

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

UNIVERSITE M'HAMED BOUGARA – BOUMERDES

Faculté des Sciences

Département de Chimie



Mémoire de Master

Présenté par :

MEDJANI Souhila

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

Filière : Sciences de la Matière

Option : Chimie

Spécialité : Physico-chimie des Matériaux

Thème

**Elaboration et caractérisation des matériaux
compositions sandwichs multicouches**

Devant le Jury composé de :

Mr. ZERIZER	Abdellatif	Prof.	UMBB	Président de Jury
Mr. IREKTI	Amar	MCB	UMBB	Encadrant
Mr. KENNOUCHE	Salim	MCB	UAMOB	Examinateur
Mr. HAMI	Brahim	MAA	UAMOB	Examinateur

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué au sein d'Atelier Génie des matériaux (Boumerdès), à l'Unité de Recherche Matériaux, Procédés et Environnement (URMPE) de l'UMBB.

La première personne que je veux remercier est bien évidemment mon directeur d'étude Monsieur **A. IREKTI**, Enseignant Faculté des sciences Université M'Hamed Bougara Boumerdès, d'avoir accepté de diriger cette étude, ainsi que pour ses conseils, son aide, ses encouragements, sa disponibilité et son expertise qui nous ont été très précieuses.

Je remercie tous les membres d'Atelier Génie des matériaux et le laboratoire URMPE qui ont contribué aussi, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail. Je tiens à remercier particulièrement Monsieur **AIT HASSAN Saïd** pour sa serviabilité.

Je n'oublie pas, surtout, mes collègues de l'laboratoire aux niveaux de département de chimie Faculté des sciences Université M'Hamed Bougara Boumerdès,

Je tiens tout naturellement à remercier les membres du jury, Monsieur **ZERIZER Abdellatif** pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de mon travail de master.

Un très grand merci également à Messieurs **HAMI Brahim** et **KENNOUCHE Salim** pour avoir accepté d'examiner ce travail de master.

Enfin, que tous ceux que nous n'avons pas nommés, trouvent ici l'expression de notre gratitude.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail à,

A mon père et à ma mère,
*Aucun mot ne saurait témoigner de grands égards à mes parents.
Je souhaite que Dieu préserve une longue
vie et le sourire pour lui.*

A mes frères Mourad, Hakim, Adel et Yanis
Pour leurs temps d'avoir à supporter ma vie et mon travail.

A mes sœurs Zahia, Hayet, et leurs maries, et ma petite sœur Katia
*Pour leurs patiences avec moi, leurs soutiens, leur affection et leurs
encouragements.*

A mon ange,
Adem

Au, triplet des girls, Nadjjet, Samia et Nora,
*Pour leurs sourires et leur compagnie enviable. Une pensée
particulière à ces moments délicieux passés ensemble et à leurs lots
de bêtises.*

Une spéciale dédicace à ma chère amie Nadjjet,
Qui m'a orientée et m'a encouragée.

*Sans citer de noms, que mes oncles, mes tentes, mes cousins, mes
amis et mes collègues de trouvent en ces quelques mots, l'expression
de mes plus sincères remerciements, pour avoir m'aider ou tout
simplement, pour m'avoir écoutée.*

Souhila,

Sommaire

Liste des figures	<i>i</i>
Liste des tableaux	<i>iv</i>
Résumé	<i>I</i>
Introduction générale	1
Chapitre I	Etude théorique
I.1. Introduction.....	3
I.2. Définition des matériaux composites.....	3
I.3. Les grandes catégories de composites.....	4
I.4. Constituants des matériaux composites.....	5
I.4.1. Renforts.....	5
I.4.1.1. Renfort en fibres discontinues.....	6
I.4.1.2. Renfort continu.....	6
I.4.2. Géométrie des renforts.....	6
I.4.3. Les différents types de fibres.....	7
I.4.3.1. Les fibres de verre.....	7
I.4.3.2. La fibre de carbone.....	8
I.4.3.3. La fibre d'aramide.....	9
I.4.3.4. La fibre de bore.....	9
I.4.3.5. La fibre de jute.....	9
I.4.4. La matrice.....	10
I.4.4.1. Les matrices thermodurcissables.....	10
I.4.4.2. Matrices thermoplastiques.....	13
I.5. Les charges.....	14
I.5.1. Charges renforçantes.....	14
I.5.2. Charges non renforçantes.....	14
I.6. Additifs.....	15
I.7. Matériaux composites structuraux.....	15
I.7.1. Le monocouche.....	15
I.7.2. Le stratifiés.....	15
I.7.3. Les sandwichs.....	16
I.7.3.1. L'âmes des structures sandwichs.....	16

I.7.3.2 Les peaux des structures sandwichs.....	17
I.7.3.3. L'adhésifs.....	17
I.8.Etude économique.....	18
I.9.Conclusion.....	18

Chapitre II***Etude bibliographique***

II.1. Introduction.....	19
II.2. Les essais de flexion.....	19
II.3.Les essais de compression.....	36
II.4. Conclusion.....	42

Chapitre III***Matériaux et techniques expérimentales***

I. Techniques d'analyses.....	43
I.1 Caractérisation mécanique des sandwichs.....	43
I.2 Essai de flexion trois points.....	43
I.3 Essai de flexion quatre points.....	44
I.4 Essai de Compression perpendiculaire.....	45
I.5 Essai Ultra-son.....	46
II. Matériaux utilisés.....	47
II.1 Résine Epoxyde.....	47
II.1.1 Conditions d'utilisation de la Résine Epoxyde.....	47
II.2 Fibres de verre.....	47
II.3 Liège aggloméré.....	48
III. Technique d'élaboration.....	49
III.1 Moulage au contact.....	49
III.1.1 Principe.....	49
III.2 Elaboration des plaques sandwichs par Moulage au contact.....	49
III.2.1 Découpage des renforts.....	49
III.2.2 Préparation de mélange de résine.....	50
III.2.3 Moulage des sandwichs.....	50
III.2.4 Démoulage des sandwichs.....	52
IV. Conclusion.....	53

I. Comportement mécanique des structures sandwichs.....	54
I.1 Essai de flexion trois points.....	54
I.1.1 Analyse des modes de rupture en flexion trois points.....	57
I.2 Essai de flexion quatre points.....	59
I.2.1 Modes de rupture en flexion quatre points.....	61
I.3 Essais de compression perpendiculaire.....	64
II. Essai Ultra-son.....	66
III. Caractérisation hygrothermique de liège et matériaux composite.....	68
III.1 Masse volumique.....	68
III.2 Séchage en étuve.....	69
III.3 Pouvoir d'absorption d'eau.....	70
IV. Conclusion.....	72
Conclusion générale.....	73

Références bibliographique

Annexes

Liste des figures

<u>Chapitre I</u>	<u>Etude théorique</u>
Figure I.1 Composition générale d'un matériaux composite.....	4
Figure I.2 Les différents types de renfort de base.....	5
Figure I.3 Les structures géométriques des composites.....	7
Figure I.4 a - fibre de verre mat, b - fibre de verre tissé.....	8
Figure I.5 a - fibre de jute, b - le jute tissé.....	9
Figure I.6 Différentes familles de matrices.....	10
Figure I.7 Les structures chimiques de DGEBA n=2.....	13
Figure I.8 Composites stratifiés.....	15
Figure I.9 Composite sandwichs.....	16
<u>Chapitre II</u>	<u>Etude bibliographique</u>
Figure II.1 Structure sandwichs multicouches.....	22
Figure II.2 Représentation schématique des assemblages des panneaux sandwichs...	28
Figure II.3 Représentation photographique des panneaux sandwichs finis.....	28
Figure II.4 Courbes force-déplacement de panneaux sandwichs SN20 et SN40.....	29
Figure II.5 Evolution de la charge en fonction de la flèche du sandwich SMS.....	33
Figure II.6 Evolution de la charge en fonction de la flèche du sandwich SMS.....	34
Figure II.7 Les dimensions des éprouvettes études pour les essais de flexion.....	35
Figure II. 8 Évolution de la force en fonction de la flèche pour l'essai de flexion3pts.	36
Figure II. 9 Évolution de la force en fonction de la flèche pour l'essai de flexion 4 pts.....	36
Figure II.10 Comportement en compression perpendiculaire.....	38
Figure II.11 Courbe contrainte – déformation de trois matériaux sandwichs lors de la compression perpendiculaire.....	41

<i>Chapitre III</i>	<i>Matériaux et techniques expérimentales</i>	
Figure III.1	Essai de flexion 3 points.....	43
Figure III.2	Machine universelle Zwick/Rolle ZO10.....	44
Figure III.3	Essais de compression perpendiculaire.....	45
Figure III.4	C372-01 Appareil à Ultrasons TICO.....	46
Figure III.5	Lièges agglomérés de moyenne densité.....	48
Figure III.6	Procédé du moulage au contact.....	49
Figure III.7	Plaque de renfort (tissu) découpe.....	50
Figure III.8	Mise en œuvre des plaques sandwiches.....	50
Figure III.9	Superposition de Sandwich (SDW1).....	51
Figure III.10	Superposition de Sandwich (SDW2).....	51
Figure III.11	Superposition de Sandwich (SDW3).....	52
Figure III.12	La presse hydraulique (Chambon Paris).....	52
Figure III.13	Les plaques des sandwichs après démoulage.....	53
Figure III.14	Echantillons de sandwichs découpés suivant la norme AFNOR NF T 54-606.....	53
<i>Chapitre IV</i>	<i>Résultats et discussions</i>	
Figure IV.1	Montage de l'essai de flexion trois points.....	54
Figure IV.2	Courbes (force-déplacement) en flexion 3 points trois structures sandwichs.....	56
Figure IV.3	Histogrammes de la contrainte à la flexion 3 points des différents sandwichs.....	57
Figure IV.4	Modes de rupture en essai de flexion trois points des différents sandwiches.....	58
Figure IV.5	Montage de l'essai de flexion trois points.....	59

Figure IV.6	Courbes (force-déplacement) en flexion 4 points.....	60
Figure IV.7	Histogrammes de la contrainte à la flexion 4 points.....	61
Figure IV.8	Modes de rupture en flexion quatre points.....	62
Figure IV.9	Histogrammes comparatifs des valeurs des forces maximales et des contraintes des éprouvettes en essai de flexion 3 et 4 points.....	63
Figure IV.10	Montage de l'essai de compression perpendiculaire.....	64
Figure IV.11	Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwichs.....	65
Figure IV.12	Montage de l'essai d'ultrasons.....	66
Figure IV.13	Histogrammes comparatifs des valeurs de la vitesse de propagation.....	68
Figure IV.14	Variation de la masse du liège en fonction du temps de chauffage à 100°C.....	69
Figure IV.15	Immersion partielle du liège dans un bac à eau.....	71
Figure IV.16	Egouttage des échantillons pendant 10 minutes.....	71
Figure IV.17	Histogramme du pouvoir d'absorption d'eau des lièges et des sandwichs.....	72

