

Réf

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

UNIVERSITE AKLI MOHAND OULHADJ-BOUIRA



Faculté des Sciences et des sciences appliquées

Département Génie Civil

Projet de Fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master en :

Filière : Génie Civil

Option : Structures

Thème :

Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'une eco-structure sandwich

Réalisé par : **Boucetta Amel**
Korai Rima

Soutenu devant le jury composé de :

Membre de jury	Grade	En qualité de
Mr HAMI BRAHIM	MCB	Président
Mme. MOHAMADI SADDIKA	MAA	Encadrant
Mr ARBAOUI AHCENE	MCA	Co-encadrant
Mme. SAOUDI NACIRA	MCB	Examineur

Promotion 2022-2023

Remerciements

Nous tenons à remercier tout d'abord notre dieu créateur, le tout puissant pour nous avoir donné la patience, le courage et la volonté pour réaliser ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer notre respect au membre de jury

Nous souhaitons en premier lieu à montrer toute notre gratitude à notre encadrante, Mme S. MOHEMDI, Chef de département à l'université de AKLI MOHAND OULHADJ, BOUIRA. On a pu bénéficier de votre encadrement et apprécier vos qualités scientifiques et humaines. Merci pour la bonne démarche que vous nous avez offert pendant la réalisation de ce travail, vos précieux conseils, votre orientation et surtout votre patience.

Nous tenons également à remercier Mr B. HAMI, Professeur à l'université AKLI MOHAND OULHADJ BOUIRA, vous nous faites un grand honneur en acceptant de présider ce jury. On a pu apprécier l'étendue de vos connaissances et vos grandes qualités humaines. Veuillez accepter, Professeur, nos sincères remerciements et notre profond respect.

Nos remerciements s'orientent ensuite vers Mme N. SAOUDI, Professeur à l'université de AKLI MOHAND OULHADJ, BOUIRA, qui nous a fait l'honneur d'avoir accepté d'examiner et juger ce travail. On a eu le grand privilège de bénéficier de votre enseignement lumineux durant nos années d'étude. Veuillez chère maître, trouver dans ce travail, le témoignage de notre gratitude et notre profond respect.

Nous tenons à exprimer mes sincères remerciements à notre Co-encadrant, Mr H. ARBAOUI, pour son précieux soutien et sa guidance tout au long de mon projet. Sa contribution et son expertise ont été essentielles pour la réussite de cette recherche. Sa disponibilité, sa patience et ses conseils avisés ont grandement enrichi notre expérience et nous ont permis de progresser dans nos connaissances et compétences. Nous sommes reconnaissantes de l'opportunité d'avoir travaillé à ses côtés et d'avoir bénéficié de son mentorat. Sa passion pour le sujet, son engagement et son dévouement ont été une source d'inspiration pour nous. Nous tenons à le remercier chaleureusement pour son soutien constant et pour avoir cru en nous tout au long de ce parcours.

Nos remerciements vont également à tous nos docteurs et professeurs et à tout le groupe pédagogique.

Merci

Dédicace

À mes chers parents,

Aujourd'hui, je souhaite vous dédier ma soutenance, un moment important de ma vie académique, car vous êtes les piliers qui m'ont soutenu tout au long de ce parcours.

Depuis le tout début, vous avez été mes plus grands supporters, mes confidents, croyant en moi et en mes capacités. Votre soutien inconditionnel, vos encouragements et votre amour ont été une source de motivation sans faille. Vous avez été mes premiers enseignants, m'inculquant des valeurs telles que la persévérance, le travail acharné et la détermination.

Je ne saurais trouver les mots justes pour exprimer toute ma gratitude envers vous, mes chers parents. Votre amour, votre dévouement et votre soutien inébranlable ont été les fondations de ma réussite. Vous êtes mes modèles, mes héros, et je vous serai éternellement reconnaissante pour tout ce que vous avez fait et continuez de faire pour moi.

Cette dédicace est un témoignage de mon amour filial et de ma profonde reconnaissance envers vous. Merci d'avoir été mes plus grands soutiens, mes plus grands admirateurs et mes plus grands alliés.

A mes cher sœur et frère

Mes compagnons de vie, mes alliés et mes plus grands soutiens. Vous avez été présents à chaque étape de mon parcours, et votre soutien inconditionnel a été une source de force et de motivation. A travers les hauts et les bas, vous avez été là pour moi. Vos mots d'encouragement, vos conseils avisés et votre présence bienveillante ont été une boussole qui m'a guidé dans les moments de doute et d'incertitude. Vous avez toujours cru en moi, même lorsque je doutais de moi-même, et cela a été une source d'inspiration infinie et je suis fière de vous avoir comme frères et sœur. Sans oublier ma nièce ma perle rare.

A mes amis précieux

Vous avez été mes complices, mes confidentes et mes soutiens indéfectibles. Dans les moments de stress, vous m'avez apporté votre soutien moral et votre écoute bienveillante. Vos encouragements et vos mots d'encouragement ont été essentiels pour me donner la confiance nécessaire pour persévérer et atteindre mes objectifs.

Je vous aime profondément et je suis reconnaissant(e) de vous avoir dans ma vie

Amel

Dédicace

A mon père

Aujourd'hui, alors que je m'apprête à présenter ma soutenance, je souhaite dédier ce moment à toi, mon père bien-aimé, qui n'est plus parmi nous physiquement, mais qui reste présent dans mon cœur et dans mes pensées. Que cette dédicace soit le témoignage de mon amour et de ma gratitude éternelle envers toi, mon cher père. Ta mémoire continue de briller dans mon cœur, et je suis fier(e) d'être ton enfant. Je continuerai à te rendre fier, à honorer ton héritage et à vivre ma vie avec la même passion et le même dévouement que tu as toujours démontrés.

A ma mère

Aujourd'hui, je tenais à t'exprimer ma profonde gratitude pour tout ton soutien indéfectible tout au long de ma soutenance. Ta présence à mes côtés a été d'une importance capitale et a renforcé ma confiance en moi. Je suis extrêmement reconnaissant(e) de t'avoir comme mère, modèle et alliée dans ma vie.

Je suis également conscient(e) de tous les sacrifices que tu as consentis pour me permettre d'atteindre ce moment important de ma vie. Les longues nuits passées à m'accompagner dans mes révisions, les conseils précieux que tu m'as donnés, et le soutien financier que tu m'as apporté ont été inestimables. Je ne saurais jamais assez te remercier pour tout ce que tu as fait pour moi.

A mes sœurs

Je dédie cette soutenance à mes sœurs. Votre soutien et votre amour inconditionnels ont été une source constante d'inspiration pour moi tout au long de ce parcours. Votre présence encourageante et vos encouragements constants m'ont donné la force et la détermination nécessaires pour surmonter les défis et atteindre mes objectifs. Vous êtes des femmes incroyables, pleines de force et de persévérance, et je suis reconnaissant(e) de vous avoir comme sœurs. Cette réussite est également la vôtre, et je souhaite partager ce moment spécial avec vous. Merci d'être toujours là pour moi.

Rima

Résumé

Notre projet présente une étude expérimentale qui consiste à déterminer les caractéristiques physico-mécaniques d'un matériau composite de type sandwich. Ce dernier a été élaboré au niveau du laboratoire de mécanique des matériaux et composites, de l'unité de recherche matériaux, procédés et environnement de l'université de Boumerdes. Cette nouvelle structure sandwich est constituée de couches en matériaux composites, stratifiées, à base d'une résine époxy renforcée par des fibres de lin du type non tissés ; entre lesquelles se trouvent des plaques de liège aggloméré.

Tout d'abord, les matériaux utilisés dans le cadre de cette étude ont été présentés et caractérisés par des essais physico-mécaniques ; le matériau de l'âme de la structure sandwich est le liège aggloméré. Tandis que la résine époxy et la fibre de lin constituent les peaux de la structure sandwich.

D'après l'essai de traction sur les stratifiés, il est observé que les courbes présentent une phase de déformation élastique, avec un comportement linéaire de toutes les éprouvettes jusqu'à la rupture. Cela indique que le stratifié composé de fibres de lin et de résine époxy présente une rupture fragile. Ainsi, on a constaté que la contrainte maximale du stratifié orienté à 0° est légèrement supérieure à la contrainte maximale du stratifié orienté selon deux directions, cette différence peut être expliquée par l'anisotropie du matériau.

Les essais de flexion trois et quatre points montrent que les structures sandwiches testées présentent un comportement linéaire élastique depuis le début de chargement. Mais il existe une légère déformation plastique pour des déplacements plus élevés. En fait, la dégradation affectant les structures sandwiches commence par une petite fissure de cisaillement, qui se propage depuis la zone chargée suivant la direction du plan médian vers les bouts de l'échantillon.

Mots clés : Liège, fibres de lin, structure sandwich, flexion trois points et quatre points, traction.

Summary

Our project presents an experimental study which consists in determining the physico-mechanical characteristics of a sandwich type composite material. The latter was developed at the level of the materials and composites mechanics laboratory, of the materials, processes and environment research unit of the University of

Boumerdes. This new sandwich structure is made up of layers of composite materials, laminated, based on an epoxy resin reinforced with flax fibers of the woven type; between which there are plates of agglomerated cork, stacked alternately with the layers of laminates.

First, the materials used in this study were presented and characterized by physico-mechanical tests; the core material of the sandwich structure is agglomerated cork. While epoxy resin and flax fiber constitute the skins of the sandwich structure.

From the tensile test on the laminates, it is observed that the curves show an elastic deformation phase, with a linear behavior of all the specimens until failure. This indicates that the laminate composed of flax fibers and epoxy resin has a brittle fracture. Thus, it was found that the maximum stress of the laminate oriented at 0° is slightly higher than the maximum stress of the laminate oriented in two directions, this difference can be explained by the anisotropy of the material.

The three and four point bending tests show that the tested sandwich structures exhibit linear elastic behavior from the start of loading. But there is a slight plastic deformation for higher displacements. In fact, the degradation affecting the sandwich structures starts with a small shear crack, which propagates from the loaded zone following the direction of the midplane towards the ends of the sample.

المخلص :

يقدم مشروعنا دراسة تجريبية تتكون من تحديد الخصائص الفيزيائية والميكانيكية لمادة مركبة من نوع الساندويتش. وقد تم تطوير هذا الأخير بمختبر ميكانيكا المواد والمركبات التابع لوحدة أبحاث المواد والعمليات والبيئة بجامعة بومرداس. يتكون هذا الهيكل الجديد من طبقات من المواد المركبة، المصفحة، على أساس راتنجات الايبوكسي المعززة بألياف الكتان غير المنسوجة؛ التي توجد بينها لوحات من الفلين المتكتلة. في البداية تم عرض المواد المستخدمة في هذه الدراسة وتميزت بالاختبارات الفيزيائية والميكانيكية؛ المادة الأساسية لهيكل الساندويتش هي الفلين المتكتل. بينما تشكل راتنجات الايبوكسي وألياف الكتان جلود هيكل الساندويتش.

من اختبار الشد على الصفائح، لوحظ أن المنحنيات تقدم مرحلة تشوه مرنة، مع سلوك خطي لجميع العينات حتى الفشل. يشير هذا إلى أن الصفائح المصنوعة من ألياف الكتان وراتنج الايبوكسي تظهر كسرًا هشًا. وبالتالي، نرى أن الحد الأقصى لإجهاد الصفائح الموجهة عند 0 درجة أكبر قليلاً من الحد الأقصى لإجهاد الصفائح الموجهة في اتجاهين؛ يمكن تفسير هذا الاختلاف من خلال تباين المادة.

أظهرت اختبارات الانحناء ذات الثلاث والأربع نقاط أن هياكل الساندويتش التي تم اختبارها تظهر سلوكًا مرئيًا خطيًا منذ بداية التحميل. ولكن هناك تشوهًا بلاستيكيًا طفيفًا للإزاحات الأعلى. في الواقع، يبدأ التدهور الذي يؤثر على هياكل الساندويتش بصدع قص صغير، ينتشر من المنطقة المحملة على طول اتجاه المستوى المتوسط نحو أطراف العينة.

الكلمات المفتاحية: الفلين، ألياف الكتان، بنية الساندويتش، الثني الثلاثي والرباعي، الجر.

Sommaire

Remerciements	
Dédicace	
Résumé	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Introduction générale.....	1

Chapitre I: généralités sur les matériaux composites

I.1	Introduction	4
I.2	Définition d'un matériau composite	4
I.3	Caractéristiques générales	5
I.4	Classification des matériaux composite	6
I.4.1	Classification suivant la nature des constituants.....	6
I.4.1.1	Composites à matrice organique.....	6
I.4.1.2	Composites à matrice métallique.....	6
I.4.1.3	Composites à matrice minérale.....	6
I.4.2	Classification suivant la structure des matériaux composites.....	6
I.4.2.1	Monocouche	6
I.4.2.2	Stratifiés.....	7
I.4.2.3	Structure sandwich.....	8
I.4.2.4	Composites tissées.....	9
I.4.3	Classification suivant le type de matériau composite.....	9
I.4.3.1	Composites de grande diffusion	9
I.4.3.2	Composite à haute performance	9
I.4.4	Classification suivant la forme des constituants	10
I.4.4.1	Composite à particule	10
I.4.4.2	Composite à fibre.....	10
I.5	Éléments constituant un matériau composite.....	11
I.5.1	Matrice	11
I.5.1.1	Résines thermodurcissables	12
I.5.1.2	Résines thermoplastique	15
I.5.2	Renfort	17

I.5.2.1	Fibre de verre	18
I.5.2.2	Fibre de carbone	19
I.5.2.3	Fibres d'aramide	20
I.5.2.4	Les fibres céramiques	20
I.5.3	Les charges et les additifs	21
I.5.3.1	Charge.....	21
I.5.3.2	Additifs	22
I.6	Les bio-composites	22
I.7	Classification des fibres végétales	23
I.7.1	Fibre de bois.....	23
I.7.2	Fibre de chanvre.....	24
I.7.3	Fibre de lin	25
I.8	Propriétés des fibres végétales.....	26
I.8.1	Propriété physiques des fibres végétales.....	26
I.8.2	Propriété mécaniques des fibres végétales.....	26
I.9	Avantages et inconvénients des fibres végétales	27
I.10	L'utilisation des fibres végétales dans la construction	27
I.11	Répartition géographiques des fibres végétales.....	28
I.11.1	Dans le monde	28
I.11.2	En Algérie.....	28

Chapitre II: généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et élaborés

II.1	Définition.....	31
II.2	Constituants des panneaux sandwich	31
II.2.1	Peaux	31
II.2.2	Ame	32
II.2.3	Adhésifs.....	32
II.3	Techniques d'assemblage des panneaux sandwich	33
II.4	Domaine d'utilisation	34
II.5	Rôle et avantages des panneaux sandwich	34
II.6	Matériaux, Méthodes élaborés	35
II.6.1	Matériaux	35
II.6.1.1	Fibre de lin.....	35

II.6.1.2	Liège	36
II.6.1.3	Résine Epoxy	37
II.6.2	Méthode d'élaboration	39
II.6.2.1	Traitement des fibres de lin par L'hydroxyde de sodium (NaOH)	39
II.6.2.2	Préparation de la matrice	40
II.6.2.3	Préparation des éprouvettes	41
II.6.3	Méthode de caractérisation.....	46
II.6.3.1	Essai de traction.....	46
II.6.3.2	Essai de Flexion trois point	48
II.6.3.3	Essai de flexion quatre points	49

Chapitre III: résultats et interprétation

III.1	Introduction	52
III.2	Résultats.....	52
III.2.1	Essai de traction.....	52
III.2.1.1	Interprétation de résultats.....	54
III.2.1.2	Essai de flexion 3 point.....	56
III.2.1.3	Interprétation des résultats	58
III.2.1.4	Essai de flexion 3 point.....	58
III.2.1.5	Interprétation des résultats	60
	Conclusion générale	62
	Référence bibliographique	63
	Résumé.....	Erreur ! Signet non défini.

Liste des figures

Chapitre I: généralités sur les matériaux composites

Figure I. 1: Les Constituants d'un matériau composite.....	4
Figure I. 2: Microstructure d'un matériau composite	5
Figure I. 3: Matériaux composite UD	7
Figure I. 4: Matériaux composites stratifiés	7
Figure I. 5: Représentation idéalisée des directions empilements.....	8
Figure I. 6: Structure sandwich.....	9
Figure I. 7: Modélisation d'un composite tissés	9
Figure I. 8: Schéma illustratif de différents types de matériaux composite	10
Figure I. 9: Les structures géométriques des renforts de composites.	11
Figure I. 10: Les différentes familles de matrices	12
Figure I. 11: Les différentes familles de renfort de base	18
Figure I. 12: Fibre de verre.....	18
Figure I. 13: Fibres de carbone	19
Figure I. 14: Fibres d'aramide	20
Figure I. 15: Fibres de céramique	21
Figure I. 16: Classification des fibres végétales.	23
Figure I. 17: Fibres de bois	24
Figure I. 18: Fibre de chanvre	25
Figure I. 19: Fleur de lin et fibres de lin observées au microscope	25
Figure I. 20: Répartition de la production mondiale de fibres végétales hors coton et bois	28
Figure I. 21: Différents gisement de fibres végétales en Algérie.....	29

Chapitre II: généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et élaborées

Figure II. 1: Matériau composite sandwich	31
Figure II. 2: Matériaux pour les peaux.....	32
Figure II. 3: Type des âmes des structures sandwich	32
Figure II. 4: les fibres utilisées dans notre matériau composite	35
Figure II. 5: Lièges agglomérés de moyenne densité, granulé 3 à 5 mm	37
Figure II. 6: Traitement des fibres dans le NaOH (0.5% ,1%).....	39

Figure II. 7: Les couches de fibres de lin	40
Figure II. 8: Préparation de la résine époxy	40
Figure II. 9: Eprouvette sous forme haltère	41
Figure II. 10: Eprouvettes de résine et éprouvette de résine séchées.	42
Figure II. 11: Elaboration des stratifiés d'orientation 0° (1% et 0.5%)	43
Figure II. 12: Elaboration des stratifiés d'orientation 0°/90° (1% et 0.5%)	44
Figure II. 13: Eprouvettes de stratifiés après séchage.....	44
Figure II. 14: Elaboration des panneaux sandwich.....	45
Figure II. 15: Panneaux sandwich après séchage	46
Figure II. 16: Des structures sandwich	46
Figure II. 17: Machine de traction Zwick Z010.....	47
Figure II. 18: Eprouvette avant l'essai.....	47
Figure II. 19: Eprouvette avant l'essai de flexion 3 points.....	49
Figure II. 20: Eprouvette avant l'essai de flexion 4 points.....	50

Chapitre III: résultats et interprétation

Figure III. 1: Eprouvette après la traction	52
Figure III. 2: Courbe de traction sur le stratifié (orientation 0°-90°) avec concentration de NaOH égale à 0.5%	53
Figure III. 3: Courbe de traction du le stratifié (orientation 0°) avec une concentration de NaOH égale à 0.5%	53
Figure III. 4: Courbe de traction du stratifié (orientation 0-90) avec concentration de NaOH égale à 1%	54
Figure III. 5: Courbe de traction du stratifié (orientation 0°) avec concentration du NaOH égale à 1%	55
Figure III. 6: Courbe de traction de la matrice	56
Figure III. 7: Eprouvette après l'essai de flexion 3 point.....	57
Figure III. 8: Courbe de flexion 3 point sur une structure sandwich (0° - NaOH 1%)....	57
Figure III. 9: Courbe de flexion 3 point sur une structure sandwich (0° - NaOH 0.5%).	58
Figure III. 10: Eprouvettes après l'essai de flexion 4 points.....	59
Figure III. 11: Courbe de flexion 4 points sur une structure sandwich (0° - NaOH 0.5%).	60
Figure III. 12: Courbe de flexion 4 point sur une structure sandwich (0° -NaOH 1%) .	60

Liste des tableaux

Chapitre I: généralités sur les matériaux composites

Tableau I. 1: Les caractéristiques physico-mécaniques des résines époxy	14
Tableau I. 2: Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables	14
Tableau I. 3: Caractéristiques des résines thermoplastiques.....	16
Tableau I. 4: Les principales différences entre matrices TP et TD.....	16
Tableau I. 5: Caractéristiques mécaniques des fibres de verre	18
Tableau I. 6: Tableau comparatif entre les types de fibres	19
Tableau I. 7: Tableau représentant les caractéristiques des charges.	21
Tableau I. 8: Données bibliographique sur les dimensions du lin	25
Tableau I. 9: Propriétés physiques de certaines fibres végétales.....	26
Tableau I. 10: Tableau comparatif entre les propriétés mécaniques des fibres naturelles et les fibres de renforcement conventionnelles.....	26
Tableau I. 11: Avantages et inconvénients des fibres végétales.....	27

Chapitre II: généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et élaborés

Tableau II. 1: Caractéristiques de liège aggloméré blanc de moyenne.....	37
Tableau II. 2: Caractéristique technique de résine époxy.....	37
Tableau II. 3: Propriétés mécanique de la résine époxy utilisée.....	38
Tableau II. 4: Les dimensions des éprouvettes haltères selon la norme NF EN ISO 527-4	41

Introduction Générale

Introduction générale

L'augmentation de la demande énergétique, principalement due à l'utilisation croissante d'énergies polluantes, a entraîné des conséquences néfastes liées au changement climatique. Cela a suscité un intérêt accru de la part des laboratoires de recherche pour trouver des solutions durables à long terme en utilisant des matériaux respectueux de l'environnement, renouvelables et plus écologiques [6], [41].

