sont devenues d'un intérêt scientifique important en raison de leur abondance et de leurs avantages écologiques. La Figure I.2 présente les principaux types de fibres naturelles utilisées pour la production des matériaux composites classées en fonction de leur origine végétale.

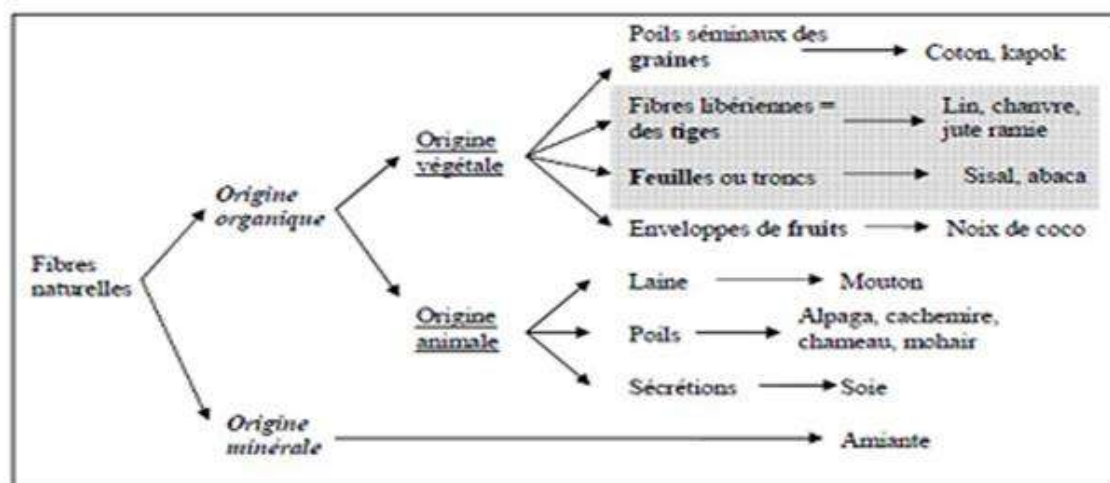


Figure I-2. Principaux types de fibres naturelles [6].

La comparaison entre les fibres végétales et les fibres de verre révèle plusieurs avantages, tels que :

- Un rapport résistance / poids élevé
- Un faible coût de production
- Un recyclage facile
- Une faible demande en énergie pour la production
- Une bonne isolation thermique et électrique

- L'abondance et la biodégradabilité

Par contre, ces fibres montrent également quelques inconvénients et nécessitent des traitements spécifiques par rapport :

- l'homogénéité des propriétés des fibres
- l'hydrophilie
- la bonne adhésion fibre/matrice

D'une manière générale, l'utilisation de fibres végétales comme renforcement des composites se justifie par l'utilisation de ressources locales ainsi que par la production des matériaux en tenant compte des effets sur l'environnement. Les fibres naturelles sont des tissus de qualité qui sont produits et recyclés naturellement depuis des milliers d'années. Par conséquent, les fibres de verre sont non seulement substituées aux fibres végétales pour des raisons économiques, mais aussi pour leurs aspects écologiques. Les fibres de lin et de chanvre présentent un grand intérêt en raison de leur abondance. La majorité des recherches ont été menées sur toutes les formes de fibres ainsi les composites [7] [8]. Les fibres de jute [9] de kenaf [10] et de sisal [11] les plus étudiées se trouvent dans les régions équatoriales et tropicales.

I.2.1. Marché des matériaux composites

Comme l'illustrent les différents travaux [12] [13], la demande de matériaux composites est en plein essor en Europe, aux États-Unis et en Asie. Bien que depuis les années 1960, la quantité d'acier produite ait à peine changé, le volume des matériaux composites a augmenté de 25 fois. La croissance des entreprises aux États-Unis en 2016 a été de 3,6 % avec un volume de 8 milliards de dollars, mais les analystes s'attendent à une croissance annuelle de 4,9 % en 2022 pour atteindre un marché de 10,6 milliards de dollars dans les années à venir (figure I.3). En Europe, cette tendance à la hausse se confirme, mais avec un développement plus faible. En effet, la mondialisation et la délocalisation de production en Asie entravent l'économie européenne.

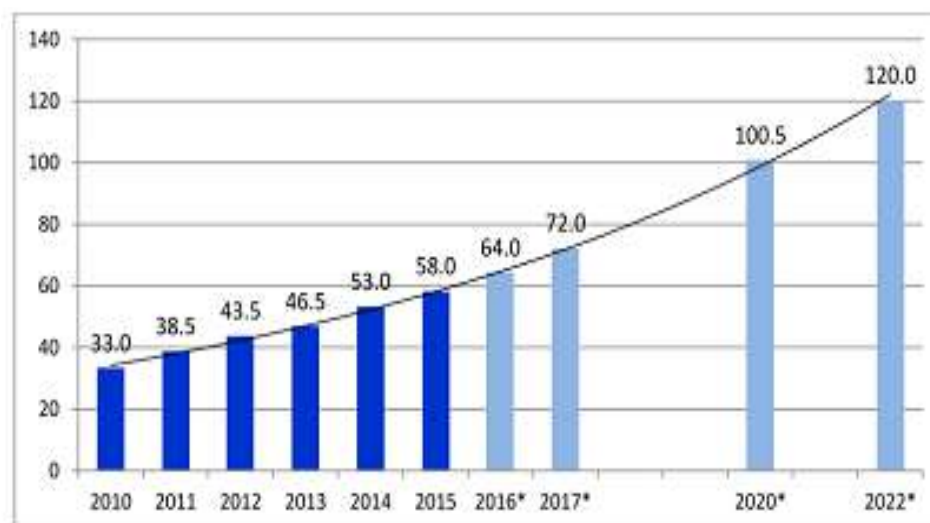


Figure I-3. Demande mondiale de fibres de carbone de 1000 tonnes de 2012 à 2022 (* estimation) [7].

Aujourd'hui, les fibres de verre, qui représentent près de 95 % du volume des composites fabriqués, demeurent le renfort le plus utilisé dans les matériaux composites. Dans de nombreuses industries, comme le transport, l'aéronautique ou le bâtiment, ses fortes propriétés mécaniques, son prix abordable et la maîtrise des processus de production associés lui confèrent un potentiel idéal.

En combinaison avec les fibres de verre, les résines thermodurcissables telles que le polyester, l'ester vinylique ou l'époxy restent les plus couramment utilisées, en raison surtout des procédés qui y sont associés, dont la flexibilité permet d'obtenir des taux de fibres allant jusqu'à 70% et, par conséquent, des propriétés mécaniques remarquables.

Cependant, l'intérêt pour les composites à matrice thermoplastique n'a fait que croître ces dernières années, sous l'impulsion de l'industrie automobile. En effet, ces matériaux présentent toutes les caractéristiques souhaitées par les constructeurs automobiles : Ils sont faciles à mettre en forme, leurs processus de façonnage ont des cadences rapides qui permettent de fabriquer plus de 100000 pièces dans l'ordre, facilement assemblables avec d'autres matériaux et finalement recyclables.

Ainsi, la demande de mats de verre ou de thermoplastiques renforcés de fibres longues connaît la plus forte croissance, soit 6% en Europe

Heureusement, la législation visant à réduire les émissions de gaz à effet de serre a permis à l'industrie de l'automobile et de la construction de se concentrer sur ces matériaux potentiels. La demande mondiale pour ces composites était de 3,5 milliards de dollars en 2015[8], mais la croissance du marché au cours des années à venir devrait être rapide. Bien

que le bâtiment repose sur des composites à base de bois, dans l'industrie automobile, les fibres de lin, de chanvre ou de kenaf qui sont privilégiées.

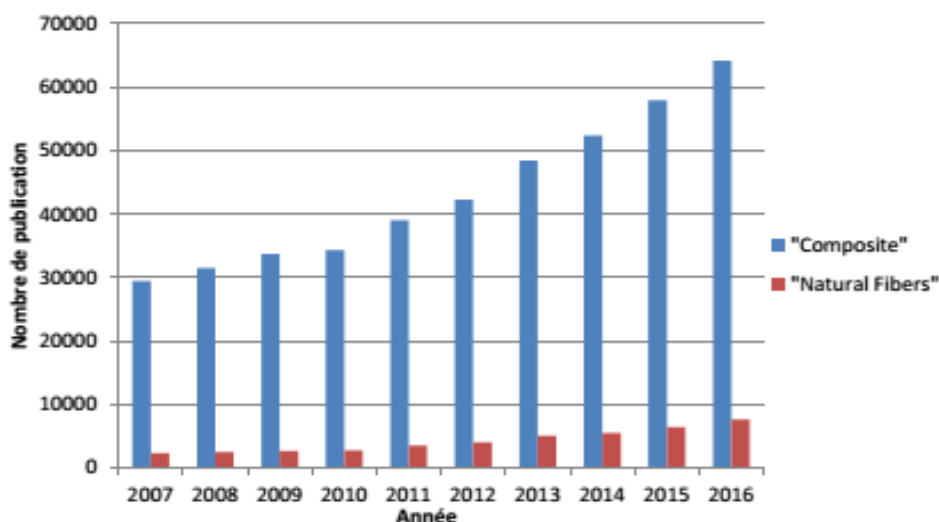


Figure I-4. Nombre de publications dans Science Direct utilisant les mots-clés « composite » et « natural fibers & composite » [8].

La recherche a également permis d'identifier et d'affiner de nouveaux matériaux à base de fibres naturelles et de les rendre plus durables ces dernières années. Les publications portant le mot clé "fibres naturelles" ne représentaient que 8 % des publications composites en 2007, contre 12 % en 2016 (Figure I.4), ce qui témoigne d'un bon enthousiasme pour ces nouveaux matériaux.

I.3. Polymères

1.3.1. Généralités

Le mot polymère désigne une molécule de masse moléculaire élevée généralement organique ou semi-organique. Dans le domaine de la chimie, les macromolécules sont des polymères, c'est-à-dire de longues chaînes de groupes chimiques appelés monomères reliés entre eux par des liaisons covalentes. Il existe généralement diverses sous-catégories de la famille des polymères, celles qui nous intéressent le plus :

- Fibres végétales : Elles représentent l'une des ressources naturelles les plus abondantes de la Terre. Ces matériaux, principalement composés de cellulose, font que depuis 2000 ans, certains arbres comme le séquoia peuvent dépasser la hauteur de 80 m tout en supportant les risques du temps et surtout du vent.
- Matériaux plastiques : Ces matériaux à base de pétrole sont apparus dans les années 1930 avec le PVC, qui a été la première matière plastique fabriquée à grande échelle. La gamme

actuelle de plastiques est extrêmement diversifiée et répond aux exigences de nombreuses industries, telles que l'alimentation, le logement, le mobilier, l'automobile, etc.

La facilité avec laquelle ces matériaux sont formés les rend peu coûteux et peuvent être fabriqués à très grande échelle. En variant leur composition chimique, leurs propriétés mécaniques, chimiques ou diélectriques sont aisément adaptables à une application précise.

Les plastiques les plus couramment utilisés sont le polypropylène (PP), le polyéthylène (PE), le chlorure de polyvinyle (PVC), le polycarbonate (PC), le polystyrène (PS).

Les polymères sont donc des composés organiques ayant une structure en chaîne qui peut être définie par son motif élémentaire, aussi appelé monomère, et son degré de polymérisation, c'est-à-dire le nombre de répétitions du motif.

Les liaisons covalentes puissantes entre les différents atomes de la même chaîne sont des liaisons intramoléculaires. Les liaisons inter-chaînes, données par des maillons faibles de style VAN DER WAALS sont possibles grâce aux fonctions alcool, amine, hydroxyle et carboxyle présentes dans les polymères, ces liaisons sont possibles. L'énergie des liaisons intramoléculaires est 100 fois plus élevée que celle des liaisons intermoléculaires [9].

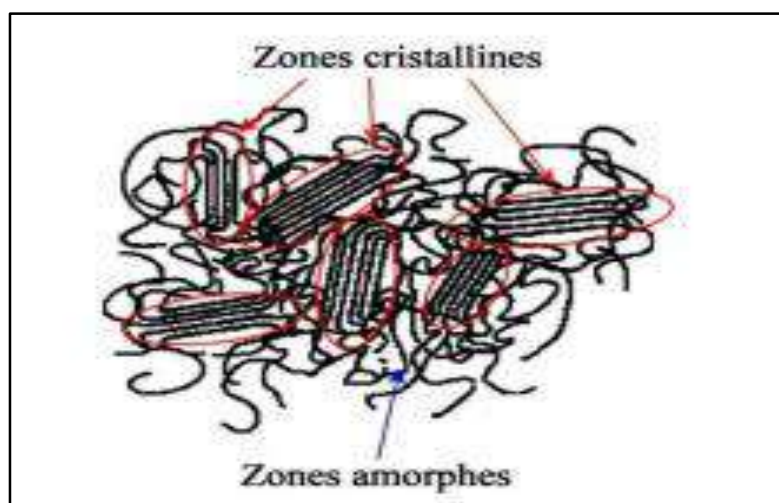


Figure I-5. Structure des polymères semi-cristallin [9].

Les chaînes peuvent suivre une configuration périodique et ordonnée ou une structure aléatoire et plus complexe lors de la synthèse d'un polymère. La première forme du processus est nommée phase cristalline dans laquelle les chaînes sont orientées dans la même direction et ceci dans les trois directions spatiales avec un espacement normal afin de définir un réseau cristallin périodique. De l'autre côté, la phase amorphe, en forme de boule, s'appelle zone à distribution plus aléatoire, où les chaînes adjacentes sont enchevêtrées les unes dans les autres. Les deux phases sont généralement présentes simultanément dans un polymère (Figure I.5). Étant donné que les implications et les vitesses de refroidissement sont trop grandes pour que

la cristallisation complète soit possible il s'agit d'un matériau cristallin semi-solide dont le taux cristallin peut être défini comme le rapport de masse de la phase cristalline à celui de l'échantillon. Le taux de cristallinité a une influence directe sur la stabilité thermique du matériau et sur ses propriétés mécaniques.

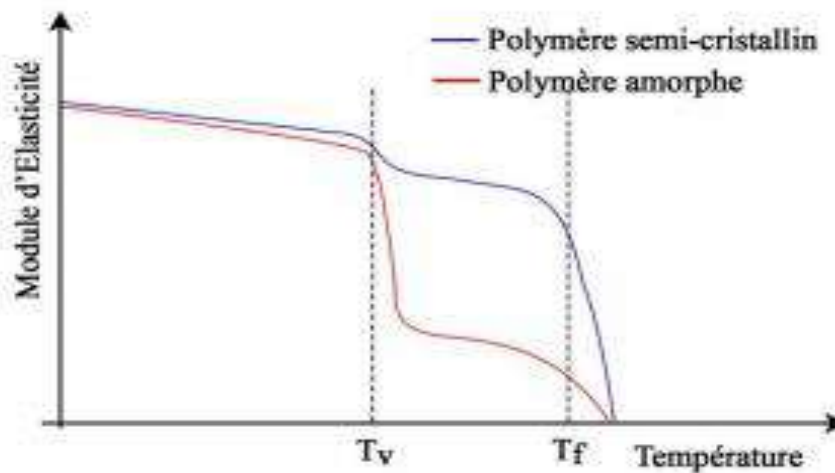


Figure I-6. Mise en évidence de la température de transition vitreuse [9].

Les polymères sont particulièrement sensibles à la température en raison de leur faible énergie de liaison entre les chaînes. Deux comportements radicalement différents peuvent être différenciés en fonction de leur structure moléculaire, c'est pourquoi nous divisons les plastiques en deux groupes :

- Les thermodurcissables désignent des matériaux qui, sous l'action de la chaleur, unissent des macromolécules. La polymérisation est normalement soutenue par divers agents (réticulation, catalyseur, durcisseur) qui créent une réaction exothermique, qui a pour effet de connecter des liaisons fortes appelées ramification ou contournement des macromolécules entre elles. Ensuite, ces polymères réticulés ont un réseau qui est difficile à briser et empêche leur fusion.

- Il n'y a pas de bonnes relations inter-chaînes dans les thermoplastiques. Les chaînes glisseront ensuite les unes par rapport aux autres sous l'action de la température, ce qui entraînera un ramollissement majeur. Une température critique, appelée température de transition du verre T_v est spécifiée pour ces matériaux, qui marque le passage d'un état solide vitrifié à un état caoutchouteux, ainsi qu'une température de fusion T_f où le matériau perd complètement ses propriétés mécaniques. Figure I.6 Sans détruire les chaînes macromoléculaires, la transition d'un état à un autre est effectuée de façon complètement réversible, rendant ces polymères recyclables [9].

I.4. Les fibres naturelles

I.4.1. Classification et type de fibre

En effet, les arbres, les vignes, les pierres, la laine et d'autres matériaux naturels ont été utilisés par l'homme bien avant l'âge de la pierre. Aujourd'hui, les progrès techniques ont permis de mieux caractériser ces fibres et de leur trouver des applications acceptables. Trois grandes familles de fibres naturelles sont classées par origine : les fibres de plantes, d'animaux et de minéraux comme montré dans la Figure I.7. Les premières fibres naturelles qui ont intéressé l'homme étaient les fibres animales à base de protéines, comme la sécrétion du ver à soie ou la toile d'araignée, en particulier pour leur capacité d'absorption d'énergie, leur finesse et leur régularité. Cependant, la production annuelle de chaque animal est faible, la quantité de fibres disponibles est faible et, par conséquent, le prix élevé de la fibre est élevé. L'amiante, une fibre minérale naturelle, a longtemps été utilisé dans les bâtiments pour la toiture en raison de ses propriétés mécaniques, mais surtout en raison de sa résistance à haute température. Aujourd'hui, les lois interdisent son utilisation en raison de sa nature cancérigène. Cependant, de nouveaux minéraux, comme le basalte, émergent du refroidissement rapide du magma fondu. Il possède d'excellentes propriétés mécaniques et une tolérance de température supérieure à 900 °C [9].

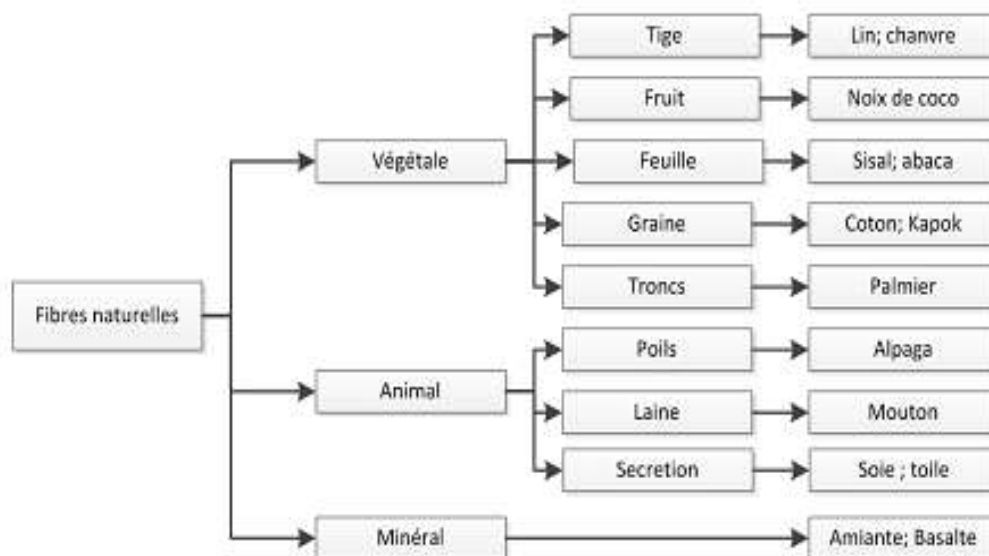


Figure I-7. Classification des fibres naturelles (adaptée [10], [6]).

Les fibres végétales sont principalement composées de matériaux cellulosiques (cellulose, hémicellulose, etc.) et peuvent provenir de divers composants végétaux (figure I.7). Ils sont parfaitement adaptés à la production de masse en raison de leurs propriétés mécaniques élevées, de leur faible densité, de leur haute disponibilité, de leur recyclabilité et surtout, de

leur capacité à absorber le dioxyde de carbone lors de leur fabrication. Comme les fibres de verre, mais avec une densité plus faible, de nombreuses fibres végétales ont des propriétés mécaniques substantielles (tableau I.1), ce qui les rend d'autant plus intéressantes pour les applications d'allègement structurel. Les plantes composites les plus étudiées sont le lin et le chanvre, car ils ont de très fortes propriétés mécaniques, mais surtout parce qu'ils proviennent de cultures locales. Les pays asiatiques choisiront la ramie, le bambou ou le coton, et le kenaf sera préféré par les pays africains pour les mêmes raisons.

Tableau I-1. Caractéristiques des renforts courants [6] [11].

	Module élastique E(GPa)	Contrainte à rupture σ (MPa)	Déformation à rupture A(%)	Densité	Prix (€)/kg	Production mondiale 2002 (tonnes)
Verre E	72-73	3200-3400	4.6-4.8	2.54	1.5	
Carbone	230	3530	1.5	1.7-1.9	30	
Aramide	124	3620	2.9	1.44		
Lin	13-85	600-2000	1-4	1.54	0.56-0.61	750
Ramie	24.5-128	400-1000	1.2-4	1.56		202
Chanvre	23.5-90	170-900	1-3.5	1.07	0.6-1.3	78
Jute	26.5	393-773	1.5-1.8	1.44	0.27	3200
Sisal	9-21	350-700	3-7	1.45	0.31	345

I.4.1.1. Le lin

Le lin, *Linum usitatissimum*, appartient aux fibres libériennes. Il est cultivé dans les régions tempérées et constitue l'une des fibres les plus anciennes au monde. Le lin à fibres libériennes est le plus souvent utilisé dans les marchés textiles offrant une plus grande valeur ajoutée. De nos jours, il est largement utilisé dans le domaine des composites. Les propriétés mécaniques statiques et dynamiques des composites à base de polypropylène renforcés à base de fibres de lin non tissés ont été étudiées en tenant compte de l'effet de l'agent de couplage de la zéine [12], la zéine est une protéine extraite du maïs et utilisée comme solution. Les composites contenant de l'agent de couplage Zein possèdent des propriétés mécaniques améliorées. Les propriétés mécaniques de traction des fibres laxistes sont estimées en fonction de leur diamètre et de leur emplacement dans les tiges [13]. La grande dispersion de ces propriétés est attribuée à la variation de la taille de la fibre le long de son axe longitudinal.

Les valeurs les plus élevées des propriétés mécaniques des fibres issues du milieu des tiges sont associées à la composition chimique de leurs parois cellulaires. Les propriétés mécaniques des composites fibres de lin unidirectionnel/matrice époxy sont étudiées en fonction de leur teneur en fibres dont les propriétés sont inférieures à celles attendues de la fibre unique. Diverses recherches sur les composites de fibres de lin/polypropylène ont été effectuées. Ces études se concentrent sur de nombreuses variables différentes, notamment : la comparaison entre le NMT (tapis thermoplastique en fibre naturelle) et le GMT (tapis thermoplastique en fibre de verre) [14], l'influence de la modification fibre/matrix et de l'hybridation des fibres de verre [15] et l'effet du traitement des fibres sur les propriétés thermiques et de cristallisation[16] .

Des recherches ont été menées sur l'influence de la modification biotechnique des fibres[17] , du comportement de rupture et de la ténacité [18] ainsi que l'effet du traitement des fibres alcalines sur les composites unidirectionnels [19] [29]. Les composites de fibres de lin renforcés de résine de polyester[20] ont été évalués pour la dégradation thermique et la résistance au feu , les traitements chimiques sur les propriétés de surface et l'adhérence [20] , et l'effet des traitements chimiques sur l'absorption d'eau et les propriétés mécaniques [21].

Aussi, Amroune et al.[22] ont étudié (comportement en traction quasi-statique) de la fibre de lin.Les résultats des essais de traction quasi-statiques semblaient avoir une grande dispersion, ce qui permet de mesurer le degré de variabilité de la résistance ultime à la traction, de la déformation à la rupture et du module de Young de la fibre.

Dans le même contexte, Amroune et al.[23] ont étudié les matériaux biocomposites (lin/époxy) avec différents ratios de fibres ont été fabriquées et leurs propriétés de traction, de flexion 3 points et morphologiques ont été caractérisées. Les résultats mécaniques ont révélé une augmentation de l'échantillon composite fabriqué par la seconde formulation CT090 (biocomposites UD [0/90°]s traités par NaHCO₃) par rapport aux différentes formulations étudiées, ainsi le traitement au carbonate de sodium bio a amélioré les propriétés mécaniques et morphologiques des biocomposites dans cette étude.

1.4.1.2. Le jute

Le jute est produit à partir de plantes du genre Corchorus, qui comprend environ 100 espèces. C'est l'une des fibres naturelles les moins chères et présente actuellement la fibre de bast dont le volume de production est le plus élevé. Le Bangladesh, l'Inde et la Chine offrent les meilleures conditions pour la croissance du jute. Ray et ses collègues [24] [25] ont étudié

en profondeur la fibre de jute alcaline traitée renforcée par de la résine d'ester de vinyle. Dans leurs études, ils ont examiné le comportement de fatigue dynamique, mécanique, thermique et d'impact par rapport à celui des composites esters de fibre de jute et de vinyle non traités. Un traitement alcalin plus long a éliminé les hémicelluloses et a amélioré la cristallinité, permettant une meilleure dispersion des fibres.

Gowda et al. [26] ont fait des essais de traction sur des fils et des tissus de jute d'une longueur de jauge de 200 mm et avec une vitesse de sollicitation de $1,3 \text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$. Ils ont montré que le fil présente un comportement non linéaire au début de l'essai. Cette non linéarité est due au réalignement des fibres. De ce fait, le comportement devient linéaire jusqu'à la rupture. Cette dernière est brutale, alors que celle du tissu est progressive. Dans le cas des tissus, chaque fil peut s'étirer et se rompre individuellement lorsque la contrainte de rupture est atteinte. Aussi ils se sont intéressés à l'essai de traction monotone sur des fils issus de tissus de jute dans les deux sens trame et chaîne. Leur comportement se manifeste aussi bien dans le sens chaîne que dans le sens trame (figure I.8). La seule différence réside dans le niveau de la charge à la rupture. Ce dernier est de l'ordre de 50 N pour les fils sens chaîne et 40 N suivant le sens trame. La différence enregistrée entre les deux sens (chaîne et trame) est due essentiellement à la variation du diamètre et au mode de tissage de la chaîne.

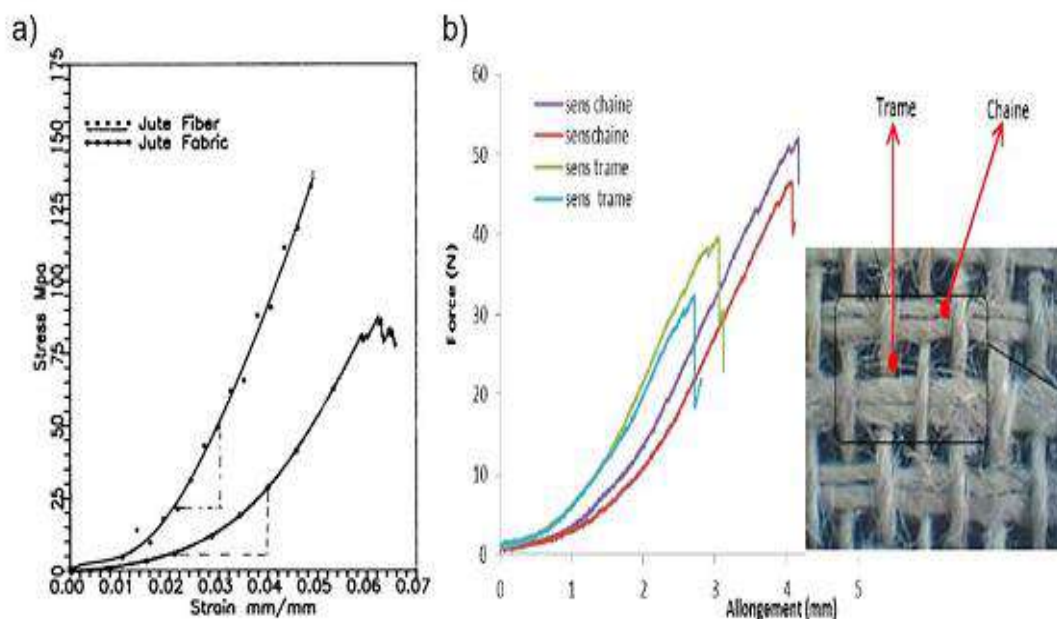


Figure I-8. Courbes de traction obtenues pour le fil et le tissu de jute[26][27].

I.4.1.3 Le sisal

Le sisal est un agave (*Agave sisalana*) produit commercialement au Brésil et en Afrique de l'Est. Entre 1998-2000 et 2010, la demande mondiale de fibres de sisal et de ses produits

devrait diminuer d'un taux annuel de 2,3 % en tant que ficelle agricole. L'hydroxyde de magnésium et le borate de zinc ont été incorporés dans des composés de sisal/PP comme ignifugeants [28]. L'ajout d'ignifugeants dans les composites de sisal/PP a réduit le taux de combustion et augmenté la stabilité thermique des composites. Aucun effet synergique n'a été observé lorsque l'hydroxyde de magnésium et le borate de zinc ont été incorporés dans les composites sisal/PP. De plus, les composites de sisal/PP présentaient des différences insignifiantes de viscosité de cisaillement à des taux de cisaillement élevés, ce qui indique que les types d'ignifugeants utilisés dans cette étude n'ont eu aucune incidence sur la traitabilité des composites. Zhang et al. [29] ont mis au point tous les composites de fibres végétales en convertissant la farine de bois en thermoplastiques à l'aide d'un traitement de benzylation approprié et en mélangeant des fibres de sisal discontinues et continues pour produire des composites à partir de ressources renouvelables. Towo et al. [30] [31] ont préparé les composites de fibre de sisal traitées avec une matrice de résine époxy et de polyester. Des essais d'évaluation de la fatigue et d'analyse thermique dynamique ont été effectués. Les composites contenant des faisceaux de fibres traitées par une solution alcaline se sont révélés avoir de meilleures propriétés mécaniques que ceux contenant des faisceaux de fibres non traitées.

Les fibres de sisal ont été également étudiées avec d'autres matrices, telles que le caoutchouc [32] [33], le phénol-formaldéhyde[34], le polyuréthane bio [35] et le polyéthylène[36] pour ce qui est de leurs caractéristiques mécaniques, morphologiques, chimiques et de durcissement.

I.4.2. Comportement mécanique

Le comportement mécanique d'une fibre végétale est complexe. L'aspect naturel du matériau provoque une grande dispersion dans les mesures et rend difficile le choix des valeurs pouvant être utilisées pour le dimensionnement. Baley et Bourmaud et al. [37] ont décrit les propriétés mécaniques de 50 lots de fibres de lin sur 10 ans et de différentes régions [39]. En termes de résistance avec des valeurs allant de 800 à 2200MPa, et de rigidité avec un module élastique allant de 40 à 70 GPa, une grande variation des propriétés mécaniques a été constatée. L'effet du diamètre des fibres élémentaires sur les propriétés mécaniques a également été souligné dans ce rapport.

Li et al. [40] ont montré que, selon la hauteur de la collection sur la tige, les différences étaient déjà mesurables à l'échelle de la plante, avec les fibres les plus fines et les plus rigides près de la fleur. Il est toutefois admis que dans un essai de traction, les fibres végétales ont un

comportement de décomposition en deux phases. La première, non linéaire, fait référence à la libre réorientation de la fibrille par une simple rotation dans le sens de la traction. La deuxième étape fait référence à un comportement élastique linéaire qui permet de calculer un module linéaire d'élasticité. Placet et coll. [41] ont suggéré une décomposition du comportement en trois étapes. La première action linéaire des fibrilles de cellulose et de la matrice est due à des déformations élastiques.