Liste des tableaux

<u>Chapitre I</u>	<u>Etude théorique</u>
Tableau I.1	Compositions chimiques des différents types de fibres de verres..... 8
Tableau I.2.	Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables..... 11
<u>Chapitre II</u>	<u>Etude bibliographique</u>
Tableau II.1	Classification et appellation des sandwichs en fonction des types des renforts..... 19
Tableau II.2	Résultats de l'essai de flexion trois points pour les différents sandwichs.. 20
Tableau II.3	Résultats de l'essai de flexion quatre points pour les différents sandwichs..... 21
Tableau II.4	Dimensions des éprouvettes (Série de 10, 20 et 40)..... 23
Tableau II.5	Caractéristiques déduites des essais de flexion 3 points..... 24
Tableau II.6	Caractéristiques déduites des essais de flexion quatre points..... 25
Tableau II.7	Propriétés mécaniques des constituants utilisés..... 26
Tableau II.8	Propriétés de la résine STR..... 26
Tableau II.9	Caractéristiques mécaniques des panneaux sandwichs SN20 et SN40 sous (a) flexion 3 points et (b) flexion 4 points..... 29
Tableau II.10	Différentes variantes des sandwichs et mortiers témoins..... 30
Tableau II.11	Résistance à la flexion des différentes variantes sandwichs à 28 jours d'âge..... 31
Tableau II.12	Résultats des essais statiques des sandwichs SMS..... 33
Tableau II.13	Résultats des essais statiques des sandwichs SMS [0/90 ₂ /0]..... 34
Tableau II.14	Les résultats de calcul des contraintes et des modules..... 35
Tableau II.15	Résistance à la compression des différentes variantes des sandwichs, à 28 jours d'âge..... 37
Tableau II.16	Caractéristiques mécaniques en compression perpendiculaire des sandwichs..... 38
Tableau II.17	Dimensions normalisées des différents échantillons de sandwichs..... 39

Tableau II.18	Appellation des sandwichs en fonction de la densité du liège.....	40
----------------------	---	----

Tableau II.19	Principales propriétés mécaniques sandwichs jute/époxy_liège.....	41
----------------------	---	----

Chapitre III

Matériaux et techniques expérimentales

Tableau III.1	Caractéristiques de la résine Medapoxy STR.....	47
----------------------	---	----

Tableau III.2	Propriétés mécaniques de la fibre du verre.....	47
----------------------	---	----

Chapitre IV

Résultats et discussions

Tableau IV.1	Représentes les dimensions des éprouvettes et les résultats mécaniques en flexion trois points des différents types des sandwiches.....	56
---------------------	---	----

Tableau IV.2	Résultats de l'essai de flexion quatre points pour les différents sandwiches.....	62
---------------------	---	----

Tableau IV.3	Caractéristiques mécaniques en compression perpendiculaire des sandwiches.....	66
---------------------	--	----

Tableau IV.4	Résultats de la vitesse de propagation des différents échantillons.....	67
---------------------	---	----

Tableau IV.5	Masse volumique et densité du liège et matériaux sandwich.....	69
---------------------	--	----

Tableau IV.6	Valeurs des masses d'échantillon avant immersion dans l'eau.....	70
---------------------	--	----

Résumé :

Dans cette étude, des panneaux sandwichs ont été élaborés à l'aide des stratifiés en fibres de verre et trois épaisseurs de lièges agglomérés (4 mm, 8 mm et 16 mm) comme âme.

Le comportement mécanique des panneaux a été testé à la compression perpendiculaire et à la flexion trois et quatre points. Les courbes de charge-déplacement et les modes de rupture ont été analysés et discutés. Le noyau de liège aggloméré a donné une très bonne performance en compression, tandis que les couches des fibres de verre qui renforcent les panneaux résistent en flexion. L'augmentation de nombre de plis de fibre de verre a donné un impact positif sur la performance mécanique de la structure sandwich. Des analyses hygrothermiques sont effectuées pour déterminer l'influence de la température sur la variation de la masse du sandwich, ainsi que son pouvoir d'absorption d'eau, en fonction du type et de l'épaisseur du liège et de la structure sandwich multicouches. Enfin, plusieurs essais du type ultrasons sont effectués pour déterminer l'influence de la nature et de l'épaisseur du liège sur les caractéristiques phoniques des panneaux sandwichs multicouches. Ces panneaux sandwichs peuvent être utilisés comme matériaux de construction non structuraux dans la construction, comme cloisons et panneaux de séparation dans le bâtiment.

Mots clés : Liège, fibre de verre, sandwich, propriétés mécaniques, propriétés hygrothermiques.

Abstract:

In this study, sandwich panels were developed using laminated glass fibers and agglomerated corks three thicknesses (4 mm, 8 mm and 16 mm) as soul.

The mechanical behavior of the panels was tested to compression perpendicular and three and four bending points. Load-displacement curves and the failure modes were analyzed and discussed. The agglomerated cork core gave a very good compression performance, whereas the layers of glass fibers which reinforce the panels resist bending. Increasing number of fiberglass plies gave a positive impact on the mechanical performance of the sandwich structure. Hygrothermal analyzes are performed to determine the influence of temperature on the change in mass of the sandwich, and its power to absorb water, depending on the type and thickness of the cork and multilayer sandwich structure. Finally, several tests like ultrasound are performed to determine the influence of the nature and thickness of the cork on the phonetic characteristics of multilayer sandwich panels. These sandwich panels can be used as non-structural building materials in construction, such as partitions and partition panels in the building.

Keywords: Cork, fiberglass, sandwich, mechanical properties, Hygrothermal.

ملخص :

في هذه الدراسة صنعت الألواح باستخدام ألياف زجاجية مصفحة والفلين مكثل ثلاث سمك (4 ملم و 8 ملم و 16 ملم)، والروح. تم اختبار السلوك الميكانيكي للألواح بالضغط العمودي والانحناء ثلاثة و أربعة نقاط. وقد تم تحليل منحنيات الشدة-الانتقال و وسائط الفشل ومناقشتها (أسلوب القطع). أعطت أساسية الفلين المكثل أداء ضغط جيد جدا، في حين أن (على عكس) طبقات من الألياف الزجاجية التي تعزز لوحات مقاومة الانحناء. أعطت ارتفاع عدد انثناءات طبقات الألياف الزجاجية تأثير إيجابي على الأداء الميكانيكي لهيكل الشظيرة. يتم إجراء التحاليل الرطوبة الحرارية لتحديد تأثير درجة الحرارة على التغيير في كتلة الشظيرة، ووسعها لتمتص الماء، وهذا يتوقف على نوع وسماكة الفلين و هيكل الشظيرة متعددة الطبقات. وأخيرا، يتم القيام بالعديد من الاختبارات مثل الموجات فوق الصوتية لتحديد تأثير طبيعة وسمك الفلين على الخصائص الصوتية للألواح متعددة الطبقات. هذه الألواح يمكن استخدامها كموايد بناء غير الهيكلية في البناء، مثل أقسام وألواح الفصل في المبنى.

كلمات البحث: الفلين، شظيرة الألياف الزجاجية، الخصائص الميكانيكية، الخصائص الرطوبة الحرارية.

Introduction générale

Le matériau a souvent eu un rôle simplifié dans la mise en place et la réussite d'un projet tant que les techniques de fabrication, de dimensionnement, de maîtrise des propriétés apparaissaient performantes et suffisantes et que la prédictibilité des comportements assurait au concepteur une approche sécurisante. Inévitablement, cette exigence impose la nécessité de stabiliser et renforcer les surfaces minces pour leurs permettre de supporter des efforts souvent complexes et combinées. Pour évaluer une nouvelle structure, le concepteur doit prendre en compte un certain nombre de considérations importantes. La nouvelle structure doit être, économique à construire et à faire fonctionner, fiable et confortable. Il existe évidemment plusieurs façon de satisfaire à ces exigences et le matériau de construction joue là un rôle prépondérant.

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

Cependant, pour faire valoir ces atouts et atteindre ses objectifs, l'industrie des matériaux composites doit mieux intégrer dans sa stratégie de croissance la composante environnementale du développement durable. Les évolutions réglementaires en termes de recyclabilité et d'hygiène et sécurité constituent également des enjeux forts que cette industrie doit relever pour maintenir sa croissance.

Les matériaux composites et plus particulièrement les structures sandwichs à base de matériaux issus de la récupération ont de très bons potentiels de substitution des matériaux traditionnels actuellement utilisés dans la conception des structures sandwichs.

La technique de conception du panneau sandwich est connue et utilisée depuis longtemps dans de nombreuses industries. Elle consiste à positionner une âme souvent légère entre deux peaux résistantes, en générale plus denses. Les fonctions de chaque composant sont alors dissociées pour être optimisées. Les panneaux sandwichs peuvent être structurels, des isolants thermique et /ou acoustique.

Le principe du panneau sandwich structurel consiste à relier efficacement et durablement des peaux résistantes, pour reprendre les sollicitations de traction et de compression développées dans un chargement de flexion, par une âme légère sollicitée. En cisaillement cette technique permet d'optimiser les fonctions de chaque composant du panneau sandwich.

L'objectif principal de cette étude est d'élaborer un nouveau matériau composite multicouche. Les stratifiés sont à base de fibres de verre tissue. L'âme utilisée est un liège de densité moyenne, ce type de matériau donne au composite des meilleures caractéristiques physiques d'isolation et de légèreté. Les propriétés des structures élaborées ont été déterminées à l'aide d'un dispositif expérimental afin de mettre en valeur ce matériau dans des applications industrielles.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres :

Chapitre I

Le premier chapitre est une revue de la littérature, qui a fait le point sur les éléments clés de la thématique et les différents travaux effectués.

Chapitre II

Le deuxième chapitre est une étude bibliographique sur les structures sandwichs, avec les résultats de quelques travaux de recherches réalisés dans le contexte de notre étude.

Chapitre III et IV présenteront respectivement les méthodes, les matériaux utilisés et les résultats

A la fin, on termine avec une conclusion générale suivie de perspectives pour des travaux futurs.

I.1. Introduction :

Les années 70 ont vu l'apparition d'un nouveau type de matériau qui a très rapidement remplacé les métaux dans certaines applications : les matériaux composites à matrice polymère. Ils sont constitués d'un renfort sous forme de fibres et d'une matrice polymère. Leur assemblage donne un matériau dont les propriétés sont supérieures à celles de chacun des composants. Aujourd'hui, on enregistre une progression importante dans l'emploi des matériaux composites dans des domaines aussi divers que l'aéronautique, l'automobile, le sport et les loisirs. Parmi les matériaux composites les plus utilisés, on peut citer les matériaux sandwichs, les structures sandwichs occupent un large créneau dans la construction des pièces composites. Historiquement, ce sont les premières structures composites allégées et performantes.

L'objectif de ce premier chapitre est de définir les différents types de matériaux composites, ainsi que nous allons mettre en évidence tous leurs composants propres.