Depuis l'avènement des matériaux composites, dans les années trente et jusqu'à nos jours, ils ne cessent pas d'attirer l'attention pour résoudre des problèmes technologiques, et surtout depuis la découverte des composites à base de polymères; ainsi les composites sont devenus les matériaux d'engineering les plus importants et les plus utilisés dans diverses applications (industrie automobile, articles de sports, aéronautique, industrie maritime etc.) [48], [25]. Les matériaux composites offrent plusieurs avantages par rapport aux matériaux conventionnels, ce qui les rend très attractifs. Ils présentent des caractéristiques fonctionnelles remarquables, tels que leur légèreté, leur résistance mécanique et chimique, leur faible besoin de maintenance, ainsi que leur capacité à prendre des formes variées. Grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques, ces matériaux permettent également d'allonger la durée de vie de certains équipements [17].

Les matériaux composites fabriqués à partir de fibres végétales offrent de nombreux avantages qui justifient leur utilisation en substitution des fibres synthétiques et minérales. Les fibres libériennes provenant de plantes cultivées dans les régions tempérées, comme le chanvre et le lin, présentent notamment d'excellentes propriétés mécaniques spécifiques, pouvant même surpasser celles des fibres de verre. Toutefois, ces fibres sont caractérisées par une variabilité significative de leurs propriétés. Cette variabilité est principalement influencée par des facteurs agronomiques et climatiques, ainsi que par la méthode de défibrage, ainsi que par la morphologie, la constitution et la composition de chaque fibre [49].

Les assemblages en sandwich jouent un rôle crucial dans la fabrication de pièces composites. Ils représentent une catégorie particulière de matériaux composites, où deux couches externes minces mais résistantes sont reliées à un noyau léger, relativement épais et suffisamment solide pour maintenir les peaux dans leurs positions relatives sous charge. Le noyau est collé à la peau avec un adhésif. Une variété de substrats sont utilisés dans la construction sandwich. La construction en sandwich a une rigidité très élevée et un rapport résistance/poids élevé. En conséquence, les composants sandwich atteignent les mêmes

performances que les matériaux de construction conventionnels, mais avec une réduction significative du poids.

L'objectif principal de cette étude est de créer une structure en sandwich utilisant du liège aggloméré comme matériau central, associé à des couches stratifiées constituées de résine époxy renforcée par des fibres de lin. Dans un premier temps, une caractérisation des matériaux constitutifs de la structure sandwich a été réalisée à l'aide d'essais physico-mécaniques. Ensuite, la deuxième étape du projet consiste à développer la structure sandwich elle-même. Enfin, la dernière étape implique la caractérisation de la structure sandwich obtenue en réalisant des essais physicomécaniques.

Ce travail est structuré en trois chapitres. Le premier chapitre est dédié à une présentation des matériaux composites, de leurs composants et de leur classification.

Dans le deuxième chapitre, nous présenterons les panneaux sandwich en premier lieu : ces différents constituants ainsi que ses techniques d'assemblage. En deuxième lieu, nous présenterons les différents matériaux utilisés au cours de cette étude pour but de réaliser une structure sandwich : le liège aggloméré comme matériau d'âme et un stratifié de résine époxy et fibre de lin comme peaux de la structure. Enfin, nous aborderons les différentes méthodes utilisées pour la fabrication et la caractérisation des matériaux composites stratifiés, ainsi que des structures en sandwich.

Le dernier chapitre sera dédié à la présentation des résultats des essais mécaniques effectués sur les stratifiés et les structures en sandwich, ainsi qu'à leur interprétation.

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites

I.1 Introduction

De nombreux matériaux naturels possèdent des propriétés mécaniques exceptionnelles grâce à leur structure composite, certains étant à la fois rigides et légers, tels que les os, tandis que d'autres sont souples mais résistants, comme le bois. Ces matériaux font partie de la famille des composites, car ils intègrent des fibres immergées dans une matrice de composition différente [4].

Depuis l'avènement des premières pièces en résine renforcée de fibres de verre vers 1940, les composites ont connu une évolution constante, visant à produire des produits à la fois économiques et performants, voire les deux à la fois. Cette industrie a connu une croissance régulière de 10% au cours des 20 dernières années. Grâce à leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, ces matériaux peuvent être utilisés dans un large éventail d'applications, touchant divers secteurs tels que l'aéronautique, l'électronique, la construction, l'automobile. Etc. [6].

I.2 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est caractérisé par la combinaison d'au moins deux composants non miscibles, qui possèdent une grande capacité d'adaptation. Les qualités respectives de ces composants se complètent mutuellement, créant ainsi un matériau doté de performances mécaniques, thermiques, électriques et/ou physico-chimiques améliorées [7].

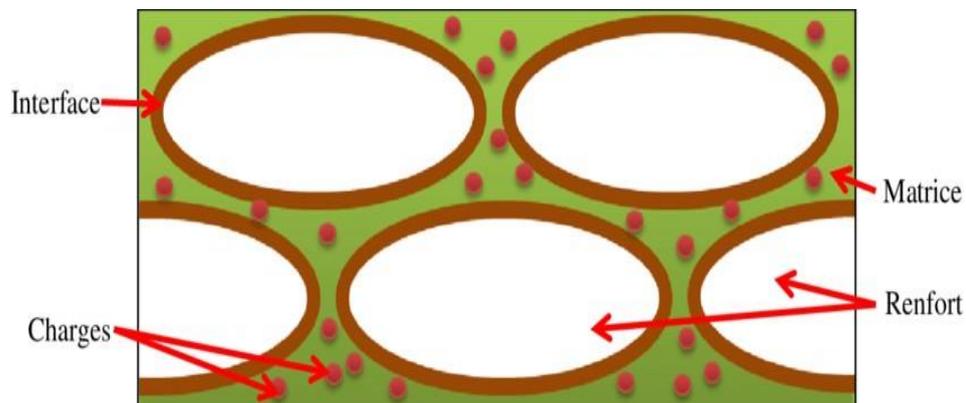


Figure I. 1: Les Constituants d'un matériau composite

Il est important de faire la distinction entre les charges et les renforts. Les charges, qu'elles soient sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou de liquide, modifient une propriété spécifique du matériau auquel elles sont ajoutées, telle que la Résistance aux chocs, la résistance aux UV ou le comportement au feu. En revanche, les renforts, qui prennent la

forme de fibres, contribuent exclusivement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés [6].

I.3 Caractéristiques générales

Dans sa forme la plus générale, un matériau composite est constitué d'une ou de plusieurs phases discontinues dispersées dans une phase continue. Lorsqu'il est composé de plusieurs phases discontinues de natures différentes, il est qualifié de composite hybride. La phase discontinue est généralement plus rigide et présente de meilleures propriétés mécaniques que la phase continue. On désigne la phase continue comme étant la matrice, tandis que la phase discontinue est appelée renfort ou matériau de renforcement [4].

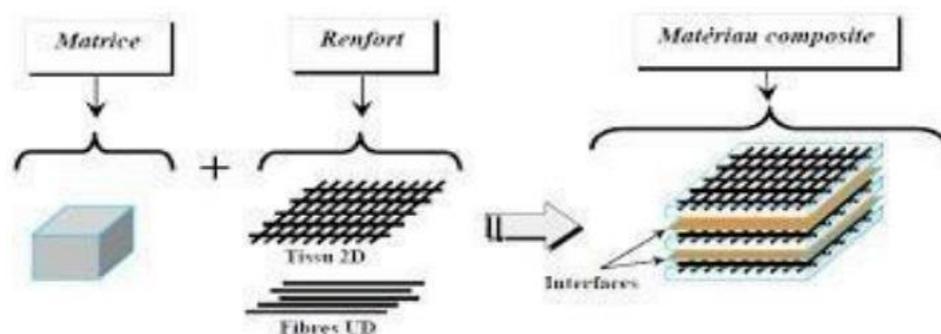


Figure I. 2: Microstructure d'un matériau composite

Les propriétés des matériaux composites résultent [4] :

- Des propriétés des matériaux constituants,
- De leur distribution géométrique,
- De leur interaction, etc

La géométrie du matériau de renforcement sera définie par des caractéristiques telles que sa forme, sa taille, sa concentration et sa disposition (orientation). La concentration du renfort est généralement évaluée en termes de fraction volumique ou de fraction massique. Cette concentration joue un rôle crucial dans les propriétés du matériau composite : pour une concentration donnée, la répartition du renfort dans le volume du composite est également un paramètre essentiel. Une répartition uniforme garantira l'homogénéité du matériau [4].

Dans le cas des matériaux composites comportant des fibres en tant que renfort l'orientation des fibres joue un rôle déterminant dans l'anisotropie du matériau composite [4].

I.4 Classification des matériaux composite

Les matériaux composites peuvent être classifiés en fonction de la nature et la forme des constituants ainsi pour la forme et la structure utilisé.

I.4.1 Classification suivant la nature des constituants

Les matériaux composites peuvent être catégorisés en fonction de la nature de leur matrice, regroupant ainsi les composites à matrice organique, métallique ou minérale.

I.4.1.1 Composites à matrice organique

Les matrices polymériques de synthèse sont largement utilisées dans le composite grand public, associées à des fibres de verre, d'aramide ou de carbone. Ces matrices présentent un module de faible valeur et une résistance à la traction relativement basse, mais elles sont facilement imprégnables par les renforts [16].

I.4.1.2 Composites à matrice métallique

Étant donné la complexité technique de l'imprégnation de renforts avec un alliage liquide, seuls les alliages d'aluminium sont généralement utilisés dans cette technique, associés à des fibres ou des particules de graphite ou de céramique.

I.4.1.3 Composites à matrice minérale

On peut obtenir des composites à matrices céramiques (telles que C, Al_2O_3 , SiO_2 , Cr_2O_3 , MgO, SiC...) en imprégnant des préformes de fibres (métalliques, de verre, d'aramides, de carbone, de céramique) avec des suspensions liquides, qui sont ensuite frittées à haute température et sous haute pression.

Les matériaux composites avec une matrice organique sont adaptés pour des applications à des températures ne dépassant pas 200 à 300°C, tandis que les matériaux avec une matrice métallique ou minérale peuvent être utilisés à des températures plus élevées : jusqu'à 600°C pour une matrice métallique et jusqu'à 1000°C pour une matrice minérale [10],[4].

I.4.2 Classification suivant la structure des matériaux composites

I.4.2.1 Monocouche

Les monocouches constituent les éléments fondamentaux des structures composites. Ils consistent en des fibres unidirectionnelles disposées dans le plan médian et enrobées dans une matrice polymère. La caractéristique principale des monocouches réside dans le type de

renfort utilisé, qu'il s'agisse de fibres longues (unidirectionnelles ou non), de fibres courtes, de tissus ou de rubans [14].

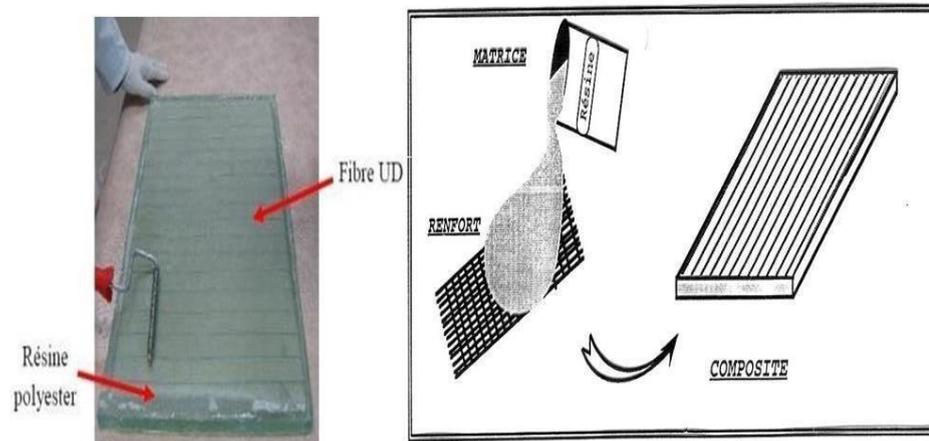


Figure I. 3: Matériaux composite UD [4],[14]

I.4.2.2 Stratifiés

Un stratifié est un matériau constitué d'un arrangement structuré de couches ayant une orientation et une épaisseur spécifiques. Ces couches sont composées de renforts imprégnés de résine. Chaque couche d'un stratifié est souvent appelée "strate". Le type de stratifié est généralement déterminé par sa séquence d'empilement, qui indique de manière concise l'orientation des différentes couches par rapport à un référentiel commun.

Ces couches sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Les composites stratifiés offrent l'avantage de permettre la création de matériaux ayant des propriétés mécaniques orientées de manière optimale, ce qui les rend plus résistants aux contraintes exercées sur la structure [14],[4],[15].

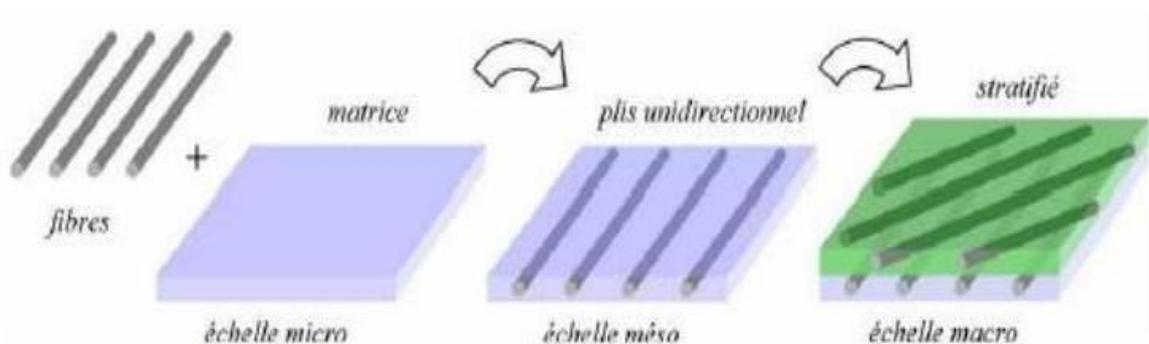


Figure I. 4: Matériaux composites stratifiés

En sélectionnant soigneusement l'agencement des couches, en particulier les orientations, il est possible d'obtenir des propriétés mécaniques spécifiques. Par exemple, un

stratifié avec l'empilement $(0, +45, +90, -45)_2s$ comprend quatre couches disposées dans les directions 0° , -45° , 90° et $+45^\circ$, où l'orientation 0° correspond à la direction principale du composite. Ces plans sont répartis de manière symétrique par rapport au plan médian du stratifié [4].

On pourra avoir des stratifiés de type:

- Equilibre : Un stratifié équilibré est constitué d'un nombre égal de couches orientées dans la direction $+0$ et dans la direction -0 .
- Symétrique : Un stratifié symétrique est composé de couches disposées de manière symétrique par rapport à un plan médian.
- Orthogonal : Un stratifié orthogonal est caractérisé par un nombre égal de

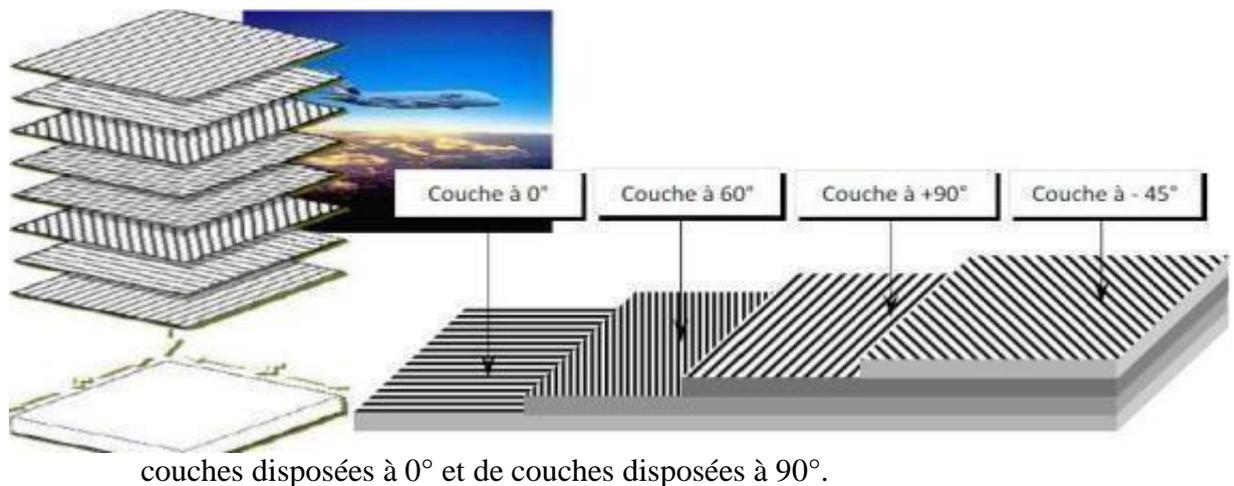


Figure I. 5: Représentation idéalisée des directions empilements [14].