Cela s'accompagne d'une diminution de la rigidité des composants amorphes causée par le flux visqueux qui leur permet de cristalliser. Enfin, un domaine non linéaire mais rigide est observé, clarifié par le mouvement de dislocation, une réduction de l'angle micro-fibrillaire et une rupture interfaciale entre la cellulose cristalline et la dislocation.

Baley et al. [42] ont démontré une amélioration du module Young après une dizaine de cycles grâce à un essai de traction, ce qui indique qu'un réarrangement structurel est en cours.

Belaadi et al. [38] ont étudié le comportement statique en traction des fibres naturelles produites par de nouvelles techniques d'extraction. Des essais de traction à fibre unique ont été effectués à quatre longueurs pour évaluer l'effet de la longueur sur la résistance à la traction et le module de Young. Les résultats ont été analysés pour quantifier le degré de variabilité de la résistance des fibres et du module de Young à différentes longueurs.

David-West et al. [39] se sont intéressés sur la réactions des fibres végétales quasi unidirectionnelles (sisal et lin) des composites à matrice de polyester styrène à différentes températures de l'échantillon et à des énergies d'impact de (6, 9 et 12 J). Les échantillons à température ambiante ont été étudiés ainsi que les propriétés d'indentation ont été réalisées à partir de charges statiques à différentes traverses. Les valeurs d'impact énergétique (6 J) sont faibles entraînant une fissuration de la matrice et une réduction de la résistance du composite. Cependant, les grandes valeurs d'impact énergétique produisent une fissuration de la matrice et une fragmentation des fibres.

Charlet et al. [40] se sont concentrés sur les propriétés mécaniques obtenues par des essais de traction ainsi que les propriétés des fibres et celles de la matrice (non-tissé. polyester). La similitude des courbes de traction des composites et des fibres élémentaires est attribuée à la bonne adhérence des fibres avec la matrice. Les chercheurs ont conclu qu'il y a une bonne évolution des propriétés des composites avec l'augmentation de la fraction volumique de la fibre. De bons résultats ont été obtenus pour le mélange matrice et fibre par rapport aux résultats des fibres élémentaires.

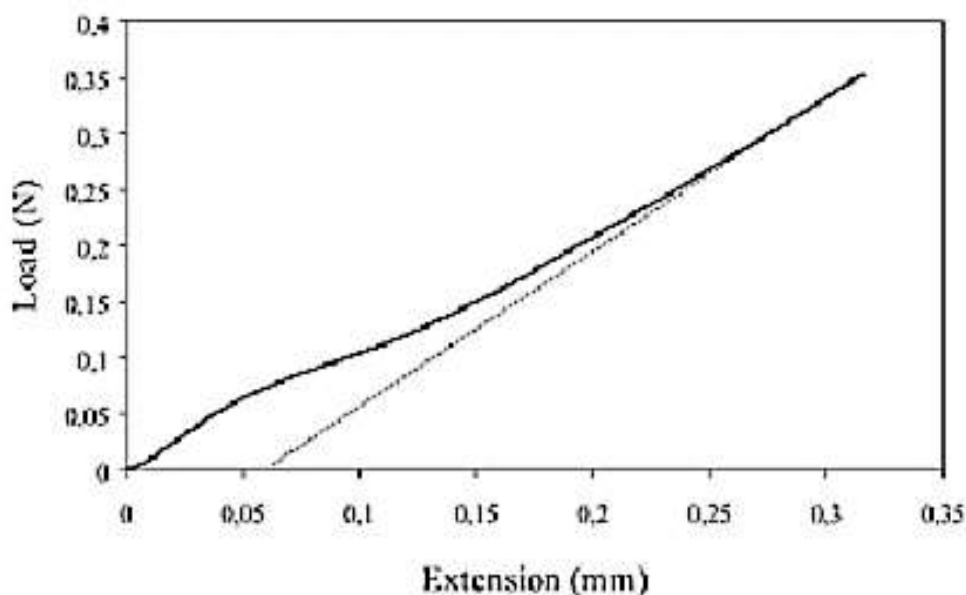


Figure I-9. Courbe de traction d'une fibre de lin unitaire [41].

I.5. Composite à fibres végétales

I.5.1. Comportement mécanique

Le comportement mécanique des composites végétaux renforcés de fibres varie considérablement en fonction de la fibre/matrice utilisée et de la structure de renforcement (fibres courtes ou fibres longues) de la fraction de densité de fibres utilisées. Le module élastique E et la résistance à la traction σ_r de différents composites renforcés de fibres naturelles varient en fonction de type de fibre et la matrice employée dans l'élaboration des échantillons.

La Figure I.10 compare les propriétés de divers composites divisés par leur fraction respective de densité afin de se libérer de leur effet. Ce graphique montre l'effet de la matrice sur les propriétés mécaniques, avec une différence particulière entre les composites à base d'époxy et de polypropylène (PP). Cette disparité de propriétés peut être atténuée, quoique notable, en tenant compte des processus de fabrication associés à ses polymères. En effet, les composites à base d'époxy sont fabriqués par infusion à partir de tissu tandis que les composites à base de PP sont produits par injection à partir de fibres courtes.

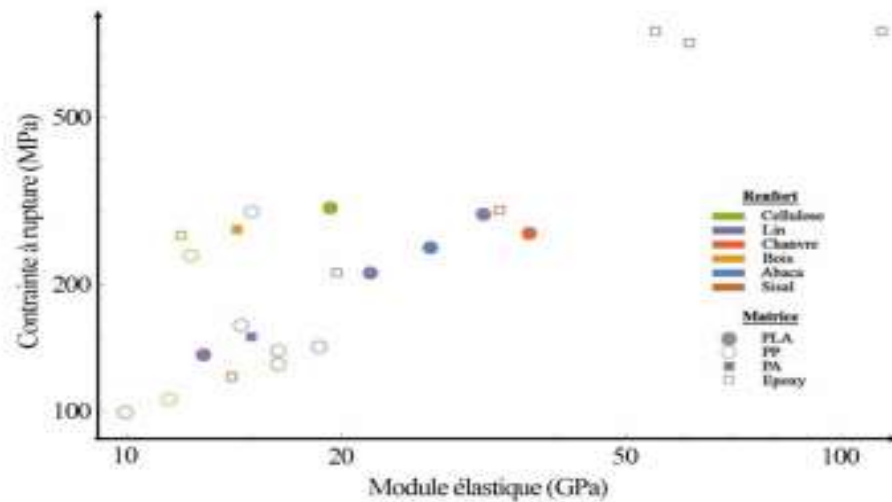


Figure I-10. Comparaison des propriétés mécaniques réduites de différents composites renforcés de fibres végétales [9].

En effet, la présence de fibres naturelles ne semble pas avoir un effet réel sur les propriétés mécaniques du composite. Les propriétés mécaniques varient et comparables en moyenne, indépendamment de la fibre utilisée. Il semble que les variations de propriétés soient explicitées par la forme de matrice utilisée et les processus de mise en forme du composite.

Filho et al. [42] ont étudié la Structure en nid d'abeille reconstituée à partir d'un nouveau composite à base de matières recyclées (caoutchouc). Ce travail décrit le comportement à la traction et à la rupture des topologies en nid d'abeilles re-entrant en tenant compte des variations de la largeur, d'épaisseur et d'angle. Après analyse des résultats, les chercheurs ont constaté que l'épaisseur et la largeur ont un effet significatif sur les propriétés de traction et le comportement de rupture Figure I.11.

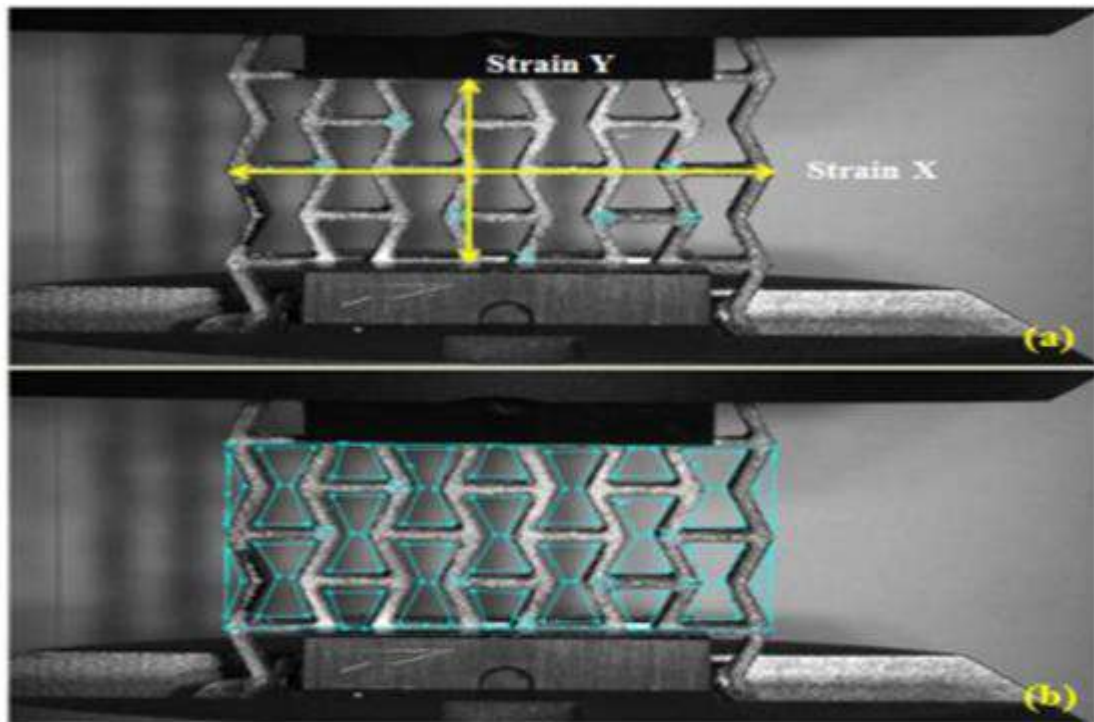


Figure I-11. Essai de traction (a), le masque et la zone marquée (b).

Tiantian et al. [43] ont examiné les structures auxétiques qui présentent un coefficient de poisson négatif. Quatre structures de différentes géométries de conception de matériaux est rendue possible par la technique de fabrication additive de pointe, guidée par des essais expérimentaux et des analyses d'éléments finis. Une étude systématique sur le comportement de compression des composites auxétiques renforcés et imprimés en 3D a montré une amélioration significative de leur rigidité et de leur absorption d'énergie comme le montre la Figure I.12. Cette amélioration des performances mécaniques est due à l'effet du coefficient de poisson négatif, qui rend la matrice dans un état de compression bi-axiale et fournit donc un support supplémentaire.

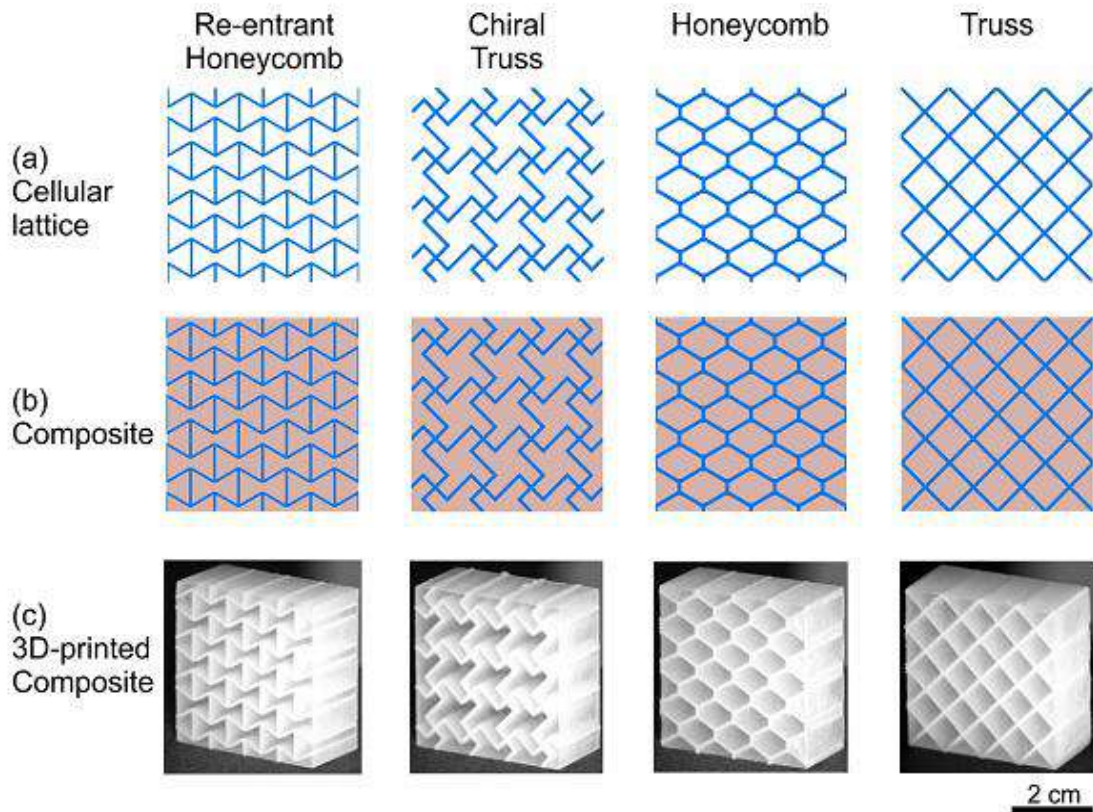


Figure I-12. Schémas des structures (a) en treillis, (b) composites renforcées en treillis et (c) spécimens composites renforcés en treillis imprimés en 3D composés de 4x4 cellules unitaires avec nid d'abeille re-entrant, cellule chirales, nid d'abeille et structures en treillis.

Aussi, Tiantian et al. [44] ont mené une étude sur une nouvelle classe de composites sandwichs qui présentent divers comportements en chargement de flexion. Ces structures sandwichs programmées, contiennent des matériaux de base imprimés en 3D avec des topologies en nid d'abeille conventionnelles, en nid d'abeille re-entrant et truss. Des essais de flexion en trois points sont effectués pour étudier le comportement de flexion de ces composites sandwichs. Les structures truss présentent une grande rigidité et une résistance en flexion Figure I.13.

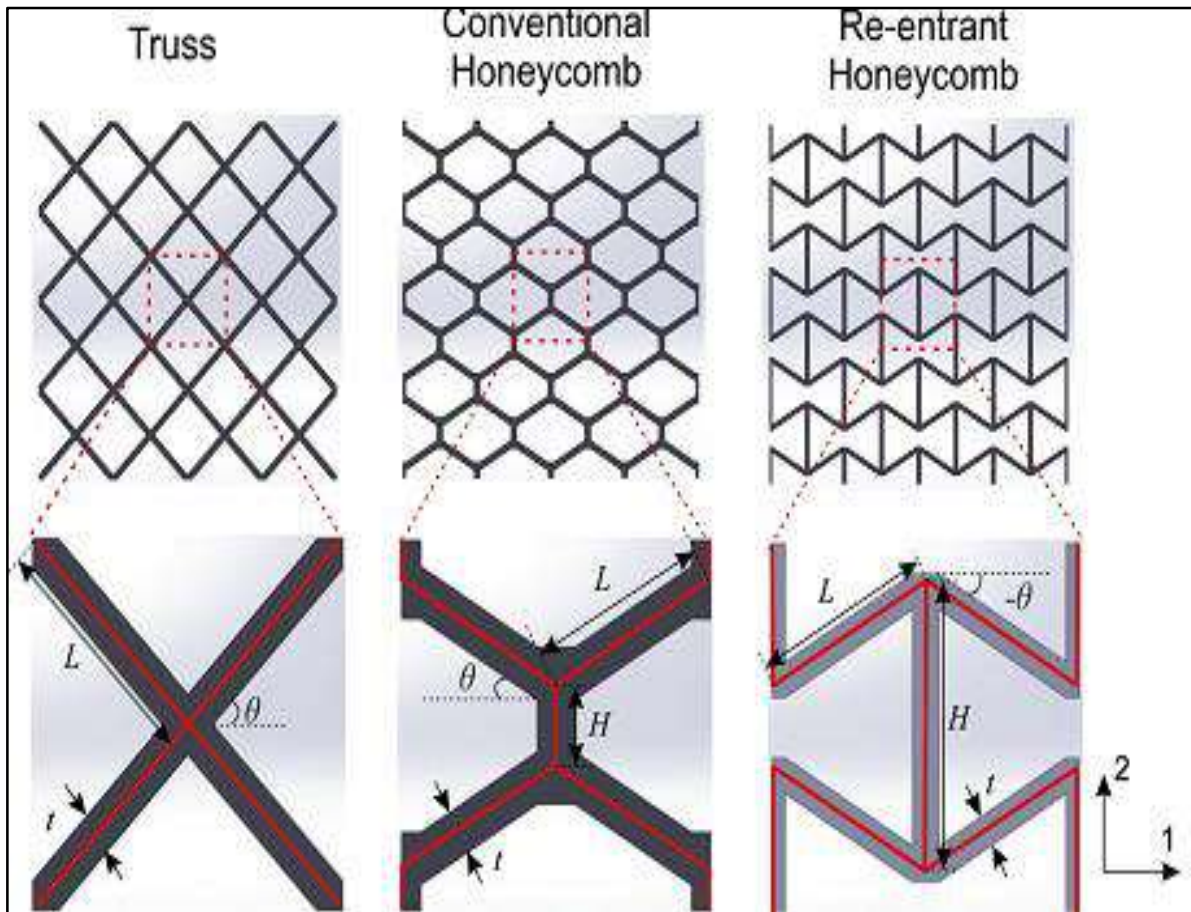


Figure I-13. Conception de la cellule élémentaire des structures truss, du nid d'abeille conventionnel et de la structure en nid d'abeille re-entrant.

L est la longueur des parois cellulaires inclinées des structures truss; t c'est l'épaisseur des parois cellulaires ; et θ est l'angle entre les parois de cellule inclinées. Les formes des structures en nid d'abeilles régulières et re-entrant sont décrites comme la longueur des parois cellulaires verticales, H ; la longueur des parois cellulaires inclinées, L ; l'épaisseur des parois cellulaires, t , et l'angle entre les parois cellulaires verticales et inclinées, θ .

El-Sabbagh et al. [45] a constaté qu'une proportion d'un dixième de la masse de fibres permettait d'obtenir les meilleures propriétés en augmentant la rigidité de 10 % et la résistance du composite de 30 %. Cependant, dans le cas de la matrice composite PP, l'effet de la fibre est remarquable car les propriétés de la rigidité et de la résistance du composite diminuent comme l'explique la Figure I.14.

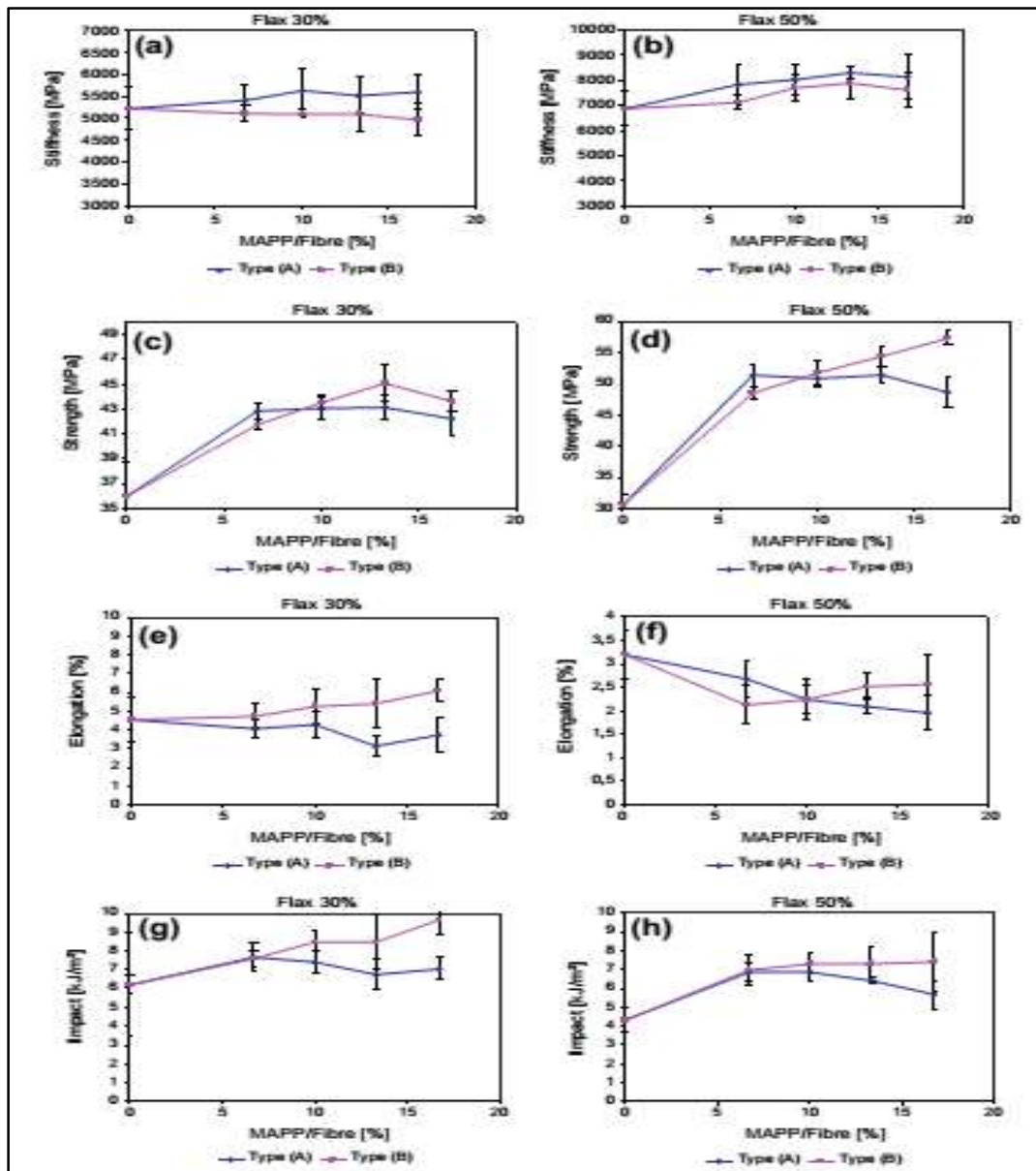


Figure I-14 Effet de MAPP:NF sur : (a,b) Rigidité (c,d) Résistance (e,f) Allongement (g,h) Impact.

Stocchi et al.[46] ont exploré les composites renforcés de fibres naturelles constitués d'une matrice de vinylester renforcée avec du tissu de jute, présenté comme indiqué dans la Figure I-15. Des nids d'abeilles de 6 et 10 mm sont fabriquées à l'aide de deux techniques de moulage par compression. Les résultats de cette étude suggèrent que les structures renforcées au jute présentent un bon comportement par rapport aux structures standard (sans fibres).

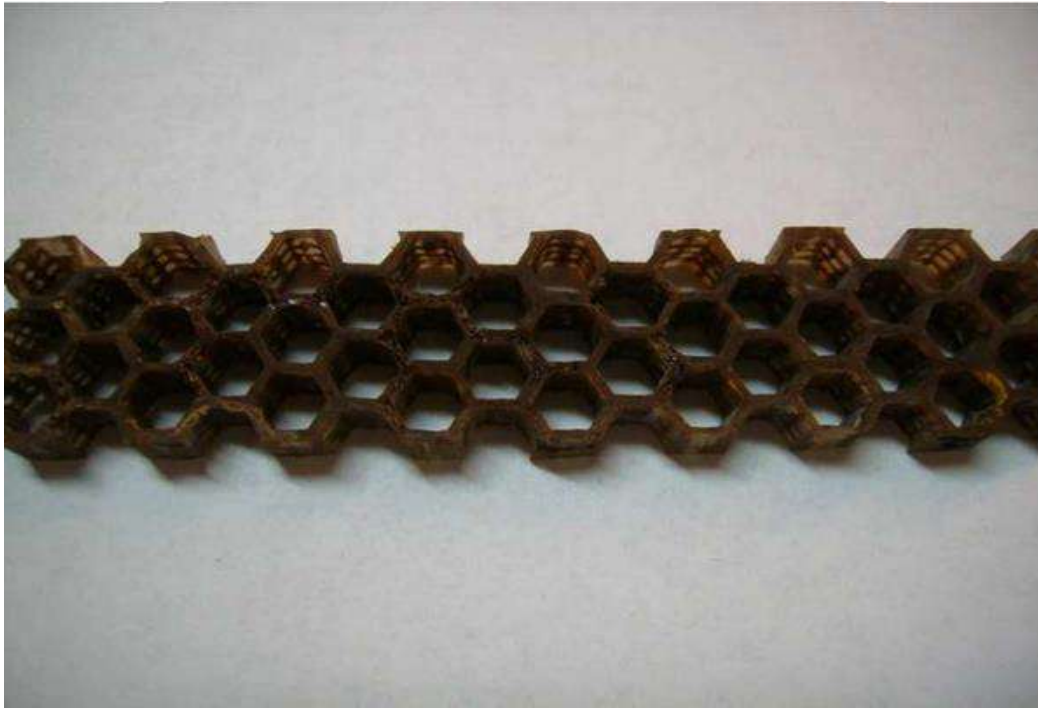


Figure I-15 Noyau en nid d'abeille fabriqué à l'aide du moule avec les inserts fixes

Rao et al.[47] ont étudié les structures nid d'abeilles de matrice polypropylène renforcée avec une courte fibre en sisal comme le montre la Figure I.16. Les structures renforcées étaient mécaniquement supérieures, ce qui a permis d'améliorer les forces et les modules spécifiques de plus du double de ceux du noyau non renforcé. De plus, l'alignement des fibres le long du processus d'extrusion a permis d'aligner la direction principale des fibres dans la direction de chargement, améliorant ainsi la rigidité des parois des cellules.

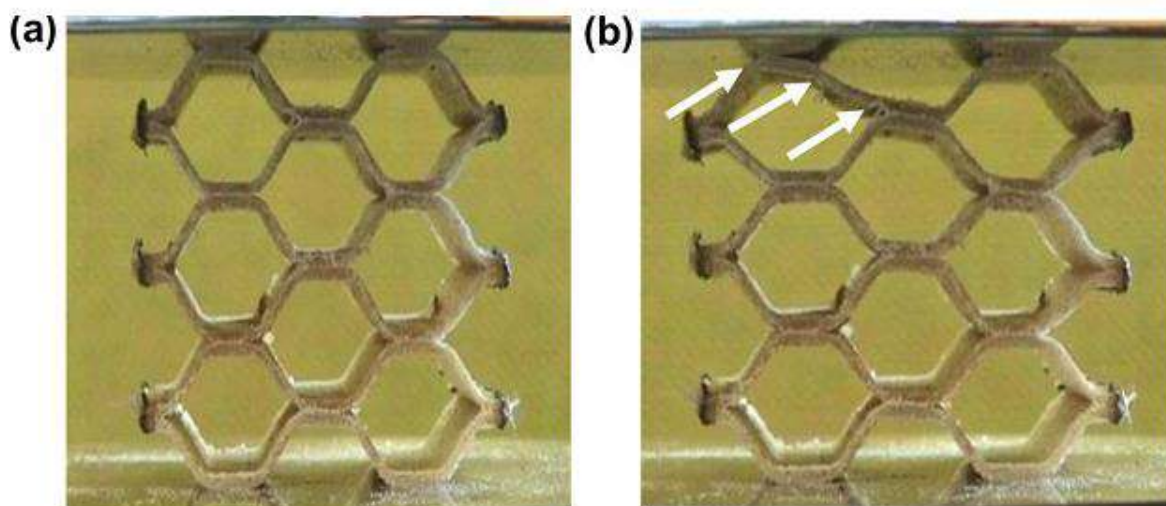


Figure I-16 Défaillances séquentielles de la structure en nid d'abeilles en sisal-PP : (a) début de l'essai et (b) formation de charnières en plastique pointées par les flèches.

Ajdari et al.[48] ont examiné les propriétés mécaniques et le comportement des nids d'abeilles classiques. L'étude a donné une nouvelle approche de l'évolution des structures cellulaires de faible poids avec des propriétés beaucoup plus améliorées. Ainsi, Ajdari et al.[49] ont montré le comportement d'une structure cellulaire à gradient de densité par changement progressif de l'épaisseur de la paroi cellulaire, et ont analysé son mécanisme de déformation à des vitesses d'écrasement faibles et élevées. Lira et al.[50] ont fourni une solution pratique pour améliorer la rigidité transversale au cisaillement du nid d'abeille en faisant varier la paroi horizontale et l'épaisseur sur l'ensemble du panneau.

I.6.Conclusion

Ce chapitre présente une analyse bibliographique réalisée dans le but de se familiariser avec les matériaux composites et les fibres naturelles. L'objectif est de constituer une base de connaissances qui pourra être utilisée par la suite pour le choix des différents matériaux nécessaires à la réalisation d'un produit à base de constituants naturels. Tout d'abord, les notions et définitions principales relatives aux fibres naturelles sont rappelées. Puis les matériaux composites sont définis, ainsi que les différents éléments qui les composent. De nombreux types et architectures de structures sont décrits, ainsi que différentes matrices et particulièrement des matrices polymères. Une revue de la littérature portant spécifiquement sur les renforts et les matrices en polymère également présentée. Par la suite, des travaux de recherche bibliographique y sont présentés en vue de faire une bonne comparaison avec ceux-ci ultérieurement. Toutes ces informations bibliographiques peuvent alors être utilisées pour choisir une matrice, un renfort dans le but de constituer une structure bio-composite, ainsi qu'un procédé de fabrication compatible avec les différents constituants utilisés.