I.2. Définition des matériaux composites :

Un matériau composite est une combinaison de deux matériaux distincts que l'on appelle généralement la matrice et le renfort, aux propriétés souvent complémentaires, qui associés possèdent des caractéristiques physiques complètement différentes de leurs composants. [1]

Les matériaux composites sont des matériaux solides hétérogènes et anisotropes [2] Il faut différencier charges et renforts. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés. [3]

La diversité de composites est essentiellement due à la variabilité du renfort fibreux

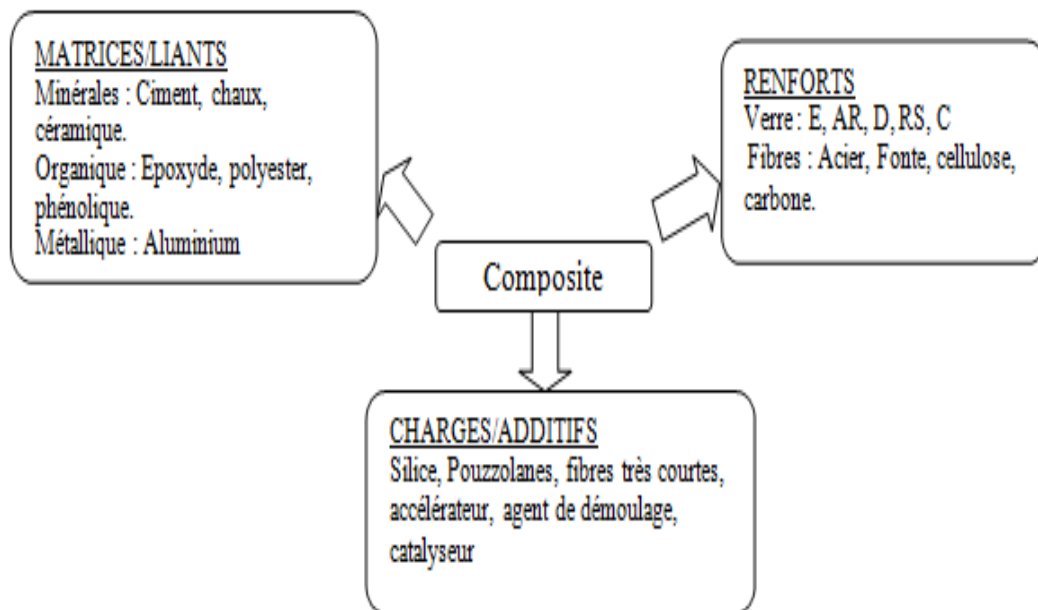


Figure I.1.Composition générale d'un matériaux composite. [4]

I.3. Les grandes catégories de composites :

Le vouloir de composites se livres à une revue exhaustive de tous les type de composites il est pourtant possible de distinguer deux grandes familles :

- **Composites de grande diffusion GD** : constitués principalement par le couple Résine/fibre de verre.
- **Composites à haute performances HP** : constitués par les couple Résine/fibre de verre, fibre de carbone ou d'aramide.

Les composites **GD** représentent 95% des matériaux composites utilisés. En générale ce sont des plastiques armés au des plastiques renforcés dont le taux volumique de renfort avoisine 30%, les principaux constituants de base sont les résines polyesters (95% des résines thermodurcissables) avec des fibres de verres (plus de 99% des renforts utilisés).

Les composites **HP** sont principalement utilisés dans l'aéronautique. Les renforts utilisés sont plutôt des fibres longues dont le taux de renfort est supérieur à 50%. Contrairement aux composites GD, leurs propriétés mécaniques, résistance mécanique et Rigidité, Sont largement supérieurs à celles des métaux. [5]

I.4. Constituants des matériaux composites :

Les principaux constituants sont le renfort et la matrice. Le renfort a pour rôle d'apporter au matériau composite ses performances mécaniques élevées. La matrice qu'on appelle aussi liant, son rôle est de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures.

En ajoutant des additifs pour modifier certains des propriétés physiques ou chimiques. On les utilise même pour des raisons économiques et par fois pour faciliter la mise en œuvre.

I.4.1. Renforts :

C'est le principal porteur constitutif dans le composite (forme, volume). Il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture, dureté. Ces renforts permettent également d'améliorer certaines des propriétés physiques : comportement thermique, tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible coût [6]

En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines diverses comme il est indiqué sur la figure I.2

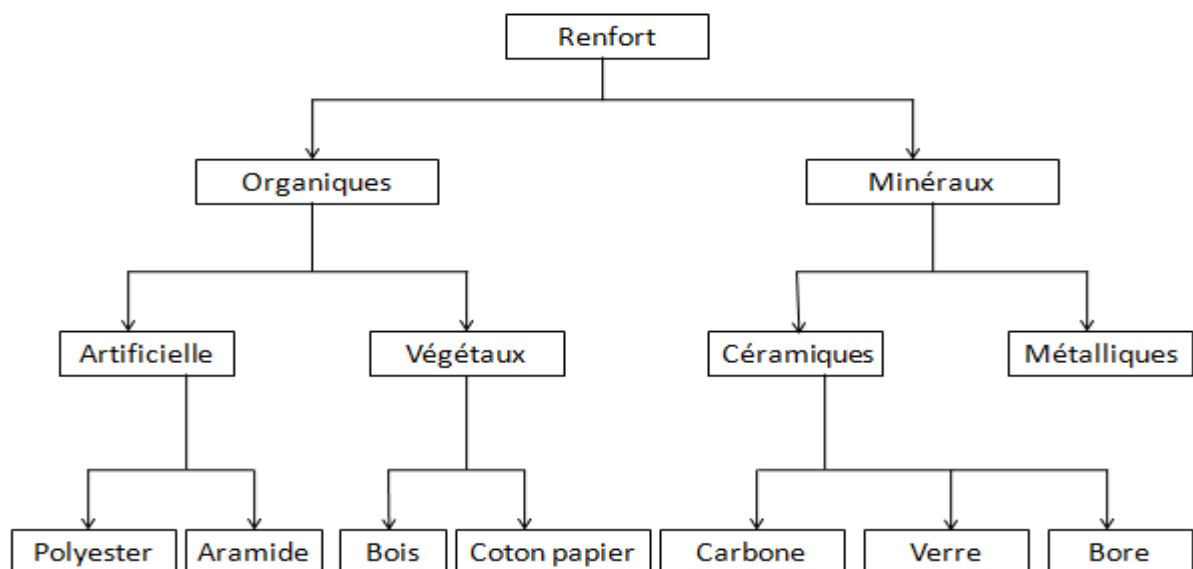


Figure I.2. Les différents types de renfort de base. [7]

Les propriétés physiques et mécaniques sont fortement influencées par la nature des fibres.

La forme du renfort est fonction de l'application et du volume de pièces à réaliser, elle permet de distinguer deux grandes familles.

I.4.1.1. Renfort en fibres discontinues :

Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écailles ou de poudre), permettent d'améliorer certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ».

I.4.1.2. Renfort continu :

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multiplié par 100 dans le cas des fibres de verre. [8]

Ces renforts ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées.

Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts : unidirectionnelle (nappes ou roving), bidirectionnelle (tissus ou complexes 2D), tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois directions).

I.4.2. Géométrie des renforts :

D'un point de vue géométrique, on peut distinguer trois grands types de renforts :

- Les fibres longues (longueur comparable aux dimensions de la pièce, figure I.3 a) ;
- Les fibres courtes (de longueur faible devant les dimensions de la pièce, figure I.3b) ;
- Les particules, ou charges renforçantes (figure I.3c).

Tous ces renforts sont inclus au sein d'une matrice qui répartit les efforts entre eux et les protège des agressions extérieures, comme indiqué ci-dessus. En outre, lorsque les renforts sont des fibres, celles-ci peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées aléatoirement.

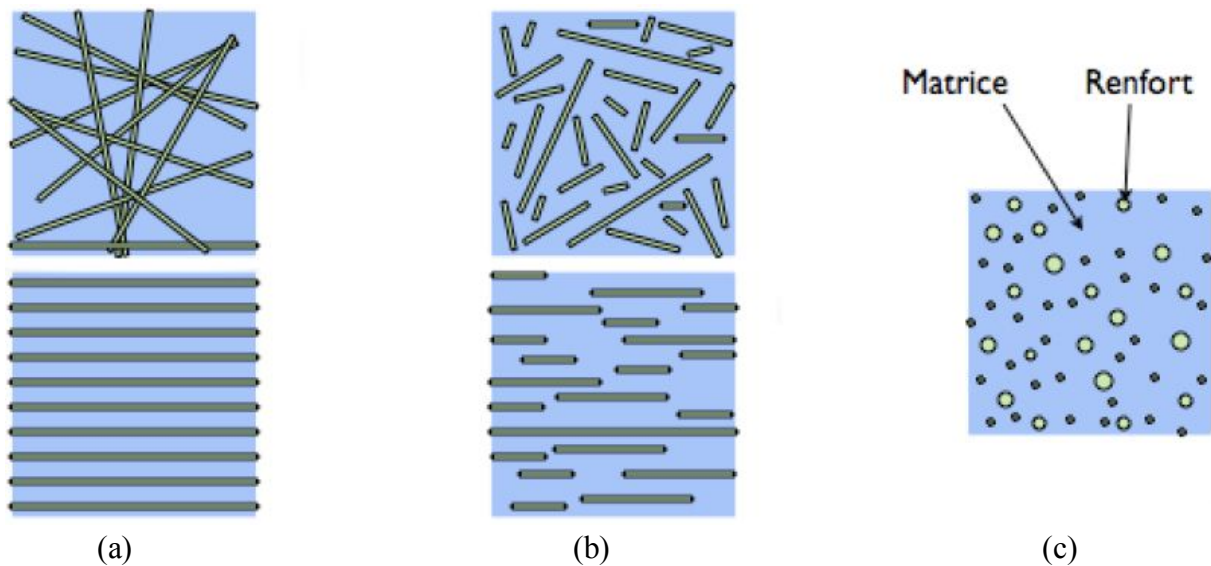


Figure I.3. Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules. [9]

I.4.3. Les différents types de fibres :

I.4.3.1. Les fibres de verre :

Le comportement du verre dans sa forme massive est dominé par son caractère fragile. En revanche, lorsqu'il est élaboré sous forme de fibres de très faibles diamètres, il devient tenace et révèle de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres sont obtenues à partir du verre textile composé d'un mélange d'oxydes : silice, alumine, chaux, magnésie, et oxyde de bore. Les proportions du mélange, et l'ajout d'oxydes modificateurs donnent au matériau final ses propriétés spécifiques. [10]

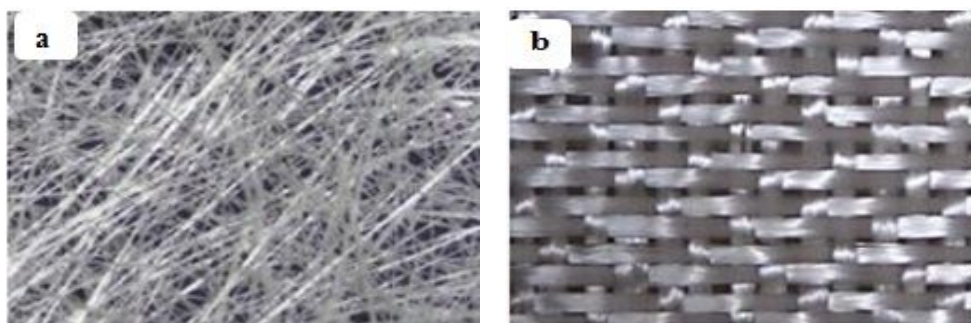
Différents types de verre peuvent être distingués :

- Le verre E à usage général, bonnes propriétés électriques ;
- Le verre D à hautes propriétés diélectriques, utilisé pour la construction de matériel de télécommunications ;
- Le verre C résistant aux agents chimiques, enrobage des structures sévèrement exposées ;
- Les verres R et S à caractéristiques mécaniques élevées, utilisés pour la réalisation de structures de hautes performances mécaniques.