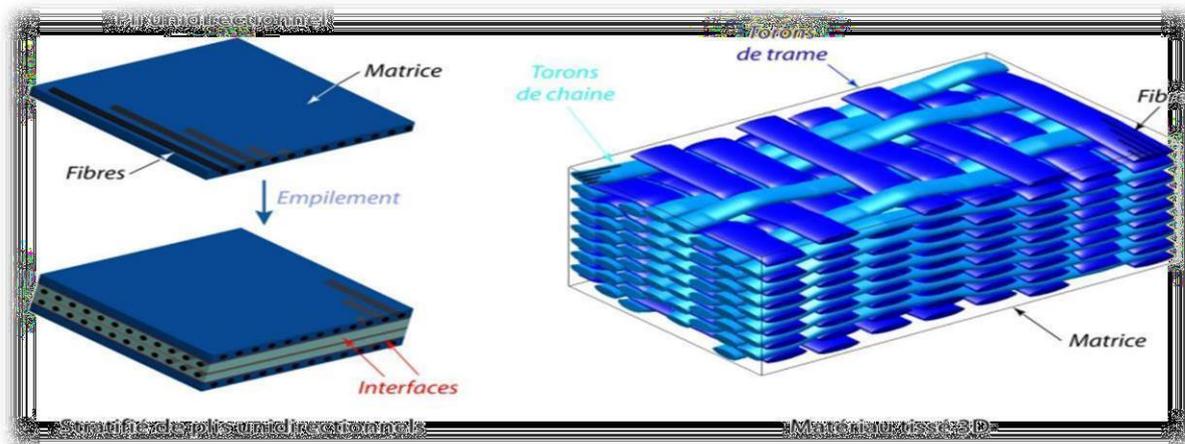
I.4.2.3 Structure sandwich

Les structures composites soumises à des contraintes de flexion ou de torsion sont couramment fabriquées à partir de matériaux sandwich. Un matériau sandwich est constitué d'un noyau central et de deux couches externes en matériaux composites. Ces éléments sont assemblés par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux utilisés [14] ,[15].



*Figure I. 6: Structure sandwich***I.4.2.4 Composites tissés**

De nombreuses pièces composites sont fabriquées à partir de textiles ou de composites tissés. Dans ces structures, les fibres sont entrelacées ou alignées pour former des "câbles" appelés torons ou simplement fils, qui contiennent des centaines voire des milliers de fibres. Ces fils sont ensuite tissés selon des motifs plus ou moins complexes. Une fois la mise en forme terminée, la matrice est présente à deux niveaux : à l'intérieur des fils (c'est-à-dire entre



les fibres) et à l'intérieur du tissu (c'est-à-dire entre les fils) [17].

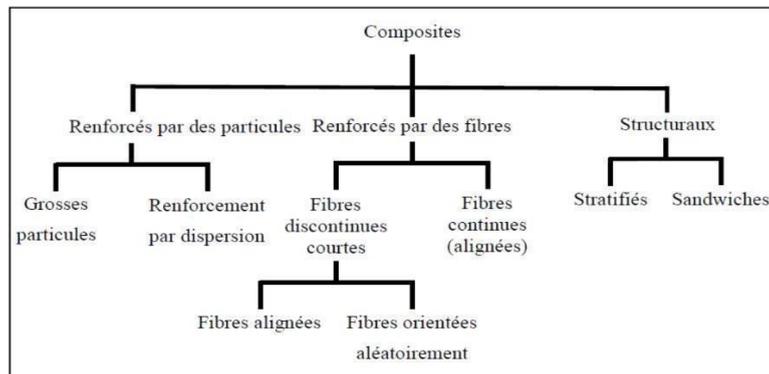
*Figure I. 7: Modélisation d'un composite tissés***I.4.3 Classification suivant le type de matériau composite****I.4.3.1 Composites de grande diffusion**

Ces matériaux constituent la grande majorité des composites utilisés, représentant environ 95 % de leur utilisation. Ils se composent généralement de plastiques renforcés ou de plastiques armés, avec un taux de renfort volumique d'environ 30 %. Les composants principaux de ces matériaux sont les résines polyester (résines thermodurcissables) associées à des fibres de verre [4].

Ces matériaux largement utilisés présentent des avantages clés, notamment une optimisation des coûts grâce à une réduction des prix de revient, une composition à base de polyester associé à des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de natte ou de tissu), ainsi qu'une simplicité dans leur principe de fabrication (moulage par contact, SMC et injection) [14].

I.4.3.2 Composite à haute performance

Ces matériaux sont principalement employés dans le domaine de l'aéronautique, car leurs caractéristiques mécaniques, notamment leur résistance et leur rigidité, surpassent largement celles des métaux. Ils sont composés de résines époxy renforcées par des fibres longues de verre, mais principalement de fibres de carbone ou d'aramide, avec un taux de



renfort dépassant 50 % [4].

Figure I. 8: Schéma illustratif de différents types de matériaux composite [4].

1.4.4 Classification suivant la forme des constituants

Suivant la forme des constituants, les composites peuvent être classés selon deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

1.4.4.1 Composite à particule

Un matériau composite est considéré comme un composite à particules lorsque le renfort est présent sous forme de particules. Contrairement aux fibres, les particules n'ont pas de dimension privilégiée et sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, telles que la rigidité, la résistance à la température, la résistance à l'abrasion, la réduction du retrait, etc. De plus, l'utilisation de particules permet de réduire les coûts du matériau sans compromettre ses caractéristiques. [41].

1.4.4.2 Composite à fibre

Lorsque les matériaux composites intègrent des fibres pour leur renforcement, on parle de composites à fibres. Ces composites peuvent être constitués de fibres continues ou de fibres discontinues, telles que des fibres courtes ou des fibres coupées.

La disposition et l'orientation des fibres permettent de personnaliser les propriétés mécaniques des matériaux composites, offrant ainsi la possibilité de créer des matériaux allant de fortement anisotropes à isotropes dans un plan donné [10],[4].

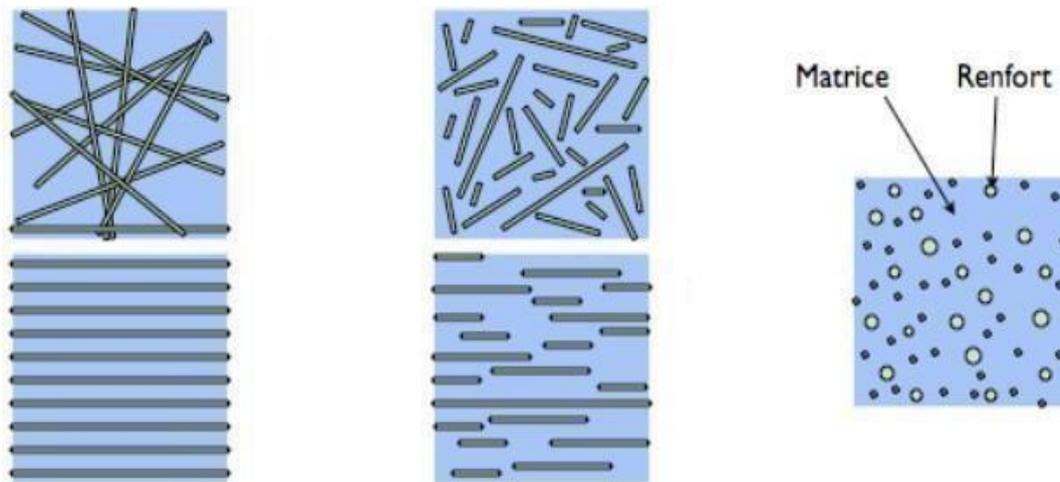


Figure I. 9: Les structures géométriques des renforts de composites.

I.5 Éléments constituant un matériau composite

Un matériau composite se distingue des matériaux homogènes classiques tels que les métaux et les polymères. Il est constitué de fibres continues ou coupées d'un matériau résistant (renfort) qui sont incorporées dans une matrice présentant une résistance mécanique nettement inférieure [4].

I.5.1 Matrice

La matrice est l'un des constituants de base des matériaux composites. C'est un matériau organique léger, facilement déformable, elle est considérée comme une protection du renfort. Le rôle de la matrice est d'assurer la cohésion entre les éléments du renfort, mais aussi de transférer les flux d'efforts entre les plis, de garantir la tenue à l'environnement (corrosion, vieillissement humide) et la tenue en température.

La matrice est l'un des éléments fondamentaux des matériaux composites. Elle est composée d'un matériau organique léger et malléable, et est considérée comme un revêtement protecteur pour le renfort. Son rôle principal est d'assurer la liaison entre les éléments du renfort, de faciliter le transfert des charges entre les couches, ainsi que de garantir la résistance aux conditions environnementales telles que la corrosion et l'humidité, ainsi qu'à la chaleur [7] Dans de nombreux cas, la matrice d'un matériau composite est une résine polymère qui offre une grande variété d'options pour différents domaines d'utilisation.

Les résines polymères sont disponibles en abondance et chacune présente des propriétés spécifiques adaptées à des applications particulières [18].

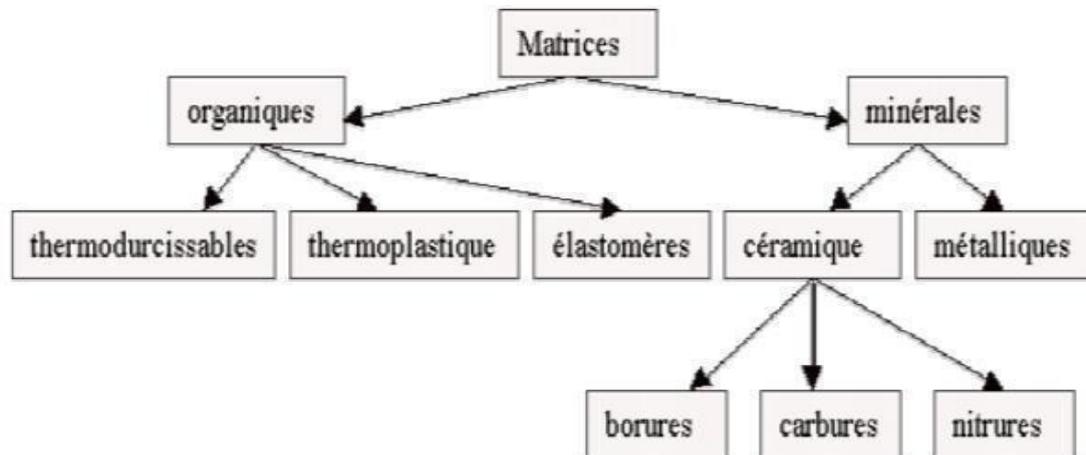


Figure I. 10: Les différentes familles de matrices

1.5.1.1 Résines thermodurcissables

Ces polymères subissent un traitement thermique qui les rend principalement non fusibles et insolubles. Ils sont caractérisés par un processus de mise en forme unique et irréversible. En raison de leur fragilité, ces résines sont rarement utilisées avec des renforts. Cependant, en raison de leurs excellentes propriétés thermomécaniques, elles sont actuellement les plus largement utilisées [4].

Elles comprennent plusieurs familles de polymères tels que les époxydes, les phénoplastes, les polyamides, les résines polyester et les résines vinylester. Elles sont généralement produites sous forme liquide ou pâteuse, puis durcies à l'aide d'un catalyseur chimique ou thermique [18].

Les résines thermodurcissables principalement utilisées sont les suivantes :

a) Résines polyester insaturé

Les polyesters insaturés ont un type de résine thermodurcissable fabriquée à partir d'un mélange de polyesters insaturés, de monomères insaturés et d'un agent de réticulation. Elles sont principalement utilisées dans l'industrie, ils sont appréciés pour leur résistance à la corrosion et leur faible coût.

Ils sont généralement produits sous forme liquide et sont catalysés avec un peroxyde organique pour provoquer la polymérisation.

Il existe différents types de résines [6] :

- Ortho-phtalique.
- Iso-phtalique : qui donne des résultats remarquables à la résistance à l'humidité.
- Chlorée : elle est bromée, dite ignifugées.
- Bisphénol : présente des excellentes caractéristiques chimiques et thermiques.

b) Vinylesters :

Les vinylesters sont produit en combinant de résines époxy et de monomères vinyliques insaturés. Ils possèdent des caractéristiques mécaniques et présente une résistance à la corrosion, à la fatigue, à la chaleur taux produits chimique, ce qui les rend adaptés pour des environnements extrêmes tels que les installations pétrolières et gazières offshore [6].

c) Phénoliques :

Les résines phénoliques sont fabriquées en mélangeant du phénol avec un aldéhyde, comme le formaldéhyde, en présence d'un catalyseur acide. La réaction chimique qui en résulte forme des liaisons croisées entre les molécules, créant ainsi un matériau solide et résistant.

d) Epoxydes

Les époxydes, aussi connus sous le nom de résines époxy, sont des polymères thermodurcissables qui se caractérisent par leur forte résistance mécanique, leur résistance à la corrosion et leur adhérence exceptionnelle. Les époxydes sont des composés organiques qui contiennent un cycle d'oxyde époxy (aussi appelé oxirane) dans leur structure moléculaire [4].

Les époxydes sont généralement fabriqués en combinant une résine époxy et un durcisseur. La résine époxy est un liquide visqueux qui contient des groupes époxy, tandis que le durcisseur est un agent chimique qui réagit avec la résine pour former une structure solide et résistante [15].

D'autres éléments peuvent être incorporés et choisis en fonction du domaine d'application de la résine, comme l'ajout de diluants dans la formulation de la résine époxy afin de réduire sa viscosité ou d'éliminer les solvants [4].

Les époxydes sont extrêmement répandus dans divers secteurs industriels en raison de leurs propriétés mécaniques exceptionnelles, de leur capacité d'adhérence, ainsi que de leur

résistance à la corrosion et à la chaleur. Leur utilisation est courante dans de nombreux domaines, tels que la construction, où ils sont utilisés pour coller des matériaux de construction tels que le béton, le bois et le métal. Ils sont également largement employés dans l'industrie aéronautique pour la fabrication de structures d'avions, de pièces de moteurs et d'ailes. L'industrie automobile, l'industrie électronique (pour l'encapsulation des composants électroniques et des circuits imprimés), la fabrication de bateaux, l'industrie des sports et loisirs, ainsi que l'industrie de l'emballage font également partie des secteurs où les époxydes trouvent de nombreuses applications.

Tableau I. 1: Les caractéristiques physico-mécaniques des résines époxy [4].

Caractéristiques physico-mécaniques des résines époxydes	
Masse volumique	1100 à 1500 kg/m ³
Module d'élasticité en traction	3 à 5 GPa
Contrainte à la rupture en traction	60 à 80 MPa
Contrainte à la rupture en flexion	100 à 150 MPa
Allongement à la rupture	(2 à 5) %
Resistance au cisaillement	30 à 50 MPa

Afin de profiter des performances élevées offertes par les résines époxydes, il est essentiel de prévoir des temps de transformation et, plus particulièrement, des temps de cuisson prolongés, qui peuvent s'étendre de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures, à des températures relativement élevées, généralement entre 50 et 100°C. Ces conditions sont nécessaires pour obtenir les résultats souhaités en termes de propriétés [4], [17].

Le tableau suivant représente une comparaison entre les types de résines thermodurcissables:

Tableau I. 2: Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables

	Polyesters	Phénoliques	Époxydes	Polyamides
Caractéristiques mécaniques	Moyenne	Faible	Très bonne	Excellentes
Tenue aux chocs	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
Tenue en fatigue	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
Pouvoir adhésif	Moyenne	Moyenne	Très bonne	Très bonne
Température maxi d'utilisation	140°C	130°C	190°C	260°C
Tenue au feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
Retrait	Important	Faible	Très faible	Très faible
Durée de polymérisation	Courte	Courte	Longue	Moyenne
Mise en œuvre	Très faible	Difficile	Facile	Difficile

1.5.1.2 Résines thermoplastique

Les résines thermoplastiques sont des polymères qui se ramollissent à une certaine température et peuvent être façonnés par moulage, extrusion ou impression 3D.

Contrairement aux résines thermodurcissables telles que les époxydes, qui se durcissent irréversiblement lorsqu'elles sont chauffées, les résines thermoplastiques conservent leur propriété de ramollissement à la chaleur et peuvent être refondues et recyclées [17], [4], [6].

Les matériaux thermoplastiques se caractérisent par la présence de molécules disposées de manière linéaire, sans qu'il y ait de liens chimiques entre elles. Ces molécules s'interconnectent grâce à des forces de Van der Waals, des interactions dipôle-dipôle et des liaisons hydrogène, ce qui assure un alignement optimal des anneaux aromatiques. Lorsque le thermoplastique est chauffé, il devient suffisamment mou pour être façonné en utilisant la chaleur et la pression, car les interactions faibles entre les molécules sont momentanément affaiblies. Quand le matériau est alors refroidi, les molécules reconstituent la liaison secondaire entre elles et il se solidifie. En raison de cette facilité de fabrication et de déformabilité, les matériaux thermoplastiques sont largement répandus dans une variété de produits [4].

Les matériaux thermoplastiques sont largement utilisés dans une grande diversité de Produits en raison de leur facilité de fabrication et de leur capacité à être façonnés [5], [6]. Ils présentent des avantages économiques et environnementaux lors de leur transformation, offrant une résistance élevée aux chocs et permettant des cycles de production rapides grâce à des temps de transformation relativement courts [17].

Pour les matrices thermoplastiques, on trouve [6] :

Les principales matrices TP utilisées (possédant tous une tenue en température supérieure à 100°C, or POM) sont les suivantes :

- 1- Polyamide(PA): tenue au choc, bonne résistance à la fatigue et aux hydrocarbures.
- 2- Poly téréphtalate éthylénique et butylénique (PET, PBT): bonne rigidité, bonne ténacité.
- 3- Polycarbonate(PC) : tenue au choc.
- 4- Poly sulfure de phénylène (PPS): résistance à l'hydrolyse.
- 5- Poly oxyméthylène (POM): bonne tenue à la fatigue.
- 6- Poly sulfurés (PSU et PPS) : bonne stabilité chimique et à l'hydrolyse, peu de fluage, tenue au chaud.
- 7- Polypropylène(PP): peu onéreux et assez stable en température, mais combustible.

Tableau I. 3: Caractéristiques des résines thermoplastiques [14].

résine	T_f (°C)	ρ (Kg/m ³)	ϵ_t^R (%)	σ_t^R (MPa)	σ_c^R (MPa)	E (GPa)
Polyamide	65 à 100	1140		60 à 85		1,2 à 2,5
polypropylène	900	1200		20 à 35		1,1 à 1,4

Tableau I. 4: Les principales différences entre matrices TP et TD [6].

Matrices	Thermoplastiques TP	Thermodurcissables TD
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	illimité	Réduit
Mouillabilité	Difficile	aisée
Moulage	Chauffage + refroidissement	Chauffage continu
Cycle	court	Long
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	réduite	Bonne
Chutes et déchets	recyclables	Perdus ou recyclés en charges
Conditions de travail	propreté	Emanation pour « méthode humide »

1.5.2 Renfort

Dans le domaine des matériaux composites, le terme "renfort" fait référence aux matériaux utilisés pour améliorer les propriétés mécaniques de la matrice, qui est le matériau responsable de lier les renforts entre eux. Le renfort se compose généralement de fibres, de particules ou de plaquettes, et est intégré à la matrice afin d'améliorer sa résistance à la traction, sa résistance à la compression, sa rigidité et sa résistance à la fatigue [14].

Lorsqu'il s'agit de trouver des renforts performants, une attention particulière est portée aux renforts en fibres. Les fibres constituent une forme de matériau exceptionnelle, offrant des performances mécaniques élevées et une maîtrise relative de leur fabrication. Sous forme de filaments fins, les propriétés d'un matériau se rapprochent davantage des valeurs théoriques maximales que toute autre forme de matière, en particulier en ce qui concerne la résistance à la rupture. Il est important de noter que la résistance à la rupture d'un matériau n'est pas une propriété intrinsèque, mais dépend des défauts présents à sa surface ou à l'intérieur, ce qui entraîne des concentrations de contrainte [6].