I.7. Références

- [1] S. Liang, “Etude de comportement en fatigue des composites renforcés par fibres végétales : prise en compte de la variabilité des propriétés,” 2012.
- [2] D. Gay, “Matériaux composites,” 5^{eme} édit. *Hermes Science, Lavoisier*, 2005. .
- [3] N. Nassir, R. S. Birch, W. J. Cantwell, Q. Y. Wang, L. Q. Liu, and Z. W. Guan, “The perforation resistance of glass fibre reinforced PEKK composites,” *Polym Test*, vol. 72, pp. 423–431, 2018, doi: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2018.11.007>.
- [4] M. S. El-wazery, M. I. EL-Elamy, and S. Zoalfakar, “Mechanical properties of glass fiber reinforced polyester composites,” *Int J Appl Sci Eng*, vol. 14, pp. 121–131, Feb. 2017.
- [5] M. J. Shukla, D. S. Kumar, K. K. Mahato, D. K. Rathore, R. K. Prusty, and B. C. Ray, “A comparative study of the mechanical performance of Glass and Glass/Carbon hybrid polymer composites at different temperature environments,” *IOP Conf Ser Mater Sci Eng*, vol. 75, p. 12002, 2015, doi: 10.1088/1757-899x/75/1/012002.
- [6] C. Baley, “Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites,” *Tech L'ingénieur*, Jan. 2004.
- [7] E. W. and T. Kraus, “Composites Market Report 2016,” 2016. .
- [8] A. Sharma, “Heatsink Market Analysis, Segments & Forecast Report to 2025,” Sep. 2019.
- [9] L. Freund, “Étude du vieillissement hygrothermique des composites renforcés de fibres naturelles : approche expérimentale et modélisation,” 2018.
- [10] Z. N. Azwa, B. F. Yousif, A. C. Manalo, and W. Karunasena, “A review on the degradability of polymeric composites based on natural fibres,” *Mater Des*, vol. 47, 2013, doi: 10.1016/j.matdes.2012.11.025.
- [11] M. Ho *et al.*, “Critical factors on manufacturing processes of natural fibre composites,” *Compos Part B Eng*, vol. 43, no. 8, pp. 3549–3562, 2012, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2011.10.001>.
- [12] M. J. John and R. D. Anandjiwala, “Chemical modification of flax reinforced polypropylene composites,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 40, no. 4, pp. 442–448, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.01.007>.
- [13] K. Charlet, C. Baley, C. Morvan, J. P. Jernot, M. Gomina, and J. Bréard,

- “Characteristics of Hermès flax fibres as a function of their location in the stem and properties of the derived unidirectional composites,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 38, 2007, doi: 10.1016/j.compositesa.2007.03.006.
- [14] K. Oksman, “Mechanical Properties of Natural Fibre Mat Reinforced Thermoplastic,” *Appl Compos Mater*, vol. 7, no. 5, pp. 403–414, 2000, doi: 10.1023/A:1026546426764.
- [15] A. Arbelaiz, B. Fernández, G. Cantero, R. Llano-Ponte, A. Valea, and I. Mondragon, “Mechanical properties of flax fibre/polypropylene composites. Influence of fibre/matrix modification and glass fibre hybridization,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 36, no. 12, pp. 1637–1644, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.03.021>.
- [16] A. Arbelaiz, B. Fernández, J. A. Ramos, and I. Mondragon, “Thermal and crystallization studies of short flax fibre reinforced polypropylene matrix composites: Effect of treatments,” *Thermochim Acta*, vol. 440, no. 2, pp. 111–121, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tca.2005.10.016>.
- [17] T. Stuart, Q. Liu, M. Hughes, R. D. McCall, H. S. S. Sharma, and A. Norton, “Structural biocomposites from flax—Part I: Effect of bio-technical fibre modification on composite properties,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 37, no. 3, pp. 393–404, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.06.002>.
- [18] Q. Liu and M. Hughes, “The fracture behaviour and toughness of woven flax fibre reinforced epoxy composites,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 39, no. 10, pp. 1644–1652, 2008, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2008.07.008>.
- [19] I. Van de Weyenberg, T. Chi Truong, B. Vangrimde, and I. Verpoest, “Improving the properties of UD flax fibre reinforced composites by applying an alkaline fibre treatment,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 37, no. 9, pp. 1368–1376, 2006, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2005.08.016>.
- [20] I. Van de Weyenberg, J. Ivens, A. De Coster, B. Kino, E. Baetens, and I. Verpoest, “Influence of processing and chemical treatment of flax fibres on their composites,” *Compos Sci Technol*, vol. 63, no. 9, pp. 1241–1246, 2003, doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00093-9](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00093-9).
- [21] S. Alix, E. Philippe, A. Bessadok, L. Lebrun, C. Morvan, and S. Marais, “Effect of chemical treatments on water sorption and mechanical properties of flax fibres,” *Bioresour Technol*, vol. 100, no. 20, pp. 4742–4749, 2009, doi:

- <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.04.067>.
- [22] S. Amroune, A. Belaadi, and A. Makhlof, “Statistical and Experimental Analysis of the Mechanical Properties of Flax Fibers,” *J Nat Fibers*, May 2020, doi: 10.1080/15440478.2020.1775751.
- [23] S. Amroune, A. Belaadi, R. Dalmis, Y. Seki, A. Makhlof, and H. Satha, “Quantitatively Investigating the Effects of Fiber Parameters on Tensile and Flexural Response of Flax/Epoxy Biocomposites,” *J Nat Fibers*, vol. xx, pp. 1–18, Jul. 2020.
- [24] D. Ray, B. K. Sarkar, S. Das, and A. K. Rana, “Dynamic mechanical and thermal analysis of vinylester-resin-matrix composites reinforced with untreated and alkali-treated jute fibres,” *Compos Sci Technol*, vol. 62, no. 7, pp. 911–917, 2002, doi: [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(02\)00005-2](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(02)00005-2).
- [25] B. K. Sarkar and D. Ray, “Effect of the defect concentration on the impact fatigue endurance of untreated and alkali treated jute–vinylester composites under normal and liquid nitrogen atmosphere,” *Compos Sci Technol*, vol. 64, no. 13, pp. 2213–2219, 2004, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2004.03.017>.
- [26] T. Munikenche Gowda, A. C. B. Naidu, and R. Chhaya, “Some mechanical properties of untreated jute fabric-reinforced polyester composites,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 30, no. 3, pp. 277–284, 1999, doi: [https://doi.org/10.1016/S1359-835X\(98\)00157-2](https://doi.org/10.1016/S1359-835X(98)00157-2).
- [27] M. Bourahli, “Caractérisation d’un composite verre époxy,” univ-setif.dz, 2018.
- [28] N. Suppakarn and K. Jarukumjorn, “Mechanical properties and flammability of sisal/PP composites: Effect of flame retardant type and content,” *Compos Part B Eng*, vol. 40, no. 7, pp. 613–618, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2009.04.005>.
- [29] M. Q. Zhang, M. Z. Rong, and X. Lu, “Fully biodegradable natural fiber composites from renewable resources: All-plant fiber composites,” *Compos Sci Technol*, vol. 65, no. 15, pp. 2514–2525, 2005, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2005.06.018>.
- [30] A. N. Towo and M. P. Ansell, “Fatigue of sisal fibre reinforced composites: Constant-life diagrams and hysteresis loop capture,” *Compos Sci Technol*, vol. 68, no. 3–4, 2008, doi: 10.1016/j.compscitech.2007.08.021.
- [31] A. N. Towo and M. P. Ansell, “Fatigue evaluation and dynamic mechanical thermal analysis of sisal fibre-thermosetting resin composites,” *Compos Sci Technol*, 2008, doi: 10.1016/j.compscitech.2007.08.022.

- [32] W. Wongsorat, N. Suppakarn, and K. Jarukumjorn, "Mechanical Properties, Morphological Properties, and Cure Characteristics of Sisal Fiber/Natural Rubber Composites: Effects of Fiber and Compatibilizer Content," *Adv Mater Res*, vol. 123–125, pp. 1171–1174, Aug. 2010, doi: 10.4028/www.scientific.net/AMR.123-125.1171.
- [33] M. John, S. Thomas, and K. Varughese, "Biodegradability and Aging Studies of Hybrid Biofiber Reinforced Natural Rubber Biocomposites," *J Biobased Mater Bioenergy*, vol. 1, pp. 118–126, Apr. 2007, doi: 10.1166/jbmb.2007.013.
- [34] A. Bessadok *et al.*, "Effect of chemical treatments of Alfa (*Stipa tenacissima*) fibres on water-sorption properties," *Compos Sci Technol*, vol. 67, no. 3, pp. 685–697, 2007, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2006.04.013>.
- [35] M. Paula, "Sisal cellulose acetates obtained from heterogeneous reactions," *Express Polym Lett - EXPRESS POLYM LETT*, vol. 2, pp. 423–428, Jun. 2008, doi: 10.3144/expresspolymlett.2008.51.
- [36] S. Fávoro, "Chemical, morphological and mechanical analysis of sisal fiber-reinforced recycled high-density polyethylene composites," *Express Polym Lett - EXPRESS POLYM LETT*, vol. 4, pp. 465–473, Jul. 2010, doi: 10.3144/expresspolymlett.2010.59.
- [37] C. Baley and A. Bourmaud, "Average tensile properties of French elementary flax fibers," *Mater Lett*, vol. 122, 2014, doi: 10.1016/j.matlet.2014.02.030.
- [38] A. Bezazi, A. Belaadi, M. Bouchak, F. Scarpa, and K. Boba, "Novel extraction techniques, chemical and mechanical characterisation of *Agave americana* L. natural fibres," *Compos Part B Eng*, vol. 66, pp. 194–203, 2014.
- [39] O. S. David-West, W. M. Banks, and R. A. Pethrick, "A study of the effect of strain rate and temperature on the characteristics of quasi-unidirectional natural fibre reinforced composites," *Proc Inst Mech Eng Part L J Mater Des Appl*, vol. 225, 2011, doi: 10.1177/0954420711404635.
- [40] K. Charlet, J.-P. Jernot, L. Bizet, and J. Bréard, "Mechanical Properties of Flax Fibers and of the Derived Unidirectional Composites," *J Compos Mater - J Compos MATER*, vol. 44, pp. 2887–2896, Nov. 2010, doi: 10.1177/0021998310369579.
- [41] A. Bourmaud, C. Morvan, A. Bouali, V. Placet, P. Perré, and C. Baley, "Relationships between micro-fibrillar angle, mechanical properties and biochemical composition of flax fibers," *Ind Crops Prod*, vol. 44, pp. 343–351, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2012.11.031>.

- [42] S. L. M. R. Filho *et al.*, “Failure analysis and Taguchi design of auxetic recycled rubber structures,” *Phys status solidi*, vol. 251, no. 2, pp. 338–348, Feb. 2014, doi: 10.1002/pssb.201384258.
- [43] T. Li, Y. Chen, X. Hu, Y. Li, and L. Wang, “Exploiting negative Poisson’s ratio to design 3D-printed composites with enhanced mechanical properties,” *Mater Des*, vol. 142, pp. 247–258, Mar. 2018, doi: 10.1016/j.matdes.2018.01.034.
- [44] T. Li and L. Wang, “Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials,” *Compos Struct*, vol. 175, pp. 46–57, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.001>.
- [45] A. El-Sabbagh, “Effect of coupling agent on natural fibre in natural fibre/polypropylene composites on mechanical and thermal behaviour,” *Compos Part B Eng*, vol. 57, pp. 126–135, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.09.047>.
- [46] A. Stocchi, L. Colabella, A. Cisilino, and V. Álvarez, “Manufacturing and testing of a sandwich panel honeycomb core reinforced with natural-fiber fabrics,” *Mater Des*, vol. 55, pp. 394–403, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.054>.
- [47] S. Rao, K. Jayaraman, and D. Bhattacharyya, “Short fibre reinforced cores and their sandwich panels: Processing and evaluation,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 42, no. 9, pp. 1236–1246, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.05.006>.
- [48] A. Ajdari, B. H. Jahromi, J. Papadopoulos, H. Nayeb-Hashemi, and A. Vaziri, “Hierarchical honeycombs with tailorable properties,” *Int J Solids Struct*, vol. 49, no. 11–12, pp. 1413–1419, 2012.
- [49] A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi, and A. Vaziri, “Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures,” *Int J Solids Struct*, vol. 48, no. 3, pp. 506–516, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.10.018>.
- [50] C. Lira and F. Scarpa, “Transverse shear stiffness of thickness gradient honeycombs,” *Compos Sci Technol*, vol. 70, no. 6, pp. 930–936, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.02.007>.

Chapitre II.

COMPORTEMENT EN COMPRESSION DES STRUCTURES BIOCOSITES A RENFORT EN FIBRE NATURELLES : APPLICATION AUX BIOCOSITES SANDWICHES

Contenu du chapitre	Page
II.1. Introduction	30
II.2. Préparation des structures sandwich.....	32
II.3. Plan d'expérience et méthode de Taguchi	35
II.4. Résultats et discussion	36
II.4.1. Contrainte de compression	42
II.4.2. Déformation en compression.....	43
II.4.3. Energie d'absorption.....	43
II.5. Conclusion	46
II.6. Reference	47

Chapitre II :

COMPORTEMENT EN COMPRESSION DES STRUCTURES BIOCOMPOSITES A RENFORT EN FIBRES NATURELLES : APPLICATION AUX BIOCOMPOSITES SANDWICHES

II.1. Introduction

Les propriétés multifonctionnelles des solides cellulaires ont suscité un grand intérêt dans leur application dans des structures extrêmement légères [1]. Les propriétés les plus pertinentes sont celles fournies utilisant des cellules solides en raison de l'existence de structures vides formant un panneau de poids spécifique inférieur aux matériaux conventionnels. Les effets sur l'environnement ont motivé l'utilisation de structures en nid d'abeilles fabriquées à partir de structures de faible densité pour être utilisées dans diverses applications telles que la construction mécanique, la construction chimique, l'aérospatiale, biomédecine et bien d'autres [2][3]. Une structure en nid d'abeille offre une grande résistance et une forte capacité à absorber l'impact énergétique (structures composites sandwichs) [3][4]. La plupart des recherches ont été effectuées afin d'obtenir de bonnes propriétés basées sur la cellule optimale de la structure en nid d'abeilles. Les résultats obtenus sont également présentés aussi dans le même plan d'étude en faisant varier les angles des cellules unitaires [5]. Ajdari et al. [6] ont étudié les propriétés mécaniques des hiérarchies en nid d'abeille dans le plan ainsi que leur comportement.

L'étude a fourni une nouvelle approche pour développer des structures cellulaires de faible poids avec des propriétés assez améliorées. Des recherches ont montré que les nids d'abeilles à structure carrée ou triangulaire montrent un bon comportement à l'écrasement et une très grande résistance à l'étirement dans le plan. Parallèlement, Yicheng et coll. [7] ont étudié le comportement de la structure en nid d'abeille renforcée par des fibres naturelles. Ils ont examiné la réponse au fluage du composite polymère thermodurcissable renforcé de fibres naturelles comportant une cellule en nid d'abeille pendant 30 jours pour une humidité relative de 65%. Les panneaux sandwich testés présentent des propriétés viscoélastiques linéaires pour une contrainte de 30 % alors que l'augmentation d'humidité provoque l'accélération de la déformation par fluage.

Petrone et coll. [8] ont décrit la réponse d'impact des cellules en nid d'abeilles écologique renforcé en fibre de lin combinée à du polyéthylène. Ils ont utilisé des nids d'abeilles en polyéthylène renforcés de fibres courtes continues et unidirectionnelles. Ils ont constaté une variation d'énergie absorbée influencée par la hauteur de la structure. Cependant, les structures fabriquées à partir de composites renforcés de fibres continues ont montré une meilleure réponse à la charge d'impact par rapport à celles renforcées de fibres courtes.

De plus, Ju et al. [3] ont étudié les propriétés élastiques des structures auxétiques avec différentes géométries de cellules sous charge de cisaillement simple alors que Zied et al. [9] ont modifié la structure en nid d'abeilles re-entrant pour améliorer la rigidité en plan en maintenant le comportement auxétique.

Wang et coll. [10] ont mené des études sur les structures auxétiques susceptibles d'être utilisées dans des applications divers en raison de leurs bonnes caractéristiques mécaniques. De plus, Lekesiz et al. [11] ont réalisé trois type de structures re-entrant en acier inoxydable (316L) en utilisant trois cellules unitaires de dimensions différentes et les ont testé sous chargement uniaxial à l'aide d'une machine d'essai universelle.

Mohd et al. [12] ont étudié les propriétés de compression des matériaux à cellule carré et triangulaire en nid d'abeille à base de polypropylène (PP) et d'acide polylactique (PLA) de lin mélangés. Les résultats ont montré que la structure en PP présente de bonnes propriétés mécaniques (propriétés de traction) et une absorption d'énergie par rapport aux autres structures en PLA. En outre, il a été constaté que la structure en nid d'abeille carrée est meilleure que la structure triangulaire.

Rao et al. [13] ont signalé dans leur étude sur les nids d'abeilles en PP renforcés de fibres de sisal que l'énergie absorbée par les noyaux en sisal-PP est beaucoup plus importante que celle des nids d'abeilles non renforcés, de plus les structures renforcées ont de meilleures propriétés mécaniques. Lira et al. [14] ont défini les propriétés de rigidité transversale en cisaillement d'un nouveau nid d'abeille ayant un rapport de coefficient de poisson nul. Les courbes de rigidité au cisaillement ainsi obtenues ont permis de comparer la configuration en silicomb avec les structures en nids d'abeilles classiques, symétriques centrées et rectangulaires. La structure silicomb offre le même comportement spécifique au cisaillement avec une densité inférieure de 20%. Le mélange des angles internes des cellules donne à la plate-forme cellulaire de silicomb une plus grande flexibilité en termes de réalisation des structures sandwich à géométrie complexe. D'autres chercheurs comme. Chen et al. [15] ont produit un silicomb à structure cellulaire courbée et ont observé un bon arrangement entre la modélisation par éléments finis et

le comportement mécanique prédit par les essais en flexion à 3 points. La géométrie du silicomb fournit une densité relative minimale et une rigidité maximale tout en atteignant des niveaux de contrainte élevés.

Dans le cadre de cette étude, les propriétés mécaniques des fibres utilisées ont déjà été rapportées par Belaadi et al. [16]. L'augmentation potentielle de l'application des biocomposites a justifié la nécessité de tenir compte de leur capacité de développement commerciale [17][18].

Ce chapitre présente une étude comparative du comportement en compression uniaxiale des structures en nid d'abeille, nid d'abeille re-entrant et en silicomb dans leur plan. Tous les modèles ont été réalisés sur des échantillons développés avec le procédé de moulage. Ces échantillons sont à base d'un mélange de résine époxy et de fibres naturelles (lin, jute et sisal). Le recours aux fibres a pour avantage d'augmenter la résistance à la compression des composites contenant 50% de fibres. La déformation et les modes de défaillance des différentes cellules ainsi que leur performance ont été examinés. Les résultats ainsi obtenus sont présentés puis comparés avec ceux de la littérature.

II.2. Préparation des structures sandwich

Dans cette étude, trois types de fibres naturelles sont exploités : le lin, le jute et le sisal. Les fibres utilisées sont illustrées à la Figure II.1, nous sont fournies par l'usine de cordes de Blida, en Algérie.

La surface des fibres individuelles de lin, de jute et de sisal a été analysée à l'aide d'un microscope électronique à balayage (MEB) JSM-7600F. Pour rendre les fibres conductrices, les échantillons ont été revêtus d'une fine couche d'or. Les images du MEB ont été traitées à une tension d'accélération de 10 kV, comme le montre la Figure II.1. La résine époxy (MEDAPOXY STR) utilisée pour la fabrication des composites a été fournie par la société GRANITEX Alger-Algérie. Les échantillons de biocomposites préparés pour la caractérisation mécanique ont été réalisés par moulage. Les dimensions des éprouvettes réalisées sont de 100 mm de long, 100 mm de large et 10 mm d'épaisseur avec des fibres de 10 mm de long. Afin de fabriquer les échantillons, trois structures ont été conçues à l'aide du logiciel SOLIDWORKS. Ensuite, les noyaux ont été produits à l'aide d'une imprimante 3D qui utilise un filament de PLA présentant de bonnes caractéristiques comme la biodégradabilité et la biocompatibilité (Figure II.2).

La liste complète des paramètres utilisés dans l'impression 3D (3D UP MINI 2) pour tous les types d'échantillons est présentée au Tableau II.1. Jamshidian et al. [18] et Lyes et al.[19] ont publié les propriétés mécaniques du PLA à savoir 2852 MPa pour le module de traction et 38,5

MPa pour la limite d'élasticité lors des essais conformément à la norme ISO 527. Enfin, le matériau final a été introduit dans des moules aux dimensions suivantes (100x100x10 mm, 100x100x20 mm et 100x100x30 mm). Pour assurer le durcissement du mélange, les échantillons ont été conservés à l'air libre pendant 24 heures afin d'obtenir une polymérisation complète de la résine. Ensuite, les échantillons ont été séchés à l'air libre à température ambiante (25°C). Les conditions expérimentales ont été fixées en variant les facteurs : épaisseur ou hauteur de la structure (10, 20 et 30 mm) et type de fibre. Cependant, l'épaisseur de la paroi cellulaire est de 3 mm et l'angle interne entre les parois de cellules horizontales et verticales est de 120 ° pour la structure en nid d'abeille, de 65 ° pour le nid d'abeille re-entrant et de 95 ° pour la structure en silicomb. Plus de 5 échantillons de chaque type de biocomposites ont été testés sur la machine Zwick/Roell 050 Z équipée d'une cellule de charge de 50 kN et d'un capteur linéaire intégré pour mesurer le mouvement de la traverse. La machine est contrôlée par le logiciel Test expert II qui permet d'enregistrer les résultats obtenus sous forme de rapport d'essai.

Les essais de compression quasi-statique sur les échantillons ont été effectués conformément aux normes ASTM D695. Ces essais ont été réalisés à une température ambiante de 25 °C avec un taux d'humidité relative d'environ 50 % à une vitesse constante de 1 mm/min.

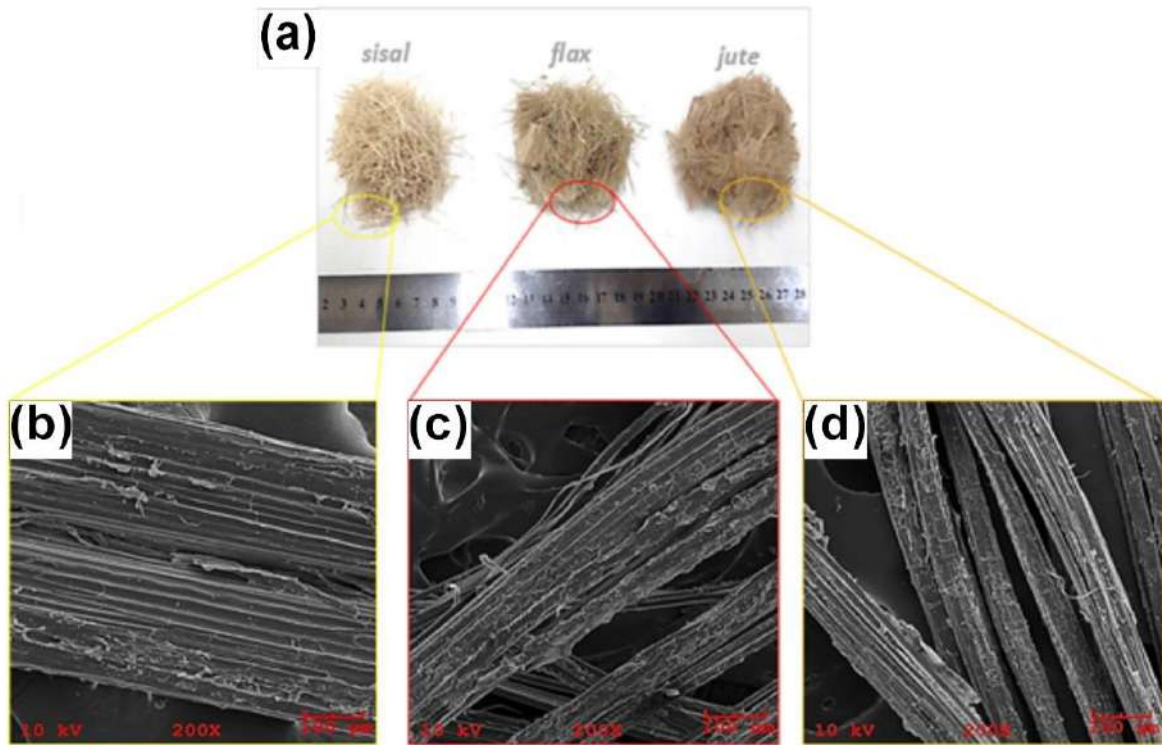


Figure II-1. Micrographies des fibres naturelles ainsi que leur morphologie de surface : (a) aperçu général, (b) sisal, (c) lin et (d) fibres de jute.

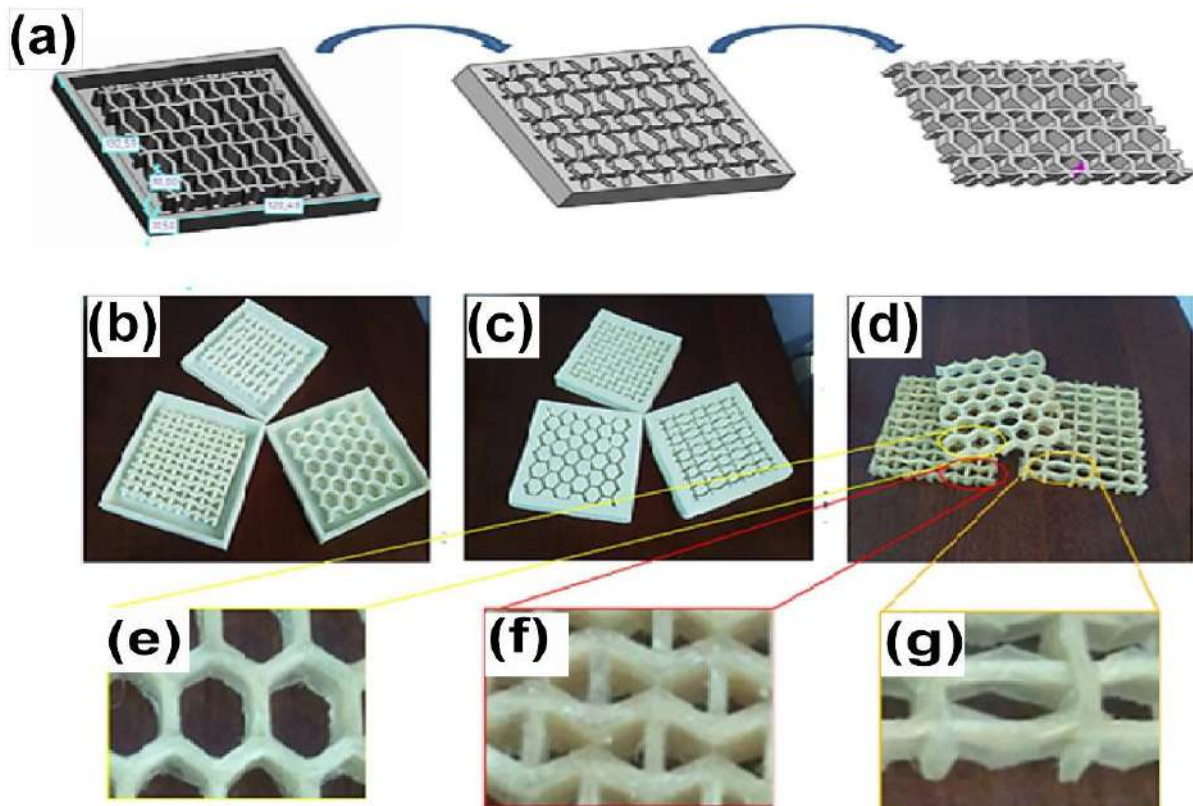


Figure II-2. Étapes de fabrication des structures en nid d'abeille, en re-entrant et en silicomb : (a) Dessin de structure numérique (silicomb) avec le logiciel Solid Works, (b) structures obtenues par impression 3D, (c) moule en résine de silicone (d) structures finales, (e) structure en nid d'abeille finale (f) structure finale en re-entrant et (g) structure finale en silicomb.

Tableau II-1. Paramètres d'impression 3D utilisés pour la fabrication des échantillons testés dans cette étude.

Epaisseur de couche (mm)	0,15 à 0,35
Densité intercalaire (%)	100
Température impression (C)	220
Température de lit d'imprimante (C)	60
Vitesse d'impression (mm/s)	15
Débit (%)	100
L'adhérence au lit d'impression	Délivrer au lit

II.3. Plan d'expérience et méthode de Taguchi

Une méthode de conception expérimentale orthogonale a été proposée par Taguchi qui représente l'ensemble des outils statistiques afin de définir la combinaison optimale des variables impliquées dans un processus donné. L'avantage ultime de cette approche est la possibilité d'inspecter les principaux effets des paramètres de façon indépendante [20]. Le logiciel utilisé dans cette technique est MINITAB Version 16.0. Cette technique est basée sur l'évaluation du rapport signal-bruit (S/N). Il existe trois catégories de S/N, en fonction des caractéristiques essentielles telles que les plus petites et les plus grandes.

$$S/N = -10 \log_{10}(\sum_{i=1}^n y_i^2)/n \quad (1)$$

où "n" est le nombre de l'expérience, y compris la répétition, et "y" est le score des valeurs utilisant un taux plus faible est le meilleur des données expérimentales "i", appliquées pour les réponses du taux de déformation.

$$S/N = -10 \log_{10}(\sum_{i=1}^n 1/y_i^2)/n \quad (2)$$

où "n" est le nombre de l'expérience, y compris la répétition, et "y" est le score des valeurs utilisant un taux plus élevé est le meilleur des données expérimentales "i", appliquées pour les

réponses du taux de contrainte de compression et l'énergie d'absorption. Les origines du rapport signal-bruit ont été obtenues en appliquant les lois de traitement des signaux. Il est important de faire la différence entre le message diffusé (signal) et la variation arbitraire du système lui-même (bruit). Le rapport S/N estime les propriétés des facteurs. Le système est supérieur car il s'agit d'un rapport signal-bruit bien, il est plus clair de sorte que le message peut être détaché du bruit. Ainsi, la productivité des méthodes de correction peut être estimée à l'aide de leur S/N [21]. Le tableau de matrice orthogonale Taguchi Design (L9) est utilisé pour déterminer l'effet de chaque facteur sur les réponses suivantes : contrainte de compression, déformation de compression et énergie d'absorption. Le Tableau II.2 présente les différents paramètres (épaisseur, type de fibres) utilisés dans les tests pour les trois types de structures.

II.4. Résultats et discussion

Les tests expérimentaux sont effectués selon le plan de Taguchi (L9). Il comprend neuf expériences pour chaque structure (nid d'abeille, Re-entrant nid d'abeille et silicomb) par combinaison des différents niveaux des paramètres variés à savoir, le type de fibre et le type de structure. Le total de cette combinaison est de (3^2 ou 9). Les niveaux de facteurs sont présentés dans le Tableau II.2.

Tableau II-2. Facteurs de niveaux pour l'élaboration de structures en nid d'abeilles, re-entrant et en silicomb.

Facteur	Niveau-1	Niveau-2	Niveau-3
Structure nid d'abeille			
Type de fibre	Lin	Jute	Sisal
Epaisseur (mm)	10	20	30
Structure re-entrant			
Type de fibre	Lin	Jute	Sisal
Epaisseur (mm)	10	20	30
Structure silicomb			
Type de fibre	Lin	Jute	Sisal
Epaisseur (mm)	10	20	30

Les résultats des contraintes de compression pour les structures en nid d'abeille, en nid d'abeille re-entrant et en silicomb sont présentés dans le Tableau II.3. L'analyse des résultats obtenus, a révélé que la structure de re-entrant a donné le meilleur comportement au test de compression par rapport aux autres structures aussi a montré les plus faibles dommages géométriques observés. De plus, le phénomène de l'auxétisme apparaît bien pour le test de compression. Ces

chiffres suggèrent que les valeurs d'absorption d'énergie sont plus importantes dans les nids d'abeilles et les silicomb des structures conventionnelles.

Tableau II-3. Résultats expérimentaux de la conception de Taguchi pour les trois structures utilisées dans cette étude.