Tableau I.1. Compositions chimiques des différents types de fibres de verres. [11]

Constituants		Composition en masse (%)		
		Verre E	Verre D	Verre R
Silice	SiO ₂	53-54	73-74	60
Alumine	Al ₂ O ₃	14-15.5	/	25
Chaux	CaO			9
Magnésie	MgO	20-24	0.5-0.6	6
Oxyde de bore	B ₂ O ₃	6.5-9		
Fluore	F	0-0.7	22-23	
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃			
Oxyde de titane	TiO ₂	<1	0.1-0.2	
Oxyde de sodium	Na ₂ O		1.3	
Oxyde de potassium	K ₂ O	<1	1.5	

- 1) **La fibre de verre de type mat** : les fibres sont disposées dans un plan sans aucune orientation préférentielle.
- 2) **La fibre de verre de type Tissu** : les fibres sont placées selon deux directions perpendiculaires.

**Figure I.4.a** - fibre de verre mat, b - fibre de verre tissé.

I.4.3.2. La fibre de carbone :

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, 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 2000 °C.

I.4.3.3. La fibre d'aramide :

Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

Les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;

La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances. [12]

I.4.3.4. La fibre de bore :

Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

I.4.3.5. La fibre de jute :

Est une plante des régions tropicales (genre corchorus) appartenant à la famille liliacées. En distingue deux classifications (la toile de jute et les fibres de jute) le jute pousse essentiellement au Bangladesh qui détient un quasi-monopole de son commerce. Il en existe deux variétés (une blanche et un rouge), ce qui exige un triage préalable avant l'utilisation. La fibre ultime est très courte et très lignifiée. [13][14]

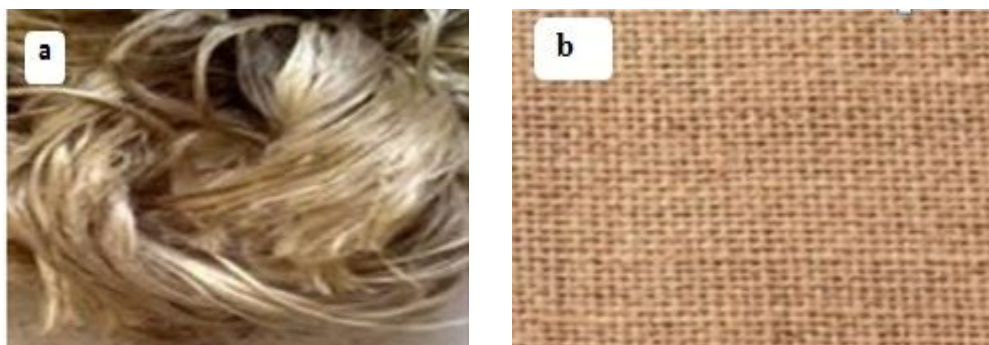


Figure I.5.a - fibre de jute, **b** - le jute tissé.

I.4.4. La matrice :

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres, et lie les fibres du renfort entre eux et assure la répartition de la contrainte c'est « l'emballage ». Les matrices doivent présenter une bonne compatibilité avec le renfort. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. [15]

Les résines les plus utilisées dans les matériaux composites sont :

- Les résines thermodurcissables
- Les résines thermoplastiques.

Ces deux types de polymères diffèrent en leur structure moléculaire aussi bien que leur comportement

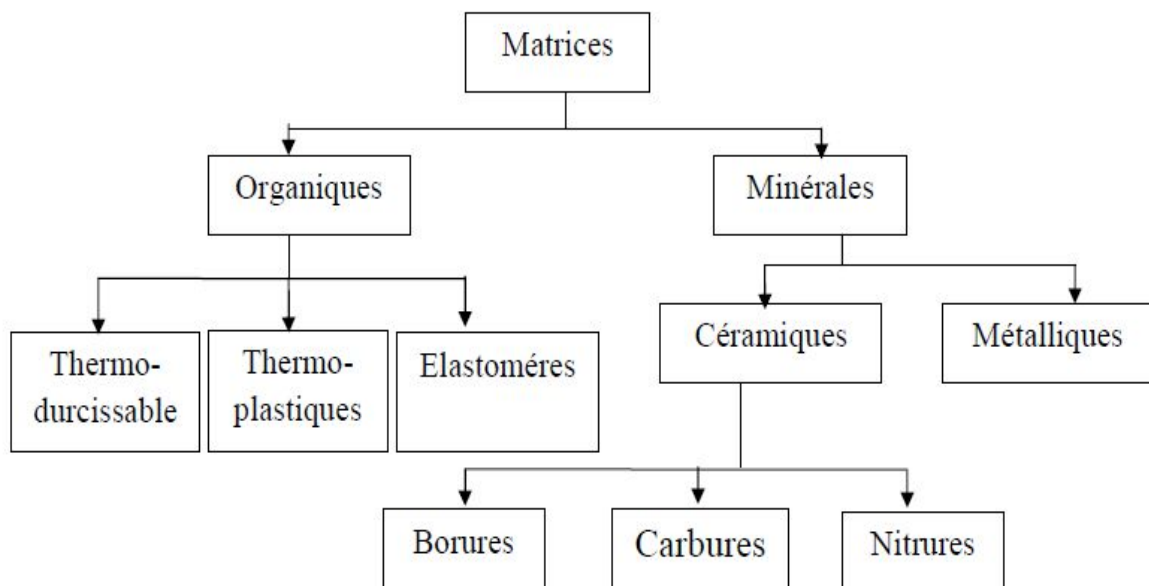


Figure I.6. Différentes familles de matrices. [16]

I.4.4.1. Les matrices thermodurcissables :

Ont une stabilité thermique beaucoup plus élevée en comparaison avec les matériaux thermoplastiques, un grand avantage pour des applications d'une demande très élevée.

Des remplisseurs ou charges sont employés en polymères pour une variété de raisons, à savoir réduire le coût, améliorer le traitement, la densité de commande, conductivité thermique, dilatation thermique, propriétés électriques, propriétés magnétiques, retard de flamme, et pour améliorer les propriétés mécaniques [17].

En général, les remplisseurs peuvent changer l'exécution des composés de polymère en changeant la couleur, viscosité, propriétés de barrière, les propriétés électriques et thermiques, la finition de surface, le rétrécissement, etc...

Les résines thermodurcissables principalement utilisées sont les suivantes :

- Résines époxydes : font l'objet de notre étude.
- Résines phénoliques : sont obtenues par la polycondensation du phénol et du formol ; elles présentent une très bonne tenue au feu, sans fumée, c'est pour cette raison qu'on les utilise dans les des transports ferroviaires. Elles sont fragiles, sensibles à l'humidité, difficiles à mettre en œuvre.
- Résines polyamides.
- Résines polyesters : se présentent sous la forme d'une solution polyacide + polyalcool qui se rigidifient sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficile à stocker.

Le Tableau I.2. Représente une comparaison entre ces types de résines :

Tableau I.2. Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables. [18]

	Polyesters	Phénolique	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

➤ Les matrices époxydes :

L'époxy ou scientifiquement nommé polyépoxyde est un thermodurcissable composé d'une résine dite prépolymère qui contient des monomères dont les fonctions époxydes sont les groupements réactifs de la résine, et le durcisseur permettant l'ouverture du cycle époxy et la liaison entre les monomères. [19] Pour cela, les durcisseurs doivent posséder au moins deux fonctions pouvant réagir avec le prépolymère en déclenchant la copolymérisation (réaction de polycondensation) de la résine et en formant un réseau tridimensionnel, non cristallin et infusible. Ce sont souvent des amines ou des anhydrides.

D'autres ajouts peuvent être additionnés et sélectionnés selon le domaine d'application de la résine, tels que les diluants qui sont utilisés dans la formulation de la résine époxy pour réduire la viscosité ou éliminer les solvants. Ces ajouts permettent à la résine époxyde d'être la famille la plus polyvalente des résines, (peuvent être facilement modifiées) pour avoir des propriétés différentes. Cette modification peut être réalisée par :

- La sélection d'un prépolymère approprié ou une combinaison de différentes familles de prépolymère.
- La sélection d'un agent de durcissement et de mécanisme de réaction associé.
- L'addition simple des charges organiques ou inorganiques et les composantes [20].

➤ Constituants de la résine époxyde

a) **Prépolymère** : D'une façon générale, les prépolymères sont caractérisés par les facteurs suivants :

- **n** : est le degré de polymérisation qui dépend du rapport molaire entre l'épichlorhydrine et le diphénylpropane (les deux produits pour la synthèse de monomère).

Suivant sa valeur, la molécule est plus ou moins longue, et la viscosité du produit est alors modifiée :

- ✓ Si $0 < n < 1$: le prépolymère est liquide ;
- ✓ Si $1 < n < 1,5$: le prépolymère est très visqueux ;
- ✓ Si $n > 1,5$: le prépolymère est sous forme solide.

- **M_n (g/mol)** représente la masse molaire du prépolymère : $M_n = 340 + 248n$;

- **L'indice époxyde (IE)** : est le nombre d'équivalents d'époxydes, c'est-à-dire de moles d'époxydes contenues dans un kilogramme de prépolymère (équivalent époxyde / kg de résine ou mol/kg), avec $IE = 2000/M_n$;

• **Le poids équivalent d'époxydes (EP)** : c'est la quantité de résine en grammes contenant un équivalent d'époxyde.