La proportion des renforts dans les matériaux composites est généralement située entre 0,3 et 0,7 en termes de fraction volumique. Les structures composites présentent une anisotropie inhérente [4].

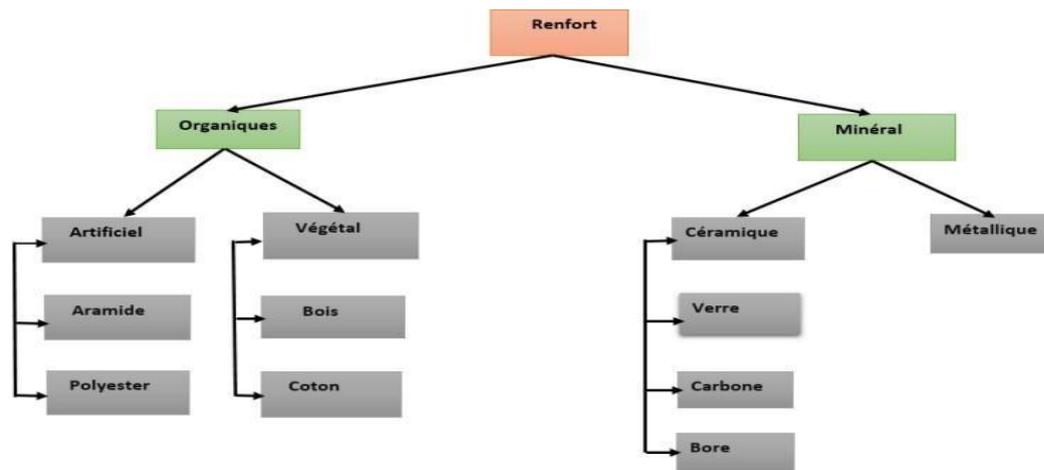


Figure I. 11: Les différentes familles de renfort de base [18].

1.5.2.1 Fibre de verre

Les fibres de verre se distinguent par leur excellent rapport performance/prix, ce qui en fait le choix privilégié comme renfort dans la construction de structures composites. Elles sont largement utilisées dans les composites couramment utilisés. Leur fabrication implique l'utilisation de sable (silice) et d'additifs tels que l'alumine, le carbonate de chaux, la magnésie et l'oxyde de bore [14].

Trois catégories de fibres sont identifiées [5]:

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes.
- R : pour les composites hautes performances.



- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

Figure I. 12: Fibre de verre

Tableau I. 5: Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [6].

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Contrainte à la rupture (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module d'Young (Gpa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à la rupture (%)	4,5	4,5	4	5.3	5.3

I.5.2.2 Fibre de carbone

La fibre de carbone est composée de fibres synthétiques renforcées en carbone, qui sont fabriquées à partir de fils de polyacrylonitrile (PAN) ou de rayonne. Ces fils subissent un processus d'étirement et de chauffage à des températures élevées (carbonisation à 1 100 °C ou graphitisation à 2 500 °C) en l'absence d'oxygène, ce qui élimine les composants non carbonés et crée une fibre de carbone pure. En fonction de la température de traitement, on distingue deux types de fibres :

- **Fibres haute résistance (HR):** pour une combustion de 1000 à 1500 °C.
- **Fibres haut module (HM):** pour une température de combustion de 1800 à



Figure I. 13: Fibres de carbone

La qualité des fibres de carbone finales est étroitement liée aux caractéristiques du précurseur utilisé [5].

Le tableau suivant représente quelques propriétés des fibres de carbone :

Tableau I. 6: Tableau comparatif entre les types de fibres [5]

Fibre	σ_{T-max} (MPa)	E_T (GPa)	ϵ (%)	σ_{C-max} (MPa)
Fibre HR	3400 à 4500	230 à 250	1.4 à 1.8	2200 à 2800
Fibre HM	2000 à 2500	390 à 450	0.5 à 0.6	1300 à 1700

I.5.2.3 Fibres d'aramide

La fibre d'aramide, communément connue sous le nom de KEVLAR, est dérivée de la chimie des polyamides aromatiques, notamment le poly téréphtalate de p- phénylène diamine[4],[6].

Quelques exemples de fibres aramides : KEVLAR (Dupont de mours, TWARON (Akzo, Allemagne-Hollande), TECHNORA (Teijin, Japon). Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques [14].



Figure I. 14: Fibres d'aramide

On peut identifier deux types de fibres d'aramide ayant des rigidités différentes [4]:

- Les fibres bas module : $E= 70\ 000$ MPA.
- Les fibres hauts module : $E= 130\ 000$ MPA.

I.5.2.4 Les fibres céramiques

La fibre de céramique est un matériau synthétique renforcé en céramique, créé à partir de composés tels que l'oxyde d'aluminium, le carbure de silicium et le nitrure de bore. Elle est obtenue par fusion des matières premières et leur extrusion sous forme de fibres extrêmement fines.



Figure I. 15: Fibres de céramique

1.5.3 Les charges et les additifs

1.5.3.1 Charge

Les charges sont des éléments solides incorporés à une matrice dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques, physiques et/ou chimiques du matériau composite final. Elles peuvent se présenter sous différentes formes et tailles, telles que des particules en poudre, des granulés ou des fibres courtes. Ces charges sont souvent classifiées en fonction de leur forme géométrique, regroupant ainsi différentes catégories [4]:

- Charges sphériques
- Charges non sphériques

Tableau I. 7: Tableau représentant les caractéristiques des charges [5].

	influencent	améliorent
Les charges	<ul style="list-style-type: none"> - l'aspect du produit - la viscosité - la densité - l'opacité - le temps de gel - le prix de revient 	<ul style="list-style-type: none"> - la résistance à l'humidité - la résistance aux agents chimiques - la résistance au feu - la résistance à la chaleur - la résistance aux chocs

I.5.3.2 Additifs

Les additifs sont des substances qui sont introduites en quantités réduites dans une matrice de polymère ou un matériau composite afin de modifier certaines de leurs propriétés physiques ou chimiques. Ils permettent d'améliorer des caractéristiques telles que la résistance, la durabilité, la résistance à la chaleur, la protection contre les rayons UV, la conductivité, la coloration, et bien d'autres propriétés du matériau composite. Le choix des additifs se fait souvent en fonction de leur compatibilité avec la matrice de polymère et de leur capacité à fournir les résultats souhaités. Ils interviennent comme [4], [6]:

- Lubrifiants et agents de démoulage.
- Pigments et colorants.
- Agents anti-retrait.
- Agents anti-ultraviolets.

I.6 Les bio-composites

Actuellement, l'incorporation de ressources renouvelables dans les matériaux composites est devenue une pratique de plus en plus courante, demandant une attention accrue et faisant l'objet d'études approfondies. Cette évolution est due à leur importance économique, environnementale et mécanique, ainsi qu'à leurs vastes domaines d'application. Ces matériaux sont désignés par différentes appellations telles que les bio-composites, les biodégradables, les biocompatibles, etc[41].

Il n'existe pas encore de définition officielle des bio-composites, mais il est généralement reconnu que ces matériaux doivent être exclusivement fabriqués à partir de ressources naturelles qui ont subi différentes transformations mécaniques et/ou chimiques.

Les bio-composites sont principalement constitués de renforts, souvent des fibres naturelles, et d'une matrice, de préférence d'origine biologique. Le terme "biopolymère" est utilisé pour caractériser la biodégradabilité dans un environnement naturel, bien qu'un biopolymère puisse également être d'origine fossile [43].

Les bio composites, dotés de caractéristiques mécaniques supérieures, font l'objet de nombreuses recherches. Cependant, en raison du stade encore peu avancé des bio polymères, de la variabilité des propriétés des fibres et des défis liés à leur transformation en composites, leurs performances sont actuellement limitées, ce qui les empêche de rivaliser avec les matériaux composites synthétiques traditionnels [41].

Néanmoins, ces ressources renouvelables, durables, leur combinaison unique de propriétés en font des choix pour une variété d'applications.

I.7 Classification des fibres végétales

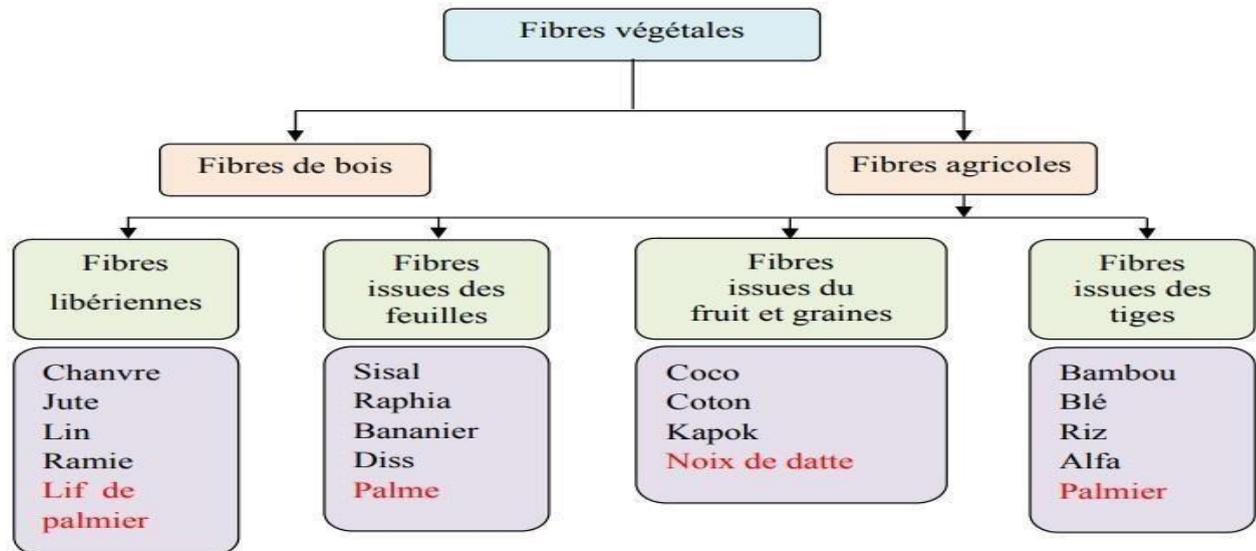


Figure I. 16: Classification des fibres végétales.

Diversité des fibres papetières, diversité des propriétés

La catégorie des "fibres papetières" englobe une grande diversité de fibres. En effet, il est possible de produire du papier à partir de toutes les fibres végétales, chacune ayant des propriétés distinctes en fonction de l'espèce végétale utilisée, qu'il s'agisse de plantes ou d'arbres [41].

Les fibres de lin, chanvre et bois sont parmi les principales utilisées dans les bio-composites.

I.7.1 Fibre de bois

La fibre de bois, un isolant d'origine biosourcé, est produite en défibrant des déchets d'arbres résineux. Ces fibres sont ensuite comprimées et moulées pour former des panneaux avec différentes densités [44]. Les fibres de bois résineux mesurent environ 2 mm de longueur et ont un diamètre d'environ 40 μm , tandis que les fibres de bois feuillus ont une longueur d'environ 1 mm et un diamètre d'environ 20 μm . Parfois, le bois est disponible sous forme de farine, notamment pour les composites bois-plastique (WPC)[41].

La fibre de bois est largement utilisée sur le marché de l'isolation des bâtiments en



raison de sa nature écologique et de ses nombreuses qualités [44].

Figure I. 17: Fibres de bois

1.7.2 Fibre de chanvre

La fibre de chanvre est extraite de la partie supérieure de la tige, qui atteint généralement une hauteur de 1 à 3 mètres [46].

Les fibres de chanvre présentent une résistance à la traction élevée (550 -900 MPA), un module de Young élevé (70 GPa), une longueur moyenne de 20 à 50 mm et un diamètre de 10-51 μm . Grâce à leur solidité, elles sont largement utilisées comme renfort dans les composites, ainsi que dans d'autres domaines tels que l'industrie textile. De plus, le chanvre est cultivé dans des régions à climat tempéré, principalement en Europe de l'Est, en Italie, en Chine et en France, qui est le principal producteur en Europe. Cette accessibilité facilite grandement son utilisation par les Fabricants de bio composites [41].

En outre, la fibre de chanvre présente des avantages supplémentaires en tant que matériau écologique, offrant de bonnes propriétés isolantes, d'excellentes qualités acoustiques,



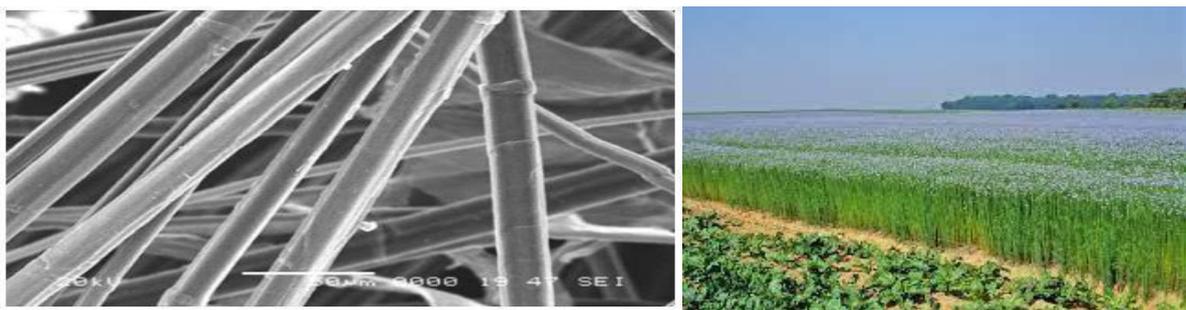
une résistance mécanique solide et une résistance naturelle contre les rongeurs [46].

Figure I. 18: Fibre de chanvre

I.7.3 Fibre de lin

Le lin est une plante herbacée annuelle qui présente une tige dressée et fibreuse qui se ramifie en forme de corymbe. Les feuilles du lin sont épaisses, simples, entières, linéaires à lancéolées, et elles sont disposées de manière alternée le long de la tige. La plante produit des inflorescences sous forme de cymes ou de grappes terminales lâches qui apparaissent entre juin et août. Les fleurs du lin sont de couleur bleue, hermaphrodite, solitaire et portées par de longs pédoncules dressés. Les fruits sont des capsules à cinq loges contenant généralement jusqu'à une dizaine de graines. Les graines du lin ont une couleur brune plus ou moins intense et sont ovales et lenticulaires, mesurant de 4 à 6 mm de long. Elles sont pointues à une extrémité et ont une surface lisse et brillante. Les graines sont récoltées avant leur chute, qui se produit généralement à la fin de l'été ou au début de l'automne [6].

La tige du lin a une hauteur comprise entre 0,60 et 1,20 m, avec un diamètre de 1 à 3 mm. Les fibres de cette plante herbacée annuelle se distinguent par leur longueur significative, atteignant en moyenne 33 mm, et par leur diamètre de 20 à 76 μm , ce qui en fait un substitut potentiel du coton dans l'industrie textile. Elles présentent une résistance à la traction de 800 à 1500 MPA et un module de Young de 60 à 80 GPa, ce qui les rend adaptées à la fabrication de papiers spéciaux tels que le papier pour cigarettes ou le papier biblique. Le rendement des fibres de lin est supérieur à celui de la plupart des autres fibres végétales annuelles, avec parfois une production de deux tonnes par hectare et par an. Le lin est cultivé dans différentes régions du monde, notamment en Asie, en Europe et en Égypte [41].

*Figure I. 19: Fleur de lin et fibres de lin observées au microscope**Tableau I. 8: Données bibliographique sur les dimensions du lin [37].*

L (mm)	d (μm)	référence
4 - 77	5 - 76	[91]
30 - 80	8 - 21	[15]
9 - 70	5 - 38 (19)	[95]

I.8 Propriétés des fibres végétales

Les fibres végétales sont dotées par leurs propriétés uniques, parmi ces propriétés, on mentionne :

I.8.1 Propriété physiques des fibres végétales :

Elles varient selon la plante, son implantation géographique et son essence [41].

Tableau I. 9: Propriétés physiques de certaines fibres végétales.

Fibre	Longueur (mm)		Diamètre (μm)		L/d
	Intervalle	Valeur	Intervalle	Valeur	
Lin	4-80	33	5-76	19	1500
Jute	0,8-6	3	15-25	20	150
Chanvre	5-55	25	10-51	25	1000
Ramie	40-250	120	16-126	50	2400
Coton	15-56	18	12-25	20	900
Noix de coco	0,3-1	0,7	12-24	20	350

I.8.2 Propriété mécaniques des fibres végétales :

La variété des normes utilisées pour évaluer les propriétés mécaniques du lin peut introduire une certaine incertitude. Étant donné que ces plantes poussent dans de nombreuses régions du monde, différentes méthodes peuvent être utilisées pour les tests de traction, ce qui entraîne une dispersion importante des valeurs du module de Young ou de l'allongement, par exemple [41].

Tableau I. 10: Tableau comparatif entre les propriétés mécaniques des fibres naturelles et les fibres de renforcement conventionnelles [26].

Fibre	Densité (g/cm ³)	Allongement(%)	Résistance à la traction (Mpa)	Module de Young (Gpa)
Coton	1.5-1.6	7.0 - 8.0	287-597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5 - 1.8	393-773	26.5
Lin	1.5	2.7 - 3.2	345-1035	27.6
Chanvre	—	1.6	690	—
Ramie	—	3.6-3.8	400-938	61.4-128
Sisal	1.5	2.0 - 2.5	511-635	6.4-22.0
Coco	1.2	30.0	175	4.0-6.0
Verre E	2.5	2.5	2000-3500	70.0
Verre S	2.5	2.8	4570	86.0
Aramide	1.4	3.3 - 3.7	3000-3150	63.0-67.0
Carbone	1.4	1.4 - 1.8	4000	230.0-240.0

I.9 Avantages et inconvénients des fibres végétales

Tableau I. 11: Avantages et inconvénients des fibres végétales.

AVANTAGES	INCONVENIENTS
Faible coût.	Absorption d'eau.
Biodégradabilité.	Faible stabilité dimensionnelle.
Neutre pour l'émission de CO₂.	Mauvaise tenue en vieillissement.
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres.	Faible tenue thermique (200 à 230 °C max).
Pas de résidus après incinération.	Fibres anisotropes.
Ressource renouvelable.	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
Demande peu d'énergie pour être produite.	Pour des applications industrielles, demande la gestion d'un stock.
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité).	Renfort discontinu.
Bonne isolation thermique et acoustique.	--
Non abrasif pour les outillages.	--

I.10 L'utilisation des fibres végétales dans la construction

Les fibres de toutes natures sont largement utilisées dans diverses applications pour améliorer leurs performances mécaniques et physiques. L'utilisation de fibres végétales dans le renforcement des ciments est relativement récente. En effet, de nombreuses recherches sont en cours pour substituer les fibres d'amiante par des fibres végétales. Aujourd'hui, les fibres végétales sont de plus en plus utilisées dans la fabrication de dalles, de tuiles, de dallages de parking, ainsi que dans le renforcement du plâtre [46].

I.11 Répartition géographiques des fibres végétales

I.11.1 Dans le monde

La production mondiale annuelle de fibres végétales, excluant le coton (22 600 Kt) et le bois, est estimée à environ 6 200 Kt [27].