Test	Type de fibre	Epaisseur (mm)	Contrainte de compression (MPa)	Déformation de compression ε (%)	Energie d'absorption (j/m ³)*10 ³
Structure nid d'abeille					
1	Lin	10	25,55	17,26	20,12
2	Lin	20	43,65	28,77	33,65
3	Lin	30	68,80	35,77	51,23
4	Jute	10	24,28	15,49	19,65
5	Jute	20	39,81	26,25	31,65
6	Jute	30	61,33	32,79	46,87
7	Sisal	10	20,96	13,87	17,02
8	Sisal	20	31,96	23,60	25,36
9	Sisal	30	55,20	29,52	41,56
Structure re-entrant					
1	Lin	10	17,57	3,85	22,12
2	Lin	20	34,45	6,92	38,37
3	Lin	30	48,62	9,31	57,99
4	Jute	10	20,46	4,60	18,11
5	Jute	20	36,85	7,89	34,46
6	Jute	30	52,00	10,44	47,13
7	Sisal	10	17,46	3,16	18,35
8	Sisal	20	33,95	6,24	33,48
9	Sisal	30	47,35	8,80	42,36
Silicomb structure					
1	Lin	10	28,37	3,78	12,46
2	Lin	20	54,11	6,55	24,43
3	Lin	30	81,77	8,21	34,48
4	Jute	10	25,53	3,89	14,51
5	Jute	20	48,59	6,48	26,13
6	Jute	30	66,45	8,03	36,88
7	Sisal	10	24,45	2,47	12,38
8	Sisal	20	47,21	5,81	24,07
9	Sisal	30	52,67	7,21	33,58

Le Tableau II.4 présente les résultats des ratios S/N, calculés d'après Eq. (1) et Eq. (2), pour les propriétés mécaniques des structures étudiées (nid d'abeille, nid d'abeille re-entrant et silicomb). Il a été constaté que la combinaison optimale correspondant à une contrainte de

compression plus élevée pour toutes les structures est (33,99 MPa pour la fibre de lin et 36,38 pour l'épaisseur 30 mm). Cependant, la combinaison correspondant à des valeurs plus petites de la contrainte de compression est (29,65 MPa pour la fibre de sisal et 25,43 MPa pour l'épaisseur 10 mm). Pour la déformation par compression, la combinaison (-28,33 MPa pour la fibre de sisal et -30,26 MPa pour l'épaisseur 30 mm) a montré les valeurs les plus faibles parmi les structures testées. Par conséquent, elle représente la combinaison optimale. Cependant, la combinaison correspondant à des valeurs plus élevées est (-13,43 pour la fibre de sisal et -10,4 MPa pour l'épaisseur 10 mm). Enfin, on constate que la combinaison optimale correspondant à une absorption d'énergie plus élevée pour toutes les structures est (31,01 MPa pour le type de fibre de lin 33,76 pour une épaisseur de 30 mm), mais la combinaison (26,67 MPa pour la fibre de sisal et 22,34 MPa pour l'épaisseur 10 mm) a montré des valeurs inférieures obtenues. Les résultats indiquent que la structure re-entrant (auxétique) présente un niveau d'énergie d'absorption nettement plus élevé que la structure non auxétique (structures nid d'abeille et silicomb) et présente une bonne déformation de compression. Le nid d'abeille classique est le deuxième meilleur car il présente moins de valeurs d'absorption d'énergie et de déformation en compression. Cependant, la structure en silicomb présente les plus faibles valeurs d'absorption d'énergie de toutes les structures et les contraintes de compression élevées. Ces résultats fournissent des orientations directrices pour l'ingénierie et le développement d'une nouvelle classe de composites renforcés auxétiques avec des performances mécaniques améliorées pour une large gamme d'applications et de création de matériaux multifonctionnels. Les résultats de l'ANOVA résumés dans le Tableau II.5 révèlent que les propriétés mécaniques, à savoir la contrainte de compression, la déformation et l'absorption d'énergie. La structure nid d'abeille est fortement influencée par l'épaisseur de la structure avec les contributions respectives de 93,83%, 93,40% et 93,97%. L'influence du type de fibre est moins significative avec seulement 6,17%, 6,59% et 6,03% de contribution, respectivement. Pour la structure en nid d'abeille re-entrant, la contrainte de compression, la déformation et l'absorption d'énergie sont fortement influencées par l'épaisseur de la structure avec les contributions de 98,57%, 92,62% et 95,87 %, respectivement. L'effet du type de fibre est également moins significatif avec seulement 1,43%, 7,38% et 4,13% de la contribution, respectivement. Pour la structure en silicomb, la contrainte de compression, la déformation et l'absorption d'énergie sont fortement influencées par l'épaisseur de la structure avec les contributions respectives de 93,9%, 92,16% et 98,57 %. L'influence du type de fibre s'avère moins significative avec seulement 6,10, 7,83 et 1,43 de

contribution, respectivement. La Figure II.3 montre le comportement mécanique des composites en nid d'abeille et en silicomb soumis à un essai de compression.

Tableau II-4. Valeurs rapport S/N.

	Niveau	Contrainte de compression (plus grande et meilleure)		Déformation de compression (plus petite et meilleure)		Energie d'absorption (plus grande et meilleure)	
		Type de fibre	Epaisseur	Type de fibre	Epaisseur	Type de fibre	Epaisseur
<i>Structure nid d'abeille</i>	1	<u>32,57</u>	27,43	<u>-28,33</u>	-23,79	<u>30,27</u>	25,52
	2	31,82	31,63	-27,50	-28,34	29,76	29,54
	3	30,46	<u>35,78</u>	-26,57	<u>-30,26</u>	28,36	<u>33,33</u>
	Delta	2,11	8,35	1,76	6,47	1,91	7,81
	Rank	2	1	2	1	2	1
<i>Structure nid d'abeille Re-entrant</i>	1	<u>29,79</u>	25,32	<u>-15,97</u>	-11,66	<u>31,01</u>	25,34
	2	30,62	30,90	-17,20	-16,89	29,79	30,97
	3	29,65	<u>33,86</u>	-14,94	<u>-19,55</u>	29,27	<u>33,76</u>
	Delta	0,97	8,54	2,26	7,89	1,73	8,42
	Rank	2	1	2	1	2	1
<i>Structure silicomb</i>	1	<u>33,99</u>	28,32	<u>-15,39</u>	-10,4	<u>26,81</u>	22,34
	2	32,77	33,96	-15,38	-15,95	27,64	27,91
	3	31,89	<u>36,38</u>	-13,43	<u>-17,85</u>	26,67	<u>30,87</u>
	Delta	2,1	8,06	1,96	7,45	0,97	8,54
	Rank	2	1	2	1	2	1

Petrone et al.[8] ont trouvé que les charges sont plus faibles que celles obtenues dans cette étude via le graphe force vs déformation et présentant des pics. Le comportement caractéristique de la structure de silicomb produite dans ce travail est une conséquence de leurs mécanismes de rupture. Les structures fibres naturelles/résine époxy ne souffrent pas de la rupture instable due au flambement des parois cellulaires, mais d'un dommage progressif dû aux mécanismes de défaillance typiques des composites de fibres : retrait des fibres, rupture des fibres et coupure axiale. Ces mécanismes de défaillance sont illustrés dans la Figure II.5. D'autre part, on peut dire que les hétérogénéités dans les composites fibres naturelles/époxy dues aux variations locales des propriétés et de l'orientation des fibres sont des sites d'amorçage préférentiels des dommages. Ainsi, les dommages du biocomposites s'amorcent avant que la charge critique de flambage ne soit atteinte.

Tableau II-5. Test ANOVA pour les propriétés mécaniques de différentes structures élaborées avec un niveau de confiance 95%.

Source	DOF	SS	MS	F-table	P (%)	SS	MS	F-table	P (%)	SS	MS	F-table	P (%)
		Structure nid d'abeille				Structure nid d'abeille re-entrant				Structure silicomb			
Test ANOVA pour les données de contraintes de compression													
Type de fibre	2	6,889	3,4446	34,19	6,17	1,644	0,8221	15,56	1,43	6,664	3,3318	5,78	6,10
Epaisseur	2	104,675	52,3373	519,54	93,83	112,726	56,3632	1066,91	98,57	102,506	51,2531	88,92	93,9
Erreur	4	0,403	0,1007			0,211	0,0528			2,306	0,5764		
Total	8	111,967			100	114,582			100	111,476			100
R ²		99,6 %				99,8%				97,9 %			
Test ANOVA pour les données de déformation													
Type de fibre	2	4,6717	2,3358	554,24	6,59	7,695	3,8477	17,8	7,38	7,639	3,8195	4,26	7,83
Epaisseur	2	66,203	33,1015	7854,19	93,40	96,677	48,3383	223,62	92,62	89,86	44,9298	50,08	92,16
Erreur	4	0,0169	0,0042			0,865	0,2162			3,589	0,8971		
Total	8	70,8915			100	105,237			100	101,087			100
R ²		98,4%				99,2%				96,5%			
Test ANOVA pour les données d'énergie d'absorption,													
Type de fibre	2	5,8736	2,9368	31,96	6,03	4,758	2,370	12,63	4,13	1,644	0,8220	15,56	1,43
Epaisseur	2	91,4674	45,7337	497,67	93,97	110,358	55,1792	292,98	95,87	112,722	56,3609	1066,95	98,57
Erreur	4	0,3676	0,0919			0,753	0,1883			0,211	0,0528		
Total	8	97,7086			100	115,870			100	114,577			100
R ²		99,6 %				99,3 %				99,8 %			
Degree of freedom (DOF) ; Sum of square (SS) ; Contribution (P)													

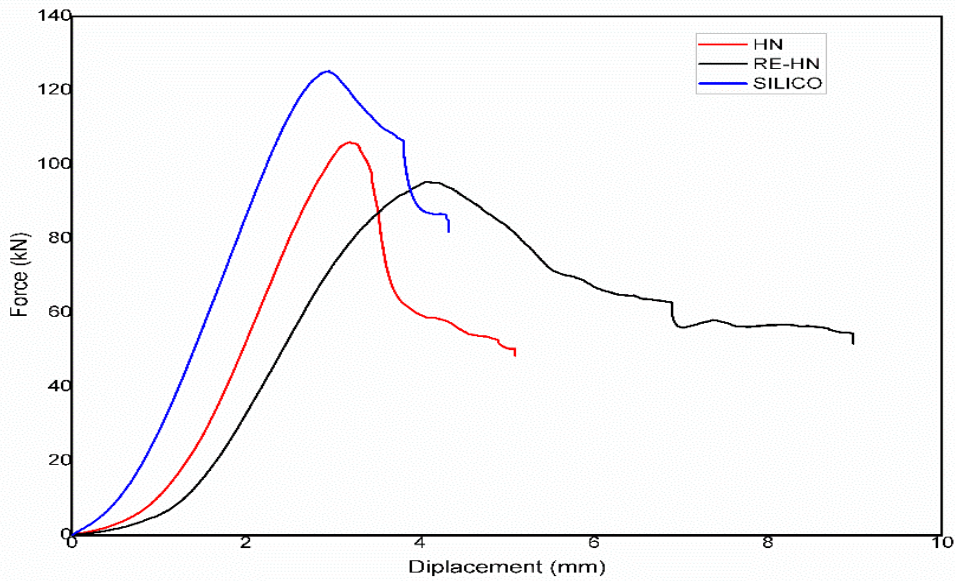


Figure II-3. Courbes de force vs déplacement des structures en nid d’abeille, en nid d’abeille re-entrant et en silicomb renforcés par de courtes fibres naturelles.

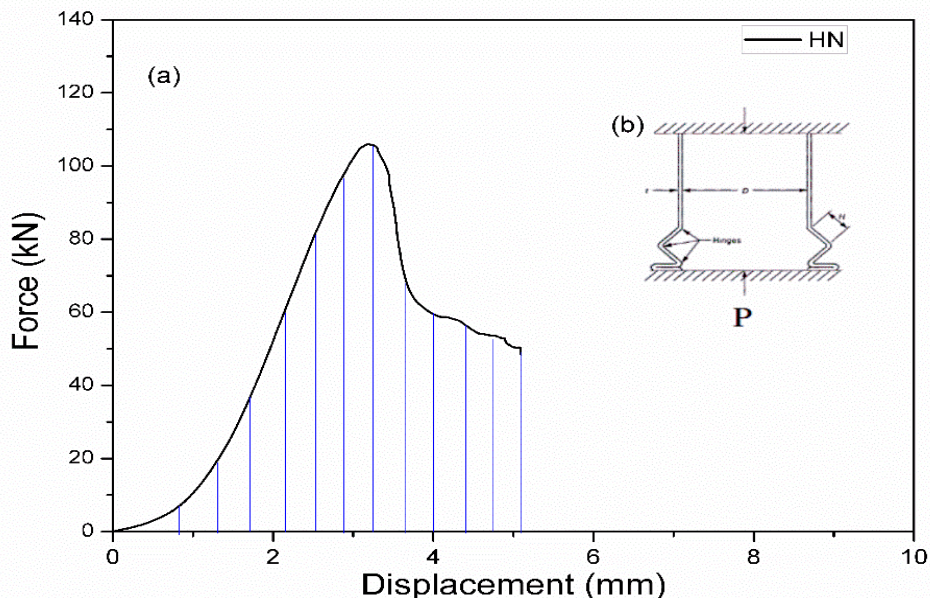


Figure II-4. (a) Courbe de compression de structure en nid d’abeille soumise à un essai de compression et (b) le mécanisme de flambage et de rupture.

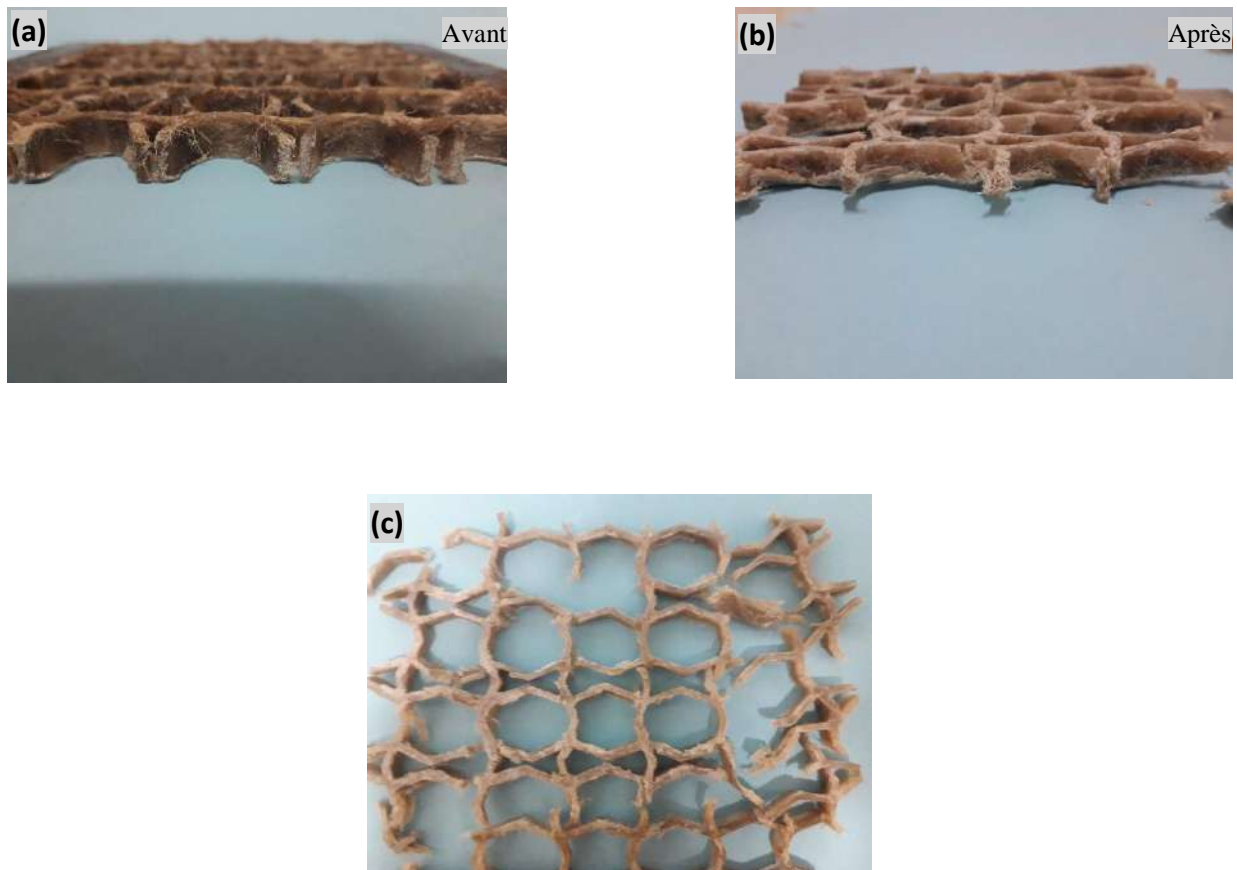


Figure II-5. Échantillons de structures de silicomb de 10 mm (a) avant l'essai de compression et (b, c) après l'essai de compression .

II.4.1. Contrainte de compression

La Figure II.6 (a) montre des variations des réponses pour toutes les structures où les données de contraintes de compression varient de 25,32 à 36,38 MPa. La variation intra-graphique mesure l'effet des facteurs "type de fibre et épaisseur" basés sur la conception de Taguchi. Une variation des données sur les contraintes de compression a été observée pour toutes les structures avec la variation du type et de l'épaisseur des fibres. Les valeurs de la contrainte de compression augmentent avec l'augmentation de la valeur de l'épaisseur pour toutes les structures. Aussi les résultats des contraintes de compression de la structure de silicomb ont été meilleurs que celles des nids d'abeilles et re-entrants. En outre, la fibre de lin a montré la meilleure réponse puis le jute et le sisal. Aussi, il a été constaté que l'épaisseur est le principal paramètre affectant la contrainte de compression suivie du type de fibre, basé sur le rang et le

delta présentés dans le Tableau II.4. La contrainte de compression maximale a été atteinte pour les paramètres géométriques de la cellule définis comme suit : épaisseur à 30 mm et type de fibre lin comme indiqué dans le Tableau II.3. Des résultats similaires ont été obtenus par Ariel et al. [10] dans leurs études sur le comportement des structures en nid d'abeilles de 6 mm et 10 mm de largeur. Suite aux résultats obtenus (contrainte de compression), on peut dire que les structures de biocomposites offrent un bon comportement en compression.

II.4.2. Déformation en compression

La Figure II.6 (b) montre les variations de réponse pour toutes les structures où la déformation de compression varie de - 30,26 à - 13,43 MPa et le graphique d'effet entre les facteurs de "type de fibre et d'épaisseur" basés sur la conception de Taguchi. On a observé une variation de la déformation par compression pour toutes les structures ayant divers types et épaisseurs de fibres. Il est indiqué que la valeur de déformation par compression diminue avec une augmentation de la valeur de l'épaisseur pour toutes les structures (10 à 30 mm). En outre, la structure en nid d'abeille offre la meilleure valeur de la déformation compressive (moins est mieux) puis la structure re-entrant et enfin silicomb. De plus, les résultats des fibres de lin indiquent la meilleure réponse, puis le jute et enfin le sisal. En résumé, l'épaisseur est le principal paramètre affectant la déformation de compression suivie du type de fibre en fonction du rang et du delta présentés au Tableau II.4.

II.4.3. Energie d'absorption

L'énergie absorbée dans tous les échantillons testés a été estimée comme étant la surface sous la courbe de déformation en fonction la charge correspondante comme le montre la figure II.4 [18]. La Figure II.6 (c) montre l'absorption d'énergie résultante de différentes structures par rapport à deux paramètres différents (type de fibre et épaisseur). Tout d'abord, grâce à la variation du type de fibre de structure, on peut voir que le nid d'abeille re-entrant possède la plus forte valeur d'absorption d'énergie absorbée (31,01 MPa) par rapport à ceux du nid d'abeille et du silicomb. Ensuite, à travers la variation de l'épaisseur de la structure, on remarque que l'absorption d'énergie augmente avec l'augmentation de l'épaisseur et que le nid d'abeille re-entrant possède également, l'absorption d'énergie la plus élevée (33,76 MPa). Sur la base de l'analyse effectuée précédemment, le nid d'abeille re-entrant est le plus rigide. De plus, le maximum atteint par la variation de l'épaisseur de la structure est supérieure au maximum atteint par la variation des fibres. En conséquence, après analyse des résultats, l'épaisseur représente le facteur le plus déterminant ainsi que les valeurs d'absorption d'énergie augmentent avec

l'augmentation de la valeur d'épaisseur pour toutes les structures. En outre, la structure re-entrant présente la meilleure valeur d'absorption d'énergie par rapport au nid d'abeille et au silicomb et la fibre de lin donne la meilleure réponse, puis le jute et le sisal. Comme pour les observations précédentes, l'épaisseur est le principal paramètre affectant l'absorption d'énergie, suivi du type de fibre en fonction du rang et du delta présentés dans Tableau II.4.

L'absorption d'énergie maximale a été atteinte pour les paramètres géométriques des cellules : épaisseur de 30 mm et type de fibre de lin (Figure II.3 et Tableau II.3). Petrone et al. [9] ont constaté que les structures biocomposites renforcées par de longues fibres de lin ont plus d'énergie d'absorption que les structures composées de structures courtes. Aussi les structures en nid d'abeille renforcées par de longues fibres de lin sont plus rigides et ont un bon comportement de réponse à l'essai de compression.

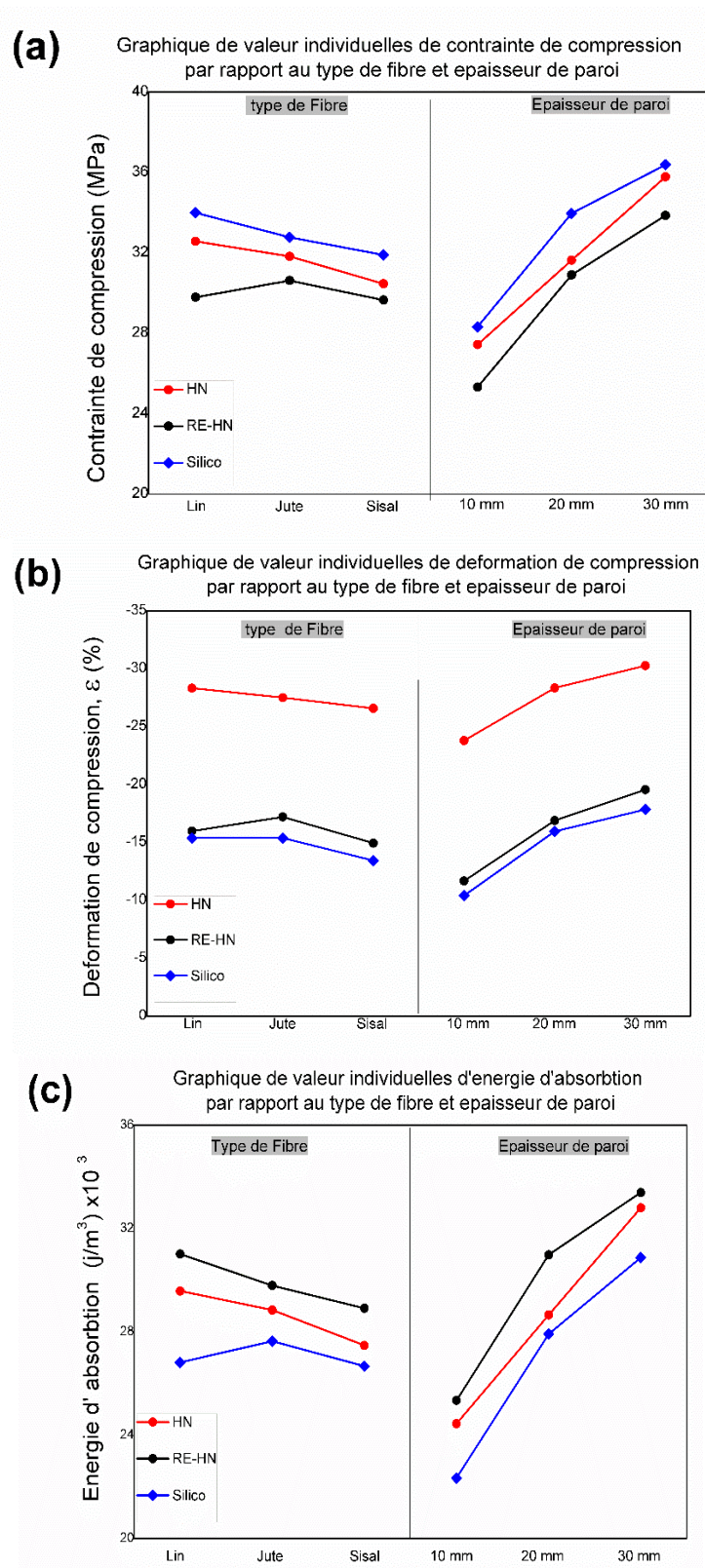


Figure II-6. Diagramme des valeurs individuelles de (a) contrainte de compression, (b) déformation de compression et (c) absorption d'énergie pour toutes les structures renforcées avec des fibres et des épaisseurs différentes.

II.5. Conclusion

Pour conclure, notre étude a porté sur les réponses mécaniques macroscopiques des structures auxétiques, nid d'abeille et silicomb renforcées par des fibres naturelles (lin, jute et sisal). Il en ressort que les composites renforcés auxétiques (re-entrant) ont des performances mécaniques plus élevées, offrant une combinaison unique de contraintes de compression et d'absorption d'énergie, par rapport aux composites renforcés non-auxétique. L'analyse statistique basée sur la méthode de Taguchi illustre l'interaction entre l'épaisseur et le type de fibre. Selon les résultats de l'analyse de la réponse (S/N), les structures auxétiques révèlent la valeur la plus élevée de (S/N) avec une épaisseur de 30 mm et une fibre de lin.

Il a également été prouvé dans cette étude que les contraintes de compression et les caractéristiques d'absorption d'énergie des structures re-entrant en nid d'abeilles sont nettement supérieures à celles de leurs structures classiques en nid d'abeilles et en silicomb. De plus, sur la base des résultats obtenus, la conception ANOVA et Taguchi ont révélé que l'épaisseur est le principal facteur affectant la contrainte de compression et l'absorption d'énergie. Par ailleurs, ces résultats sont en bon accord avec ceux illustrés dans d'autres travaux similaires de la littérature. Cette étude est précieuse pour les concepteurs qui s'intéressent à une nouvelle classe croissante de composites auxétiques renforcés dont les performances mécaniques sont susceptibles d'être améliorées et de convenir à une large gamme d'applications.

II.6.Reference

- [1] R. F. Gibson, "A review of recent research on mechanics of multifunctional composite materials and structures," *Compos Struct*, vol. 92, no. 12, pp. 2793–2810, 2010.
- [2] L. J. Gibson and M. F. Ashby, *Cellular solids : structure and properties*. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 1999.
- [3] J. Ju and J. D. Summers, "Compliant hexagonal periodic lattice structures having both high shear strength and high shear strain," *Mater Des*, vol. 32, no. 2, pp. 512–524, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2010.08.029>.
- [4] Y. Liu and X.-C. Zhang, "The influence of cell micro-topology on the in-plane dynamic crushing of honeycombs," *Int J Impact Eng*, vol. 36, no. 1, pp. 98–109, 2009, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijimpeng.2008.03.001>.
- [5] Bitzer. and Mol., "Honeycomb Technology." Springer Netherlands, [Place of publication not identified, 1997, [Online]. Available: <https://link.springer.com/book/10.1007/978-0-412-54050-9>.
- [6] A. Ajdari, B. H. Jahromi, J. Papadopoulos, H. Nayeb-Hashemi, and A. Vaziri, "Hierarchical honeycombs with tailorable properties," *Int J Solids Struct*, vol. 49, no. 11–12, pp. 1413–1419, 2012.
- [7] Y. Du, N. Yan, and M. T. Kortschot, "An experimental study of creep behavior of lightweight natural fiber-reinforced polymer composite/honeycomb core sandwich panels," *Compos Struct*, vol. 106, pp. 160–166, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.007>.
- [8] G. Petrone, S. Rao, S. De Rosa, B. R. Mace, F. Franco, and D. Bhattacharyya, "Behaviour of fibre-reinforced honeycomb core under low velocity impact loading," *Compos Struct*, vol. 100, pp. 356–362, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.004>.
- [9] K. Zied, M. Osman, and T. Elmahdy, "Enhancement of the in-plane stiffness of the hexagonal re-entrant auxetic honeycomb cores," *Phys status solidi*, vol. 252, no. 12, pp. 2685–2692, Dec. 2015, doi: 10.1002/pssb.201552164.
- [10] K. Wang, Y.-H. Chang, Y. Chen, C. Zhang, and B. Wang, "Designable dual-material auxetic metamaterials using three-dimensional printing," *Mater Des*, vol. 67, pp. 159–164, 2015, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.11.033>.
- [11] H. Lekesiz, S. Bhullar, A. Karaca, and M. Jun, "Mechanical Characterization of Auxetic Stainless Steel Thin Sheets with Reentrant Structure," *Smart Mater Struct*, vol. 26, May 2017, doi: 10.1088/1361-665X/aa73a4.

- [12] M. Y. M. Zuhri, Z. W. Guan, and W. J. Cantwell, “The mechanical properties of natural fibre based honeycomb core materials,” *Compos Part B Eng*, vol. 58, pp. 1–9, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.10.016>.
- [13] S. Rao, K. Jayaraman, and D. Bhattacharyya, “Short fibre reinforced cores and their sandwich panels: Processing and evaluation,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 42, no. 9, pp. 1236–1246, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2011.05.006>.
- [14] C. Lira, F. Scarpa, Y. H. Tai, and J. R. Yates, “Transverse shear modulus of SILICOMB cellular structures,” *Compos Sci Technol*, vol. 71, no. 9, pp. 1236–1241, 2011.
- [15] F. Scarpa, Y. Chen, C. Remillat, I. Farrow, Y. Liu, and L. Jinsong, “Curved Kirigami SILICOMB cellular structures with zero Poisson’s ratio for large deformations and morphing,” *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 25, Mar. 2013, doi: [10.1177/1045389X13502852](https://doi.org/10.1177/1045389X13502852).
- [16] A. Belaadi, A. Bezazi, M. Bourchak, F. Scarpa, and C. Zhu, “Thermochemical and statistical mechanical properties of natural sisal fibres,” *Compos Part B Eng*, vol. 67, pp. 481–489, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.07.029>.
- [17] S. Chaitanya and I. Singh, “Processing of PLA/sisal fiber biocomposites using direct- and extrusion-injection molding,” *Mater Manuf Process*, vol. 32, no. 5, pp. 468–474, Apr. 2017, doi: [10.1080/10426914.2016.1198034](https://doi.org/10.1080/10426914.2016.1198034).
- [18] M. Jamshidian, E. A. Tehrany, M. Imran, M. Jacquot, and S. Desobry, “Poly-Lactic Acid: Production, Applications, Nanocomposites, and Release Studies,” *Compr Rev Food Sci Food Saf*, vol. 9, no. 5, pp. 552–571, Sep. 2010, doi: [10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x](https://doi.org/10.1111/j.1541-4337.2010.00126.x).
- [19] L. Azzouz *et al.*, “Mechanical properties of 3-D printed truss-like lattice biopolymer non-stochastic structures for sandwich panels with natural fibre composite skins,” *Compos Struct*, vol. 213, 2019, doi: [10.1016/j.compstruct.2019.01.103](https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2019.01.103).
- [20] T. T. Ajaal and R. W. Smith, “Employing the Taguchi method in optimizing the scaffold production process for artificial bone grafts,” *J Mater Process Technol*, vol. 209, no. 3, pp. 1521–1532, 2009.
- [21] J. A. Ghani, I. A. Choudhury, and H. H. Hassan, “Application of Taguchi method in the optimization of end milling parameters,” *J Mater Process Technol*, vol. 145, no. 1, pp. 84–92, 2004, doi: [https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(03\)00865-3](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(03)00865-3).

Chapitre III.

ETUDE DES STRUCTURES BIOCOMPOSITES EN FLEXION 3-POINT

Contenu du chapitre	Page
III.1. Introduction	49
III.2. Préparation des matériaux et des spécimens :	51
III.3. Approche expérimentale de la méthode du Taguchi	53
III.4. Résultats et discussion.....	54
III.4.1. Contrainte en flexion 3-points	63
III.4.2. Déplacement en flexion 3-points	63
III.4.3. Module de flexion.....	66
III.5. Conclusion.....	68
III.6.References	69

Chapitre III :

ETUDE DES STRUCTURES BIOCOMPOSITES EN FLEXION 3-POINTS

III.1. Introduction

Les récents développements des méthodes de fabrication additive (impression 3D) [1] ont permis de produire des matériaux aux formes complexes. Ces progrès ont confirmé l'évolution rapide des matériaux ces dernières années [2] dont de nombreuses études [3] révèlent le grand intérêt. Le recours à des structures en nid d'abeilles écologiques a inspiré la fabrication de structures de faible densité pour diverses applications telles que l'ingénierie mécanique, l'ingénierie chimique, l'aérospatiale, la biomédecine et bien d'autres. Une structure en nid d'abeille fournit une grande résistance et une capacité à absorber l'énergie d'impact (structures composites sandwich).