Selon le nombre de fonctions époxydes que possède le prépolymère (2, 3 ou 4), celui-ci est bi, tri ou tétra-fonctionnel. Il existe de nombreux prépolymère époxydes, le plus connu d'entre eux étant la DGEBA ou DiGlycidylEther du Bisphénol A. C'est le premier prépolymère époxyde apparu sur le marché et le plus répandu puisqu'il constitue à lui seul 95% de la production mondiale [21]. Sa structure chimique est présentée dans la figure I.7. [22]

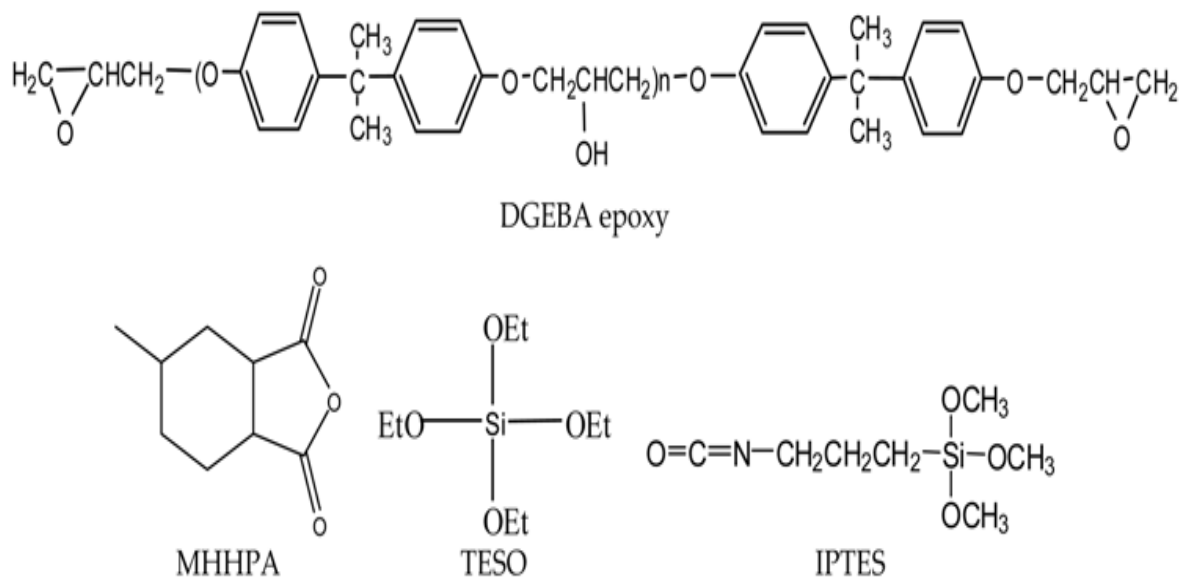


Figure I.7. Les structures chimiques de DGEBA n=2, MHHPA, APTES et de TEOS. [23]

La résine époxy (Fig. I.7) à été durcie avec 2,4 méthylhexahydrophthalique anhydride (MHHPA). Les alcoxydes, 4,3-isocyanatopropyltriéthoxysilane (IPTES) et le tétraéthoxysilane (TEOS),

I.4.4.2. Matrices thermoplastiques :

Dans les matériaux thermoplastiques, les différentes molécules ont une structure linéaire et il n'y a aucun produit chimique liant entre eux. Ces molécules s'associent par des forces de Van der Waals, interactions de dipôle-dipôle, liaison d'hydrogène et égalisent l'empilement des anneaux aromatiques. Le thermoplastique peut être ramolli et fait pour couler avec l'application de la chaleur et de la pression pendant que l'interaction faible entre les molécules peut être temporairement décomposée. 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 formabilité, les matériaux thermoplastiques sont largement répandus dans une variété de produits. [24]

Parmi les matrices thermoplastiques, on trouve :

- ✚ Le polyéthylène (PE)
- ✚ Le polypropylène (PP);
- ✚ Le poly (acétate de vinyle) (PAV) (colles à bois et autres adhésifs) ;
- ✚ Le poly (chlorure de vinyle) (PVC) (tuyauteries) ;
- ✚ Le poly (méthacrylate de méthyle) (PMMA) ;
- ✚ Le nylon 6,6 (fibres, vêtements) ;
- ✚ L'acétate.

Les matrices thermoplastiques possèdent de faibles propriétés mécaniques. Leur renforcement (Le plus souvent par des fibres courtes) confère une meilleure résistance mécanique, une bonne stabilité dimensionnelle, ainsi qu'un accroissement de la tenue en température.

Les résines thermoplastiques, en revanche, peuvent être alternativement ramollies par chauffage et durcies par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. De plus ces résines présentent l'aptitude à l'état liquide de se mouler facilement par plasticité.

I.5. Les charges :

I.5.1. Charges renforçantes :

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine [25]. Ces charges peuvent être classées suivant leur forme géométrique en :

- ✓ Charges sphériques.
- ✓ Charges non sphériques.

I.5.2. Charges non renforçantes :

Les charges non renforçantes ont pour rôle soit de diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines, soit d'améliorer certaines propriétés des résines.

[26]

Parmi ces classes on trouve :

- ✓ Charges de faible coût.
- ✓ Charges ignifugeantes.

- ✓ Charges conductrices et antistatiques.

I.6. Additifs :

Les additifs se trouvent en faibles quantités (quelques % et moins) et interviennent comme :

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

I.7. Matériaux composites structuraux :

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches
- Les stratifiées
- Les sandwichs

I.7.1. Le monocouche :

Il représente l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

I.7.2. Le stratifié :

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacune une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques.

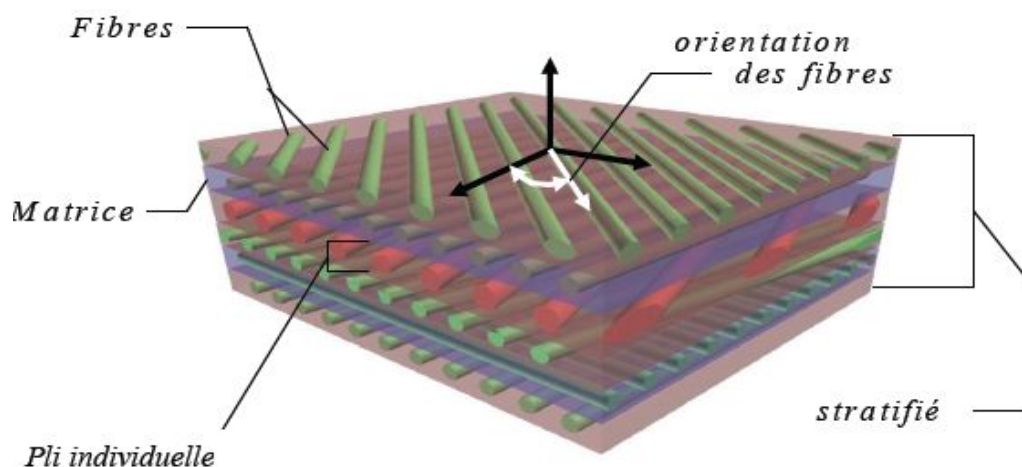


Figure I.8. Composites stratifiés. [27]

I.7.3. Les sandwichs :

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique. [28]

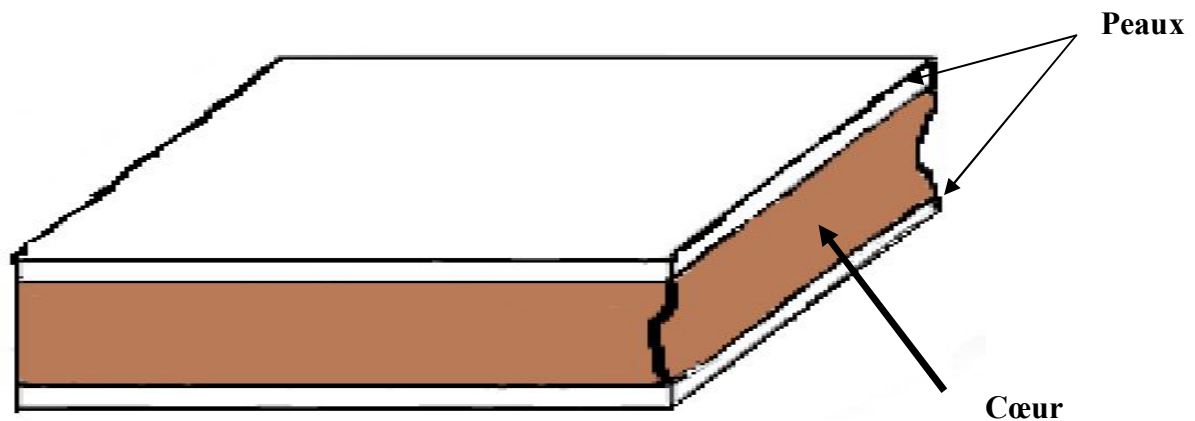


Figure I.9.Composite sandwichs. [29]

I.7.3.1.L'âmes des structures sandwichs :

Le rôle principal de l'âme dans le matériau sandwich est de résister aux efforts de cisaillement. Par ailleurs, l'âme doit pouvoir supporter des charges localisées de poinçonnement. Dans les faits, c'est le constituant de l'âme qui permet de classer les différentes structures en matériau sandwich. Parmi les âmes les plus utilisées, citons celles en mousse, en nid d'abeilles et en bois de balsa :

– Les mousses : ce sont les plus fréquemment utilisées, elles sont produites à partir de polychlorure de vinyle, polystyrène, polyuréthane ou d'autres polymères synthétiques. Elles sont thermo formables et permettent donc de réaliser des pièces de formes complexes. Leurs propriétés mécaniques sont bonnes, elles adhèrent bien à la résine et absorbent peu d'eau.

Néanmoins, leur point faible réside dans une faible résistance à l'impact.

– Le bois : il est utilisé pour sa très bonne résistance à la compression notamment pour les supports d'accastillage. Le bois le plus utilisé comme matériau d'âme est le balsa. Les âmes en balsa ont été utilisées pour la première fois dans les années 1940 sur des hydravions. Le bois de balsa est aussi un isolant thermique mais pour conserver cette propriété, il doit être traité avec un produit hydrofuge puisqu'il est très hygroscopique.

– Le nid d’abeilles : l’âme en nid d’abeilles, connue sous le nom « Nida », est un matériau structural souple constitué de mailles hexagonales. Elle est réalisée à partir de différents matériaux comme par exemple le papier ou l’aluminium. Le Nida étant une structure anisotrope, ses propriétés varient selon le sens transversal ou longitudinal des alvéoles (taille de mailles). De plus, la taille de celles-ci, l’épaisseur des parois du Nida et la méthode de mise en œuvre sont des paramètres qui influencent la résistance au cisaillement transversal et longitudinal du Nida. Les variétés les plus courantes sont le Nomex et le Korex et sont fabriquées à partir du Kevlar. [30]

I.7.3.2 Les peaux des structures sandwichs :

Le but des peaux est de reprendre les efforts dans le plan. De bonnes propriétés de raideur et de résistance en traction et compression sont donc nécessaires.

De plus, la résistance à l’impact, la finition de surface, la résistance à l’environnement et la résistance à l’usure peuvent être des propriétés importantes selon les applications. Deux principaux types de peaux peuvent être envisagés : métalliques et non-métalliques. Dans la catégorie non-métallique, les matériaux les plus intéressants sont les composites à base de fibres. En effet, ils peuvent offrir de bonnes propriétés de raideur et de résistance pour une masse moins importante que les matériaux métalliques. Ils sont anisotropes : l’orientation des fibres permet de reprendre les efforts dans une ou plusieurs directions préférentielles. Les types de fibres les plus utilisés sont les fibres de verre, les fibres d’aramide (souvent connues sous le nom commercial Kevlar®) et les fibres de carbone. Les fibres de verre ont l’avantage d’être peu coûteuses, mais ont un module d’élasticité moins élevé et une masse volumique plus importante que les autres fibres utilisées couramment. Les fibres d’aramide ont une faible masse volumique, un module et une résistance élevés. Cependant, leur résistance à l’usure les rend difficiles à usiner. Les fibres de carbone sont très rigides et résistantes, mais sont coûteuses. Elles sont largement utilisées dans les applications aérospatiales. [31]

I.7.3.3. L’adhésifs :

L’assemblage des peaux et de l’âme est réalisé par collage. Les adhésifs ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et à l’âme et de les protéger de l’environnement extérieur. Les adhésifs sont généralement des résines (les résines à base de polyester, Les résines à base vinylestes, Les résines époxydes...).