Environ la moitié de la production mondiale de fibres végétales, en dehors du coton et du bois, provient de la culture du jute et de ses fibres similaires et connexes.

Ensuite, les fibres les plus couramment utilisées sont le coco et le lin, représentant respectivement 16% et 13% de la production mondiale [FAO10]. De plus, il existe de nombreuses autres espèces végétales dont les fibres peuvent être extraites, telles que les tiges (chanvre, ramie, kenaf, bambou, etc.), les feuilles (sisal, abaca, agave, etc.) ou les graines (kapok, etc.) [27], [28].

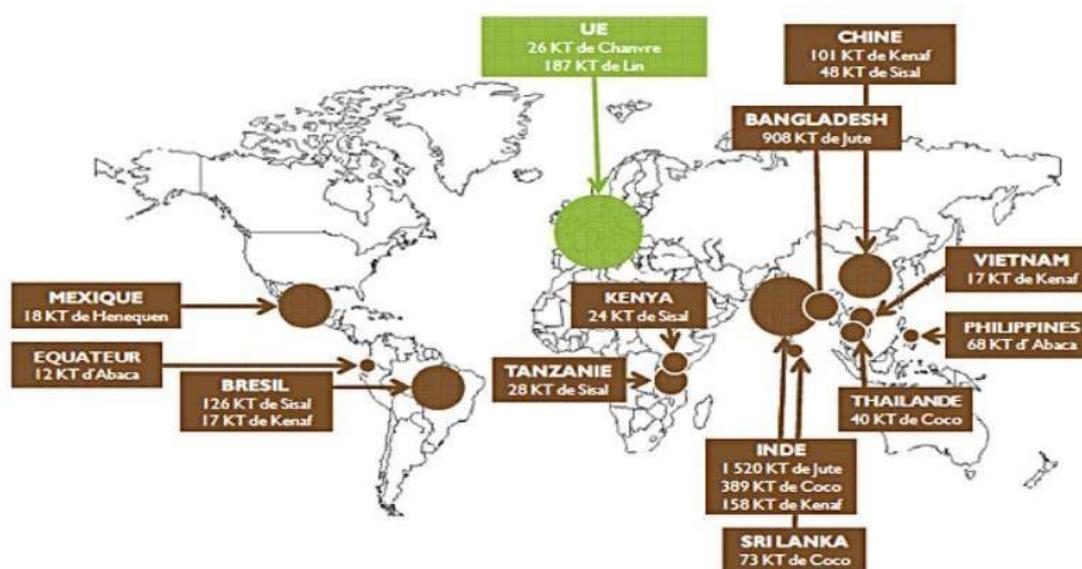


Figure I. 20: Répartition de la production mondiale de fibres végétales hors coton et bois [27]

I.11.2 En Algérie

L'Algérie dispose d'une quantité considérable de fibres végétales non exploitées qui représentent une ressource potentielle importante. Les fibres végétales sont présentes dans tout le pays, avec une concentration plus élevée dans les régions côtières par rapport aux zones intérieures [28].

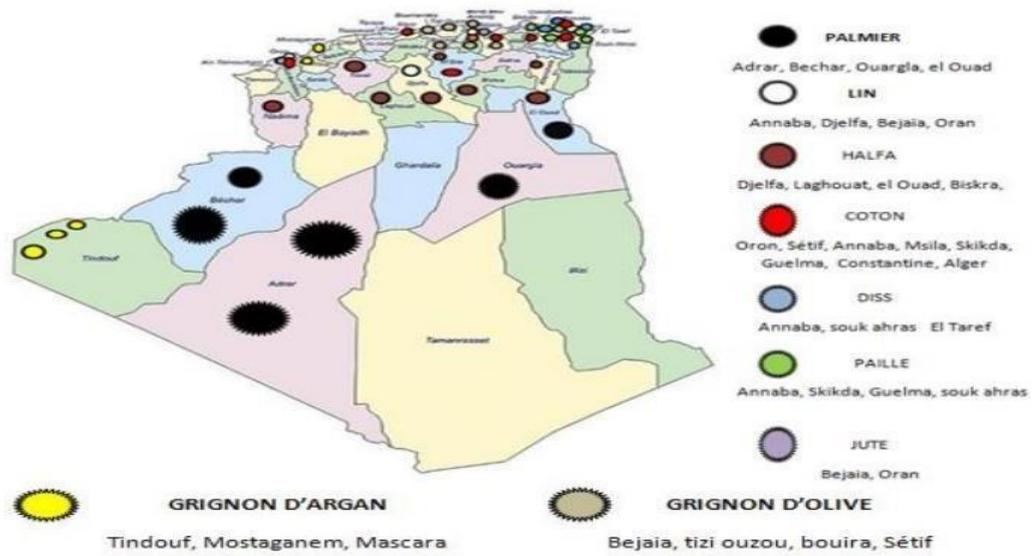


Figure I. 21: Différents gisement de fibres végétales en Algérie [27].

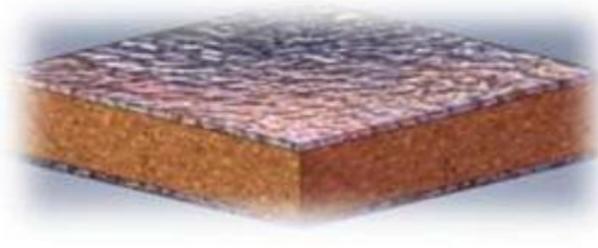
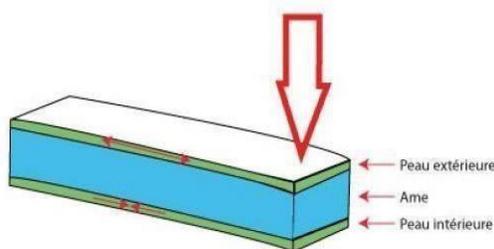
Chapitre II

**Généralités sur les panneaux
sandwich, matériaux et
méthodes élaborées**

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

II.1 Définition

Une structure sandwich résulte de l'assemblage par collage ou soudure de deux semelles ou peaux et d'un matériau d'âme. Les peaux sont de faibles épaisseurs et possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques (module élevé, grande résistance). Entre les deux peaux est intercalé un matériau d'âme de forte épaisseur et de faible densité. En gardant une distance constante entre les deux peaux, l'insertion de cette âme permet d'augmenter le moment d'inertie de la structure et, par conséquent, sa rigidité en flexion, tout en minimisant



la masse de l'ensemble [6].

Figure II. 1: Matériau composite sandwich

Le concept de structure sandwich remonte assez loin puisqu'un français, Doleau, en 1820, puis un anglais, Fairborn, en 1849, se sont intéressés aux avantages de structures constituées de deux membranes séparées par une certaine distance [6].

II.2 Constituants des panneaux sandwich

II.2.1 Peaux

La rigidité équivalente en flexion de la structure sandwich est contrôlée par la peau, qui doit résister à la traction et à la compression pour éviter la rupture. La peau est très fine par rapport au noyau. Le choix approprié de sa composition dépend essentiellement des propriétés recherchées de la structure sandwich. Pour les structures porteuses, la peau est généralement un stratifié de tôle (aluminium, acier, etc.) ou des empilements des couches de renforts imprégnées de résine thermodurcissable ou thermoplastique. Sinon, pour des applications semi-structurelles, du bois ou du contreplaqué peut également être utilisé pour la fabrication des peaux [6].

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

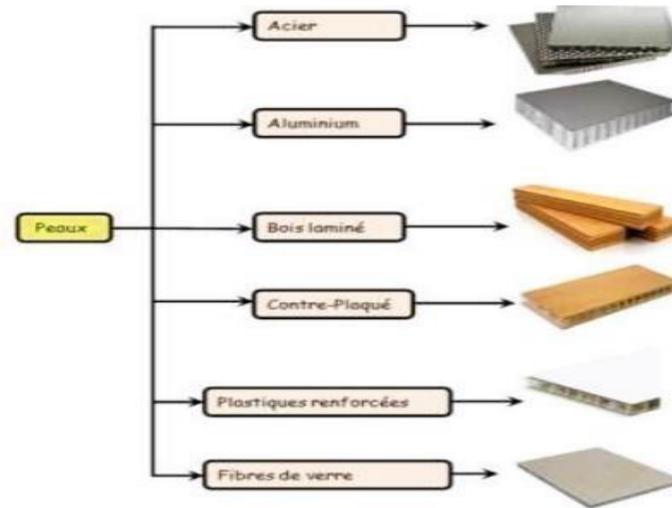
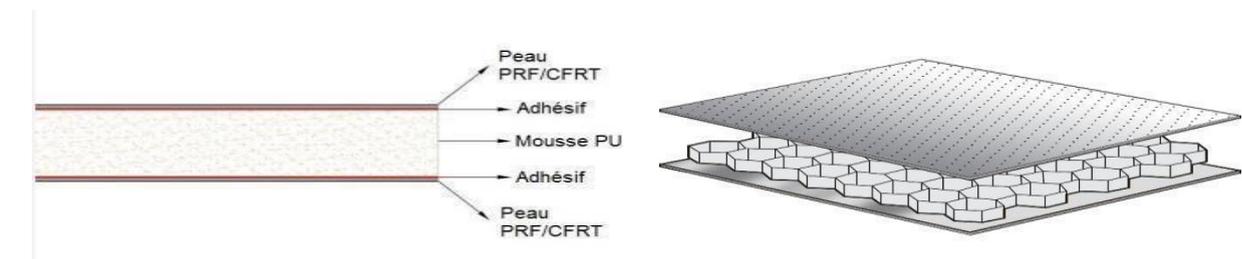


Figure II. 2: Matériaux pour les peaux

II.2.2 Ame

C'est l'élément central de la structure sandwich. Il se caractérise par sa faible masse et ses faibles propriétés mécaniques. Sa fonction principale est de supporter les efforts de compression et de cisaillement générés par le mouvement de glissement de la peau sous charge et de maintenir leur écartement. En effet, si l'épaisseur des panneaux n'est pas maintenue constante, il en résulte une diminution de la résistance des couches extérieures à la flexion. La forte épaisseur du noyau est conçue pour augmenter le moment d'inertie des



panneaux sans augmenter la densité [29].

A : Mousse en PU

B : Nid d'abeille

C : Bois en Balsa

Figure II. 3: Type des âmes des structures sandwich

II.2.3 Adhésifs

L'adhésif est un composant important dans un sandwich permettant un bon assemblage



Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

de la structure et une bonne transmission des contraintes d'un milieu à l'autre. Sa principale caractéristique est la résistance au cisaillement. La liaison âme / peaux est de deux types, la première est le collage direct de la résine pour les balsas ou mousse / polyesters, le deuxième collage par un film de colle pour les composite métal/nid d'abeille. Dans le cas de peaux en composite, l'insertion de cette troisième phase peut être évité par l'utilisation d'une résine auto-adhésive [17], [29].

II.3 Techniques d'assemblage des panneaux sandwich

Il existe différentes techniques d'assemblage des panneaux sandwich, en fonction des matériaux utilisés, de l'application et des exigences de performance. Voici quelques-unes des techniques d'assemblage courantes [29] :

- 1- **Collage** : cette technique consiste à coller les couches de revêtement sur l'âme centrale en utilisant une colle spécifique. Cette méthode est largement utilisée dans l'industrie aéronautique et spatiale, ainsi que dans l'industrie de la construction. Le collage offre une résistance élevée et une bonne étanchéité.
- 2- **Rivetage** : cette technique consiste à utiliser des rivets pour fixer les couches de revêtement sur l'âme centrale. Cette méthode est couramment utilisée dans l'industrie navale et automobile. Le rivetage offre une grande résistance mécanique, mais peut entraîner des points faibles en raison de la perforation des couches de revêtement.
- 3- **Soudage** : cette technique consiste à souder les couches de revêtement sur l'âme centrale en utilisant différents types de soudure, tels que la soudure par friction, la soudure ultrasonique ou la soudure par induction. Cette méthode est couramment utilisée dans l'industrie automobile et des équipements de communication. Le soudage offre une grande résistance et une bonne étanchéité.
- 4- **Fixation mécanique** : cette technique consiste à utiliser des vis, des boulons ou des écrous pour fixer les couches de revêtement sur l'âme centrale. Cette méthode est couramment utilisée dans l'industrie de la construction. La fixation mécanique offre une grande résistance, mais peut entraîner des points faibles en raison de la perforation des couches de revêtement.

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

II.4 Domaine d'utilisation

A l'égard de leur combinaison unique de légèreté, de résistance, rigidité et leurs bons comportements vis-à-vis de différentes sollicitations, les structures sandwiches envahissent plusieurs domaines, notamment le transport. Quelques technologies Récentes basées sur des structures sandwiches sont citées ci-dessous :

En industrie automobile, Volkswagen fabrique les planchers de chargement du Tiguan en peaux renforcées en mats de fibres de verre et en âme à nid d'abeilles en carton, le tout pour moins de 3 kg/m². Telle structure a favorisé une baisse de poids allant jusqu'à 80% par rapport aux planchers fabriqués en matériaux conventionnels tels que le bois et les tôles métalliques. Également, BMW a développé un concept de module de toit avec la même structure qui a permis de réduire la masse de 25% par rapport aux modules de toit conventionnels en acier [6].

L'utilisation de panneaux sandwich est également largement utilisée dans l'industrie de la construction et ils sont couramment utilisés pour les murs, les plafonds et les sols des bâtiments en raison de leur capacité à fournir une isolation thermique et acoustique, ainsi qu'une résistance aux chocs et aux charges et une bonne résistance à la corrosion. Ils permettent également une installation rapide car ils sont conçus pour être installés directement sur le sol en béton d'un bâtiment [31].

II.5 Rôle et avantages des panneaux sandwich

- **Installation rapide et facile** : Contrairement aux systèmes traditionnels, les panneaux sandwich fabriqués en ligne continue sont entièrement compatibles et prêts à assembler avec des pièces préparées selon les dimensions requises, les types d'isolation et les couleurs basées sur la structure de votre installation, avec les processus d'ingénierie et de contrôle de qualité effectués au préalable à l'usine [30].
- **Isolation thermique et acoustique parfaite** : L'utilisation de panneaux sandwich pour l'isolation thermique permet de prévenir les problèmes liés à la condensation et aux variations de chaleur, garantissant ainsi la solidité et la durabilité de notre bâtiment. L'épaisseur du matériau isolant dans ces panneaux varie en fonction de la capacité de charge requise, des conditions régionales, de l'objectif d'utilisation de la construction et des exigences en termes d'isolation thermique. [30].

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

- **Economie et Investissement** : Dans de nombreux types de bâtiments, vous pouvez économiser sur le temps de construction et d'installation en sélectionnant le panneau sandwich approprié. Grâce à sa fonctionnalité de montage facile, vous pouvez effectuer de travaux d'agrandissement et de rénovation sans interrompre les activités quotidiennes dans la construction. En outre, les panneaux sont à la fois économiques et pratiques car ils peuvent être démontés et réutilisés [30].
- **Une excellente résistance à l'humidité** : Les panneaux sandwich utilisés à l'extérieur sont traités avec un revêtement de haute qualité pour les protéger de l'eau. Les matériaux isolants utilisés dans ces panneaux, tels que la mousse polyuréthane rigide (PIR) ou le poly-isocyanurate, sont généralement conçus pour résister à l'eau [34].

II.6 Matériaux, Méthodes d'élaboration

Dans cette section, notre attention se porte principalement sur la description des divers matériaux utilisés dans cette étude. Nous commençons par introduire le matériau de l'âme, qui est du liège aggloméré blanc fabriqué en Algérie par la société liège Taliza. Ensuite, nous présentons les matériaux constituant la peau de la structure sandwich, à savoir la résine époxy et la fibre de lin. Par la suite, nous abordons les méthodes utilisées pour la fabrication des composites stratifiés et des structures sandwich. Enfin, nous décrivons les méthodes de caractérisation de la structure sandwich et de ses composants.

II.6.1 Matériaux

II.6.1.1 Fibre de lin

Dans cette étude, nous avons utilisés des matériaux composites à base de fibre de lin non



tissées.

Figure II. 4: les fibres utilisées dans notre matériau composite

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

II.6.1.2 Liège

Dans le Cadre de cette étude le matériau de l'âme qui a été utilisé est le liège aggloméré de moyenne densité.

➤ Présentation du liège aggloméré

Le liège aggloméré offre une alternative intéressante en tant qu'âme pour les structures sandwich. C'est un matériau polyvalent et respectueux de l'environnement largement utilisé dans l'industrie de la construction et de la décoration. Il est fabriqué en broyant les chutes de liège, les granulés ou les copeaux provenant de la production de bouchons de liège ou d'autres industries connexes. Ces particules de liège sont ensuite mélangées à des résines ou des adhésifs écologiques, puis comprimées et chauffées pour former des panneaux de liège solides. Cette méthode de fabrication permet de valoriser les déchets de liège, contribuant ainsi à une utilisation plus durable des ressources [39], [40].

Le processus de transformation du liège naturel est réalisé par l'Entreprise Nationale des lièges, connue sous le nom de "Taleza Lièges", située à l'Est de l'Algérie. Cette entreprise fabrique des panneaux de liège aggloméré de couleur blanche, avec une densité moyenne, utilisant des granulés de différentes tailles (1 à 2 mm, 2 à 3 mm, 3 à 5 mm). Les panneaux sont disponibles dans une gamme d'épaisseurs allant de 2 mm à 30 mm, en fonction de leurs applications industrielles. Dans cette étude, nous avons utilisé le liège aggloméré de densité moyenne avec des granulés de 3 à 5 mm [6].

Le liège aggloméré est également un matériau respectueux de l'environnement, un matériau naturel, renouvelable et recyclable doté d'incroyables propriétés absolument uniques et polyvalentes [39].

Il offre une combinaison remarquable de légèreté en fait un matériau facile à manipuler, cela en fait un matériau apprécié dans les applications où la légèreté est essentielle, comme les revêtements de sol ou les panneaux d'affichage. Le liège aggloméré offre une excellente isolation thermique et acoustique. Grâce à sa structure cellulaire unique, cette matière aide à maintenir une température stable et à réduire les transferts de chaleur à travers les surfaces, elle agit également comme un isolant acoustique efficace en absorbant les vibrations sonores et en réduisant la transmission du bruit.

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées



Figure II. 5: Lièges agglomérés de moyenne densité, granulé 3 à 5 mm

Tableau II. 1: Caractéristiques de liège aggloméré blanc de moyenne.

Masse volumique	180 à 270 kg/m ³
Dimension de granulé utilisé	3 à 5 mm
Allongement	5%
Comportement aux rayons solaires	Léger jaunissement après une année d'exposition,
Résistance aux acides	Après une heure dans l'acide chlorhydrique concentré de 201.19 gr/litre : aucune désagrégation de l'aggloméré.
Résistance à l'eau bouillante durant trois heures	Aucune désagrégation
Effet d'isolation :	Isolation thermique et phonique
Résistance au feu	Brûle difficilement

II.6.1.3 Résine Epoxy

La résine époxy utilisée dans cette étude est un mélange d'époxyde insaturé orthophtalique et de styrène dilué. Elle est fournie par l'usine LORN Chemicals Algérie, située à RN5 Aomar Gare, Bouira, Algérie. Cette résine présente une réactivité modérée et une faible viscosité.

On obtient cette résine en mélangeant de vernis époxy avec un durcisseur, ce mélange se fait selon les normes et les proportions exigées par le fabricant (LORN).