La plupart des recherches ont été faites pour obtenir les propriétés optimales des cellules de la structure du nid d'abeille. Par la variation des angles entre les paroi de la cellule unitaire, les résultats obtenus ont influencés sur les propriétés mécaniques, parmi lesquelles les propriétés mécaniques et le comportement des nids d'abeilles classiques ont été étudiées [4]. L'étude a donné une nouvelle approche de l'évolution des structures cellulaires de faible poids avec des propriétés nettement améliorées. Ainsi, le comportement d'une structure cellulaire à gradient de densité par changement progressif de l'épaisseur de la paroi cellulaire a été mis en évidence et son mécanisme de déformation a été analysé à des vitesses d'écrasement faibles et élevées [5]. En outre, les résultats de l'étude [6] ont fourni une solution pratique pour améliorer la rigidité transversale au cisaillement du nid d'abeille en faisant varier la paroi horizontale et l'épaisseur dans tout le panneau. L'utilisation d'une cellule en nid d'abeille a été développée. Des recherches antérieures ont révélé que les nids d'abeilles à base de structures carrées ou triangulaires offrent une résistance impressionnante à l'écrasement et une résistance élevée à l'étirement en plan. Dans le même contexte, les chercheurs [7] ont fondé leur étude sur les phénomènes d'écrasement des structures en nid d'abeille dans des conditions de charge quasi statiques et dynamiques, en tenant compte des effets de la dimension cellulaire, de la résistance du matériau et du nombre de cellules sous le chargement. Ils ont découvert que l'absorption d'énergie dépend de la taille de

la cellule et de la hauteur de la structure (épaisseur) et ont recommandé tailles de nid d'abeille de plus petites et des hauteurs de cellules plus élevées pour une plus grande absorption d'énergie dans des conditions de chargement quasi-statique et d'impact.

La structure nid d'abeille renforcée par des fibres naturelles a ainsi été étudiée par [8] Les chercheurs ont montré la réponse au fluage de composite polymère thermodurcissable renforcé de fibres naturelles avec la cellule en nid d'abeille à un taux d'humidité de 65% pendant une période de 30 jours. Les panneaux sandwich testés ont montré des propriétés viscoélastiques linéaires à un niveau de contrainte était de 30 %, mais l'effet d'une humidité élevée a causé l'augmentation de déformation du fluage. Dans les travaux [9] les auteurs ont présenté l'impact de l'augmentation de la taille du nid d'abeille cellulaires (6-10 mm) composé d'une matrice de vinylester renforcée par un tissu de jute. Des essais de compression ont été effectués pour caractériser la réponse élastique du composite. Par ailleurs, les auteurs [10] ont étudié le comportement de flexion et de rupture des topologies en nid d'abeille polymorphes consistant une variation de la longueur des parois cellulaires horizontales et internes sur la surface des structures cellulaires. Quant à l'étude d'une structure en nid d'abeille avec un nouveau composite à base de caoutchouc recyclé [11], le travail consiste à changer la largeur, l'épaisseur et l'angle des parois inclinées des cellules. Une méthode Taguchi a été menée pour déterminer l'effet de chaque facteur sur la résistance à la flexion et son module de flexion. Les résultats ont montré que l'ANOVA et la conception de Taguchi ont révélé que la fraction volumique de la fibre est le principal facteur affectant la résistance et le module de flexion. D'autre part, une étude récente [12] a porté sur des panneaux sandwich durables en nid d'abeilles contenant de la sciure d'eucalyptus, du Piassava et des particules de ciment dans un essai de bandes en trois points. Cette étude a permis d'évaluer la structure composite constituée de stratifiés en fibres Piassava, cette configuration a permis d'obtenir un module de flexion et une résistance plus élevés. Il en ressort que les paramètres constructifs affectent de manière significative la contrainte de cisaillement de la structure, les contraintes imposées, la rigidité et la résistance à la flexion de différentes manières et à différents degrés. Cependant, les auteurs [13] ont réalisé une structure cellulaire silicomb, ont observé un bon accord entre la modélisation FE et le comportement mécanique prévu par les essais de compression en flexion à 3 points. La géométrie du silicomb offre une densité relative minimale et une rigidité maximale tout en atteignant des niveaux de déformation élevés.

Pour ce qui est des structures en nid d'abeille re-entrant, des travaux ont été réalisés avec du caoutchouc recyclé de largeur et d'épaisseur différentes par [11]. Pour déterminer le poids de

tous les facteurs tels que la contrainte, la force, le module d'élasticité, la contrainte de Von Mises et le coefficient de Poisson, une méthode Taguchi (L_8) a été utilisée. De plus, le comportement des fibres courtes et continues de lin renforcées par une résine polymère a été réalisé [14]. Dans une autre étude [15] le comportement de deux types de structures différentes, à savoir les structures polymères renforcés de fibres courtes de lin et continues, sous une charge d'impact hors plan à faible vitesse. Les résultats de l'impact révèlent une meilleure absorption d'énergie lorsque des nids d'abeilles à parois cellulaires renforcées de fibres continues sont utilisées. Une étude récente conduite sur le comportement des structures [16].

Ce chapitre présente une évaluation comparative du comportement de flexion 3-points des structures en nid d'abeille, re-entrant et silicomb. Tous les modèles ont été réalisés sur des échantillons développés avec le procédé de moulage. La structure finale est basée sur un mélange de résine époxy et de fibres naturelles (lin, jute et sisal). Le recours à des fibres a pour avantage d'augmenter la résistance à la charge de flexion. Les déformations et les modes d'endommagement des différentes cellules ainsi que leur performance ont été étudiés. Par ailleurs, les résultats obtenus sont présentés et discutés avec d'autres résultats de la littérature.

III.2. Préparation des matériaux et des spécimens :

Dans cette étude, trois types de fibres naturelles sont exploités : le lin, le jute et le sisal. Tableau III.1 présente les différentes caractéristiques physiques des fibres utilisées dans cette étude. Les fibres utilisées sont fournies par l'usine de cordes de Blida, en Algérie.

La matrice utilisée est une résine époxy (MEDAPOXY STR) fournie par la société GRANITEX Alger-Algérie ainsi que le durcisseur HY951 est utilisé comme liant, il est fortement recommandé de l'utiliser avec des fibres naturelles comme renfort. La mise en œuvre des structures est réalisée par moulage. Afin d'élaborer les trois moules en matériaux silicone destinés aux structures nid d'abeille, re-entrant et silicomb, trois structures ont d'abord été élaborées à l'aide du logiciel SOLIDWORKS pour la préparation de ces cellules. Ensuite, les structures de dimensions 120 x 100 x 10 mm, (matériau utilisé filament PLA) ont été imprimées en 3D.

Finalement, le produit final (composite + résine) a été introduit dans des moules de taille 120 x 100 x 10 mm comme présenté dans la Figure III.1. Ces échantillons ont été conservés à l'air libre pendant 24 heures pour obtenir une polymérisation complète de la résine.

La méthode des plans d'expérience observée dans la méthode de Taguchi cherche à établir les liens entre les deux facteurs : le type de fibre (lin, jute et sisal) et la fraction volumique des fibres (10, 20 et 30 %), l'épaisseur des parois cellulaires est de 3 mm.

Cinq échantillons environ de chaque type ont été testés sur une machine Zwick/Roell 050 Z équipée d'une force de 50 kN. La machine est contrôlée par le logiciel Test expert II qui permet d'enregistrer les résultats sur un rapport de test. Les essais de flexion quasi statique des structures ont été testés selon la norme ASTM D790 à une température ambiante de 25 °C et un taux d'humidité d'environ 50 % avec une vitesse constante de 1 mm/min.

Tableau III-1. Propriétés mécaniques des fibres naturelles utilisées dans cette étude.

Fibre	Masse volumique (kg/m³)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement (%)	Module de Young (GPa)
Sisal	1330-1500	400-550	5-8	6-8
Flax	1400-1500	343-2000	1,2-3,3	27,6-103
Jute	1300-1490	320-800	1-1,8	8-78

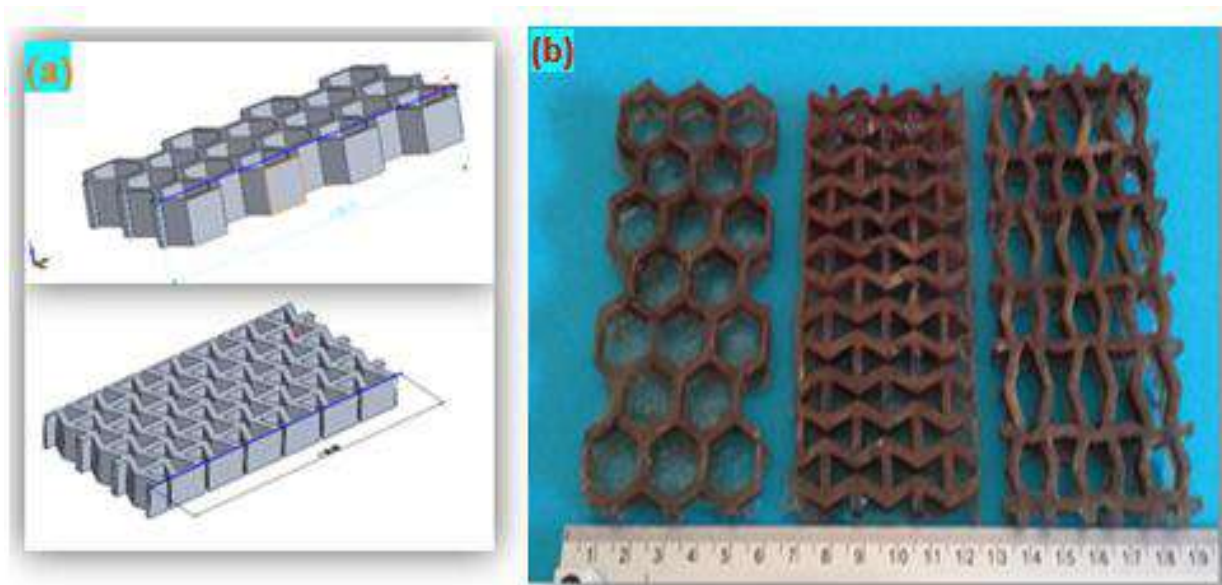


Figure III-1. Étapes d'élaboration des structures en nid d'abeille, re-entrant et en silicomb : (a) Élaboration de la structure numérique (toutes les structures) avec le logiciel Solid Works (b) Structure (biocomposites) finale.

III.3. Approche expérimentale de la méthode du Taguchi

Comme déjà vu dans les chapitres auparavant, le tableau de matrice orthogonale Taguchi Design (L9) est utilisé pour déterminer l'effet de chaque facteur sur les réponses suivantes : contrainte de flexion, déplacement et le module de flexion. Le Tableau III.2 présente les conditions expérimentales obtenues en variant les facteurs (niveaux) : type de fibre (lin, jute et sisal) et fraction volumique de fibre (10%, 20% et 30 %). Le tableau III.3 présente les résultats pour les trois structures.

Les valeurs de S/N ont été calculées à l'aide des (équations III.1).

$$S/N = -10 \log_{10}(\sum_{i=1}^n y_i^2)/n \quad (\text{III.1})$$

L'indice "n" indique le nombre de l'expérience y compris la répétition et "y" est le score des valeurs en utilisant un taux le plus faible est le meilleur des données expérimentales "i", cette fraction est appliqué pour le calcul de déplacement des structures envers le chargement en flexion.

$$S/N = -10 \log_{10}(\sum_{i=1}^n 1/y_i^2)/n \quad (\text{III.2})$$

L'indice "n" indique le nombre de l'expérience y compris la répétition et "y" est le score des valeurs en utilisant un taux le plus fort est le meilleur des données expérimentales "i", cette fraction est appliqué pour le calcul des réponses de contrainte de flexion et module de flexion.

Dans ce chapitre, la méthode de Taguchi Design (L9) est utilisée pour déterminer l'effet de chaque facteur sur les réponses suivantes : contrainte de flexion, déplacement et module de flexion.

Tableau III-2. Niveau de facteurs pour nid d'abeille, re-entrant et silicomb des structures.

Facteur	Niveau-1	Niveau -2	Niveau -3
Structure en nid d'abeille			
Type de fibre	Lin	Jute	Sisal
Densité volumique de De la fibre (%)	10	20	30
Structure en nid d'abeille Re-entrant			
Type de fibre	Lin	Jute	Sisal
Densité volumique de De la fibre (%)	10	20	30
Structure de silicomb			
Type de fibre	Lin	Jute	Sisal
Densité volumique de De la fibre (%)	10	20	30

III.4. Résultats et discussion

Les essais expérimentaux sont menés selon le schéma (L9) Taguchi. Ce diagramme contient neuf expériences pour chaque structure (nid d'abeille, Re-entrant et silicomb) qui combine plusieurs niveaux des différents paramètres à savoir, le type de fibre et sa fraction volumique. Ces niveaux de facteurs sont présentés dans le tableau III.2.

Les résultats des contraintes de flexion pour les structures en nid d'abeille, nid d'abeille re-entrant et en silicomb sont présentés dans les tableaux (III.3 III.4 et III.5). L'analyse des résultats obtenus montre que la structure silicomb a donné les meilleurs résultats ainsi qu'un meilleur comportement à l'essai de flexion par rapport aux autres structures.

Les Tableaux (III.6 III.7 et III.8) montrent les résultats de calcul de fraction S/N à partir des formules (Equation III.1). Il ressort de l'analyse des résultats que la combinaison optimale correspondant à la valeur maximale de la contrainte de flexion est de (36,95 MPa pour la fibre de lin et 36,53 pour le volume de la fraction de fibres de 30 %) par contre la combinaison qui présente le minimum est de (25,61 MPa pour la fibre de sisal et 24,66 pour le volume de la fraction de fibres de 10 %). Pour ce qui est du calcul de déplacement, la combinaison de valeurs (-26,57 MPa pour la fibre de sisal et -24,71 MPa pour le volume de la fraction de fibres de 10 %) correspond au maximum des valeurs obtenues, par contre la combinaison (-36,88 MPa pour la fibre de lin et -38,30 pour un volume de la fraction de fibres de 30 %) est la combinaison des valeurs minimales avec les meilleures résultats obtenus.

Finalement, après analyse des résultats des valeurs du module de flexion, la combinaison de valeur qui présente la réponse maximale est (15,75 GPa pour la fibre de lin et 17,17 GPa pour le volume de la fraction de fibres de 30 %), d'autre part la combinaison qui montre le minimum est 5,43 GPa pour la fibre de sisal et 3,58 GPa pour un volume de la fraction de fibres de 10 %). Globalement, les résultats indiquent que la structure silicomb offre une bonne résistance en flexion et un meilleur module de flexion, la structure re-entrant a ensuite des valeurs inférieures à celles de la structure silicomb, enfin le nid d'abeille a des valeurs inférieures à celles des autres structures. Ces résultats sont de bonnes perspectives pour l'ingénierie et le développement d'une nouvelle classe de biocomposites renforcés par des fibres naturelles aux performances mécaniques plus élevées destinés à de nombreuses applications ainsi que pour le développement de matériaux multifonctionnels.

Tableau III-3. Résultats expérimentaux de la conception Taguchi pour la structure nid d'abeille.

Test	Type de fibre	Densité volumique de la fibre (%)	Contrainte de flexion σ_f (MPa)	Déplacement d (mm)	Module de flexion E_f (GPa)
Structure nid d'abeille					
1	Lin	10	20,46	19,84	1,74
2	Lin	20	29,80	29,90	2,62
3	Lin	30	33,31	42,06	3,69
4	Jute	10	16,50	17,51	1,53
5	Jute	20	20,91	25,10	2,20
6	Jute	30	28,58	39,57	3,47
7	Sisal	10	14,83	14,65	1,28
8	Sisal	20	18,40	22,93	2,01
9	Sisal	30	25,45	28,78	2,52

Tableau III-4. Résultats expérimentaux de la conception Taguchi pour la structure Re-entrant nid d'abeille.

Test	Type de fibre	Densité volumique de la fibre (%)	Contrainte de flexion σ_f (MPa)	Déplacement d (mm)	Module de flexion E_f (GPa)
Re-entrant nid d'abeille structure					
1	Lin	10	29,16	35,31	3,10
2	Lin	20	33,87	59,92	5,26
3	Lin	30	47,04	74,21	6,51
4	Jute	10	20,91	29,88	2,62
5	Jute	20	30,18	41,31	3,62
6	Jute	30	38,20	59,99	5,26
7	Sisal	10	18,23	18,73	1,64
8	Sisal	20	23,35	34,93	3,06
9	Sisal	30	34,10	44,80	3,93

Tableau III-5. Résultats expérimentaux de la conception Taguchi pour la structure Silicomb.

Test	Type de fibre	Densité volumique de la fibre (%)	Contrainte de flexion σ_f (MPa)	Déplacement d (mm)	Module de flexion E_f (GPa)
Silicomb structure					
1	Lin	10	47,82	43,59	3,82
2	Lin	20	79,71	73,98	6,49
3	Lin	30	91,62	105,68	9,27
4	Jute	10	36,20	33,69	2,95
5	Jute	20	55,90	52,18	4,58
6	Jute	30	66,30	76,68	6,73
7	Sisal	10	29,31	26,17	2,29
8	Sisal	20	43,55	44,59	3,91
9	Sisal	30	49,66	68,62	6,02

Tableau III-6. Résultats expérimentaux de la conception Taguchi pour la structure nid d'abeille.

	Niveau	Contrainte de flexion σ_f (MPa) (plus grand et meilleure)		Déplacement d (mm) (plus petit et meilleure)		Module de flexion E_f (GPa) (plus grand et meilleure)	
		Type de fibre	Fraction volumique des fibres (%)	Type de fibre	Fraction volumique des fibres (%)	Type de fibre	Fraction volumique des fibres (%)
Structure nid d'abeille	1	28,72	24,66	- 29,31	- 24,71	8,18	3,58
	2	26,63	27,06	- 28,27	- 28,24	7,14	7,11
	3	25,61	29,23	- 26,57	- 31,20	5,43	10,07
	Delta	3,11	4,57	2,74	6,49	2,75	6,49
Rank	2	1	2	1	2	1	

Tableau III-7. Résultats expérimentaux de la conception Taguchi pour la structure Silicomb.

	Niveau	Contrainte de flexion σ_f (MPa) (plus grand et meilleure)		Déplacement d (mm) (plus petit et meilleure)		Module de flexion E_f (GPa) (plus grand et meilleure)	
		Type de fibre	Fraction volumique des fibres (%)	Type de fibre	Fraction volumique des fibres (%)	Type de fibre	Fraction volumique des fibres (%)
Structure re-entrant	1	31,11	26,97	- 34,64	- 28,64	13,51	7,50
	2	29,21	29,19	- 32,46	- 32,91	11,33	11,78
	3	27,75	31,92	- 29,78	- 35,33	8,65	14,20
Delta		3,37	4,94	4,86	6,69	4,86	6,69
Rank		2	1	2	1	2	1

Tableau III-8. Valeurs fraction S/N pour la structure Silicomb.

	Niveau	Contrainte de flexion σ_f (MPa) (plus grand et meilleure)		Déplacement d (mm) (plus petit et meilleure)		Module de flexion E_f (GPa) (plus grand et meilleure)	
		Type de fibre	Fraction volumique des fibres (%)	Type de fibre	Fraction volumique des fibres (%)	Type de fibre	Fraction volumique des fibres (%)
Structure Silicomb	1	36,95	31,37	- 36,88	- 30,56	15,75	9,43
	2	34,18	35,25	- 34,20	- 34,91	13,06	13,77
	3	32,01	36,53	- 32,69	- 38,30	11,56	17,17
Delta		4,94	5,16	4,19	7,74	4,19	7,73
Rank		2	1	2	1	2	1

Les résultats obtenus par application de la méthode ANOVA sont présentés dans les Tableaux (III.9 III.10 et III.11). Ils illustrent les propriétés mécaniques des structures à savoir : la contrainte de flexion, le déplacement et le module de flexion.

La structure en nid d'abeille est fortement influencée par la fraction volumique de la fibre avec des contributions respectives de 67,51% 84,62% et 84,53 %. L'influence de type fibre est moins significative avec seulement 32,49%, 15,38% et 15,47 % de contribution.

Pour la structure re-entrant, très influencée par la fraction volumique des fibres dont les contributions sont respectivement de 68,25% 65,97% et 65,98 %, les contributions relatives au type de fibre sont moins importantes, avec seulement 31,75% 34,03% et 34,02 %.

Ainsi, la structure Silicomb est également fortement influencée par la fraction volumique de la fibre avec des contributions respectives de 54,09% 76,92% et 76,93 %, pour ce qui du type fibre sont moins significatives avec respectivement seulement 45,91% 23,08% et 23,07% de contribution.

Par conséquent, au vu des résultats obtenus, l'influence du paramètre fraction volumique de la fibre est plus dominant par rapport au type de fibre.

La figure III.2, présente les courbes force/déplacement des trois structures (nid d'abeille, re-entrant et silicomb) sollicitées en flexion 3 points constituées par le même type de matériau. Nous remarquons sur cette figure que le comportement en flexion des biocomposites de toutes les courbes est similaire. Celui-ci peut être décomposé en trois phases principales : une première phase correspondant à une augmentation linéaire de la charge appliquée en fonction du déplacement, suivie d'une seconde phase dans laquelle le comportement est non linéaire et où la charge maximale est atteinte, puis enfin une diminution de la charge dans la dernière partie jusqu'à la rupture de l'échantillon. Il convient de noter que la structure en silicomb montre en général une assez bonne rigidité ainsi qu'un excellent comportement vis-à-vis de l'essai de flexion par rapport aux autres structures cela est dû à la morphologie des fibres et à leur orientation, ainsi qu'à leur fraction volumique dont le rôle est assez important vis-à-vis ce chargement.

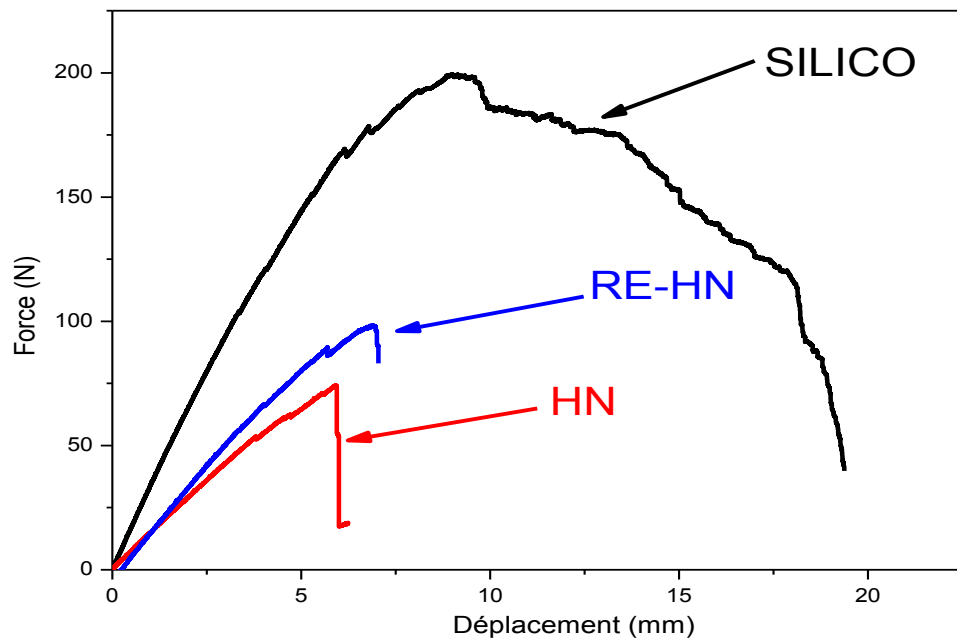


Figure III-2. Courbe force en fonction du déplacement des structures nid d'abeille, re-entrant et silicomb renforcé avec des fibres naturelles courtes sollicitées en flexion 3 points.

Tableau III-9. Test ANOVA pour les données de contrainte de flexion des structures au niveau de confiance 95%.

Source	DOF	SS	MS	F-rapport	P (%)	SS	MS	F-rapport	P (%)	SS	MS	F-rapport	P (%)
Structure niz d'bielle					Structure niz d'bielle re-entrant					Structure silicomb			
Test ANOVA pour les données de contrainte de flexion													
Type de fibre	2	15,060	7,5300	26,00	32,49	17,111	8,5554	29,04	31,75	36,7949	18,3974	189,41	45,91
Fraction volumique de la fibre	2	31,290	15,6450	54,02	67,51	36,774	18,3872	62,42	68,25	43,3537	21,6768	223,17	54,09
Erreur	4	1,158	0,2896			1,178	0,2946			0,3885	0,0971		
Totale	8	47,508			100	55,063			100	80,5371			100
R ²				97,6 %				97,9 %				99,5 %	

Tableau III-10. Test ANOVA pour les données de déplacement des structures au niveau de confiance 95%.

Source	DOF	SS	MS	F-rapport	P (%)	SS	MS	F-rapport	P (%)	SS	MS	F-rapport	P (%)
Structure niz d'bielle					Structure niz d'bielle re-entrant					Structure silicomb			
Test ANOVA pour les données de déplacement													
Type de fibre	2	11,5170	5,7585	23,07	15,38	35,550	17,7750	36,57	34,03	27,069	13,5347	115,08	23,08
Fraction volumique de la fibre	2	63,3597	31,6799	126,90	84,62	68,919	34,4596	70,89	65,97	90,221	45,1106	383,57	76,92
Erreur	4	0,9986	0,2496			1,944	0,4861			0,4704	0,1176		
Totale	8	75,8752			100	106,414			100	117,761			100
R ²				98,7 %				98,2 %				99,6 %	

Tableau III-11. Test ANOVA pour les données de module de flexion des structures au niveau de confiance 95%.

Source	DOF	SS	MS	F- rapport	P (%)	SS	MS	F- rapport	P (%)	SS	MS	F- rapport	P (%)
Structure niz d'bielle					Structure niz d'bielle re-entrant					Structure silicomb			
Test ANOVA pour les données du module de flexion													
Type de fibre	2	11,5956	5,7978	23,21	15,47	35,552	17,7761	36,63	34,02	27,0619	13,5310	114,98	23,08
Fraction volumique de la fibre	2	63,3759	31,6879	126,86	84,53	68,942	34,4708	71,03	65,98	90,2128	45,1064	383,28	76,92
Erreur	4	0,9992	0,2498			1,941	0,4853			0,4707	0,1177		
Totale	8	75,9706			100	106,435			100	117,745			100
R ²			98,7 %				98,2 %				99,6 %		
Degree of freedom (DOF) ; Sum of square (SS) ; Contribution (P)													

III.4.1. Contrainte en flexion 3-points

La Figure III.3 montre des variations de réponses pour les trois structures, dont les contraintes de flexion sont comprises entre (24,66 et 36,95 MPa). Cette variation observée pour toutes les structures dépend des facteurs «type de fibre et fraction de volume de fibre» selon la conception de Taguchi. Pour toutes les structures, les contraintes de flexion augmentent avec l'augmentation de la fraction volumique de la fibre. Les résultats de la contrainte de flexion de la structure silicomb ont également été meilleurs que ceux du nid d'abeille et la re-entrante. En outre, la fibre de lin apporte la meilleure réponse que le jute et le sisal. La fraction volumique de la fibre est le paramètre plus dominant, par rapport au type de la fibre comme indiqué dans le Tableau III.6. Les valeurs maximum de la contrainte de flexion sont atteintes pour les paramètres géométriques cités comme suit : fraction volumique de la fibre de 30 % et type de fibre est le lin comme indiqué dans le Tableau III.3.

III.4.2. Déplacement en flexion 3-points

La Figure III.4 illustre les variations observées du déplacement pour toutes les structures dont les valeurs varient de -24,71 MPa à -38,30 MPa. En outre, la figure montre les effets des facteurs pour toutes les structures liés à la nature des fibres et leur fraction volumique selon la méthode de Taguchi. Les valeurs de déplacement des structures diminuent à mesure que les volumes de la fraction de fibre augmentent (10 à 30 %), la structure silicomb indique de meilleures réponses par rapport aux autres structures. De même, la fibre de lin montre également de meilleures réponses que le jute et le sisal.

En résumé, la fraction volumique de la fibre est le principal paramètre affectant le déplacement de la structure suivi par le type de fibre présenté dans les Tableau III.7. Les valeurs minimales de déplacement sont atteintes pour les paramètres géométriques cités comme suit : fraction volumique des fibres est de 30 % et le type de fibre est le lin comme indiqué dans le Tableau III.4.

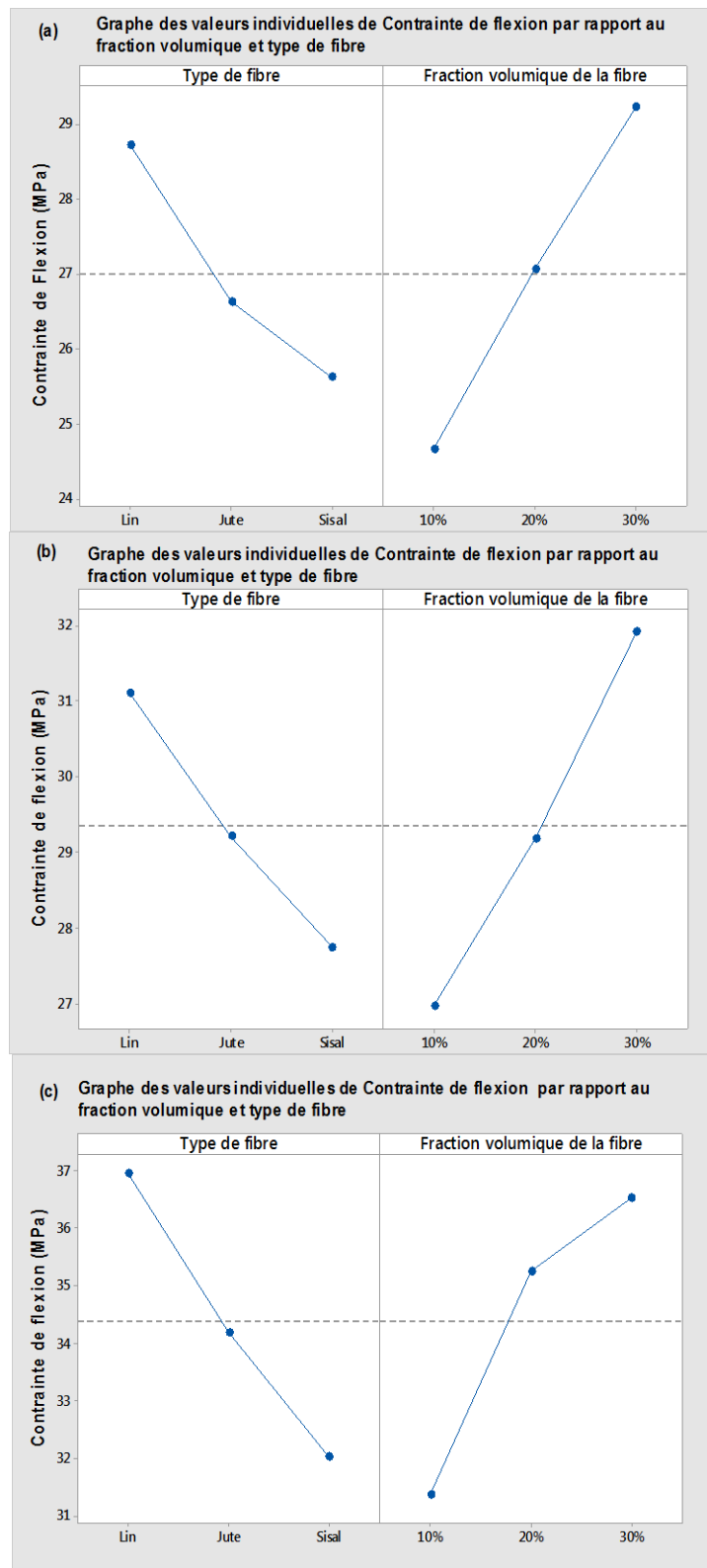


Figure III-3. Graphe des valeurs individuelles de la variation de la contrainte de flexion des structures (a) nid d'abeille (b) re-entrant (c) silicomb par rapport au type et fraction volumique de fibre.