I.8. Etude économique :

Économie d'énergie grâce au coefficient d'isolation élevé (PUR, PIR-La mousse de polyisocyanurate ou laine de roche);

- Durée de vie importante et économique ; [32]
- Coût de production lié à la matière, la main d'œuvre, au contrôle...
- Coût d'industrialisation correspondant aux différents outillages et aux équipements spécifiques... [33]

I.9. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, nous sommes attachés à présenter et définir les différents types de matériaux composites, tout d'abord une définition générale a été donnée pour le matériau composite, ensuite les différents constituants des matériaux composites ont été étudiés, aussi les matériaux composites structuraux ont été présentés dans ce chapitre, enfin une étude économique a été présentée.

Le prochain chapitre sera consacré à l'étude bibliographique sur les matériaux composites sandwichs.

II.1. Introduction :

Les matériaux sandwichs connaissent un essor important, tant dans les applications les utilisant, que dans les technologies les mettant en œuvre. Ils présentent un intérêt pour les applications qui requièrent à la fois rigidité et légèreté. Les matériaux composites à structure sandwich sont constitués de deux peaux en matériaux composites entre lesquelles est collé un noyau à faible densité permettant d'augmenter les propriétés du matériau en flexion tout en conservant un poids très faible.

Notre objectif dans ce chapitre est de présenter brièvement l'historique et les résultats de quelques travaux de recherches réalisés dans le contexte de notre étude.

II.2. Les essais de flexion :

➤ BOUZIT Fatima et al, en 2014 [34] ont étudié les caractérisations mécaniques, en statique et en fatigue, des panneaux sandwichs à base de renforts naturels. La caractérisation des échantillons sandwichs est effectuée à travers des essais de **flexion 3 et 4 points** suivant la norme AFNOR NF T54-606 (1987). Les plaques sandwichs ont été élaborées au sein de l'URMPE. Elles sont constituées du liège aggloméré blanc d'épaisseur de 10 mm pour l'âme, et pour les peaux, ils ont utilisé des nappes en fibre naturelles (fibres de lin, de jute et de sisal). Les plaques du liège ont été découpées aux dimensions 300x300mm (NF T 57-105).

Pour les peaux, Les nappes qui ont été utilisées, sont unidirectionnelles (sens chaîne).

Le tableau suivant donne la classification et l'appellation des différents types des sandwichs.

Tableau II.1. Classification et appellation des sandwichs en fonction des types des renforts. [34]

Peau	Liège	Sandwich
Jute/époxy	C260-10	SD-J
Sisal/époxy	C260-10	SD-S
Lin/époxy	C260-10	SD-L
Jute-sisal/époxy	C260-10	SD-J/S
Jute-lin/époxy	C260-10	SD-J/L

1) Essai de flexion trois points :

Les essais de flexion 3 points sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle ZO10, dotée d'un capteur de force de capacité 10 kN.

La vitesse d'avance est de 2mm/mn.

D'après les Résultats, ils ont remarqué que les sandwichs dont les peaux composées de deux nappes de différente nature (jute-sisal, jute-lin) donnent des charges maximales supérieures par rapport à ceux des sandwichs dont les peaux constituées d'une seule nappe de renfort. Parmi les trois types des renforts utilisés, le SD-S donne la charge à la rupture la plus faible (environ 416N) par rapport aux deux autres échantillons (jute et lin). La combinaison de sisal et le jute donne un sandwich qui peut supporter une charge maximale de 743N pour un allongement de 15mm. Pour le SD-L, la charge maximale atteinte est de 579N c'est-à-dire 39% plus grande à celle de SD-S, par conséquent, le SD-J/L possède la charge à la rupture la plus grande (environ 985N pour un allongement de 16mm). [34]

Le tableau II.2 donne les différentes valeurs obtenues à partir de l'essai de flexion 3 point pour les différents sandwichs.

Tableau II.2. Résultats de l'essai de flexion trois points pour les différents sandwichs. [34]

Sandwich	h (mm)	e _a (mm)	e _s (mm)	b (mm)	d ₁ (mm)	P ₁ (N)	W ₁ (mm)	σ ₁ (MPa)
SD-J	13.09	10	2.07	41.15	250	620	14.5	39.4
SD-S	13.87	10	1.65	42.64	250	479	10.23	-
SD-L	1.43	10	2.47	43.25	250	579	13.7	-
SD-J/S	16.31	10	2.51	42.4	250	743	15.1	33
SD-J/L	17	10	2.87	24.86	250	985	16.1	37.04

Avec :

d_1 : Distance entre appuis (mm) ;

P_1 : Charge maximale (N) ;

W_1 : Allongement à la charge maximale (mm) ;

σ_1 : Contrainte (MPa).

2) Essai de flexion quatre points :

Les essais de flexion quatre points sont effectués sur la machine utilisée pour les essais de flexion trois points. Avec les mêmes conditions expérimentales.

Le SD-S présente toujours la charge la plus faible dans la série des sandwichs testés, cette charge est de 922 N. Pour le SD-L, la charge maximale est de 1030N c'est-à-dire une augmentation de 11% seulement par rapport à la charge maximale atteinte par le SDS, mais pour le SD-J/L supporte une charge maximale de 38% plus grande par rapport à celle de SD-J/S. [34]

Les résultats de l'essai de flexion quatre points sont présentes dans le tableau II.3

Tableau II.3. Résultats de l'essai de flexion quatre points pour les différents sandwichs. [34]

Sandwich	h (mm)	e_a (mm)	e_s (mm)	b (mm)	d_2 (mm)	P_2 (N)	W_2 (mm)	σ_2 (MPa)	τ_2 (MPa)
SD-J	12.09	10	2.1	40.92	250	991	16.6	32.63	1.09
SD-S	13.73	10	1.7	43.2	250	924	11.9	-	0.9
SD-L	15.54	10	2.36	43.39	250	1030	12.4	-	0.92
SD-J/S	16.52	10	2.58	42.03	250	1263	18.64	-	1.13
SD-J/L	17.53	10	3.05	42.51	250	1750	18.2	-	1.49

➤ En 2009 une autre étude a été faite par ARBAOUI Jamal Eddine [35] sur le sujet d'Étude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches. Il a travaillé sur matériaux sandwichs multicouches à âme en nid d'abeilles

polypropylène. L'assemblage par collage de ce matériau est possible grâce au feutre polyester non tissé qui est intégré à la surface du nid d'abeilles. Les peaux sont des stratifiés composites constitués d'un complexe roving/mât en fibres de verre (T800/M300) et d'une résine polyester iso phtalique. L'épaisseur des peaux est de 1 mm. Le pli composite intermédiaire (PCI) entre les différentes couches de matériau d'âme résulte d'une formulation spécifique. L'épaisseur du PCI est de 0.05 mm. La figure ci-dessous représente les structures sandwichs multicouches en nid d'abeille polypropylène utilisés dans le travail de thèse.



Figure II.1. Structure sandwichs multicouches. [35]

✚ Les structures sandwichs multicouches Ont été nommées de la manière suivante

- **Série de 10**

M10/1: correspond un empilement d'un nida de 10 mm

M10/2: correspond un empilement de deux nidas de 5mm

- **Série de 20**

M20/1: correspond un empilement d'un nida de 20 mm

M20/2: correspond un empilement de deux nidas de 10 mm

M20/3: correspond un empilement de deux nidas de 5 mm et un nida de 10 mm positionné au milieu

M20/4: correspond un empilement de quatre nidas de 5 mm

- **Série de 40**

M40/1: correspond un empilement d'un nida de 40 mm

M40/2: correspond un empilement de deux nidas de 20 mm

M40/3: correspond un empilement de deux nidas de 15 mm et un nida de 10 mm positionné au milieu

M40/4: correspond un empilement de quatre nidas de 10 mm.

- ✓ La machine est instrumentée en capteur de force avec une cellule à jauge de contrainte de 10 KN.
- ✓ La vitesse de chargement recommandée pour ce type de panneau est de 10 mm/min.

Les principales dimensions des matériaux sandwichs multicouches sont données dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.4. Dimensions des éprouvettes (Série de 10, 20 et 40) [35]

Série (mm)	Sandwichs multicouches	b (mm)	h (mm)	t_c (mm)	t_f (mm)	l_1 (mm)	l_2 (mm)	L (mm)
10	M10/1	35	12	10	1	120	300	440
	M10/2	35	12.05	10.05	1	120	300	440
20	M20/1	35	22	20	1	120	300	440
	M20/2	35	22.06	20.05	1	120	300	440
	M20/3	35	22.1	20.1	1	120	300	440
	M20/4	35	22.15	20.15	1	120	300	440
40	M40/1	35	42	40	1	120	300	440
	M40/2	35	42.05	40.05	1	120	300	440
	M40/3	35	42.1	40.1	1	120	300	440
	M40/4	35	42.15	40.15	1	120	300	440

Avec :

L , L_1 , L_2 , b , t_f , t_i et h sont respectivement la longueur totale, la distance entre les appuis intérieurs, la distance entre les appuis extérieurs, la largeur, l'épaisseur de peau, l'épaisseur de la couche intermédiaire et l'épaisseur des éprouvettes. t_c est l'épaisseur de cœur (âme) du sandwich.

a- L'essai de flexion 3 points :

Les structures sandwichs quadruple (trois PCI entre les âmes) sont les plus rigides et possèdent la charge à la rupture la plus grande par rapport à ceux des sandwichs triple (deux PCI). Les structures composites des séries 10, 20 et 40 avec une âme bicouche peuvent supporter une charge supérieure de 20 à 33 %. Par contre, une âme quadruple peut supporter une charge de 45 à 70% (série 20 et 40) par rapport à celle d'une structure à âme monocouche. La charge supportée par des structures sandwich double couche (10+10) est équivalente à celle supportée par une structure à âme monocouche de 40 mm. Cette technique d'assemblage permet de réduire l'épaisseur des structures composites d'un facteur 2 tout en conservant une masse identique. Par exemple, la masse est de $4,8 \text{ kg m}^{-2}$ pour une structure bicouche de 20 mm alors que la masse d'une structure monocouche de 40 mm est de $5,2 \text{ kg / m}^2$. Les valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques déduites des essais de flexion trois points sont reportées dans le tableau II.5. On constate évidemment que la contrainte en flexion, la contrainte en cisaillement et la rigidité en flexion augmentent avec l'accroissement du nombre de couches d'âmes. [35]

Tableau II.5. Caractéristiques déduites des essais de flexion 3 points (Séries de 10, 20 et 40 mm) pour $L = 250 \text{ mm}$. [35]

Séries (mm)	Sandwich multicouches	Charge maximale (N)	Contrainte en flexion [MPa]	Contrainte en cisaillement [MPa]	Rigidité en flexion apparente [N.mm^2]
10	M10/1	357.5	58	0.46	$195.10 \cdot 10^5$
	M10/2	477.1	74.1	0.59	$245.15 \cdot 10^5$
20	M20/1	480	49	0.32	$526.66 \cdot 10^5$
	M20/2	607	60.5	0.4	$604.81 \cdot 10^5$
	M20/3	659.1	64.2	0.42	$635.74 \cdot 10^5$
	M20/4	698	66.5	0.4	$673.43 \cdot 10^5$
40	M40/1	692.4	30.2	0.24	$592.9 \cdot 10^5$
	M40/2	840.7	36.2	0.28	$693.26 \cdot 10^5$
	M40/3	923	39.2	0.31	$726.56 \cdot 10^5$
	M40/4	1180.8	49.6	0.39	$829.42 \cdot 10^5$

b- L'essai de flexion 4 points :

Le tableau II.6. Représente les Caractéristiques déduites des essais de flexion quatre points (séries de 10, 20 et 40 mm).