Tableau II. 2: Caractéristique technique de résine époxy [6]

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

Propriétés	Vernis époxy	Durcisseurs
Couleur	transparent	Paille
Densité (g/cm ³)	1.21	1.05
Viscosité à 25 C° (mg/cm s)	77.7	4000
Temps de vie à 25 C° et sans ouverture du conteneur (mois)	12	12

Tableau II. 3: Propriétés mécanique de la résine époxy utilisée [6].

Propriétés	Valeur	Unité
Dureté Barcol	30	---
Résistance à la flexion	60	MPa
Module d'élasticité en flexion	1500	MPa
Résistance à la traction	30	MPa
Module d'élasticité en traction	1500	MPa
Allongement à la rupture	20	%
Teneur en styrène	37	%
Stabilité à 65°	06	jour
Temps de gel à 25°C	11	minute
Teneur en styrène	37	%

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

II.6.2 Méthode d'élaboration

II.6.2.1 Traitement des fibres de lin par L'hydroxyde de sodium (NaOH)

Le processus de mercerisage, qui est largement utilisé, est l'un des traitements chimiques les plus courants. Il engendre une modification significative en perturbant les liaisons d'hydrogène et en pénétrant dans la structure de la fibre, ce qui entraîne une augmentation de la rugosité de sa surface. Ce traitement permet également l'élimination d'une quantité variable de lignine, de cire et d'huile qui se trouvent à la surface externe de la paroi cellulaire de la fibre [47].

Nous avons effectué un traitement chimique sur la fibre. Le traitement chimique se fait par l'immersion de ces fibres dans des solutions (NaOH) avec 0.5% et 1% de concentration pendant 24 heures à la température ambiante, puis, elles sont été rincées à l'eau. Enfin , séchées à l'air libre.



Figure II. 6: Traitement des fibres dans le NaOH (0.5% ,1%)

Une fois les fibres sont séchées, on les prépare sous formes des couches pour but de faciliter l'application de la matrice, ainsi pour fabriquer un matériau composite selon les critères souhaités.

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées



Figure II. 7: Les couches de fibres de lin

II.6.2.2 Préparation de la matrice

Les proportions exigées sont : 100 grammes de résine époxy vaut 65 vernis époxy avec 35 gramme du durcisseur.



Figure II. 8: Préparation de la résine époxy

Matériaux et produits utilisés	Outils
<ul style="list-style-type: none">- La résine- La cire : agent de démoulage- Les fibres de lin- Durcisseur- Acétone	<ul style="list-style-type: none">- Un pinceau- Une balance- Un chiffon doux

Toutes les éprouvettes ont été réalisées au niveau de laboratoire de LORN Chemicals.

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

II.6.2.3 Préparation des éprouvettes

➤ Elaboration des éprouvettes de résine époxy

Les échantillons de résine sont réalisés à l'aide de moules métalliques spécialement conçus pour la réalisation d'échantillons à base de résine aux dimensions en forme d'haltère selon la norme NF EN ISO 527-4 Type 2, comme indiqué dans la figure et le tableau :

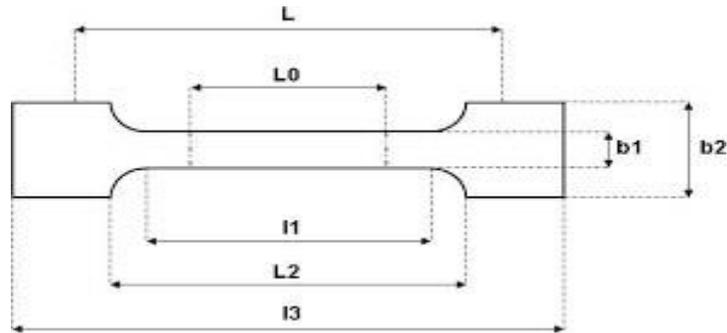


Figure II. 9: Eprouvette sous forme haltère

- L_0 : Longueur de référence
- L : Ecartement entre outillage
- L_2 : Ecartement entre les parties parallèles larges
- l_1 : Longueur de la partie calibrée étroite
- l_3 : Longueur totale
- b_1 : Longueur dans la zone de la longueur de référence
- b_2 : Largeur dans la zone d'épaulement
- h : Epaisseur de l'éprouvette.

Tableau II. 4: Les dimensions des éprouvettes haltères selon la norme NF EN ISO 527-4 [4]

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

Symboles	Les différentes dimensions	Les valeurs en « mm »
L3	Longueur totale	≥ 150
L1	Longueur de la partie étroite parallèle	$60 \pm 0,5$
R	Rayon	≥ 60
b ₂	Largeur aux extrémités	$20 \pm 0,2$
b ₂	Largeur de la partie étroite	$10 \pm 0,2$
h	Epaisseur	2 à 10
L ₀	Longueur de référence	$50 \pm 0,5$
L	Distance initiale entre mors	0,5 à 2

- Pour chaque éprouvette de résine époxy sous forme haltère, on mélange 20 grammes 36 Vernis avec 11 grammes du durcisseur.
- On agite pendant 3 à 5min pour assurer l'élimination totale des bulles d'air.
- Après la préparation du mélange, il ne faut pas tarder à l'utiliser car la durée de réticulation de ce dernier est courte.

On commence par nettoyer les éprouvettes sous forme haltère à l'aide d'un coton sèche, ensuite, on applique une couche de cire soigneusement en allant dans tous les coins (le cirage doit être effectué trois fois pour assurer le démoulage parfait de l'éprouvette). Après séchage, on verse une quantité de résine déjà préparée dans le moule jusqu'à qu'il soit rempli. Le



démoulage se fait après huit heures (08) de séchage.

Figure II. 10: Eprouvettes de résine et éprouvette de résine séchées.

➤ Elaboration du stratifié

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

Pour but de préparer notre stratifié qui se compose de renfort (fibre de lin) et une matrice (résine époxy). On commence par préparer notre matrice selon les proportions exigées par le fabricant : pour chaque éprouvette de stratifié sous forme haltère, on mélange 80 grammes de vernis avec 43 gramme du durcisseur. Ensuite. On nettoie le moule en utilisant un coton sèche et puis on applique soigneusement la cire en allant dans tous les coins. Après séchage on verse une quantité de résine et on l'étale sur toute la surface du moule et on commence à disposer les fibres de lin selon l'orientation voulu jusqu'à l'obtention de l'épaisseur et le nombre souhaités.

On obtient deux séries avec deux variantes pour chacune

Série A : Concentration 1%.

Série B : Concentration 0.5%.

Variante 1 : Orientation 0 degré

Variante 2 : Orientation 0/90 degré

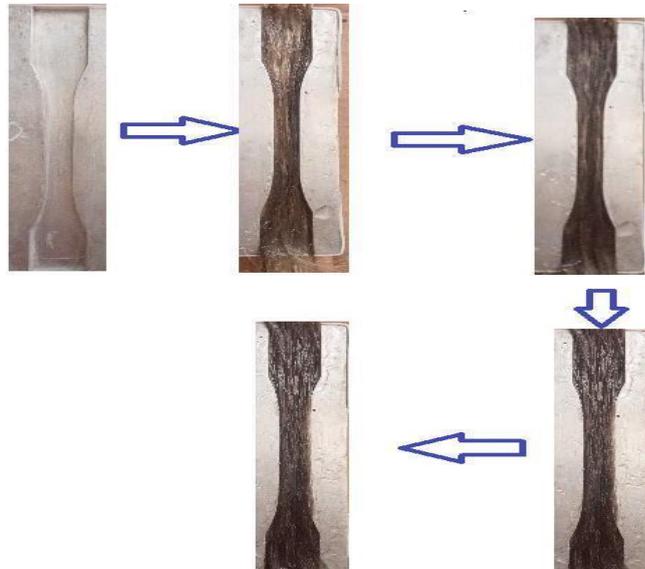


Figure II. 11: Elaboration des stratifiés d'orientation 0° (1% et 0.5%)



Figure II. 12: Elaboration des stratifiés d'orientation 0°/90° (1% et 0.5%)



Figure II. 13: Eprouvettes de stratifiés après séchage

➤ **Elaboration des panneaux sandwich**

Le choix de la technique de fabrication des panneaux sandwich dépend de plusieurs facteurs tels que les caractéristiques mécaniques, la géométrie du produit et l'importance des séries, ce qui influe sur la qualité et les propriétés de produit obtenue [4].

Dans ce travail, nous avons utilisés une technique de fabrication manuelle qui est le moulage en contact.

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

❖ Moulage en contact

Sur une plaque de liège, on verse une quantité de résine (pour chaque stratifié on mélange 600 gramme de vernis avec 323 gramme du durcisseur) ensuite , on commence à déposer sur la couche de résine un pli de fibre de lin et on ajoute une couche de résine et puis un pli de fibre et on répète l'opération jusqu'à obtenir l'épaisseur et le nombre des plaques voulu. La résine doit déborder de la plaque.

A la fin de chaque opération, on recouvre la surface avec un papier cellophane et on compacte pour éliminer les bulles d'air, enfin on presse à l'aide des charges.

On répète l'opération sur l'autre côté de la plaque du liège.



Figure II. 14: Elaboration des panneaux sandwich

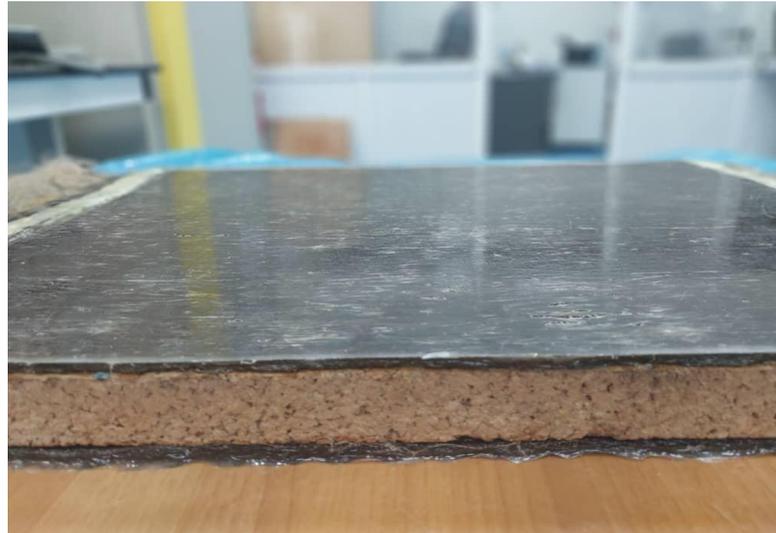


Figure II. 15: Panneaux sandwich après séchage.

Le démoulage se fait après huit heures, une fois la plaque durcie, on enlève les charges, puis on découpe les plaques en éprouvettes normalisées à l'aide d'une la scie circulaire diamantée pour obtenir les dimensions.



Figure II. 16: Des structures sandwich

II.6.3 Méthode de caractérisation

II.6.3.1 Essai de traction

Le principe de l'essai consiste à étirer une éprouvette le long de son axe principal à une vitesse constante à la température ambiante jusqu'à sa rupture.

Les essais de traction sur les fibres ont été réalisés au laboratoire de Boumerdas à l'aide d'une machine universelle Zwick Z010, fonctionnant à une vitesse de déplacement de 2,5 mm/min. Les échantillons de test, sous forme de spécimens normalisés en forme d'haltère, ont été soumis à des essais de traction en lots de 20. Le processus d'essai était piloté par un

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

logiciel qui permettait la collecte des paramètres d'essai, l'acquisition des données et leur traitement ultérieur.



Figure II. 17: Machine de traction Zwick Z010



Figure II. 18: Eprouvette avant l'essai.

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

Lors de l'essai, plusieurs paramètres sont mesurés, notamment la contrainte maximale, la déformation et le module de Young. Ces valeurs sont déterminées à partir des courbes contrainte-déformation obtenues pour chaque série d'essais.

Le module de Young s'exprime :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \text{ (N/mm)}$$

Avec

E : Module d'élasticité

σ : La contrainte

ε : La déformation

La contrainte à la rupture est donnée par l'expression :

$$\sigma_r = \frac{F}{S} \text{ (N/mm}^2\text{)}$$

F : La charge supportée par l'éprouvette

S : Surface de l'éprouvette

L'allongement à la rupture est indiqué en pourcentage sous la forme suivante :

$$\Delta l = l - l_0$$

Déformation à la rupture :

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

l_0 : Longueur initiale de l'éprouvette

l : Longueur finale de l'éprouvette

II.6.3.2 Essai de Flexion trois point

L'essai de flexion à trois points est une méthode largement utilisée pour évaluer les caractéristiques mécaniques de divers matériaux, notamment les composites. Cette méthode consiste à appliquer une charge sur une section spécifique d'un échantillon afin de mesurer sa résistance à la flexion.

Chapitre II Généralités sur les panneaux sandwich, matériaux et méthodes élaborées

Cette essai implique de placer notre éprouvette entre deux supports fixes, appelés appuis, et d'appliquer une force de flexion à une certaine distance de ces appuis, à l'aide d'un dispositif de chargement. La configuration typique comprend un support central appelé l'appui de charge, où la force est appliquée, et deux appuis extérieurs où l'échantillon est soutenu.

Les principaux paramètres mesurés lors de l'essai comprennent la contrainte maximale, la déformation maximale, la rigidité du matériau et la résistance à la flexion. Ces informations permettent d'évaluer les propriétés mécaniques du matériau.

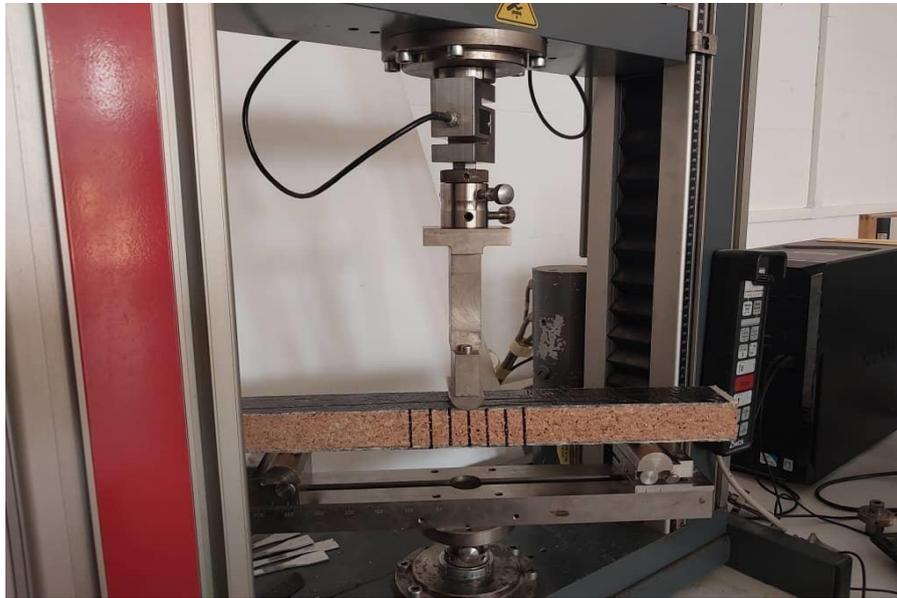


Figure II. 19: Eprouvette avant l'essai de flexion 3 points

II.6.3.3 Essai de flexion quatre points :

L'essai de flexion à quatre points est une méthode couramment utilisée en essais mécaniques pour évaluer les caractéristiques de flexion et de résistance des matériaux. Il s'agit d'une variation de l'essai de flexion à trois points, mais avec l'ajout de deux points de charge supplémentaires.



Figure II. 20: Eprouvette avant l'essai de flexion 4 points.

Chapitre III

Résultats et interprétation

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, on introduit les différents résultats obtenus à partir des essais effectués sur les éprouvettes.

III.2 Résultats

III.2.1 Essai de traction

Les essais de traction ont été réalisés afin de déterminer la résistance des éprouvettes vis-à-vis des forces de traction dans les deux cas :

- Dans le cas d'éprouvettes avec le pourcentage de NaOH égale à 1% dans deux orientations 0° et 0° - 90° .
- Dans le cas des éprouvettes avec le pourcentage de NaOH égale à 0.5% dans deux orientations 0° et 0° - 90° .

Ainsi que, l'essai nous permet de déterminer le module d'élasticité, la contrainte et la déformation.

Les stratifiés et matrices pour les deux séries, voici les résultats obtenus :



Figure III. 1: Eprouvette après la traction.

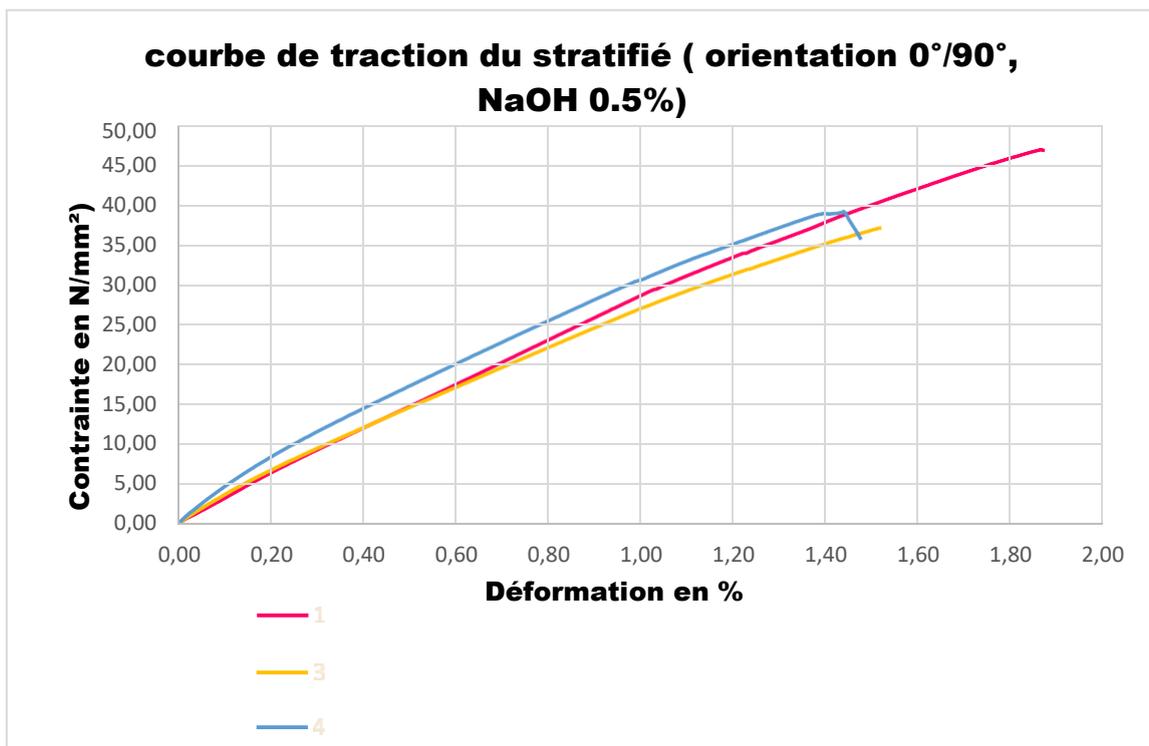


Figure III. 2: Courbe de traction sur le stratifié (orientation 0°-90°) avec concentration de NaOH égale à 0.5%