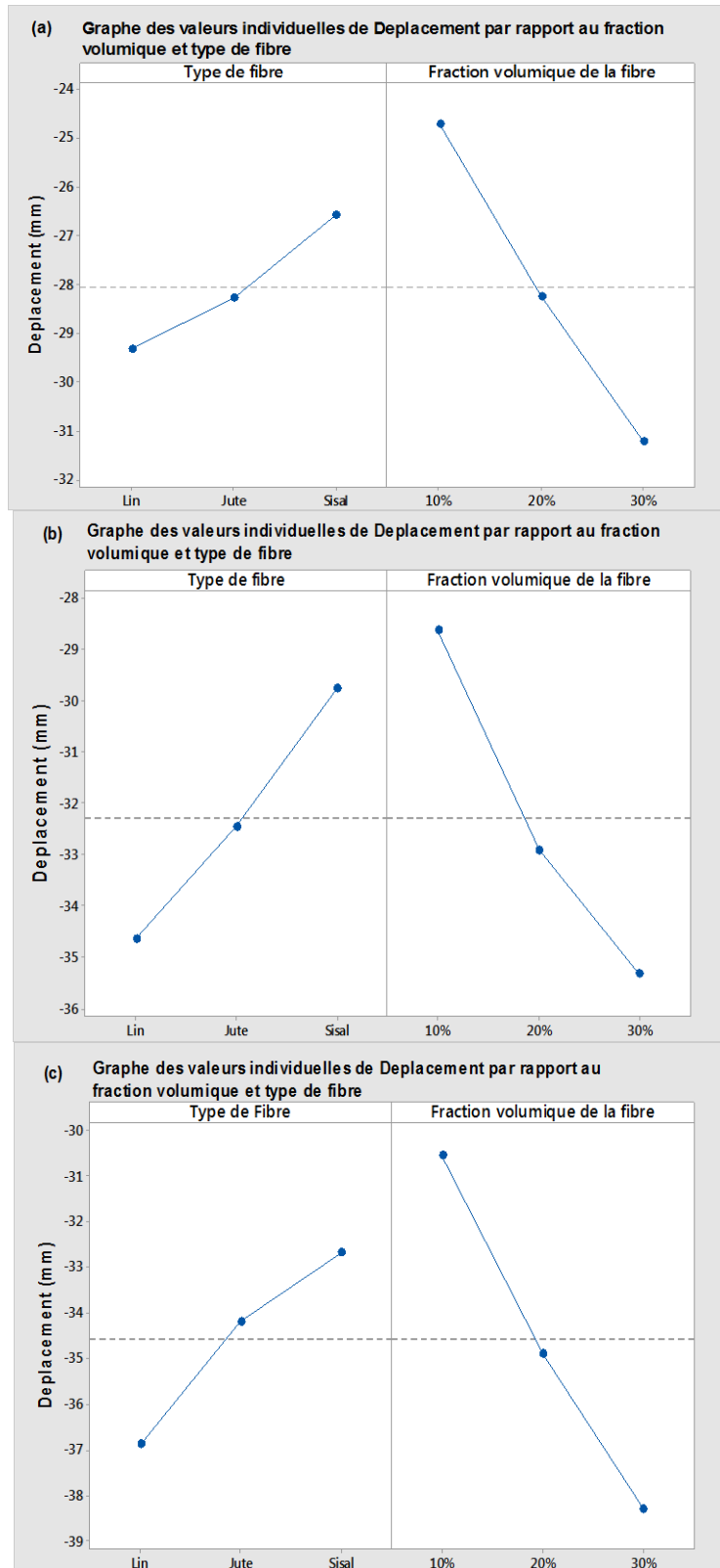


Figure III-4. Graphe des valeurs individuelles de la variation du déplacement en flexion des structures (a) nid d’abeille (b) re-entrant (c) silicomb par rapport au type et fraction volumique des fibres.

III.4.3. Module de flexion

La Figure III.5 montre les variations observées du module de flexion pour toutes les structures dont les valeurs varient de 3,58 à 17,17 MPa, les effets des facteurs pour toutes les structures liés à la nature des fibres et leur fraction volumique selon la méthode de Taguchi.

En premier à cause de la variation du type de structure, on constate que la silicomb possède le plus fort module de flexion (15,75 GPa) par rapport à ceux du nid d'abeille et nid d'abeille re-entrante. Ensuite, par la variation de la fraction volumique de la fibre de la structure, le module croît avec l'augmentation de la fraction volumique. La structure en silicomb a également le module de flexion le plus élevée (17,17 MPa), Sur la base de l'analyse effectuée précédemment, il a été constaté que la structure silicomb est la plus rigide vis-à-vis de la charge d'essai de flexion.

De plus, le maximum atteint par la variation de la fraction volumique est bien meilleur par rapport à la variation des fibres, Par conséquent, la fibre de lin est celle qui offre la meilleure réponse, suivie du jute et à la fin du sisal. La fraction volumique est le principal paramètre affectant le module de flexion suivi du type de fibre basé sur le calcul de rang et delta présentés dans le Tableau III.8. Le module de flexion maximal a été atteint en fixant les paramètres géométriques des cellules comme suit : fraction volumique de 30 % et type de fibre en lin comme indiqué dans le Tableau III.5.

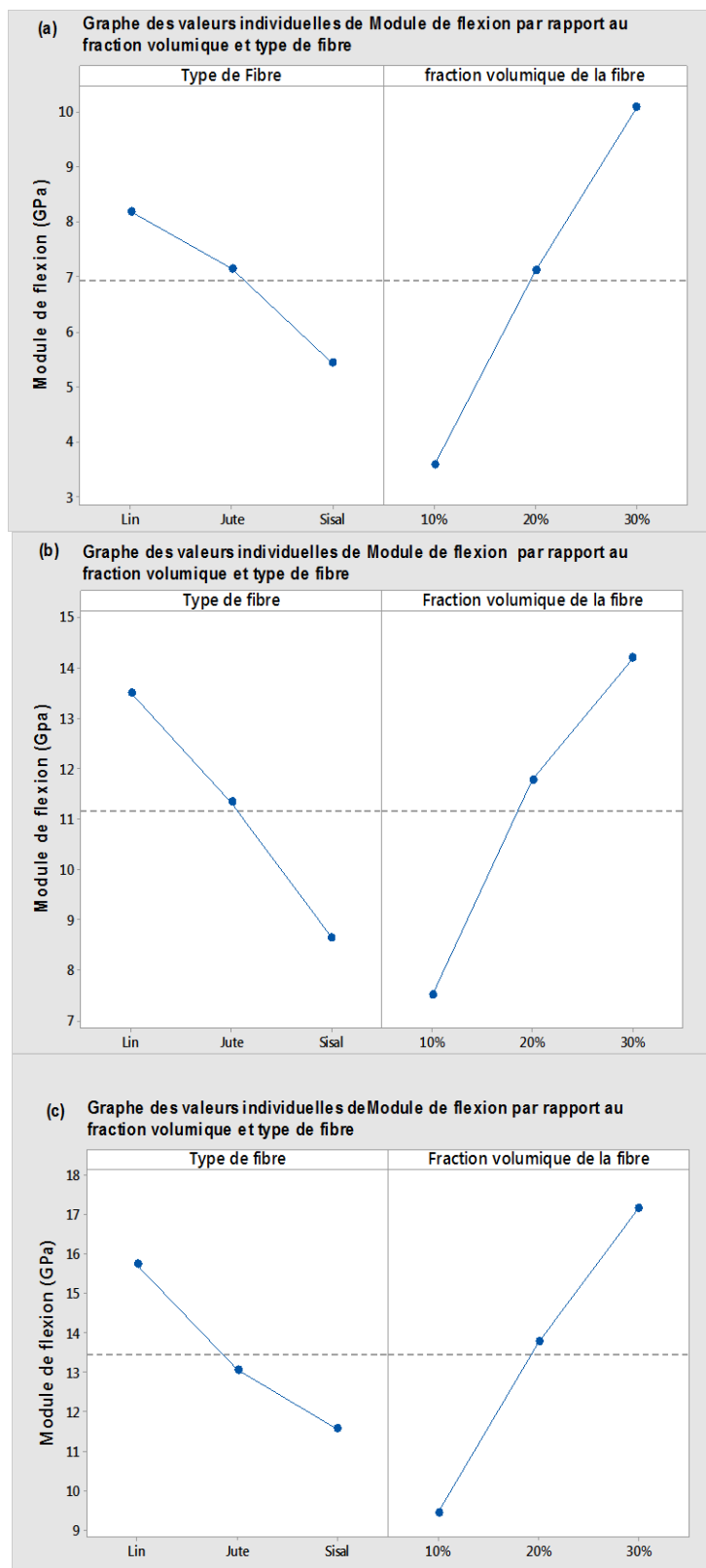


Figure III-5. Graphe des valeurs individuelles de variation de module de flexion des structures (a) nid d'abeille (b) re-entrant (c) silicomb par rapport au type et fraction volumique de fibre.

III.5. Conclusion

En conclusion, le comportement mécanique en flexion 3-point des structures auxétiques re-entrant, nid d'abeille et silicomb renforcées par des fibres naturelles (lin, jute et sisal) sollicitées en flexion 3-points a été étudié et analysé.

- Les résultats obtenus ont montré que la structure en silicomb a de meilleures performances mécaniques, obtenues grâce à une combinaison unique de contrainte de flexion et du module de flexion par rapport aux autres structures,
- L'analyse statistique basée sur la méthode de Taguchi fait apparaître l'interaction entre la fraction volumique et le type de fibre,
- Après analyse des valeurs des réponses (S/N), les structures silicomb renforcées en fibre de lin montrent la plus grande valeur de (S/N) avec une fraction volumique de 30 %,
- Dans cette étude, il a été également démontré que les contraintes de flexion et le module de flexion obtenus après rechargement des structures silicomb sont nettement supérieurs à celles obtenues pour les structures en nid d'abeilles et en nid d'abeilles re-entrant,
- En outre, les résultats montrent et confirment que la conception ANOVA et Taguchi a révélé que la fraction volumique est le principal facteur affectant la contrainte de flexion et le module de flexion.

III.6.References

- [1] T. Li and L. Wang, “Bending behavior of sandwich composite structures with tunable 3D-printed core materials,” *Compos Struct*, vol. 175, pp. 46–57, 2017, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2017.05.001>.
- [2] G. D. Goh, Y. L. Yap, S. Agarwala, and W. Y. Yeong, “Recent Progress in Additive Manufacturing of Fiber Reinforced Polymer Composite,” *Adv Mater Technol*, vol. 4, no. 1, p. 1800271, 2019, doi: [10.1002/admt.201800271](https://doi.org/10.1002/admt.201800271).
- [3] N. Mohd Nurazzi, A. Khalina, S. M. Sapuan, A. H. A. M. Dayang Laila, M. Rahmah, and Z. Hanafee, “A review: Fibres, polymer matrices and composites,” *Pertanika Journal of Science and Technology*, vol. 25, no. 4. 2017.
- [4] A. Ajdari, B. H. Jahromi, J. Papadopoulos, H. Nayeb-Hashemi, and A. Vaziri, “Hierarchical honeycombs with tailorable properties,” *Int J Solids Struct*, vol. 49, no. 11–12, pp. 1413–1419, 2012.
- [5] A. Ajdari, H. Nayeb-Hashemi, and A. Vaziri, “Dynamic crushing and energy absorption of regular, irregular and functionally graded cellular structures,” *Int J Solids Struct*, vol. 48, no. 3, pp. 506–516, 2011, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ijsolstr.2010.10.018>.
- [6] C. Lira and F. Scarpa, “Transverse shear stiffness of thickness gradient honeycombs,” *Compos Sci Technol*, vol. 70, no. 6, pp. 930–936, 2010, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2010.02.007>.
- [7] E. Wu and W.-S. Jiang, “Axial crush of metallic honeycombs,” *Int J Impact Eng*, vol. 19, no. 5, pp. 439–456, 1997, doi: [https://doi.org/10.1016/S0734-743X\(97\)00004-3](https://doi.org/10.1016/S0734-743X(97)00004-3).
- [8] Y. Du, N. Yan, and M. T. Kortschot, “An experimental study of creep behavior of lightweight natural fiber-reinforced polymer composite/honeycomb core sandwich panels,” *Compos Struct*, vol. 106, pp. 160–166, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.06.007>.
- [9] A. Stocchi, L. Colabella, A. Cisilino, and V. Álvarez, “Manufacturing and testing of a sandwich panel honeycomb core reinforced with natural-fiber fabrics,” *Mater Des*, vol. 55, pp. 394–403, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2013.09.054>.
- [10] Y. Hou, Y. H. Tai, C. Lira, F. Scarpa, J. R. Yates, and B. Gu, “The bending and failure of sandwich structures with auxetic gradient cellular cores,” *Compos Part A Appl Sci Manuf*, vol. 49, pp. 119–131, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2013.02.007>.
- [11] S. L. M. R. Filho *et al.*, “Failure analysis and Taguchi design of auxetic recycled rubber

- structures,” *Phys status solidi*, vol. 251, no. 2, pp. 338–348, Feb. 2014, doi: 10.1002/pssb.201384258.
- [12] J. R. Dutra, S. L. Moni Ribeiro Filho, A. L. Christoforo, T. H. Panzera, and F. Scarpa, “Investigations on sustainable honeycomb sandwich panels containing eucalyptus sawdust, Piassava and cement particles,” *Thin-Walled Struct*, vol. 143, p. 106191, 2019, doi: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2019.106191>.
- [13] F. Scarpa, Y. Chen, C. Remillat, I. Farrow, Y. Liu, and L. Jinsong, “Curved Kirigami SILICOMB cellular structures with zero Poisson’s ratio for large deformations and morphing,” *J Intell Mater Syst Struct*, vol. 25, Mar. 2013, doi: 10.1177/1045389X13502852.
- [14] G. Petrone, S. Rao, S. De Rosa, B. R. Mace, F. Franco, and D. Bhattacharyya, “Behaviour of fibre-reinforced honeycomb core under low velocity impact loading,” *Compos Struct*, vol. 100, pp. 356–362, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2013.01.004>.
- [15] G. Petrone, S. Rao, S. De Rosa, B. R. Mace, F. Franco, and D. Bhattacharyya, “Initial experimental investigations on natural fibre reinforced honeycomb core panels,” *Compos Part B Eng*, vol. 55, pp. 400–406, 2013, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.06.047>.
- [16] M. Cherief, A. Belaadi, M. Bouakba, M. Bourchak, and I. Meddour, “Behaviour of lignocellulosic fibre-reinforced cellular core under low-velocity impact loading: Taguchi method,” *Int J Adv Manuf Technol*, 2020, doi: 10.1007/s00170-020-05393-9.

Chapitre IV.

SIMULATION EN TRACTION STATIQUE DES STRUCTURES AUXÉTIQUES EN BIOPOLYMERES

Contenu de chapitre	page
IV.1. Introduction	72
IV.2. Simulation des procédés expérimentaux	74
IV.2.1. Modélisation des paramètres de la structure étudiée:	74
IV.2.2. Elaboration des matériaux	74
IV.2.3. Impression 3D :	74
IV.2.4. Caractérisation des structures en traction :	74
IV.2.5. Modélisation par éléments finis.....	75
IV.2.6. Approche de conception expérimentale de Taguchi	75
IV.3. Résultats et discussion.....	78
IV.3.1. Comportement auxétique de la structure re-entrant	78
IV.3.2. L'effet des paramètres géométriques sur le comportement auxétique.....	79
IV.3.2.1. Comportement du coefficient de poisson de la structure re-entrant	79
IV.3.2.2. Comportement de la contrainte de traction de la structure re-entrant :	80
IV.3.2.3. Comportement du module de cisaillement de la structure re-entrant.....	82
IV.4. CONCLUSION	84
IV.5. Références	85

Chapitre IV : SIMULATION EN TRACTION STATIQUE DES STRUCTURES AUXÉTIQUES EN BIOPOLYMERÉ

IV.1. Introduction

Comme les matériaux fabriqués par l'homme avec des structures minutieusement conçues, les méta-matériaux mécaniques ont attiré beaucoup d'attention au cours des dernières décennies

en raison de leurs propriétés mécaniques exotiques [1]. Les matériaux auxétiques à coefficient de Poisson négatif en sont un exemple typique. Par rapport aux matériaux conventionnels à de coefficient de Poisson positif, ils présentent une expansion latérale au lieu d'une contraction lorsqu'ils sont étirés dans la direction longitudinale [2][3], inversement [4]. Le seuil théorique du coefficient de Poisson pour les matériaux solides isotropes est de 1 tandis que pour les méta-matériaux à géométrie anisotrope, des valeurs plus faibles peuvent être obtenues sans spécification de limite [5]. Basé sur le comportement en déformation, des propriétés physiques remarquables sont conférées aux matériaux auxétiques, telles qu'une grande résistance à la rupture, un module de cisaillement élevé, une plus grande résistance spécifique, une meilleure résistance aux chocs par impact, une grande capacité de dissipation de l'énergie et une perméabilité contrôlable par déformation [6][7]. Ces caractéristiques attrayantes qui existent dans les matériaux auxétiques promettent des applications significatives dans diverses industries, notamment l'aérospatiale, l'automobile, la construction, les transports, la défense militaire, la biomédecine, les sports, etc [8][9]. Ensuite, Clarke et al. ont trouvé le coefficient de Poisson avec des valeurs négatives dans la couche d'orientation comprise entre 15 et 30 en empilant alternativement une série de stratifiés composites époxy renforcés de carbone avec des angles de pli variables [10].

Zhou et al. ont révélé que le composite textile auxétique 3D offrait une meilleure performance de protection contre les chocs que le composite non auxétique 3D, en raison de la plus grande capacité d'absorption d'énergie et de la stabilité des structures auxétiques [11].

Des stratégies de fabrication de pointe des composites auxétiques ont été étudiées et développées. Ces stratégies sont résumées ainsi : la construction directe de structures auxétiques

au moyen de matériaux composites. En utilisant des tiges (BCR) comme les matériaux de base du squelette, Rana et al. ont exploré de nombreuses structures auxétiques en plaçant ces tiges sur le modèle auxétique et ceci a donné de bons résultats tels que la résistance à la traction et à la rupture [12][13].

Saxena et coll.[14] se sont intéressés au comportement de la structure auxétique en nid d'abeille re-entrant classique 2D par simulation aux éléments finis (FE). Dans leur conception, le module de Young inférieur obtenue d'après les tests localisé sur les charnières pour minimiser le problème de flambage et améliorer le comportement auxétique.

Li et al. [15] ont proposé une structure en nid d'abeille en introduisant des nervures supplémentaires. La conception tient compte du mécanisme de déformation, de la rigidité de la structure supplémentaire et de leur impact sur le coefficient de Poisson. Sous le chargement de compression uniaxiale, ces nervures se sont avérées se plier et se déformer vers la paroi.

Wang et al. ont étudié le comportement des 3D composites auxétiques à travers de stratifiés composites époxy renforcés avec de carbone à l'aide d'une machine à commande numérique informatisée. Ces structures ayant un coefficient de poisson négative en tenant compte de ces paramètres structurels présentent des valeurs de rigidité spécifique par rapport aux structures composites à base de polymère et métal (acier) [16][17].

Dans ce chapitre, un modèle de structure auxétique est donc proposé appelé re-entrant par éléments finis. Les résultats obtenus sont analysés par le logiciel MINITAB version 16.0 pour déterminer la contrainte de traction, le module de cisaillement et le paramètre le plus important : le coefficient de poisson négatif qui caractérise ce type de structures non conventionnelles. Le modèle étudié est caractérisé par l'angle de paroi incliné ainsi l'épaisseur des parois de la cellule. Au vu des résultats obtenus, la structure offrant de bons résultats correspond aux paramètres ($\Theta = 65^\circ$, $t=3\text{mm}$). Afin de valider le modèle numérique, nous procéderons à l'impression 3D pour caractériser la structure en traction et réaliser une étude comparative du comportement de ces structures en fonction de chaque paramètre appliqué. Le matériau appliqué est le PLA (polylactique Acide).

Les résultats présentés dans ce chapitre seront également comparés aux travaux effectués dans la littérature pour valider la fiabilité.

IV.2. Simulation des procédés expérimentaux

IV.2.1. Modélisation des paramètres de la structure étudiée

Dans cette étude, la cellule nid d'abeille re-entrant est la cellule typique de notre travail, comme le montre la Figure IV.1. La topologie est sélectionnée en raison de sa simplicité géométrique et des performances liées aux paramètres de sa géométrie.

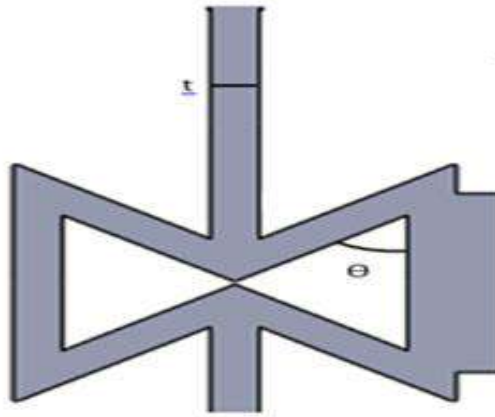


Figure IV-1. Cellule unitaire de la structure re-entrant.

IV.2.2. Elaboration des matériaux

Les granulés de PLA naturels nommé (acide polylactique) avec un point de fusion compris entre 185° C et 220° C. Les caractéristiques des matériaux ont déjà été décrites dans les chapitres précédents.

IV.2.3. Impression 3D

Toutes les structures re-entrant élaborées en PLA ont été imprimées à l'aide d'une imprimante nommée (3D UP MINI 2).

IV.2.4. Caractérisation des structures en traction

Toutes les structures en PLA ont été simulées en traction en utilisant le logiciel de simulation ANSYS 15.0, avec un déplacement de 70 mm pour toutes les structures. Par suite, les échantillons ont été élaborés et testés à l'aide d'une machine d'essai universelle (Zwick Z010, Zwick GmbH, Allemagne) dotée d'un capteur de force d'une capacité de 10 KN. Le déplacement a été contrôlé à une vitesse de 1 mm/min pour maintenir une charge quasi statique.

IV.2.5. Modélisation par éléments finis

Une simulation par éléments finis a été utilisée pour évaluer le comportement élastique de la structure rentrante afin de valider les résultats expérimentaux [18] [19]. Pour ce faire, le logiciel de simulation ANSYS 15.0 a été utilisé pour le calcul de la contrainte de traction, du module de cisaillement et du coefficient de Poisson.

La structure bidimensionnelle a été maillée avec des éléments triangulaires d'une taille de 2mm. Les simulations des éléments finis ont été effectuées uniquement en utilisant les propriétés mécaniques du PLA pur. La figure IV.2 donne un aperçu de la structure re-entrant maillée.

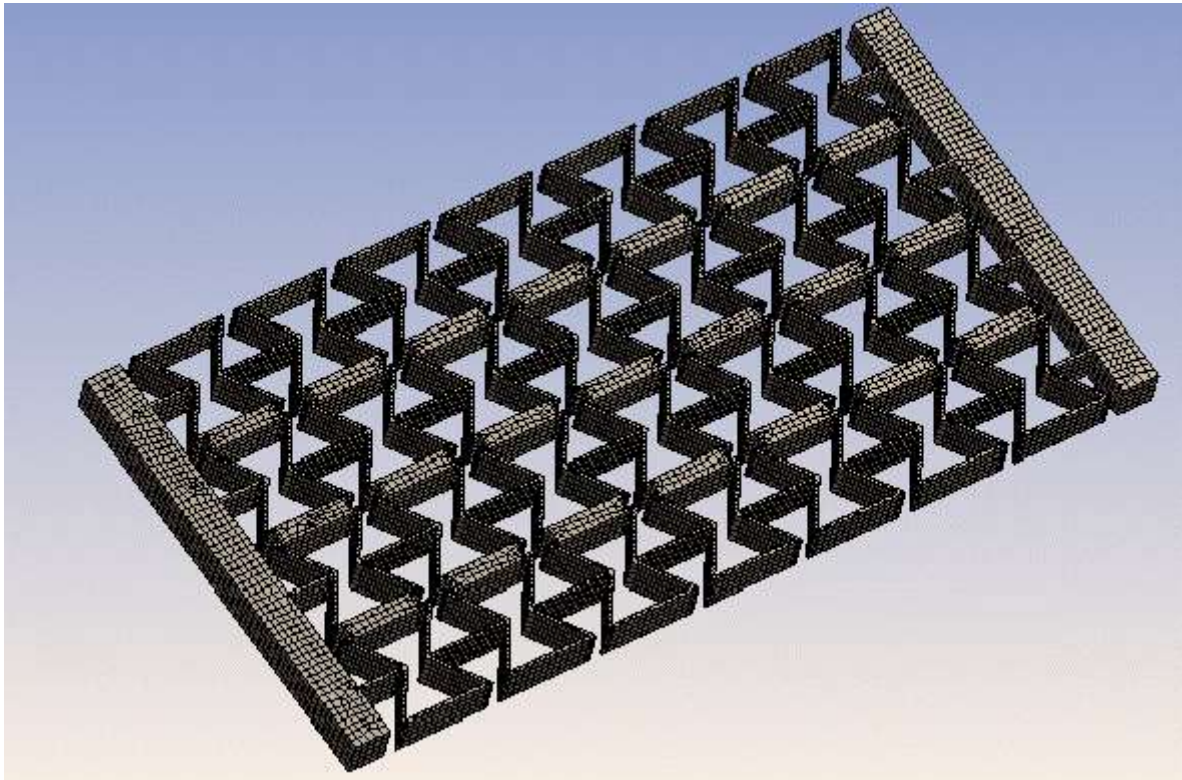


Figure IV-2. Structure re-entrant maillée.

IV.2.6. Approche de conception expérimentale de Taguchi

Comme il a été mentionné dans les chapitres précédents, le tableau de la matrice orthogonale de Taguchi Design (L9) est utilisé pour déterminer l'effet de chaque facteur sur les réponses suivantes : contrainte de traction, module de cisaillement et coefficient de poisson. Le Tableau IV.1 présente les conditions expérimentales obtenues en faisant varier les facteurs

(niveaux) : angle d'inclinaison (55° , 60° et 65°) et épaisseur (1 mm, 2 mm et 3 mm). Les résultats obtenus de l'étude numérique de la contrainte de traction, du module de cisaillement et du coefficient de poisson pour le nid d'abeille re-entrant, sont présentés dans le Tableau IV.2. L'analyse des résultats révèle que les valeurs de la contrainte de traction augmentent de 144.69 MPa à 505.45 MPa, de plus les valeurs du module de cisaillement aussi augmentent de 90,48 (N/mm^2) à 294,98 (N/mm^2) en raison de l'effet de l'angle d'inclinaison (de 55° à 65°) ainsi que de l'épaisseur de paroi des cellules unitaires (de 1 à 3 mm). Aussi on constate également que les valeurs de coefficient de poisson croissent de -4.63 à -0.47 cela signifie que de la structure re-entrant devient plus rigide et résistante en traction.

Tableau IV-1. Les différents paramètres géométriques (angle, épaisseur de paroi).

Facteur	Niveau 1	Niveau 2	Niveau 3
Angle de paroi horizontal et vertical	55°	60°	65°
Epaisseur de la paroi (mm)	1	2	3

Tableau IV-2. Les résultats de la contrainte de traction, module de cisaillement et coefficient de poisson pour le nid d'abeille re-entrant.

Test	Angle (Degré)	Epaisseur de paroi (mm)	Contrainte de traction σ_t (MPa)	Module de cisaillement G_t (N/mm^2)	coefficient de poisson
1	55	1	186,74	90,48	-4,63
2	60	2	317,59	191,04	-4,17
3	65	3	495,57	283,89	-3,19
4	55	1	149,00	97,26	-2,76
5	60	2	256,14	181,57	-2,26
6	65	3	432,88	257,30	-1,61
7	55	1	144,69	95,99	-1,17
8	60	2	336,06	207,30	- 0,99
9	65	3	505,45	294,98	-0,47

La technique est basée sur l'évaluation du rapport signal/bruit (S/N) à l'aide d'un logiciel de traitement de données. Le logiciel utilisé à cet effet est la version 16.0 de MINITAB.

Il existe trois catégories de S/N, en fonction des caractéristiques de base telles que plus petit et plus grand ou nominal est meilleur. Les résultats de calcul de S/N sont présentés dans le Tableau IV-3. Les valeurs ont été calculées à l'aide d'Eqs. (1) et (2).

« n » est le nombre d'expériences, y compris la répétition, et « y » est le score des valeurs utilisant un taux plus faible, c'est la meilleure des données expérimentales « i », appliquée aux réponses du coefficient de poisson.

$$S/N = -10 \log_{10}(\sum_{i=1}^n y_i^2)/n \quad (1)$$

Aussi, « n » est le nombre de l'expérience, y compris la répétition, et « y » est le score des valeurs utilisant un taux plus élevé, c'est la meilleure des données expérimentales « i », appliquée pour la contrainte de traction et le module de cisaillement.

$$S/N = -10 \log_{10}(\sum_{i=1}^n 1/y_i^2)/n \quad (2)$$

Le Tableau IV-3 représente les résultats des ratios S/N, calculés selon les équations (1) et (2), pour les propriétés mécaniques de la structure (nid d'abeille re-entrant).

Il convient de noter que la combinaison optimale correspondant à une contrainte de traction plus élevée correspond aux paramètres (53,57 MPa pour une épaisseur de 3 mm et de 49,97 MPa pour l'angle 65 °). Cependant, la combinaison associée aux valeurs plus petites correspond aux paramètres de 44,03 MPa pour l'épaisseur de 1 mm et de 48.12 MPa pour l'angle 60°).

Pour le module de cisaillement, la combinaison (45,12 N/mm² pour l'angle 65° et 48,49 N/mm² pour l'épaisseur de 3 mm) a révélé les plus grandes valeurs, par conséquent, elle représente la combinaison optimale. Cependant, la combinaison correspondant aux valeurs plus faibles est (44.38 N/mm² pour l'angle 60° et 39.51 N/mm² pour l'épaisseur 1 mm).

Enfin, la combinaison optimale correspondant au coefficient de poisson est (-1,74 pour l'angle 65° et de -2,56 pour une épaisseur de 3 mm), mais la combinaison (-11,92 MPa pour l'angle 55 ° et -7,82 MPa pour l'épaisseur 1 mm) a montré des valeurs plus faibles.

Les résultats de cette étude indiquent que les paramètres géométriques de la structure re-entrant (auxétique) ($\Theta = 65^\circ$ et $t=3$ mm) présentent des valeurs élevées pour la contrainte de traction et le module de cisaillement, par ailleurs les faibles valeurs du coefficient de poisson obtenus pour les mêmes paramètres confirment son bon comportement et sa bonne résistance en traction.

Tableau IV-3. Rapport de réponses S/N.

Niveau	Rapport S/N pour la contrainte de traction (grande valeur est meilleure)		Rapport S/N pour le module de cisaillement (grande valeur est meilleure)		Rapport S/N pour le coefficient de poisson (grande valeur est meilleure)		
	Angle	Epaisseur	Angle	Epaisseur	Angle	Epaisseur	
1	49,79	44,03	44,61	39,51	-11,92	-7,82	
2	48,12	49,58	44,38	45,71	-6,67	-6,46	
<i>re-entrant structure</i>	3	49,97	53,57	45,12	48,49	-1,74	-2,56
Delta	1,67	9,54	0,74	9,38	13,67	-5,28	
Rank	2	1	2	1	1	2	

IV.3. Résultats et discussion

IV.3.1. Comportement auxétique de la structure re-entrant

Sous la charge de traction axiale, la structure re-entrant s'étendait longitudinalement, et elle a tendance à se gonfler. Ce changement a été causé par le couple généré par la charge, se produisant sur les parois de chaque cellule et par conséquent la résultante sera la somme des deux charges au sens de l'axe des X.

En résumé à cause des déformations, les parois inclinées ont subi une concentration de contraintes. Par conséquent, la cellule unitaire s'est allongée dans la direction longitudinale sous la force de traction, et s'est également étendue latéralement comme indiqué dans Figure IV.3 en exerçant une force de traction F. Dans les deux cas, ΔX et ΔY semblent tous deux être positifs.