Tableau II.6. Caractéristiques déduites des essais de flexion quatre points (séries de 10, 20 et 40 mm) [35]

Sandwich multicouches	$(P/\delta)_{\text{moy}}$ (N)	Contrainte en flexion σ_f [MPa]	Contrainte en cisaillement τ_c [MPa]	Rigidité en flexion apparente [N.mm ²]
M10/1	62	87.1	1	225.95 10 ⁵
M10/2	85	132.7	1.5	309.95 10 ⁵
M20/1	130	64	0.7	473.85 10 ⁵
M20/2	136	90.3	1	495.70 10 ⁵
M20/3	200	113.6	1.3	729.00 10 ⁵
M20/4	205	129.2	1.4	747.00 10 ⁵
M40/1	182	60.3	0.7	663.50 10 ⁵
M40/2	220	66.8	0.7	804.00 10 ⁵
M40/3	259	70.5	0.8	944.00 10 ⁵
M40/4	280	72.2	0.8	1020.50 10 ⁵

D'après ses les résultats ils ont conclu que la rigidité en flexion du sandwich croît avec l'augmentation de l'épaisseur et l'accroissement du nombre de couche d'âme. La charge à la rupture augmente avec l'épaisseur et l'accroissement des couches d'âme.

Elle est plus élevée dans le cas du sandwich quadruple couche de la série 40.

➤ En 2012 une autre étude faite par K.AIT TAHAR, K.SAIDANI et H.AIT AIDER [36] sur le thème d'analyse expérimentale d'une structure composite de type sandwich. leur étude porte sur la caractérisation expérimentale sous flexion 3 points d'un nouveau matériau composite sandwich à âme combinée. Dans cette étude ils ont propos é une

structure sandwich qui est constituée de deux peaux armées de grilles métalliques imprégnées d'une matrice époxyde de type STR et d'une âme hybride composée de carton dont la cannelure présente une forme ondulée et de tissu.

Le renfort métallique utilisé dans le stratifié est une grille de fils d'acier de diamètre 0,17 mm. Sa résistance à la rupture est de 512,9 MPa.

L'âme combinée est constituée de carton ondulé, qui peut être décrit comme un assemblage rigide de feuilles planes. Ce carton ondulé est enveloppé d'un tissu, composé de fils tissés de nature de coton et de lin. [36]

Tableau II.7. Propriétés mécaniques des constituants utilisés. [36]

constituant	Densité	E [GPa]	σ Elastique [MPa]	A%
Tissu (Tissu)	1,5-1.6	5,5-12,6	287-597	7-8
Carton	1,45	19-21	350-700	3-7

Tableau II.8. Propriétés de la résine STR. [36]

Constituant	densité	R_c compression [MPa]	R_t traction par flexion [MPa]
Résine Medapoxy STR	13,5±0,05	>70	25

Ils ont utilisé trois types de matériaux sandwichs, qui sont les suivants :

M-2J-1C : consiste en un empilement de 7 plis alternés de couches de métal de 3mm d'épaisseur, de deux couches de Tissu (jean) de 1mm d'épaisseur chacune et d'une couche de carton de 4mm d'épaisseur.

M-4J-1C : consiste en un empilement de 7 plis alternés de couches de métal de 3mm d'épaisseur, de 4 couches de Tissu (jean) de 1mm d'épaisseur chacune et d'une couche de carton de 4mm d'épaisseur.

M-3J-2C : consiste en un empilement de 7 plis alternés de couches de métal de 3mm d'épaisseur, de 3 couches de Tissu (jean) de 1mm d'épaisseur chacune et deux couche de carton de 4mm d'épaisseur chacune.

Le collage est toujours assuré par la résine STR

D'après une série d'essais mécaniques en flexion ils ont conclu que Le sandwich à âme constitué d'un seul carton, enveloppé du tissu possède une meilleure limite élastique comparativement au sandwich composé de deux empilement de couches de carton. En effet, le carton ondulé rend le sandwich plus fragile. Comparativement au sandwich traditionnel à âme pleine en polystyrène, le sandwich à âme combinée présente des résistances meilleures. Enfin, ces résultats préliminaires mettent en exergue l'influence de la séquence d'empilement carton tissu, sur les résistances mécaniques.

➤ En 2014 une autre étude faite par LAKREB NADIA [37] sur le thème : Elaboration, caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich multicouches à base de liège et bois de déroulage.

Deux types de panneaux sandwichs ont été fabriqués, vingt à base de liège aggloméré noir et vingt à base de liège aggloméré blanc.

✓ SN40 : une âme de 40 mm d'épaisseur en liège aggloméré expansé noir entre deux couches extérieures de placage de bois d'épaisseur de 1.5 mm.

✓ SN20 : un noyau de deux couches de liège aggloméré noir d'épaisseur de 20 mm séparé par une couche intermédiaire de placage de bois, entre deux couches externes de placage de bois.

✓ SB40 : une âme de 40 mm d'épaisseur en liège aggloméré entre deux couches extérieures de placage de bois.

✓ SB20 : un noyau de deux couches de 20 mm d'épaisseur de liège aggloméré blanc séparé par une couche intermédiaire de placage de bois, entre deux couches externes de placage de bois.

✓ SB15 : un noyau de deux couches de 15 mm d'épaisseur de liège aggloméré blanc et une couche de 10 mm d'épaisseur en liège aggloméré blanc dans le milieu, séparé par deux couches de placage de bois et de deux couches extérieures de placage de bois.

✓ SB10 : un noyau de quatre couches de 10 mm d'épaisseur de liège aggloméré séparé par trois couches de placage de bois et de deux couches extérieures de placage de bois. [37]



Figure II.2. Représentation schématique des assemblages des panneaux sandwichs : (a) SN40 ou SB40, (b) SN20 ou SB20, (c) SB15 ou SN15 et (d) SB10 ou SN10. [37]

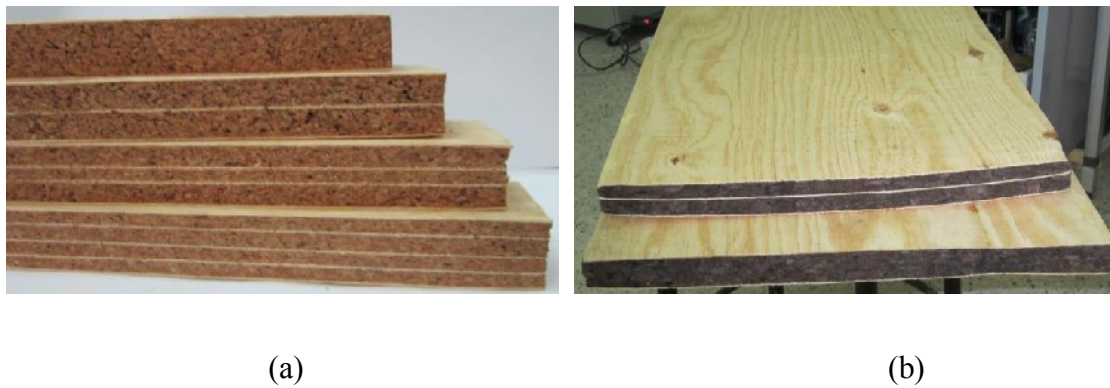


Figure II.3. Représentation photographique des panneaux sandwichs finis : (a) panneaux sandwichs à base de liège aggloméré blanc, (b) panneaux sandwichs à base de liège expansé. [37]

1. Essai de flexion trois et quatre points :

Les essais ont porté sur la détermination des modules de rigidité en flexion (D), cisaillement en flexion (N) et cisaillement de l'âme (Ga). Pour les deux types de panneaux sandwichs (SN20 et SN40).avec une vitesse de 2.25 mm/min. les résultats sont représentés dans la figures II.4.et le tableau II.9.

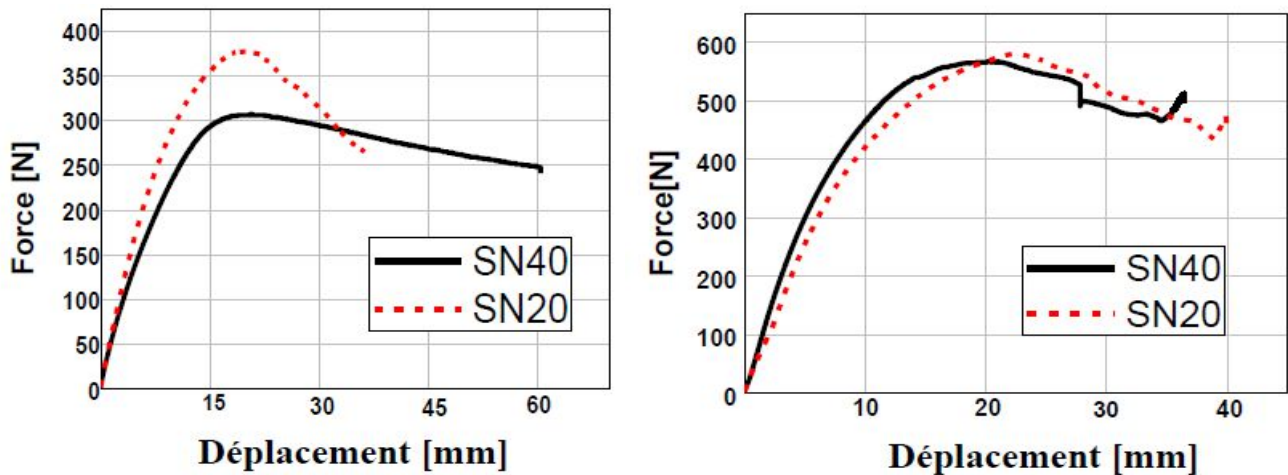


Figure II.4. Courbes force-déplacement de panneaux sandwichs SN20 et SN40 sous flexion 3 points (à gauche) et flexion 4 points (à droite). [37]

Tableau II.9. Caractéristiques mécaniques des panneaux sandwichs SN20 et SN40 sous (a) flexion 3 points et (b) flexion 4 points. [36]

Panneaux sandwichs	σ_3 [MPa]	σ_4 [MPa]	D [N/mm ²]	N [kN]	Ga [N/mm ²]
SN20	14.85	12.99	58.2×10^9	173.5	41.15
SN40	6.71	6.16	77.3×10^9	51.2	13.98

Avec la contrainte de flexion trois et quatre points (σ_3 , σ_4).