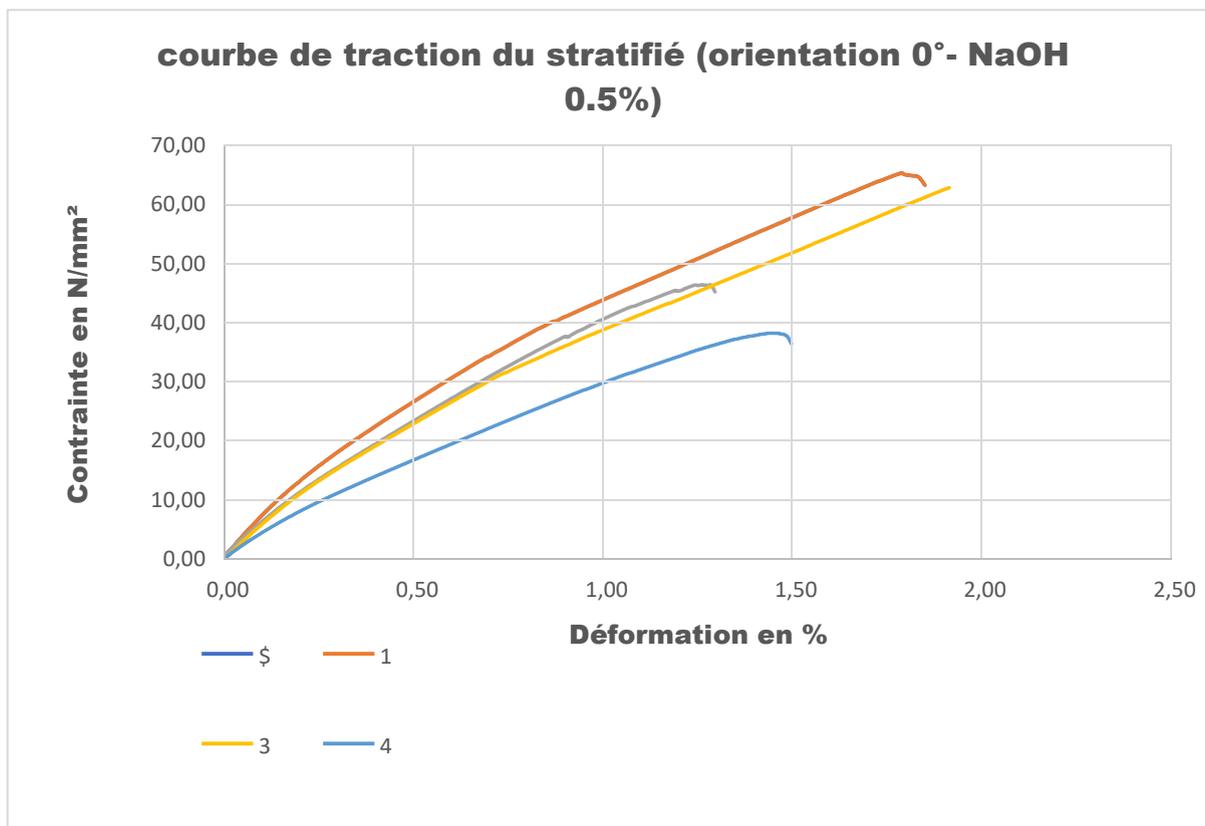


Figure III. 3: Courbe de traction du le stratifié (orientation 0°) avec une concentration de NaOH égale à 0.5%.

III.2.1.1 Interprétation de résultats

La figure 45 et 46 représentent des courbes de traction sur les stratifié orienté selon deux direction 0° et 90° en premier lieu et orientation 0° en deuxième lieu avec une concentration de NaOH égale à 0.5%.

- 1- Concernant les échantillons, il est observé que les courbes présentent une phase de déformation élastique, avec un comportement linéaire de toutes les éprouvettes jusqu'à la rupture. Cela indique que le stratifié composé de fibres de lin et de résine époxy présente une rupture fragile.
- 2- En remarque que certains stratifiés présente une faible résistance à la traction malgré que tous les stratifiés ont été réalisés sous les mêmes conditions en utilisant les même matériaux (série 4 et 3 figure III. 2, série 2 et 4 figure III. 3, série 4 figure III. 4, série 3 figure III.5) contrairement ou autre stratifiés qui ont présenté une bonne résistance, cela revient à la distribution non uniforme du renfort ce qui a diminué la résistance et a causé une rupture dans les zones pauvres du renfort.
- 3- On constate que la contrainte maximale du stratifié orienté à 0° est légèrement supérieure à la contrainte maximale du stratifié orienté selon deux direction, cette différence peut être expliquée par l'anisotropie du matériau.

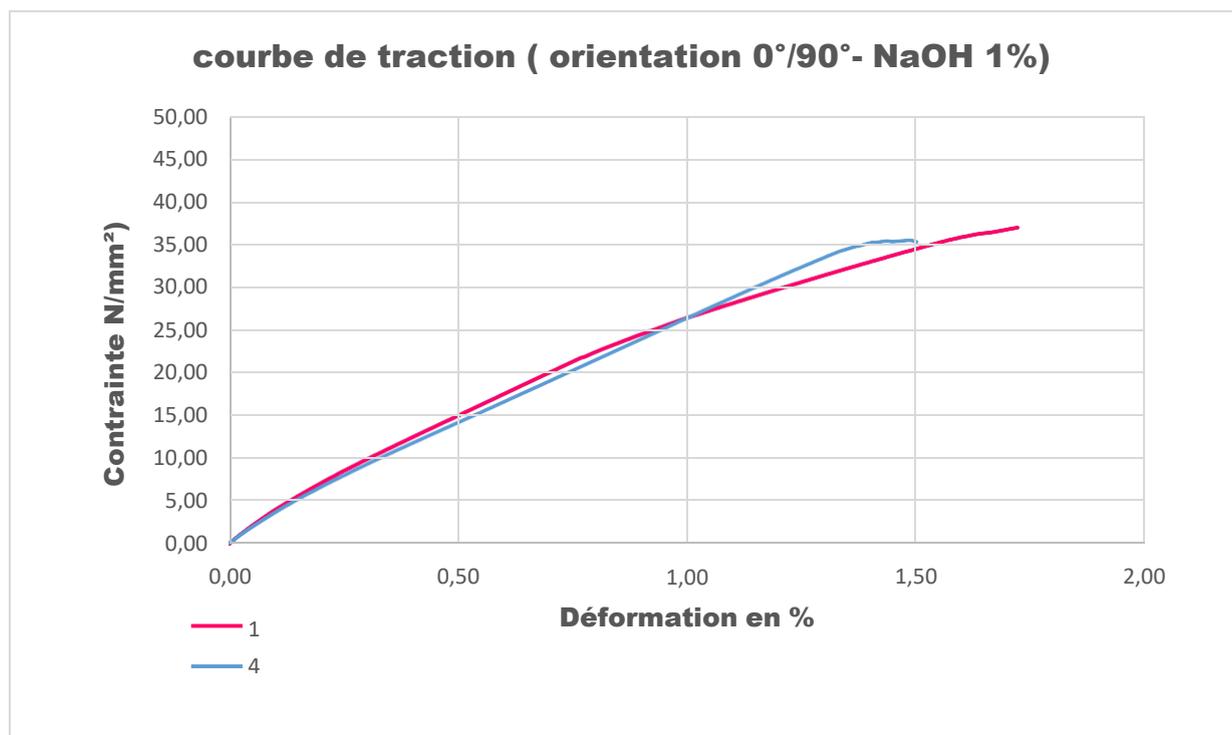


Figure III. 4: Courbe de traction du stratifié (orientation 0-90) avec concentration de NaOH égale à 1%.

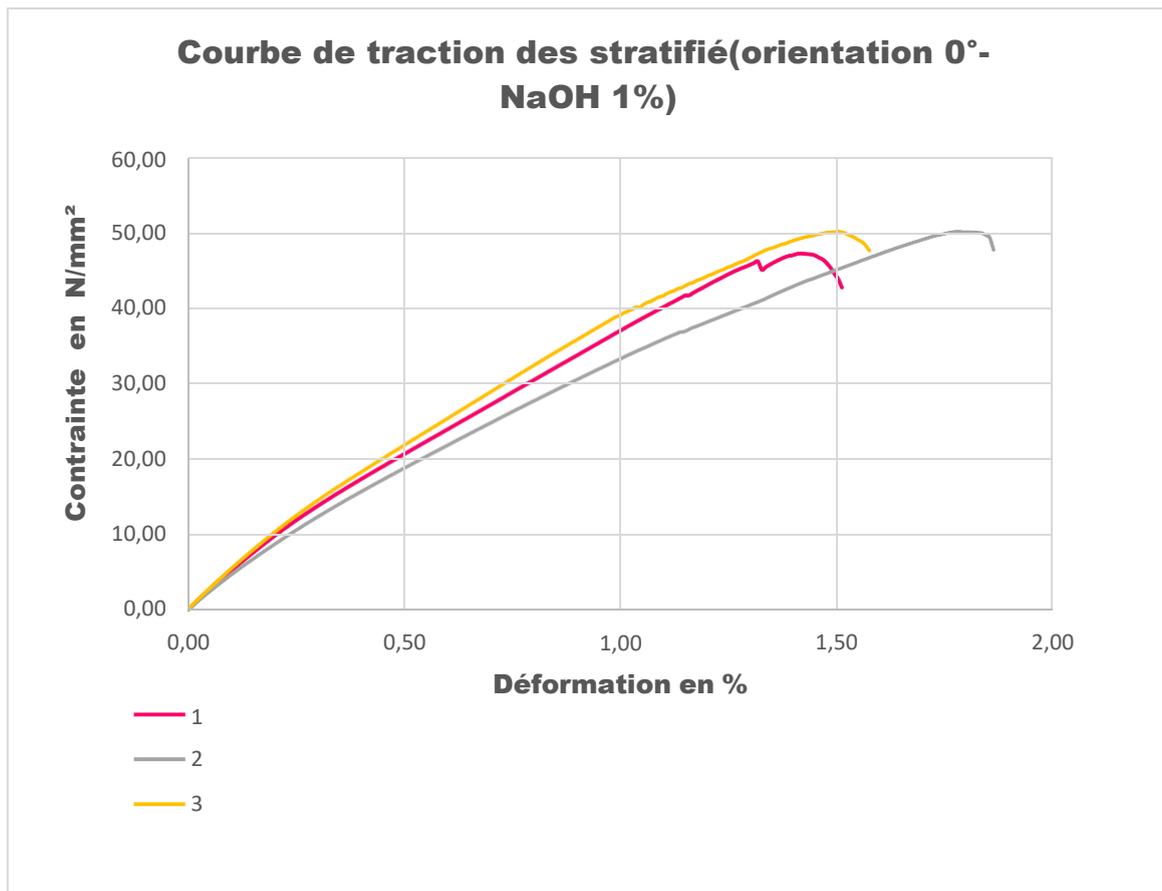


Figure III. 5: Courbe de traction du stratifié (orientation 0°) avec concentration du NaOH égale à 1%.

En terme de résistance, on observe que le stratifié renforcé par des fibres avec une concentration de NaOH de 0,5% présente une résistance supérieure à celle du stratifié renforcé par des fibres avec une concentration de NaOH de 1%. Cette différence peut être expliquée par l'élimination d'une quantité importante de lignine et de cire qui recouvre la surface externe des fibres de lin. Ces composants contribuent à la résistance et à la rigidité des fibres de lin, donc leur élimination a impacté le comportement mécanique du renfort.

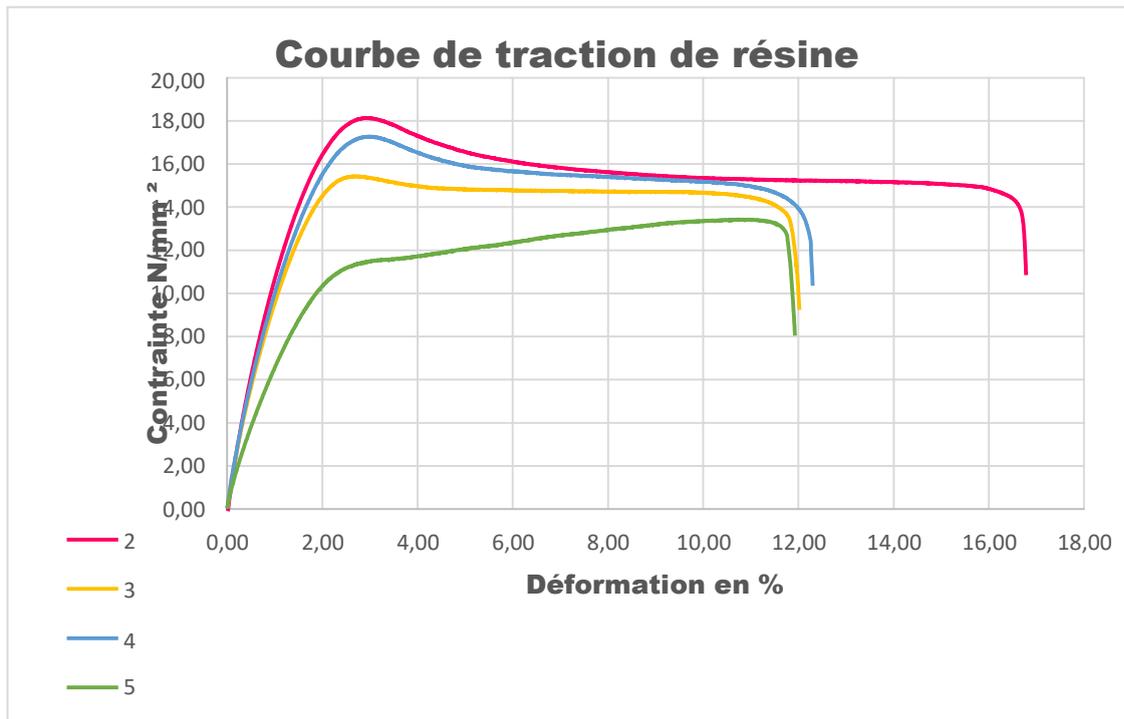


Figure III. 6: Courbe de traction de la matrice.

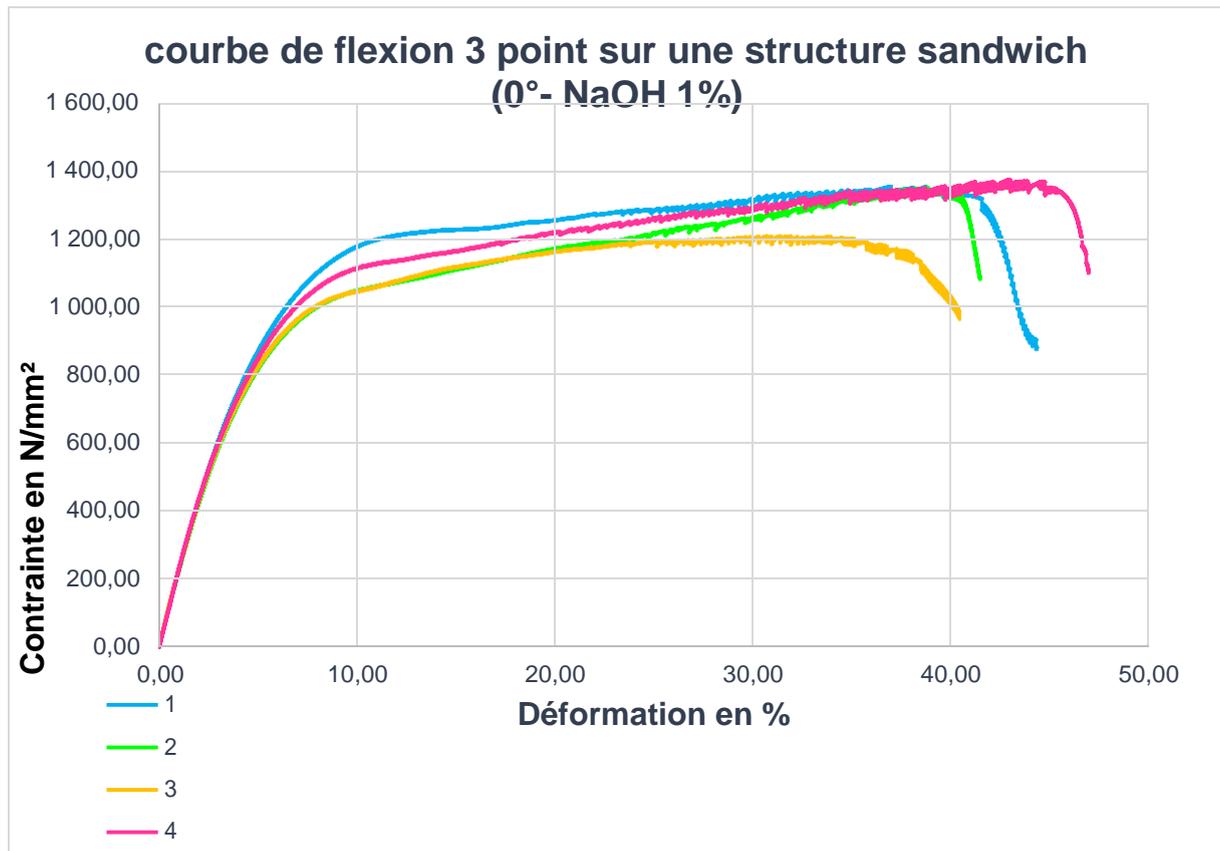
La figure 3.6 représente une courbe de traction de résine époxy, on constate que le comportement mécanique similaire pour toutes les éprouvettes mises à la traction, donc, on déduit que la résine époxy utilisée présente une bonne homogénéité.

III.2.1.2 Essai de flexion 3 point

Les essais de flexion 3 point ont été réalisés afin de déterminer la résistance des structures sandwich vis-à-vis les forces de flexion dans les deux cas :

- Dans le cas des panneaux sandwich avec le pourcentage de NaOH égale à 1% dans deux orientations 0° et 0°-90°.
- Dans le cas des panneaux sandwich avec le pourcentage de NaOH égale à 0.5% dans deux orientations 0° et 0°-90°.