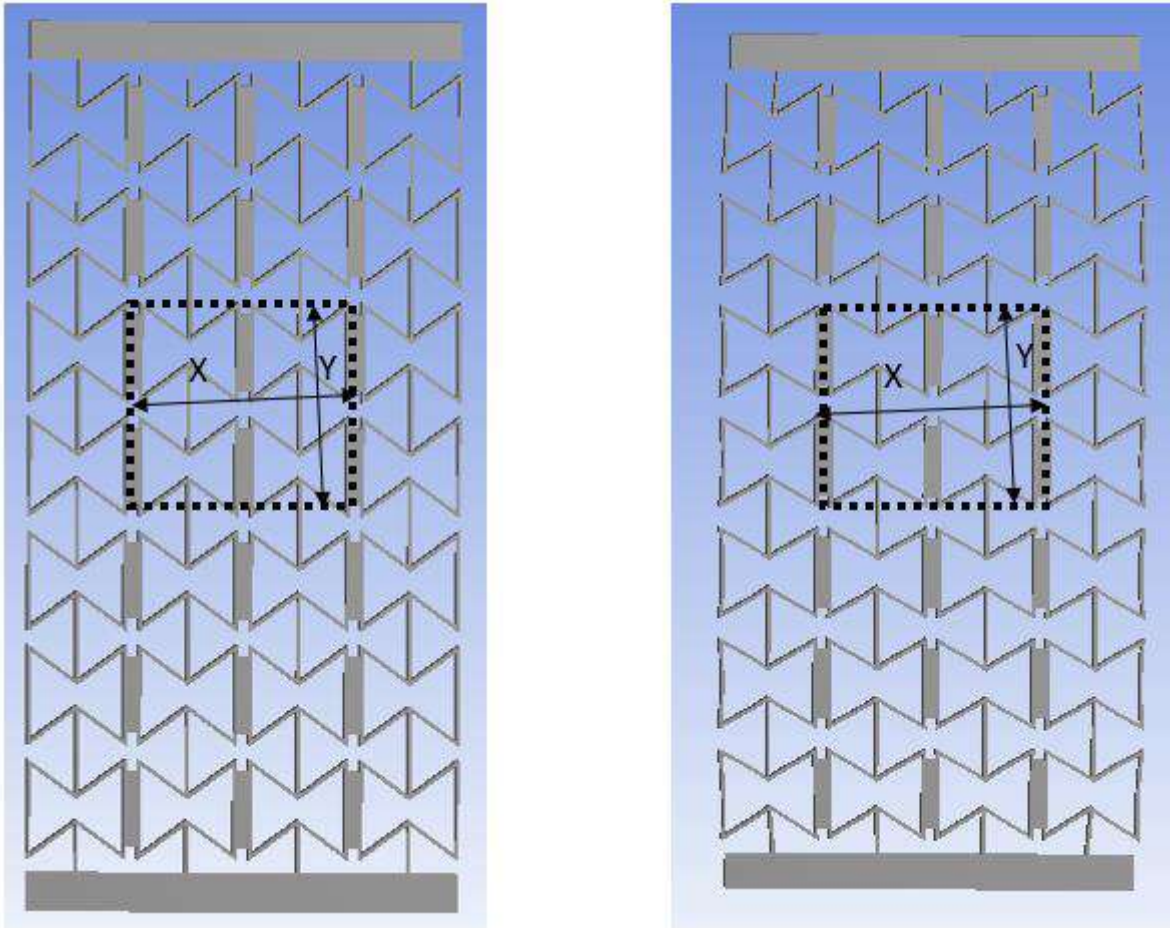


Figure IV-3. Affichage des allongements dans les essais de traction.

IV.3.2. L'effet des paramètres géométriques sur le comportement auxétique

IV.3.2.1. Comportement du coefficient de poisson de la structure re-entrant

Le comportement du coefficient de poisson de ces structures re-entrant imprimées en 3D avec les différents paramètres géométriques est montré dans la Figure. IV.4. Selon les propriétés géométriques de la structure re-entrant, le comportement pendant l'essai de traction varie d'une structure à une autre.

L'échantillon correspondant aux paramètres ($\Theta=65^\circ$ et $t=3\text{mm}$) indique un bon comportement par rapport aux autres contributions, les valeurs du coefficient de poisson varient de -4,63 à -0,47, soit une augmentation de 89,84 %. Par conséquent, ces résultats signifient que la déformation de la structure est assez faible donc signifie très résistante au chargement de traction. Par contre, en ce qui concerne l'échantillon correspondant à ($\Theta=55^\circ$ et $t=1\text{mm}$) ayant une faible valeur -4,63, la structure est moins rigide et sa déformation est importante et remarquable.

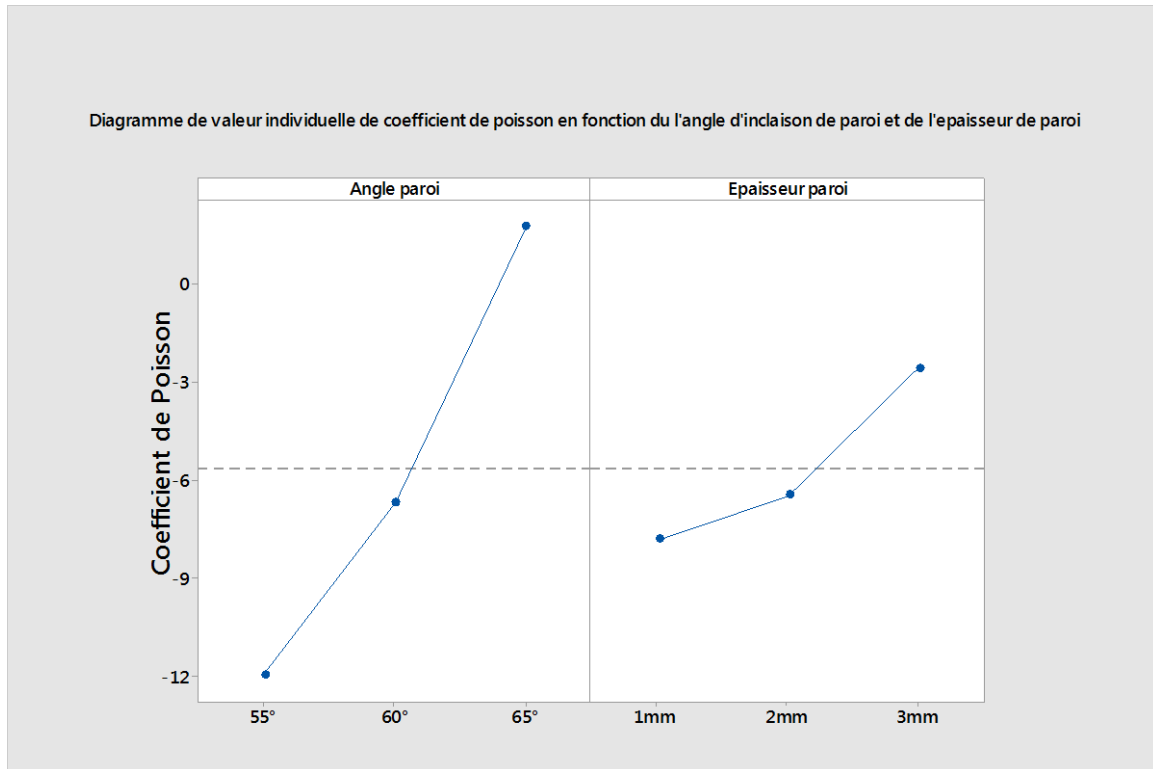


Figure IV-4. Variation du coefficient de poisson en fonction des paramètres géométriques (angle et épaisseur).

IV.3.2.2. Comportement de la contrainte de traction de la structure re-entrant :

Le comportement de contrainte en traction de ces structures re-entrant imprimées en 3D en fonction des différents paramètres géométriques est illustré dans la Figure IV.5.

L'échantillon relatif aux paramètres ($\Theta=65^\circ$ et $t=3\text{mm}$) a présenté un bon comportement par rapport aux autres contributions, à savoir des valeurs de contrainte de traction passant de 186,47 à 505,45 MPa, ce qui correspond à une augmentation remarquable de 63,10 %, signifiant ainsi que la structure devient rigide et très résistante vis-à-vis ce chargement. Par contre, pour ce qui est de l'échantillon ($\Theta=55^\circ$ et $t=1\text{mm}$), il présente la plus faible valeur de 186,47 MPa, autrement dit, la structure est moins déformable et moins rigide.

La Figure IV.6 illustre la structure re-entrant simulée avec le logiciel ANSYS 15.0 en mode de traction en imposant un déplacement de 70 mm. La figure montre que la structure est trop sollicitée au niveau des parois et la concentration des contraintes est importante.

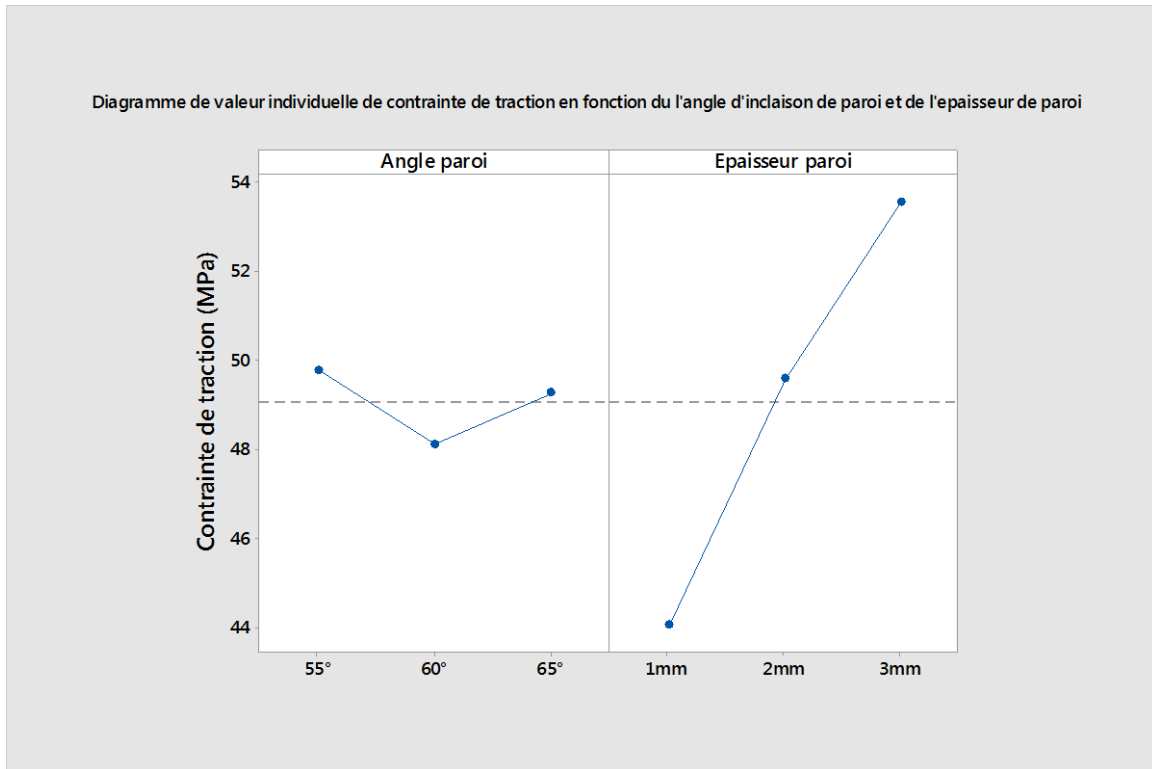


Figure IV-5. Variation de la contrainte de traction en fonction des paramètres géométriques (angle et épaisseur).

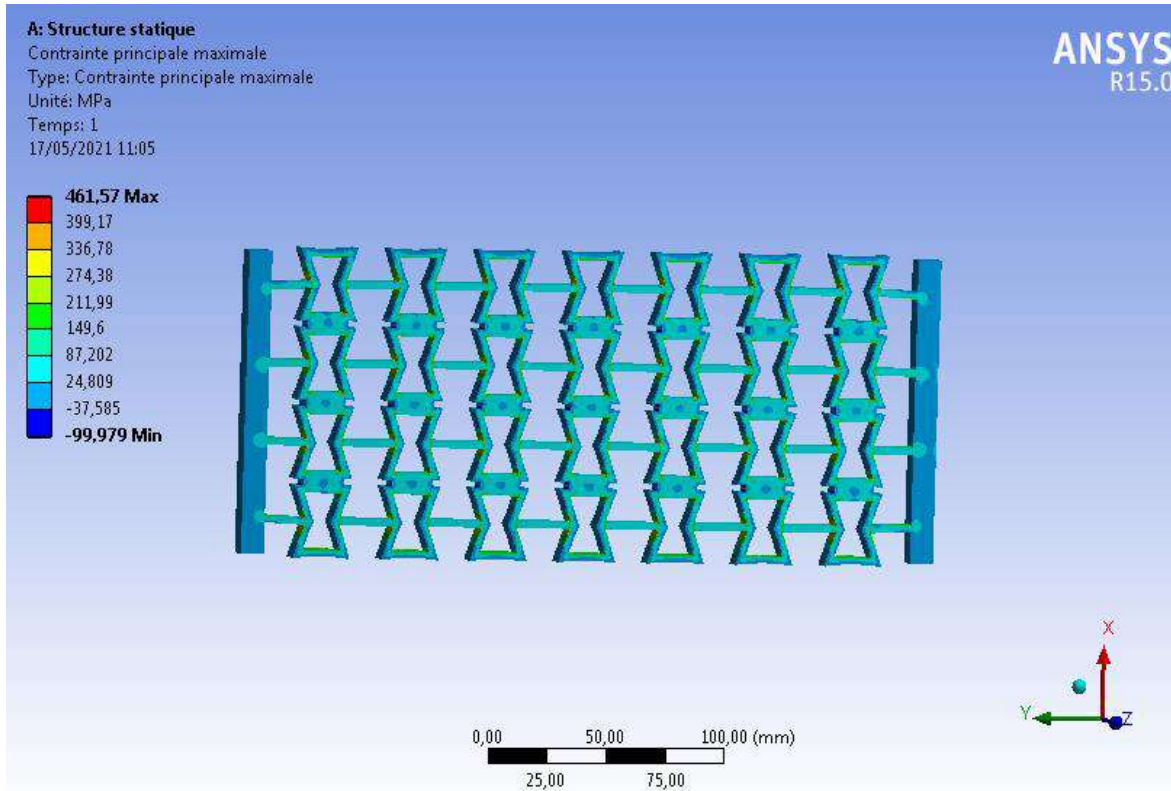


Figure IV-6. Etude numérique de la structure re-entrant en mode de traction en fonction des paramètres géométriques ($\Theta = 65^\circ$ et $t=3\text{ mm}$), (donné de sortie contrainte de traction)

IV.3.2.3. Comportement du module de cisaillement de la structure re-entrant

Le comportement du module de cisaillement de la structure re-entrant imprimée en 3D en fonction des différents paramètres géométriques est présenté dans la Figure IV.6.

L'échantillon dont les paramètres ($\Theta=65^\circ$ et $t=3\text{mm}$) a affiché le meilleur comportement. En effet les valeurs du module de cisaillement se trouvent entre 90,48 et 294,98 MPa, ce qui représente une augmentation de 69,44 %. Ce résultat signifie que la structure est assez résistante et de déformation faible vis-à-vis au chargement de traction. Par contre, concernant l'échantillon dont les paramètres ($\Theta=55^\circ$ et $t=1\text{mm}$) possède également la plus faible de 90,48 MPa, ce qui veut dire que le structure est moins rigide et qu'elle se déforme considérablement.

La Figure IV.8 présente la structure re-entrant simulé avec le logiciel ANSYS 15.0 en mode de cisaillement en imposant un déplacement de 70 mm sur la partie supérieure de la structure .nous marquons que les paroi latérale sont trop sollicité envers ce chargement cela est due l'augmentation de la concentration des contraintes qui provoque une déformation comme illustré dans la figure.

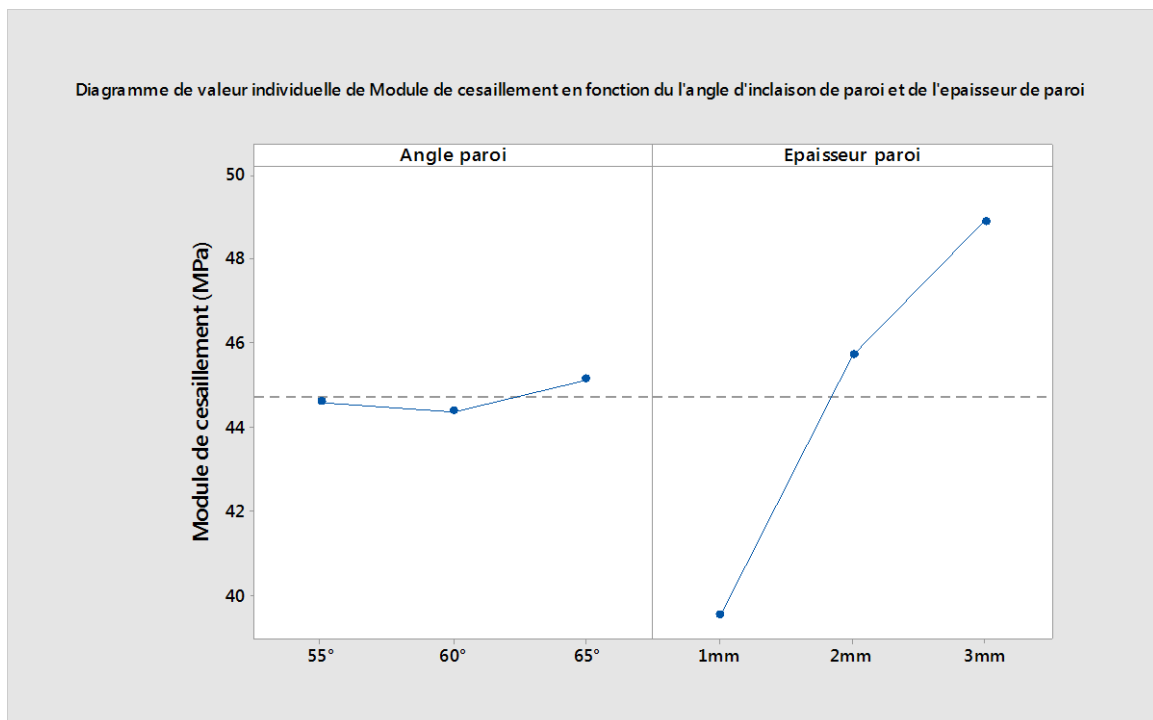


Figure IV-7. Variation de Module du cisaillement en fonction des paramètres géométriques (angle et épaisseur).

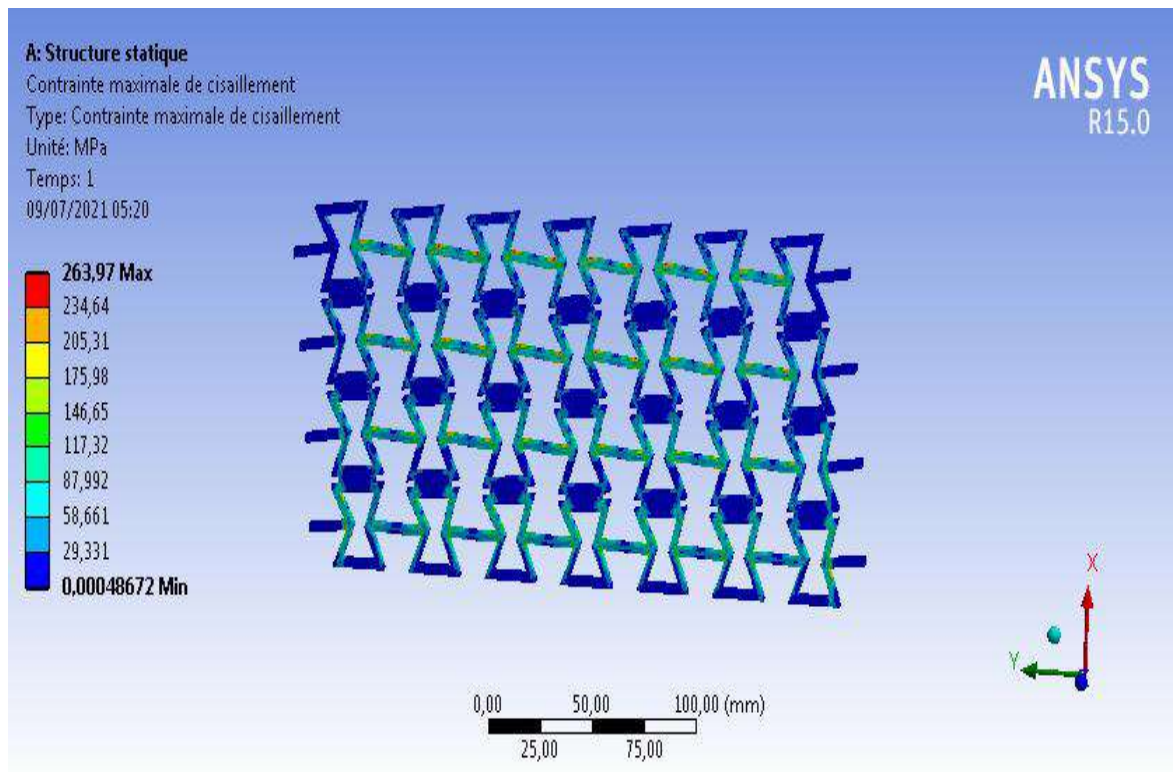


Figure IV-8. Etude numérique de la structure re-entrant en mode de cisaillement en fonction des paramètres géométriques ($\Theta = 65^\circ$ et $t=3$ mm), (donné de sortie contrainte de cisaillement)

IV.4. CONCLUSION

Dans la présente étude, des structures connues sous le nom re-entrant auxétiques sont proposés dans cette étude. Cette conception innovante permet à ces structures de se déformer avec une perte d'énergie minimale limitant ainsi la perturbation du comportement auxétique. La conception de ces structures auxétiques est basée sur des paramètres géométriques différents : angle (t) et épaisseur paroi (Θ) en utilisant la simulation par éléments finis.

En outre, ces échantillons sont réalisés à l'aide de la technologie d'impression 3D et simulés en traction en utilisant le logiciel ANSYS 15.0.

Les résultats révèlent que la rigidité de la structure augmente de manière significative avec le module de cisaillement et le coefficient de poisson pour les structures définies par les paramètres ($t= 3\text{mm}$ et $\Theta = 65^\circ$).

En effet, les résultats prédits de la simulation correspondent bien aux résultats des tests effectués sur les échantillons imprimés en 3D. De ce fait, il ressort de cette étude que pour une même structure ayant paramètres géométriques différents, il en découle une diversité de résultats et de comportement vis-à-vis la charge de traction, permettant ainsi de mieux comprendre ce phénomène d'auxétisme et de réfléchir à de futures applications dans l'industrie.

IV.5.Références

- [1] X. Zheng *et al.*, “Ultralight, ultrastiff mechanical metamaterials,” *Science* (80-), vol. 344, no. 6190, pp. 1373 LP – 1377, Jun. 2014, doi: 10.1126/science.1252291.
- [2] C. Huang and L. Chen, “Negative Poisson’s Ratio in Modern Functional Materials,” *Adv Mater*, vol. 28, no. 37, pp. 8079–8096, Oct. 2016, doi: <https://doi.org/10.1002/adma.201601363>.
- [3] H. Wang, Y. X. Zhang, and W. Q. Lin, “A novel two-dimensional mechanical metamaterial with negative Poisson’s ratio,” *Comput Mater Sci*, vol. 171, 2020, doi: 10.1016/j.commatsci.2019.109232.
- [4] X. Ren, R. Das, and P. Tran, “Auxetic metamaterials and structures: a review,” *Smart Mater Struct*, vol. 27, 2018, doi: 10.1088/1361-665X/aaa61c.
- [5] G. N. Greaves, A. L. Greer, R. S. Lakes, and T. Rouxel, “Poisson’s ratio and modern materials,” *Nat Mater*, vol. 10, no. 11, pp. 823–837, 2011, doi: 10.1038/nmat3134.
- [6] Y. Yao *et al.*, “Fabrication and characterization of auxetic shape memory composite foams,” *Compos Part B Eng*, vol. 152, Jun. 2018, doi: 10.1016/j.compositesb.2018.06.027.
- [7] J.-H. Oh, J.-S. Kim, V. H. Nguyen, and I.-K. Oh, “Auxetic graphene oxide-porous foam for acoustic wave and shock energy dissipation,” *Compos Part B Eng*, vol. 186, p. 107817, 2020, doi: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2020.107817>.
- [8] M. Sanami, N. Ravirala, K. Alderson, and A. Alderson, “Auxetic Materials for Sports Applications,” *Procedia Eng*, vol. 72, Dec. 2014, doi: 10.1016/j.proeng.2014.06.079.
- [9] N. Novak, M. Vesenjok, and Z. Ren, “Auxetic Cellular Materials - a Review,” vol. 62, pp. 485–493, Sep. 2016, doi: 10.5545/sv-jme.2016.3656.
- [10] J. F. Clarke, R. A. Duckett, P. J. Hine, I. J. Hutchinson, and I. Ward, “Negative Poisson’s ratios in angle-ply laminates: Theory and experiment,” *Composites*, vol. 25, pp. 863–868, Oct. 1994, doi: 10.1016/0010-4361(94)90027-2.
- [11] Z. Lin, J. Zeng, L. Jiang, and H. Hu, “Low-velocity impact properties of 3D auxetic textile composite,” *J Mater Sci*, vol. 53, Mar. 2018, doi: 10.1007/s10853-017-1789-8.
- [12] S. Pichandi, S. Rana, D. Oliveira, R. Fanguero, and J. Xavier, “Development of novel

- auxetic structures based on braided composites,” *Mater Des*, vol. 61, Apr. 2014, doi: 10.1016/j.matdes.2014.04.067.
- [13] S. Pichandi *et al.*, “Development and Characterization of Novel Auxetic Structures Based on Re-entrant Hexagon Design Produced from Braided Composites,” *Compos Part B Eng*, vol. 93, Mar. 2016, doi: 10.1016/j.compositesb.2016.02.058.
- [14] K. Saxena, R. Das, and E. Calius, *3D printable multimaterial cellular auxetics with tunable stiffness*. 2017.
- [15] D. Li, J. Yin, L. Dong, and R. Lakes, “Strong re-entrant cellular structures with negative Poisson’s ratio,” *J Mater Sci*, vol. 53, Mar. 2018, doi: 10.1007/s10853-017-1809-8.
- [16] X. Wang, Y. Chen, and L. Ma, “The manufacture and characterization of composite three-dimensional re-entrant auxetic cellular structures made from carbon fiber reinforced polymer,” *J Compos Mater*, vol. 52, p. 002199831876402, Mar. 2018, doi: 10.1177/0021998318764021.
- [17] X. Wang, B. Wang, Z. Wen, and L. Ma, “Fabrication and mechanical properties of CFRP composite three-dimensional double-arrow-head auxetic structures,” *Compos Sci Technol*, vol. 164, May 2018, doi: 10.1016/j.compscitech.2018.05.014.
- [18] J. Jirousek and Q. H. Qin, “Application of hybrid-Trefftz element approach to transient heat conduction analysis,” *Comput Struct*, vol. 58, pp. 195–201, Jan. 1996, doi: 10.1016/0045-7949(95)00115-W.
- [19] Q. H. Qin, “Hybrid-Trefftz finite element method for Reissner plates on an elastic foundation,” *Comput Methods Appl Mech Eng*, vol. 122, pp. 379–392, May 1995, doi: 10.1016/0045-7825(94)00730-B.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

A l'heure actuelle, les composites renforcés de fibre naturelle sont une véritable alternative à certains matériaux composites synthétiques. À plus grande échelle, leur utilisation reposera sur des études menées pour mieux comprendre certains aspects de leur comportement en vue d'une utilisation industrielle. Dans ce contexte, la présente contribution a porté sur l'élaboration et la caractérisation mécanique d'une structure sandwich et composite à base de constituants naturels. L'objectif initial de cette étude consistait à réaliser une structure mécaniquement performante, d'analyser son comportement mécanique ainsi que de mettre en évidence ses performances par rapport à des matériaux équivalents.

Les différents constituants du composite ont été sélectionnés dans un premier temps sur la base d'une analyse bibliographique. En effet, pour les trois type de structures (nid d'abeille, nid d'abeille re-entrant et silicomb), une résine thermoplastique (époxy) a été associée à des fibres de lin, jute et sisal en vue d'obtenir une structure à haute performance. Le procédé de moulage de l'ensemble résine et fibres a permis de réaliser des composites adaptés à différents types et géométries.

De nombreux résultats sur le comportement en compression, en flexion des composites renforcés de fibres de lin jute et sisal ont pu être obtenus. Les principales conclusions sont récapitulées comme suit :

- Le comportement varie d'une structure à l'autre et d'un type de fibre de renforcement à l'autre ;
- La structure re-entrant a révélé une bonne absorption d'énergie estimée à 57.995 KJ/m^3 ceci est confirmé par l'évolution de la force de compression en fonction du déplacement ;
- D'autre part, la structure en silicomb a enregistré des résultats satisfaisants en compression.
- La structure en silicomb a fait preuve d'un bon comportement lors de l'essai de flexion.
- Une analyse numérique sur la base d'une modélisation par éléments finis sur le comportement en traction des structures a révélé que le composite re-entrant

Lin/Epoxy correspondant aux paramètres géométriques (épaisseur de paroi $t=3\text{mm}$ et angle $\Theta=65^\circ$), a montré une résistance au chargement appliqué. Ceci est confirmé par la contrainte de traction, les valeurs du module de cisaillement ainsi que le coefficient de poisson négatif affecté à ce type matériaux dit auxétique (matériau non conventionnel) ;

- Cette étude a permis de démontrer la faisabilité d'une structure composite possédant une fraction volumique de la fibre de lin élevée ;
- Le matériau étudié possède des caractéristiques mécaniques spécifiques, tant pour des chargements en compression, flexion ou traction, qui permettent d'envisager son utilisation pour certaines applications envisagées ;

Au terme de ce travail, les recommandations suivantes sont à prendre en compte lors des travaux de recherche ultérieurs afin de permettre une compréhension plus approfondie du comportement en compression, en flexion des composites renforcés de fibres de lin jute et sisal

Cependant, en raison des exigences de certaines spécifications industrielles,

- Il paraît donc nécessaire de mener à bien cette étude en vue de la concrétisation d'un prototype de pièce susceptible de répondre aux exigences particulières d'une application industrielle, de manière à confronter ce matériau à de nouvelles problématiques.
- Par ailleurs, le recours à la résine époxy apporte théoriquement une solution de recyclage ou de décyclage de ce matériau ;
- Pour cette raison, il apparaît nécessaire de vérifier cette hypothèse, jugée probable, et de se lancer dans la recherche de nouvelles perspectives sur le plan industriel.

ANNEXE 1

ANALYSE DE LA VARIANCE

L'analyse de la variance est appelée « Analysis of Variance » dans la littérature anglo-saxonne ; son appellation est couramment abrégée en ANOVA. D'une façon générale, en matière de régression, le principe de l'analyse de la variance est de subdiviser la variation totale en une composante factorielle relative à l'équation de régression ou au modèle utilisé, et une composante résiduelle, la première devant être testée par rapport à la deuxième.

Les composantes factorielle et résiduelle seront mathématiquement représentées par des carrés moyens, c'est-à-dire des variances. En définitive, l'intérêt de l'analyse de variance est de pouvoir tester de manière absolue l'influence des facteurs sur les variations d'une réponse donnée [VIV 02].

A2.1 Carrés moyens des facteurs et des interactions

La variance des facteurs s'obtient en calculant la somme des carrés des écarts (SCE) que l'on divise par le nombre de degrés de liberté (*ddl*) associé au facteur *f* considéré. Le nombre de degrés de liberté *ddl_f* associé à un facteur *f* est le nombre de niveaux (de valeurs distinctes) qu'il prend lors de la réalisation du plan, minoré de 1. On a donc dans tous les cas :

$$ddl_i = Nn_i - 1 \quad (A2.1)$$

Dans le cas des plans factoriels complets, on a l'égalité :

$$\prod_{i=1}^k Nn_i = N \quad (A2.2)$$

La somme des carrés des écarts associée au facteur *f* vaut :

$$SCE_f = \nu_f \cdot \sum_{i=1}^{Nn_f} [(E_f)_{f=i}]^2 = \nu_f \cdot \sum_{i=1}^{Nn_f} (\bar{y}_i - \bar{y})^2 \quad (A2.3)$$

avec :

$$\bar{y} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N y_i \quad \text{la moyenne des réponses ;}$$

$$\nu_f = \frac{N}{Nn_f} \quad \text{le nombre d'expériences pour lesquelles le facteur } f \text{ prend un de ses } Nn_f \text{ niveaux (} \nu_f \text{ est identique pour tous les niveaux du facteur pour les plans orthogonaux) ;}$$

y_i la moyenne des réponses observées pour les expériences où le facteur *f* prend son *i*^{ème} niveau.

Pour les interactions mettant en jeu les facteurs *f* et *g*, la somme des carrés des écarts vaut :

ANNEXE 1

$$SCE_{fg} = \delta_{fg} + \sum_{i=1}^{Nn_f} \sum_{j=1}^{Nn_g} [y_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y}]^2 \quad (A2.4)$$

avec :

$$\delta_{fg} = \frac{N}{Nn_f \times Nn_g} \quad \text{le nombre d'expériences pour lesquelles le facteur } f \text{ prend un de ses } Nn_f \text{ niveaux et lorsque le facteur } g \text{ adopte un de ses } Nn_g \text{ niveaux ;}$$

\bar{y}_{ij} la moyenne des réponses observées pour les expériences où le facteur f prend son $i^{\text{ème}}$ niveau, et où le facteur g prend son $j^{\text{ème}}$ niveau ; lorsqu'il n'y a que 2 facteurs et aucune répétition d'expériences, on a $\bar{y}_{ij} = y_{ij}$

Le calcul des degrés de liberté d'une interaction est le produit des ddl des facteurs mis en jeu dans cette interaction. La généralisation aux interactions d'ordre supérieur se fait de la même façon.

On déduit alors la valeur des carrés moyens, associés au facteur ou à l'interaction considéré(e) x , comme étant :

$$CM_x = \frac{SCE_x}{ddl_x} \quad (A2.5)$$

Pour 2 facteurs, on peut écrire la décomposition suivante :

$$y_{ij} - \bar{y} = (\bar{y}_i - \bar{y}) + (\bar{y}_j - \bar{y}) + (y_{ij} - \bar{y}_i - \bar{y}_j + \bar{y}) \quad (A2.6)$$

On réalise alors une somme sur i et j , des 2 côtés de l'égalité mis préalablement au carré. La somme se fait ainsi sur les niveaux de tous les facteurs. On aboutit alors à l'équation de variance, démontrant l'additivité des sommes des carrés des écarts (membre de droite) :

$$SCE_t = \sum_{i=1}^{Nn_f} \sum_{j=1}^{Nn_g} [y_{ij} - \bar{y}]^2 = \sum SCE_x \quad (A2.7)$$

avec :

SCE_t : la somme des carrés des écarts totale ;

SCE_x : (x désignant un facteur ou une interaction) la somme des carrés factorielle.

Enfin, notons la relation donnant entre autre la valeur de ddl_t : le nombre de degrés de liberté total :

$$ddl_t = \sum_{facteurs} ddl_i + \sum_{interactions} ddl_i \quad (A2.8)$$

Il y a donc également additivité des ddl . Pour les plans orthogonaux, on a $ddl_t = N-1$.

A2.2 VARIANCE RESIDUELLE

ANNEXE 1

Lorsqu'il existe une erreur expérimentale non nulle, l'équation de variance fait apparaître un nouveau terme appelé communément *variance résiduelle* (SCE_r) :

$$SCE_t = \sum SCE_x + \sum SCE_r \quad (A2.9)$$

La détermination de SCE_r est nécessaire puisqu'elle intervient dans les tests composant l'analyse de variance. En effet, c'est à cette variance résiduelle que les SCE_x sont comparées afin de déterminer les caractères significatifs des facteurs et des interactions x . La variance résiduelle est un point de comparaison. Elle doit traduire une variation des valeurs de réponse, dont l'amplitude est arbitrairement considérée comme faible. Tout facteur influent doit donc posséder des caractéristiques fortement différenciées de celles de cette composante.

Dans le cas des expériences réelles, la variance résiduelle est prise comme étant un estimateur de la variance expérimentale, qui traduit la variabilité inhérente des résultats sur plusieurs réalisations d'expériences identiques. Cependant, l'utilisation d'expériences virtuelles exclut cette possibilité. Dans le même temps, l'équation de variance doit toujours être vérifiée : la variance résiduelle (SCE_r) est dans tous les cas une composante de la somme des carrés des écarts totale (SCE_t).

La variance résiduelle est le plus souvent calculée comme étant la *somme des carrés des résidus*, i.e. des écarts entre réponses mesurées (y) et réponses calculées (y_{mod}) correspondantes [PIL 94 et SCH 98].

Il s'agit donc de :

$$SCE_r = \sum_{i=1}^N [y(i, x) - y_{\text{mod}}(i, x)]^2 \quad (A2.10)$$

Calculer SCE_r de cette manière permet en définitive de tester le caractère significatif des facteurs et des interactions et dans le même temps d'évaluer la qualité du modèle utilisé (y_{mod}). Cette solution n'est pas applicable lors de l'utilisation de plans saturés (plans factoriels par exemple).

Dans ces cas précis, certains auteurs [GOU 96 et DRO 97] proposent la construction de la variance résiduelle à partir des interactions dont les variances (carrés moyens) sont les plus faibles ; leurs valeurs doivent être du même ordre de grandeur. Le calcul de la variance résiduelle (ou carrés moyens résiduels) peut alors s'écrire comme :

ANNEXE 1

$$CM_r = \frac{SCE_r}{ddl_r} = \frac{\sum_i SCE}{\sum_i ddl} \quad (A2.11)$$

Les sommes des carrés des écarts (SCE) et les nombres de degrés de liberté (ddl) se rapportant aux interactions choisies. Cette solution permet de retrouver la première écriture de l'équation de variance vue précédemment :

$$CM_r = \frac{SCE_r}{ddl_r} = \frac{\sum_i SCE}{\sum_i ddl} \quad (A2.11)$$

De manière générale, si une telle variance résiduelle ne peut être construite, il est inutile de calculer l'ANOVA : ses résultats seraient inexploitable.

Par exemple, si les effets des interactions sont du même ordre de grandeur que ceux des facteurs principaux, ce dernier mode de construction de SCE_r devient inapplicable car il n'est alors plus possible d'assimiler la variance construite à une composante résiduelle ou de bruit.

A2.3 TEST DE FISHER-SNEDECOR

Le *test de Fisher-Snedecor* permet de comparer 2 variances, par utilisation de la loi statistique dite *de Fisher* (ou loi F). Celle-ci travaille sur un quotient de variances et prend en compte le nombre de degrés de liberté de chacune d'elles. Les variances concernées doivent être celles de variables aléatoires à distribution normale et à variances constantes.

On calcule alors le ratio suivant, pour le facteur considéré :

$$F_{obs} = \frac{CM_x}{CM_r} \quad (A2.12)$$

La variance associée au facteur ou à l'interaction étudié(e) (CM_x) peut être considérée comme égale à la variance résiduelle (CM_r) si le rapport F_{obs} est faible, i.e. inférieur à une valeur seuil statistique. On définit ainsi l'hypothèse statistique H_0 , selon laquelle l'affirmation précédente est vraie. Si c'est le cas, F_{obs} est alors une valeur observée d'une variable F de Fisher-Snedecor, à ddl_f et ddl_r degrés de liberté.

L'hypothèse H_0 doit être rejetée au niveau, lorsque :

$$P(F \geq F_{obs}) \leq \alpha \quad (A2.13)$$

Ou, de manière équivalente, quand :

ANNEXE 1

$$P_{obs} \geq F_{1-\alpha} \quad (A2.14)$$

A2.4 TABLEAU D'ANALYSE DE LA VARIANCE

Il est courant d'utiliser un tableau réunissant les résultats des calculs précédents. Il peut prendre la forme suivante :

Sources de variation	ddl	Somme des carrés des écarts	Carrés moyens	F-value	Prob.	Source influente?
facteur 1	ddl_1	SCE_1	$CM_1 = SCE_1 / ddl_1$	CM_1 / CM_r	$P(F \geq F_{obs})$	$P < \alpha ?$
...		
facteur f	ddl_f	SCE_f	$CM_f = SCE_f / ddl_f$	CM_f / CM_r		
...		
facteur k	ddl_k	SCE_k	$CM_k = SCE_k / ddl_k$	CM_k / CM_r		
interaction fg	ddl_{fg}	SCE_{fg}	$CM_{fg} = SCE_{fg} / ddl_{fg}$	CM_{fg} / CM_r		
...						
Variation résiduelle	ddl_r	SCE_r	$CM_r = SCE_r / ddl_r$			
Totaux	ddl_t	SCE_r				

ANNEXE 1

ANNEXE A3

F-TABLEAU

Table F: valeurs critiques de la distribution F

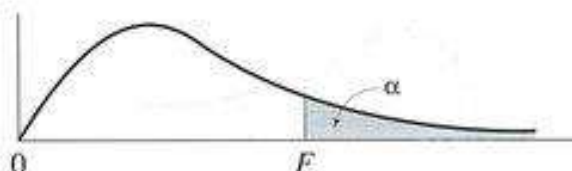


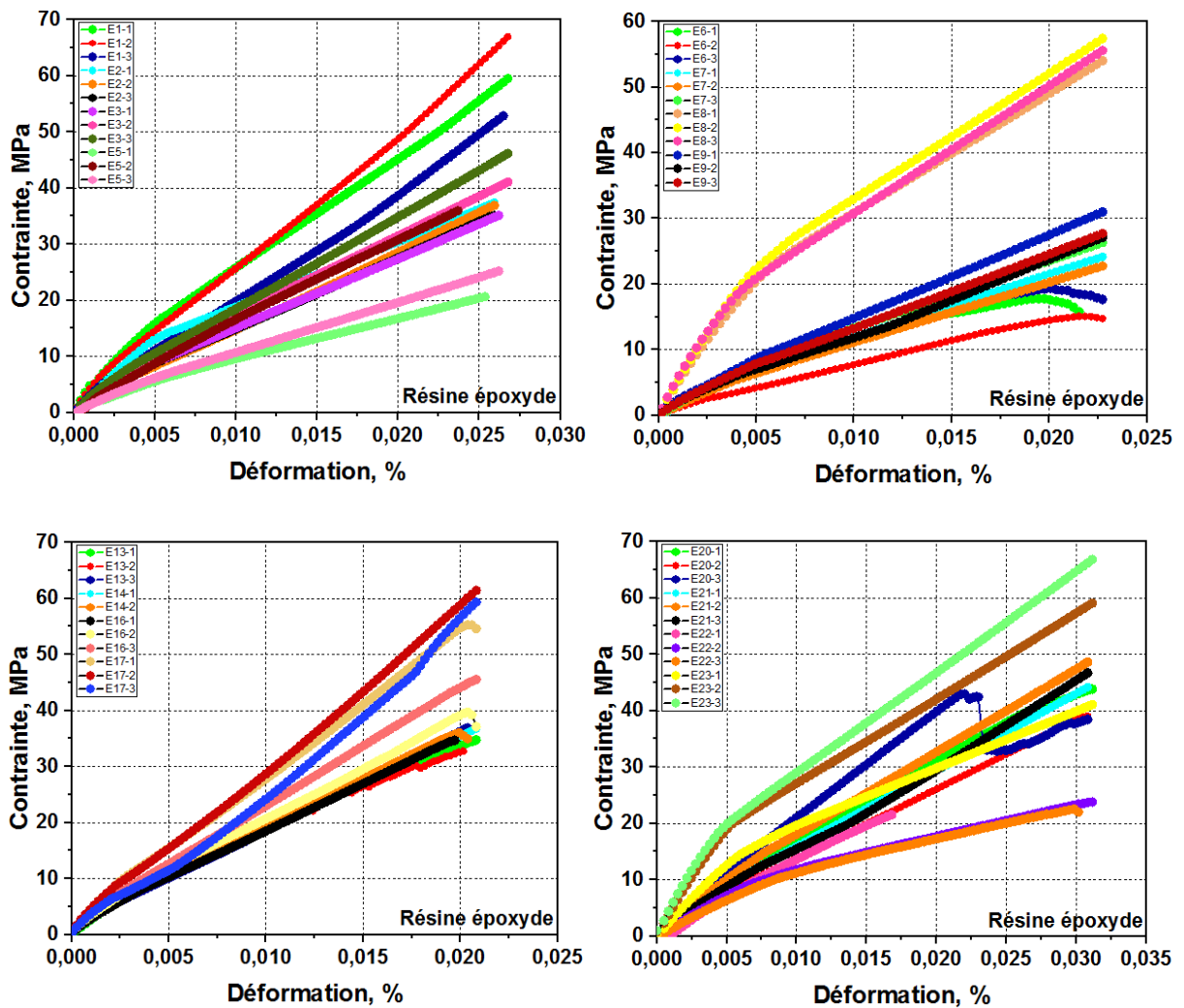
TABLE I. $\alpha = .05$

	Degrés de liberté pour le numérateur														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	15	20	25	30	
Degrés de liberté pour le dénominateur	1	161.4	199.5	215.8	224.8	230.0	233.8	236.5	238.6	240.1	242.1	245.2	248.4	248.9	250.5
2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38	19.40	19.43	19.44	19.46	19.46	19.47
3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81	8.79	8.70	8.66	8.63	8.63	8.62
4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00	5.96	5.86	5.80	5.77	5.77	5.75
5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77	4.74	4.62	4.56	4.52	4.52	4.50
6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10	4.06	3.94	3.87	3.83	3.83	3.81
7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68	3.64	3.51	3.44	3.40	3.40	3.38
8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39	3.35	3.22	3.15	3.11	3.11	3.08
9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18	3.14	3.01	2.94	2.89	2.89	2.86
10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02	2.98	2.85	2.77	2.73	2.73	2.70
11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90	2.85	2.72	2.65	2.60	2.60	2.57
12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80	2.75	2.62	2.54	2.50	2.50	2.47
13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71	2.67	2.53	2.46	2.41	2.41	2.38
14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65	2.60	2.46	2.39	2.34	2.34	2.31
15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59	2.54	2.40	2.33	2.28	2.28	2.25
16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54	2.49	2.35	2.28	2.23	2.23	2.19
17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49	2.45	2.31	2.23	2.18	2.18	2.15
18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46	2.41	2.27	2.19	2.14	2.14	2.11
19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42	2.38	2.23	2.16	2.11	2.11	2.07
20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39	2.35	2.20	2.12	2.07	2.07	2.04
22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34	2.30	2.15	2.07	2.02	2.02	1.98
24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30	2.25	2.11	2.03	1.97	1.97	1.94
26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27	2.22	2.07	1.99	1.94	1.94	1.90
28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24	2.19	2.04	1.96	1.91	1.91	1.87
30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21	2.16	2.01	1.93	1.88	1.88	1.84
40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12	2.08	1.92	1.84	1.78	1.78	1.74
50	4.03	3.18	2.79	2.56	2.40	2.29	2.20	2.13	2.07	2.03	1.87	1.78	1.73	1.73	1.69
60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04	1.99	1.84	1.75	1.69	1.69	1.65
120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96	1.91	1.75	1.66	1.60	1.60	1.55
200	3.89	3.04	2.65	2.42	2.26	2.14	2.06	1.98	1.93	1.88	1.72	1.62	1.56	1.56	1.52
500	3.86	3.01	2.62	2.39	2.23	2.12	2.03	1.96	1.90	1.85	1.69	1.59	1.53	1.53	1.48
1000	3.85	3.01	2.61	2.38	2.22	2.11	2.02	1.95	1.89	1.84	1.68	1.58	1.52	1.52	1.47

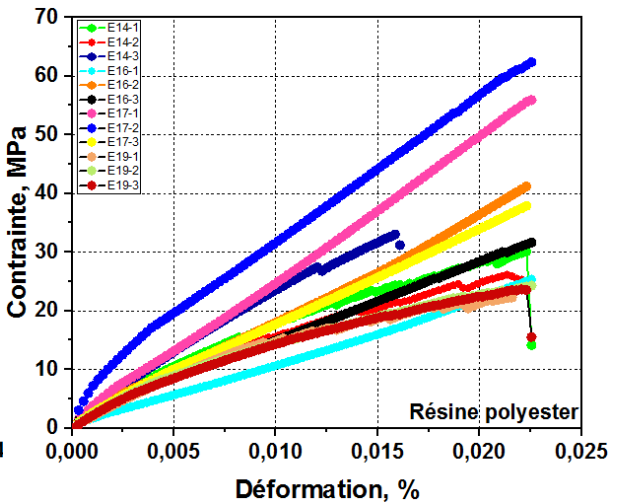
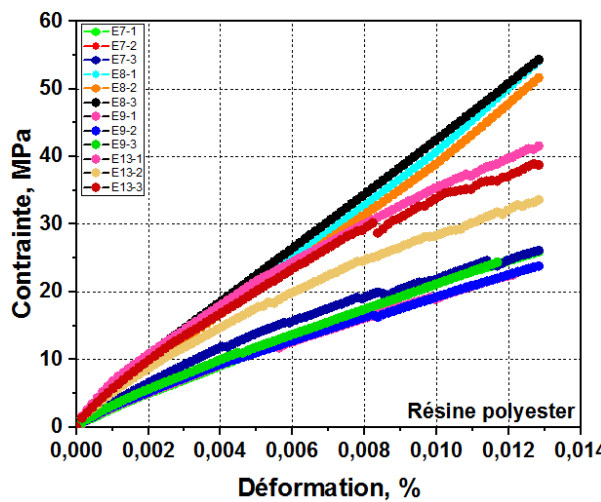
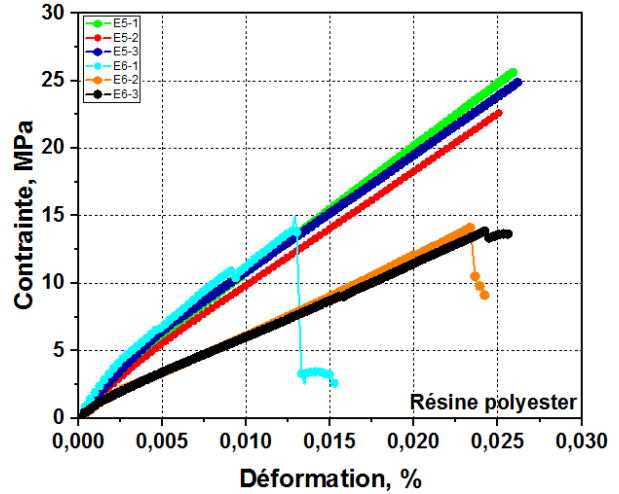
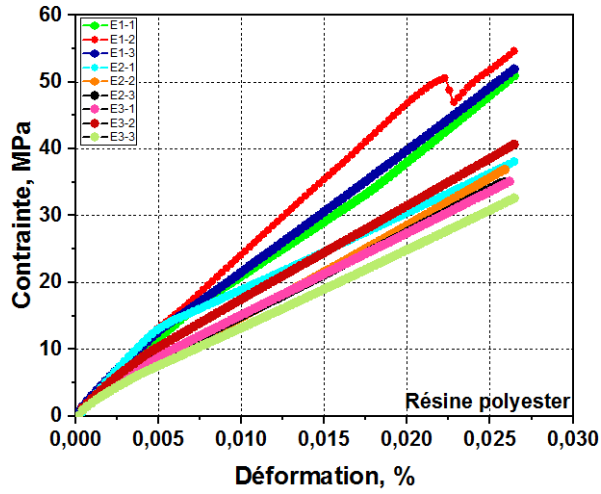
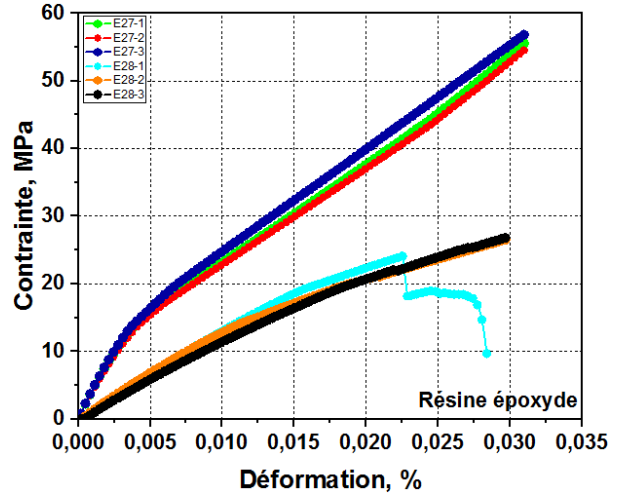
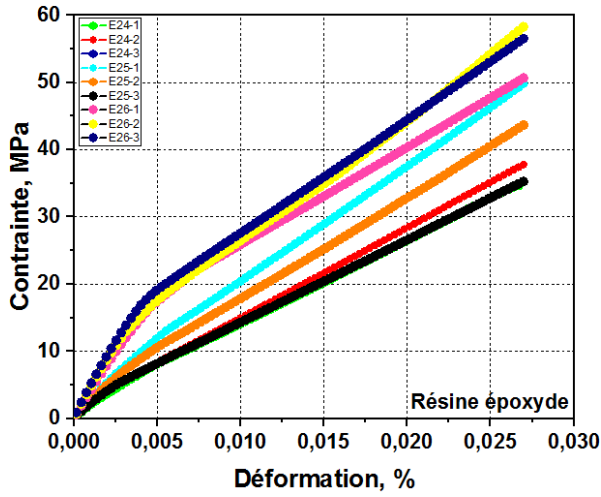
ANNEXE 1

Annexe A4

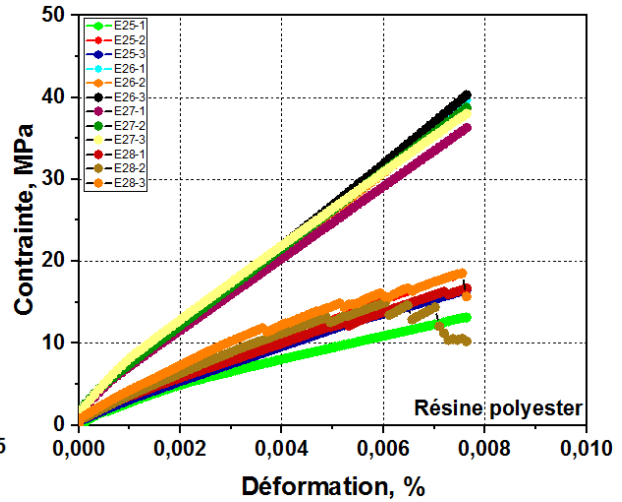
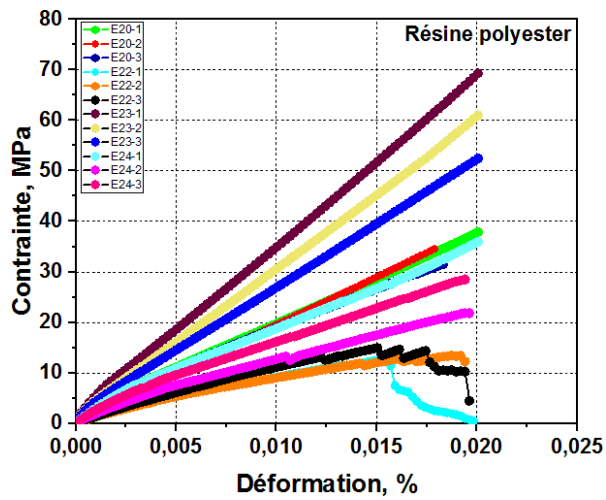
Courbes contrainte-déformation en traction pour les deux résines utilisées



ANNEXE 1

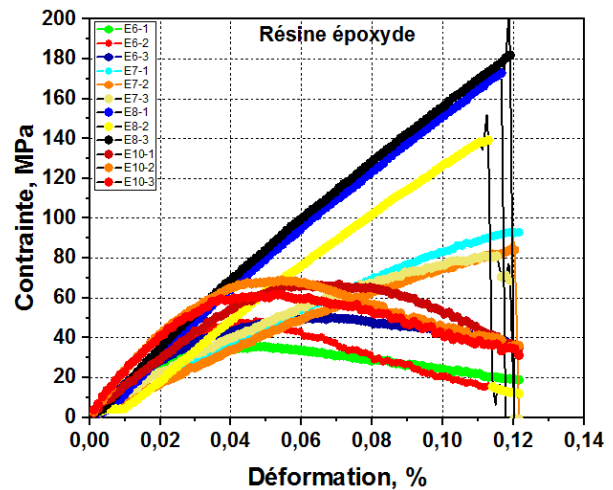
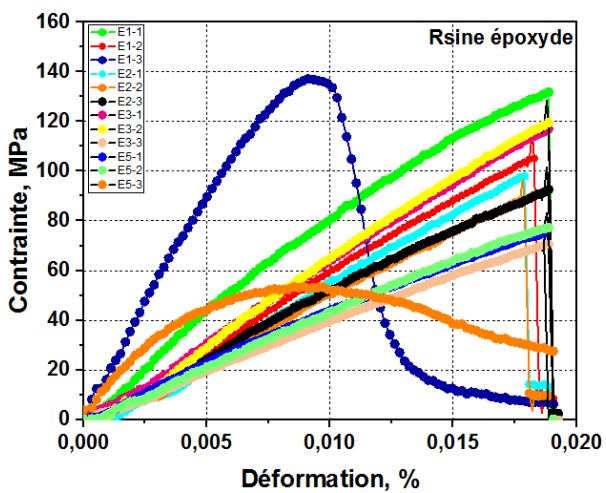


ANNEXE 1

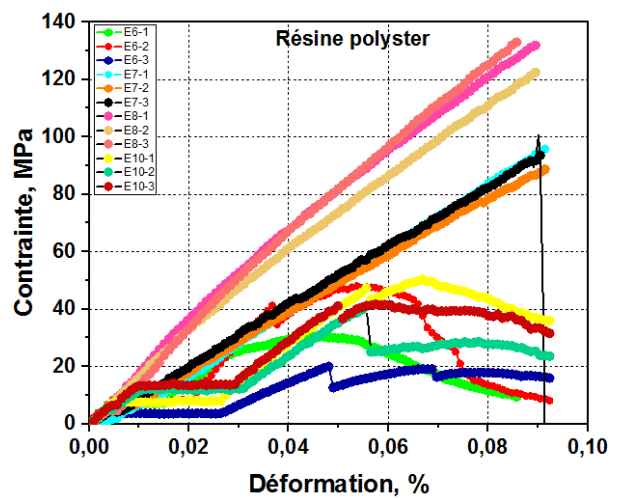
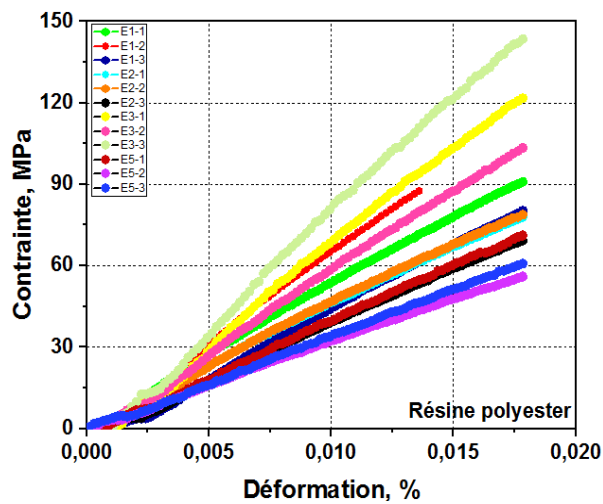
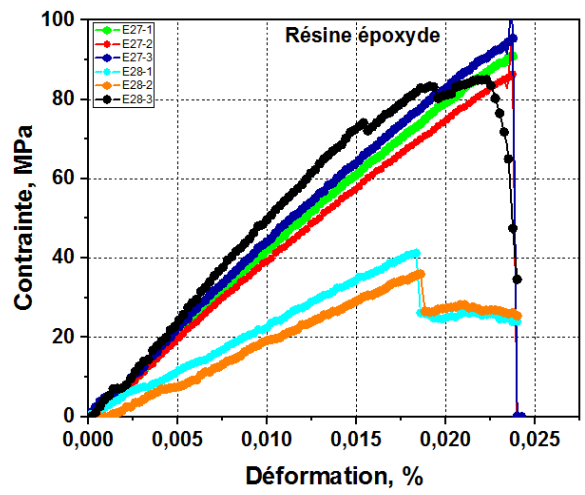
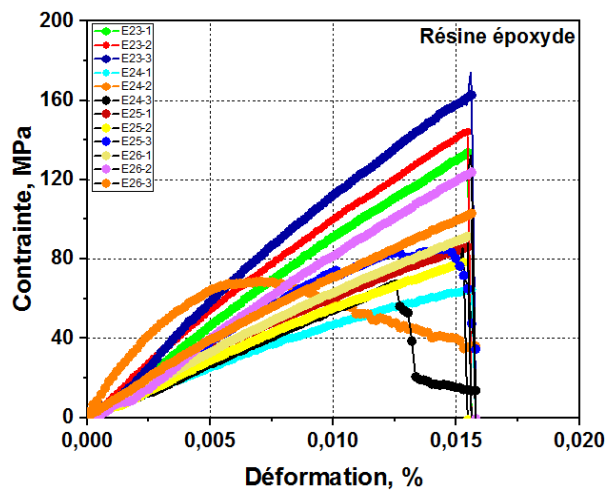
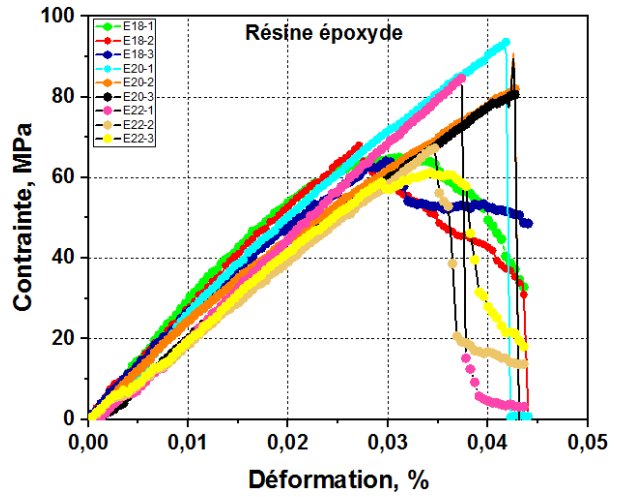
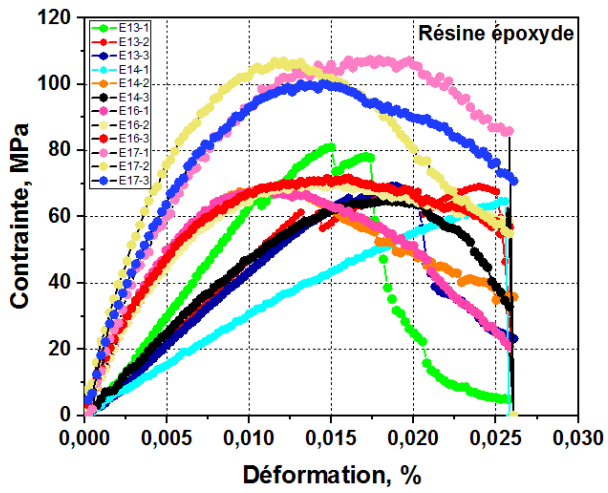


Annexe A5

Courbes contrainte-déformation en flexion pour les deux résines utilisées



ANNEXE 1



ANNEXE 1