Figure III. 7: Eprouvette après l'essai de flexion 3 point.*Figure III. 8: Courbe de flexion 3 point sur une structure sandwich (0° - NaOH 1%)*

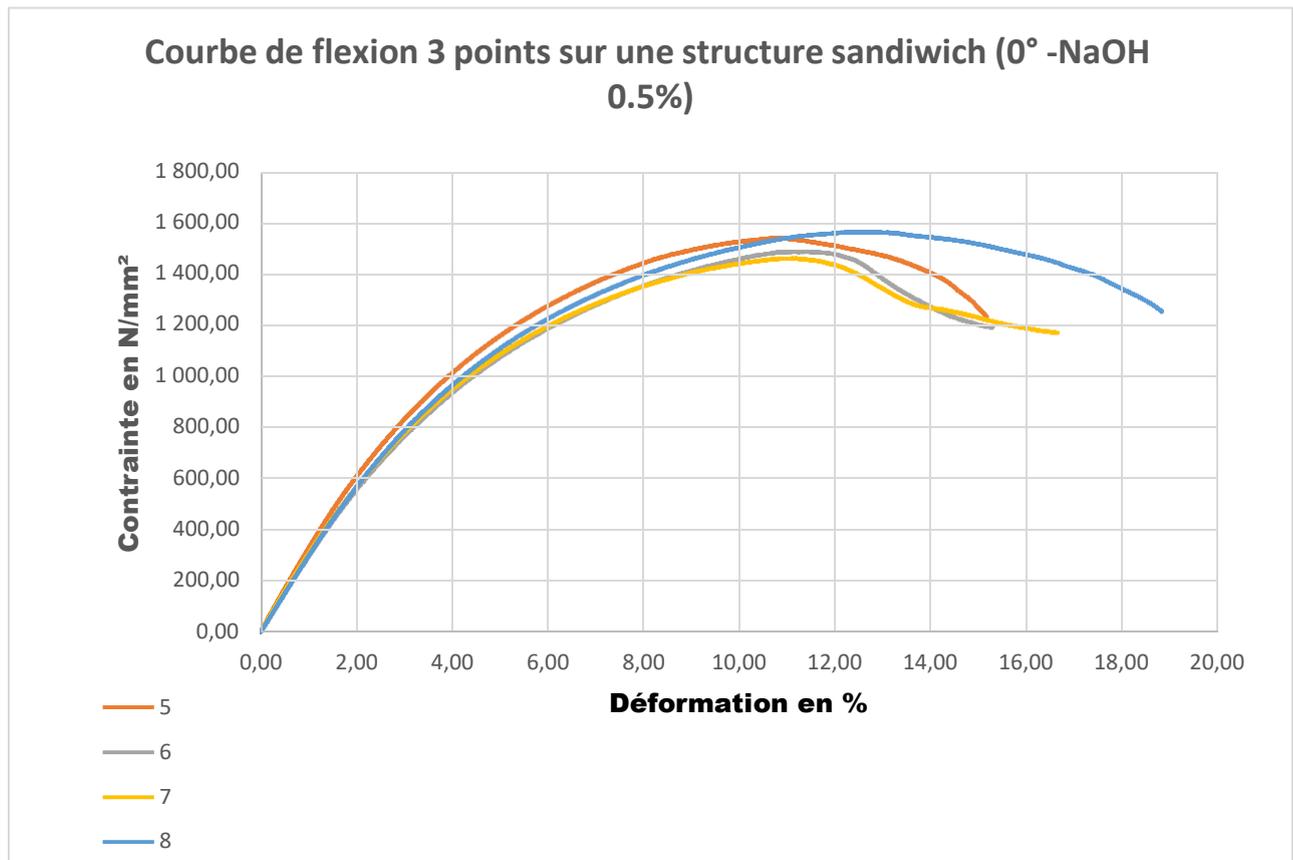


Figure III. 9: Courbe de flexion 3 point sur une structure sandwich (0° - NaOH 0.5%).

III.2.1.3 Interprétation des résultats

La figure 3.7 présente un essai sur un panneau sandwich sous les forces de flexion, où on voit une fissuration au niveau de l'âme due au force du cisaillement, alors que on voit aucune trace de fissuration au niveau des peaux, ce qui signifie la résine époxy renforcée par les fibres de lin qui compose les peaux du la structure travaille très bien à la flexion.

Il est observé que la contrainte maximale des structures sandwich présentant une concentration de NaOH de 0,5% est supérieure à celle des structures sandwich avec une concentration de NaOH de 1%.

III.2.1.4 Essai de flexion 3 point

Les essais de flexion 3 points ont été réalisés afin de déterminer la résistance des structures sandwich vis-à-vis les forces de flexion dans les deux cas:

- Dans le cas des panneaux sandwich avec le pourcentage de NaOH égale à 1% dans deux orientations 0° et 0° - 90° .
- Dans le cas des panneaux sandwich avec le pourcentage de NaOH égale à 0.5% dans deux orientations 0° et 0° - 90° .



Figure III. 10: Eprouvettes après l'essai de flexion 4 points.

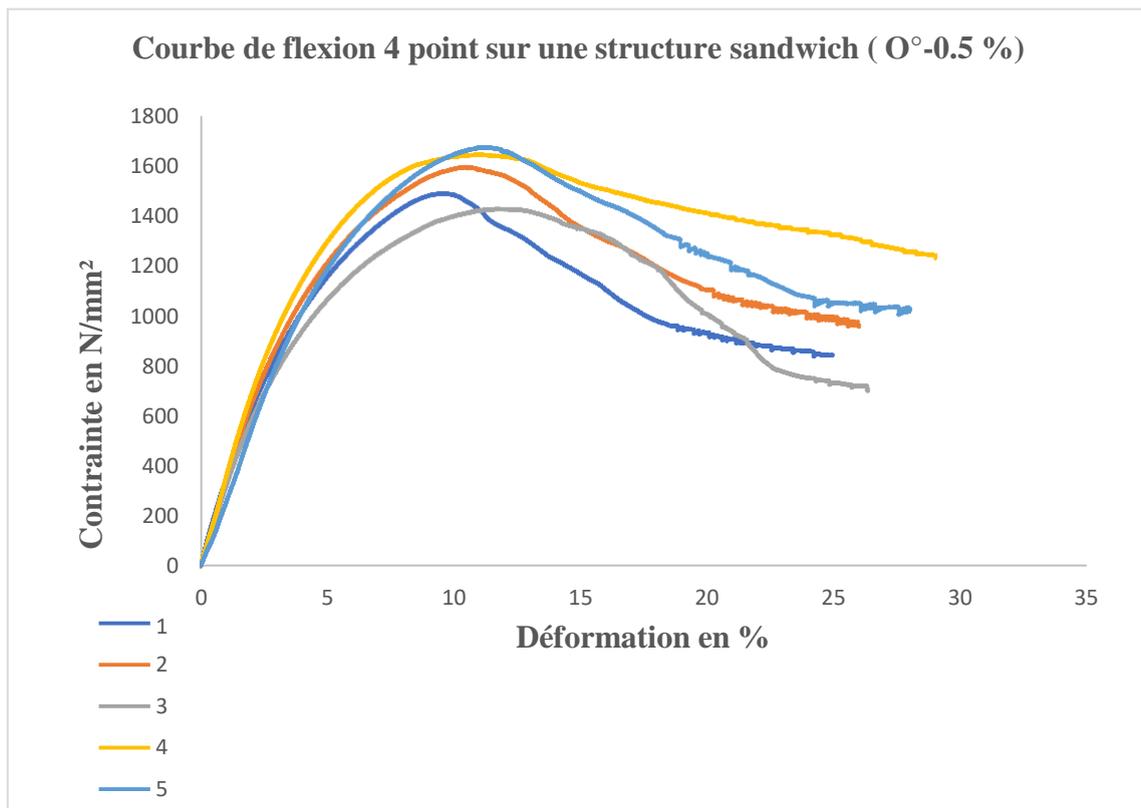


Figure III. 11: Courbe de flexion 4 points sur une structure sandwich (0°- NaOH 0.5%)

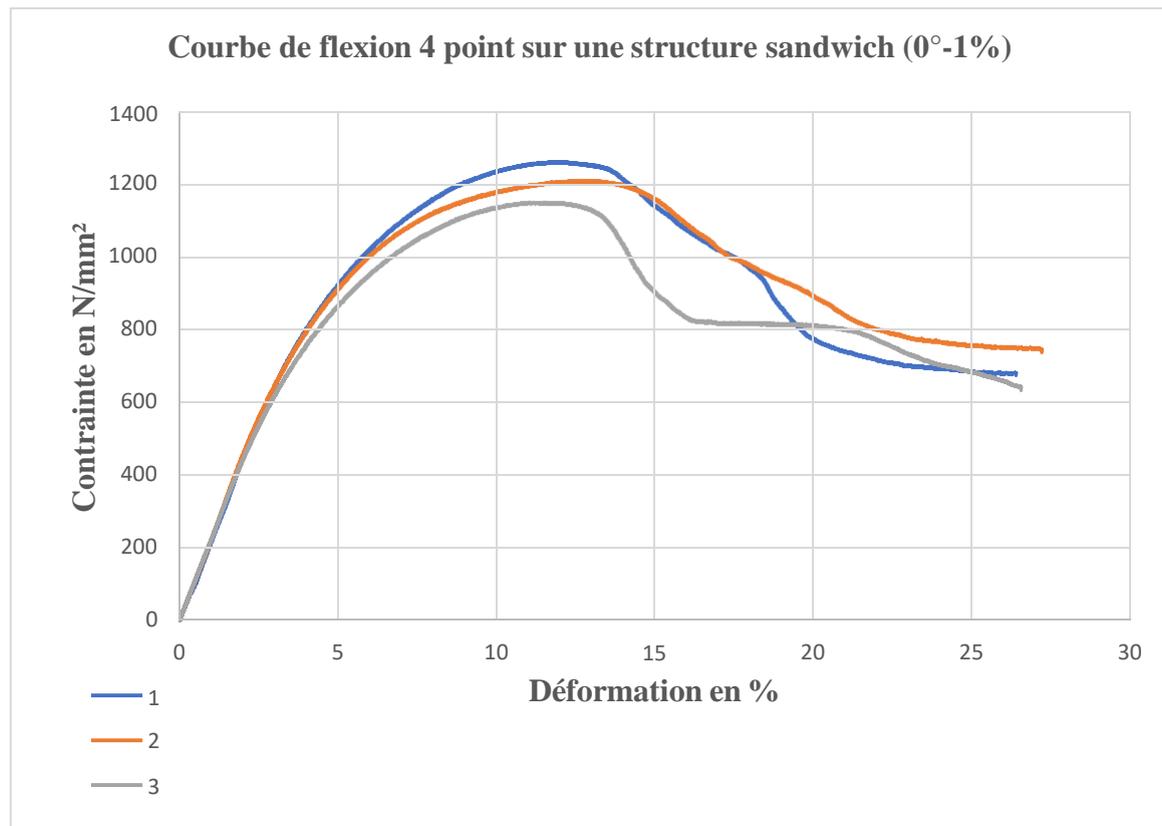


Figure III. 12: Courbe de flexion 4 point sur une structure sandwich (0° -NaOH 1%)

III.2.1.5 Interprétation des résultats

La figure 3.10 présente un essai sur un panneaux sandwich sous les forces de flexion à 4 points, ou on remarque des fissurations au niveau de l'âme due au force du cisaillement, alors que on voit aucune trace de fissuration au niveau des peaux, ce qui signifie la résine époxy renforcée par les fibres de lin qui compose les peaux du la structure travaille très bien à la flexion.

Conclusion générale

Conclusion générale

D'après les résultats, on déduit que la contrainte maximale des structures sandwich présentant une concentration de NaOH de 0,5% est supérieure à celle des structures sandwich avec une concentration de NaOH de 1%.

Dans le cadre de cette étude, notre objectif était de développer des structures à base de composites utilisant des fibres végétales afin de bénéficier de leurs excellentes propriétés mécaniques.

Des éprouvettes et structure sandwich qui se composent des fibres de lin non tissés et une résine époxy ont été réalisées et soumis à des essais mécaniques.

Nous présenterons les résultats obtenus dans le cadre de cette étude :

- Le traitement des fibres de lin avec différentes concentrations de NaOH peut avoir un impact sur les propriétés et le comportement de notre matériau composite. Nous avons observé que les échantillons traités avec une concentration de NaOH égale à 0,5% présentaient une excellente résistance aux forces auxquelles la structure peut être soumise (flexion 3 points, traction), contrairement aux échantillons traités avec une concentration de NaOH égale à 1%, qui ont montré une résistance inférieure à celle des échantillons à 0,5% de NaOH.
- L'orientation du renfort a un impact sur la résistance du matériau, comme nous l'avons observé lors de nos essais. Nous avons constaté que les échantillons avec une orientation de renfort à 0° présentaient une bonne résistance en traction par rapport aux échantillons renforcés avec des fibres orientées selon deux directions, à 0° et 90°.
- L'arrangement adéquat des fibres offre la possibilité de moduler de manière ciblée les propriétés des matériaux composites, permettant ainsi d'obtenir une gamme de matériaux allant de fortement anisotropes à isotropes dans un plan, où la résistance est réduite dans les zones présentant une faible densité de renfort.
- Dans les structures sandwich, l'âme subit des contraintes de cisaillement.

Les matériaux composites représentent une solution prometteuse pour relever les défis techniques et répondre aux exigences des industries contemporaines. Leur combinaison exceptionnelle de légèreté, de résistance et de polyvalence en fait des matériaux privilégiés pour le futur, ouvrant ainsi la voie à de nouvelles opportunités d'innovation et de développement durable.

Référence bibliographique

- [1] <https://www.amp-composite.com/le-composite/> . Consulter le 12/03/2023
- [2] P. Vannucci, « Matériaux composites structuraux : Méthodes d'analyse et de conception ». mémoire de master. France. 2007. ffccl-01529026f
- [3] Lionel GENDRE. « Matériaux composites et structures composites », édité le 17/05/2011, France,10 page.
- [4] B. Hami, « Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'une éco-structure sandwich multicouche »,Thèse de doctorat, Université de Boumerdas, 2017.
- [5] M. Taqiyeddine, Polycopié du cours, master 1 chimie des matériaux, université de Tiaret.
- [6] S, Smail.MF.Terfani, « Mise en forme d'une éco-structure composite », mémoire de master, Université de BOUIRA,2021.
- [7] <https://www.fmc-composites.com/materiaux-composites-29> . Consulter le 15/03/2023
- [8] Jérémie Aucher, « Etude comparative du comportement composite à matrice thermoplastique ou thermodurcissable ». Autre. INSA de Rouen, 2009. Français. NNT : 2009ISAM0012
- [9] S. Kenouche, « Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'une éco-structure sandwich multicouche », Thèse de doctorat, Université de Boumerdas, 2016.
- [10] F. Merabti, « Contribution d'élaboration d'un matériau léger à partir des déchets des palmiers dattiers (pétiole) », master, Université de Biskra,2021.
- [11] L. Gornet, « Généralité sur les matériaux composite », master, Université de Nantes, 2011.
- [12] Y. LEDRU, « étude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques », Thèse doctorat, Université de Toulouse, 2009.
- [13]https://moodle.uphf.fr/pluginfile.php/320093/mod_resource/content/1/Mat%C3%A9riaux%20composites%20introduction%201.pdf . Consulté le 20/3-2023.
- [14]_T. Mourad, « étude de l'endommagement dans un composite stratifié », mémoire de master, université Abdel-Hamid Ibn Badis de Mostaganem,2012.

- [15] S.DEGHBOUDJ, « Matériaux composite », mémoire de master, Université de Tebessa, 2021.
- [16] N. Chaussoy, « Synthèse et caractérisations de résines thermostables pour matériaux composites carbonés. Matériaux », Université de Lyon, 2021. Français. NNT : 2021LYSEI016.
- [18] W. Toumi, « Optimisation de la configuration des tubes en matériaux composites sous pression », mémoire de master, Université de Biskra, 2019.
- [19] La maison moderne, maison écologique, <https://www.maison-moderne.net/multiples-utilisations-de-fibre-de-verre.html>. Consulter le 16/03/2023
- [20] <https://www.mordorintelligence.com/fr/industry-reports/automotive-glass-fiber-composites-market>. Consulter le 16/03/2023
- [21] <https://gernitex.com/fr/ressources/fibre-de-carbone-proprietes/>. Consulter le 23/03/2023
- [22] <https://lelementarium.fr/product/fibres-de-carbone/>. Consulter le 23/03/2023
- [23] Rafael Masdeu de Pedro, « Etude de préformes en fibre de lin », master, Université de Orléans, 2010
- [24] Y. DJEBLOUN, « Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales », doctorat, Université de Biskra, 2018.
- [26] L. Yahiaoui, « Caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétales (Diss) », Master, Université Setif, 2011.
- [27] L. BENGORIR, A. BALOUL, « Lynda BENGORIR & Asma BALOUL », master, Université Bejaia, 2021.
- [28] A. Sellami, « Elaboration des composites cimentaires à base de fibres végétales locales (le diss) : Caractérisation, Durabilité et Application au cas de la maçonnerie », doctorat, Université de Annaba, 2015.
- [29] D. Laib, M. Bouacheria, « Etude physique de panneaux sandwichs utilisés dans les maisons solaires. Produit de CaprefAin-M'Lila (ex-CABAM) », Master, Université de Oum el Bouaghi, 2021.

- [30] Teknpanel , Panneaux Sandwich <https://www.teknopanel.com/fr-fr/produit-detail/panneaux-sandwich--propos-des-panneaux-sandwich> . Consulter le 4/04/2023
- [31] usinage, métrologie, http://www.usinage.wikibis.com/essai_de_traction.php . Consulter le 4/04/2023
- [32] groupe 6NAPSE , <https://6-napse.com/competence/essais-compression/> . Consulter le 06/04/2023
- [33] Zwick/Roell , Secteurs d'activité, Test de matériau / essai de matériau <https://www.zwickroell.com/fr/secteurs-dactivite/test-de-materiau-essai-de-materiau/essai-de-flexion/> . Consulter le 6/04/2023
- [34] ootravaux , Construction & rénovation , Isolation ,<https://www.ootravaux.fr/construction-renovation/isolation/isolation-panneaux-sandwich.html> Consulter le 6/04/2023
- [35] Mes rideaux.fr, habilleur d'intérieurs_ <https://www.mesrideaux.fr/blog/lin/>. Consulter le 7/04/2023
- [36] VAN robaeys , <http://www.vanrobaeys.fr/fr/lin/histoire-du-lin-2>. Consulter le 7/04/2023
- [37] F. YAHI, « Caractérisation physique d'une fibre végétale (le DISS) », mémoire de master, université Msila ,2016.
- [38] Christophe Poilâne, Alexandre Vivet, Ladan Momayez, Bessem Ben Doudou, M'Hamed Ayachi, et al., « Propriétés mécaniques de pré imprégnés lin/époxyde = Mechanical properties of flax/epoxy industrial preregs. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France.
- [39] Corklife, Encyclopédie du liège , <https://www.corklife.fr/encyclopedie-du-liege/>. Consulter le 15/07/2023
- [40] Yagamata, le liège : un matériau écologique, technique et esthétique <https://yagamata.fr/yoga/yoga-ecologie/le-liege-materiau-ecologique-technique-esthetique.html>. Consulter le 16/04/2023
- [41] Yagamata, https://yagamata.fr/yoga/yoga-ecologie/a_fibre_naturelle.pdf.html. Consulter le 16/04/2023
- [42] S. Chemmah, « L'effet de la température sur l'endommagement des poutres en matériaux composites », master, Université de Biskra, 2020.
- [43] R. Kueney, « Bio composites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles », doctorat, Université de Laurine, 2013.

[44] <https://www.soprema.fr/fr/vos-projets/isolation-biosourcee/fibre-de-bois>. Consulter le 20/04/2023

[45] <http://chanvreauvergne.e-monsite.com/pages/nos-produits/fibre-de-chanvre.html> . Consulter le 20/04/2023

[46] A. Seddouk, F. Djaidja, « Etude et caractérisation de l'effet des traitements chimiques par NaOH sur la morphologie structurelle des fibres végétales », master, Université de M'sila, 2022

[47] H. Brahmi, A. Hamouine, « Étude expérimentale de la liaison d'adhérence entre les fibres végétales du palmier dattier et la matrice ciment : L'effet du traitement physique et chimique », Revue des composites et des matériaux avancés – n° 2/2016, 135-146.

[48] N. Metrane, « Contribution à l'étude du comportement d'un matériau composite à base de fibres de carbone pour la réalisation de prothèses orthopédiques », master, Université de Annaba, 2019

[49] Vincent Placet, Anis Bouali, Camille Garcin, Jean-Marc Cote, Patrick Perré. Suivi par DRX des réarrangements microstructuraux induits par sollicitations mécaniques dans les fibres végétales tirées du chanvre. CFM 2011 - 20ème Congrès Français de Mécanique, Aug 2011, Besançon, France. 03421227