D'après La figure II.3. Ils ont distingué qu'il existe 3 phases principales, à savoir, une première phase correspondant à une augmentation linéaire de la charge appliquée avec le déplacement, suivie d'une seconde phase où le comportement est non linéaire et où la charge maximale est atteinte, et une diminution de la dernière charge jusqu'à la rupture de l'échantillon. L'intégration d'une couche intermédiaire de matériau en bois dans la structure composite (SN20) ne modifie pas le comportement général en flexion par rapport à une monocouche du matériau de base (SN40), bien qu'elle augmente la rigidité et la résistance à la flexion. Les résultats ont montré que les panneaux sandwichs SN20 étaient beaucoup plus résistants que les panneaux sandwichs SN40 (Tableau II.9). [37]

➤ En 2014 une autre étude faite par BENFADEL Karima [38] sur le thème : Élaboration et caractérisation de panneaux sandwichs à matrice cimentaire destinés à la construction. Les matières premières suivantes ont été utilisées dans le cadre de ce travail :

1. Ciment CEM II/B 32.5R de Lafarge Algérie
2. Sable gros laves de provenance carrière Tazmalt W-Bejaia.
3. Sable fin (sable de dune) de correction provenant de Boussaâda.
4. Des billes et feuilles de polystyrène provenance SARL Polystyrène des Oasis.
5. Fibre de verre sous forme de graille.
6. Adjuvant Médaccel T85.

Les différents sandwichs utilisés dans cette étude sont nomme comme suit :

N plis / N plis / N plis % M (% M : le pourcentage de dosage volumique de la matrice)

Le tableau ci-dessus résume les différentes variantes des sandwichs.

Tableau II.10. Différentes variantes des sandwichs et mortiers témoins. [38]

	Nombre de plis	1 ^{ere} composition 30% Matrice	2 ^{eme} composition 40% Matrice	3 ^{eme} composition 50% Matrice
01	00	T 30%M sandwich	T 40%M sandwich	T 50%M sandwich
02	02	1/1 30%M sandwich	1/1 40%M sandwich	1/1 50%M sandwich
03	04	2/2 30%M sandwich	2/2 40%M sandwich	2/2 50%M sandwich
04	06	3/3 30%M sandwich	3/3 40%M sandwich	3/3 50%M sandwich
mortiers témoins				
01	00	Sandwich témoin	(S/C=3, E/C=0.5 + feuille de 40mm polystyrène)	

- **La résistance à la flexion :**

L'essai de flexion 3 points a été réalisé selon la norme NF P18 - 407 (NA 428). Les essais ont été effectués sur une machine de type Zwick équipée d'un capteur de force de 100 KN ou 3000 KN. Les résultats obtenus sont résumés dans le tableau II.11.

Tableau II.11. Résistance à la flexion des différentes variantes sandwichs à 28 jours d'âge.

[38]

	Témoin	1//1	2//2	3//3	/
30 % Matrice	0	0,15	0,08	0,16	/
40 % Matrice	0	0,11	0	0,15	/
50 % Matrice	0	0,18	2,23	2,24	/
sandwich témoin	/	/	/	/	0

D'après les résultats Ils ont remarqué que les échantillons qui ont un nombre important de fibres présentent une évolution importante de la résistance à la flexion.

- **Effet de fibres sur évolution de la charge en flexion des sandwiches :**

A partir des essais de flexion ils ont observé que des sandwichs dosés à 50% de billes de polystyrène avec et sans renfort sont moins résistantes aux efforts de flexion, à cause de la présence de l'âme en polystyrène, malgré la faible densité des ces échantillons. Le sandwich qui est renforcé par la fibre de verre continue à résister aux efforts de flexion et les sandwichs non renforcés, les éprouvettes perdent rapidement leur résistance et se rompent. [38]

Par contre des sandwichs dosés à 60% et 70% de billes de polystyrène avec et sans renfort. Ils résistent très bien aux charges appliquées par flexion trois points.

En fin ils ont conclu que, le béton de polystyrène est un béton très fragile, sa résistance à la flexion est proche de zéro, mais il se comporte comme un matériau ductile, après renforcement par les fibres de verre. [38]

➤ En 2012 une autre étude faite par CHEMAMI Abdenacer [39] sur le thème : Etude de la Performance des Matériaux Composites Sandwichs - Application en Fatigue. Dans cette thèse, ils ont effectué une analyse des essais statique et de fatigue « flexion trois points » sur deux types de matériaux sandwich à renforts unidirectionnels et croisés. La désignation des stratifiés se fait de cette manière :

- SMS [0₄],
- SMS [0/90₂/0].

Ces deux types de sandwich, différenciés par le type de peaux sont utilisés.

Le premier type de peau est un stratifié à quatre couches [0₄] constituées d'un tissu de fibres de verre unidirectionnelles de masse surfacique (736g [100x30] cm x 0.85) et de résine époxyde SR 1500/SD 2505 (690g de résine et 230g de durcisseur).

Le deuxième type de peau est aussi un stratifié croisé à quatre couches [0/90₂/0] constituées d'un tissu de fibres de verre unidirectionnelles de masse surfacique (677g [90x30] x 0.85cm) et de la même résine (600g de résine et 200g de durcisseur).

Les deux peaux ont la même épaisseur $h_p = 2$ mm.

Les essais statiques en flexion 3 points ont permis de déterminer les caractéristiques mécaniques nécessaires aux essais de fatigue cyclique et mis en évidence leur comportement mécanique. [39]

- **Résultats expérimentaux des essais statiques de flexion trois points :**

Les figures II.5 et II.6 donnent l'évolution de la charge appliquée en fonction de la flèche prise au milieu de la poutre, pour différentes éprouvettes et pour les deux configurations, dans le cas des essais statiques, sollicités en flexion 3 points dont les caractéristiques sont représentées au tableau II.12. Dans le cas des deux types de structure composite testés, le comportement en flexion est similaire et peut se décomposer en 3 phases principales, à savoir:

- La première phase correspond à une augmentation linéaire de la charge appliquée P avec la flèche w ;
- La deuxième phase de comportement non linéaire, dans laquelle la charge maximale est atteinte ;

- La troisième et dernière phase où l'on observe une diminution de la charge appliquée jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette.

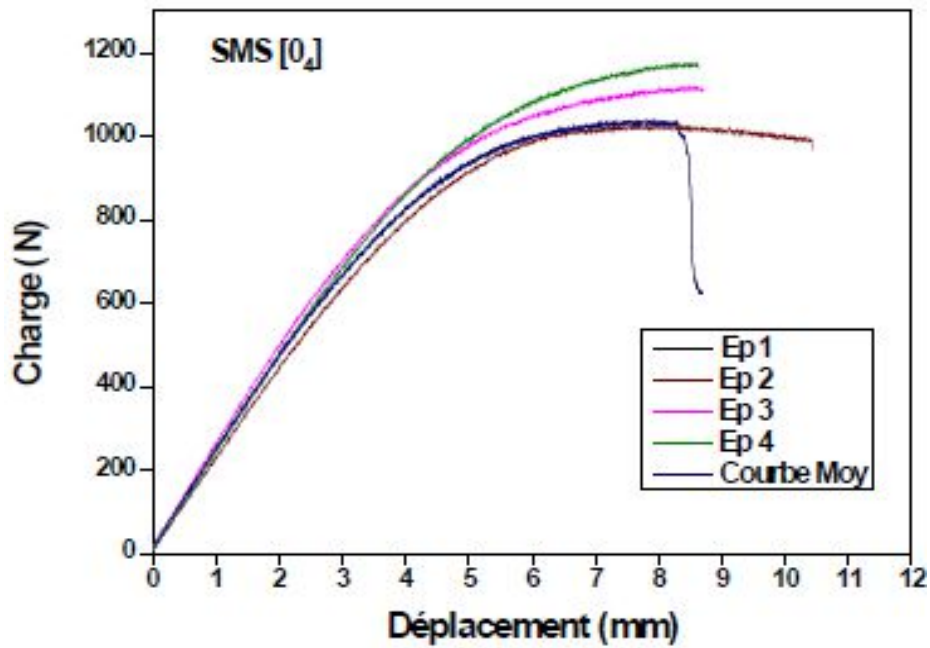


Figure II.5. Evolution de la charge en fonction de la flèche du sandwich SMS [0₄] en flexion 3-points. [39]

Tableau II.12. Résultats des essais statiques des sandwichs SMS [0₄]. [39]

Nr	a ₀ mm	b ₀ mm	F _{max} N	N° épreuve	F _{Rup} N	ε-Rupt %
1	11,57	25,16	1037,22	1	621,55	77,94
2	11,39	25,07	1011,98	2	1007,19	77,58
3	11,27	25,11	1028,95	3	968,01	93,56
4	11,82	25,2	1121,23	4	1111,65	75,20
5	11,55	25,03	1174,76	5	1163,01	74,68

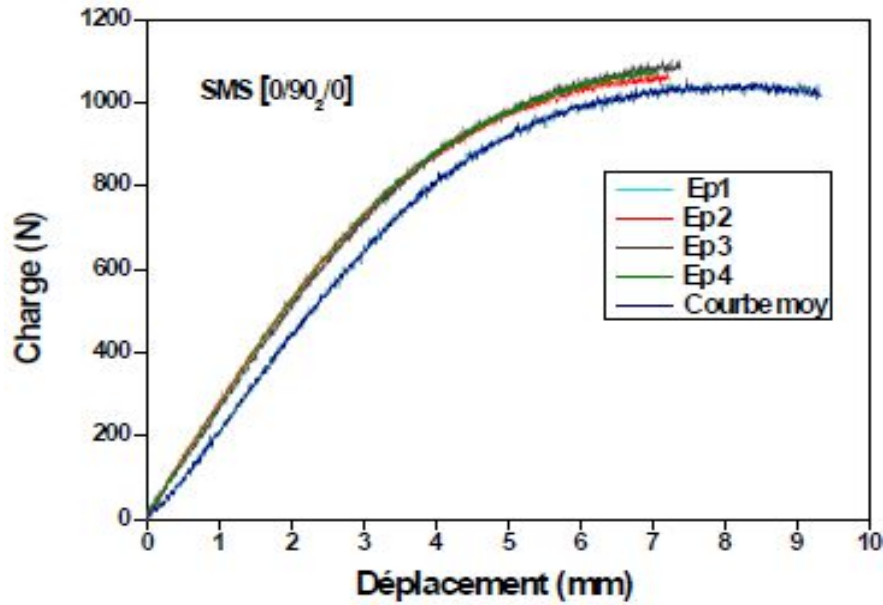


Figure II.6. Evolution de la charge en fonction de la flèche du sandwich SMS [0/90₂/0] en flexion 3-points. [39]

Tableau II.13. Résultats des essais statiques des sandwichs SMS [0/90₂/0]. [39]

Nr	a ₀ mm	b ₀ mm	F _{max} N	N°éprouvette	F _{Rup} N	ε- Rupt%
1	10,57	24,96	1059,85	1	1018,94	86,61
2	11,37	25,05	1071,17	2	1058,11	65,87
3	11,12	24,14	1101,20	3	1082,05	67,51
4	10,97	25,06	1065,51	4	1055,07	65,65
5	11,09	25,1	1078,14	5	1067,69	64,63

D'après les résultats obtenus Ils ont remarqué que la peau influe sur le comportement statique des sandwichs étudiés (tableau II.13). Les sandwichs ayant les peaux unidirectionnelle SMS [0₄] sont plus rigides. Ils ont constaté aussi que le déplacement et la charge à la limite de la partie linéaire du sandwich constitué de peaux croisées sont supérieurs à ceux de l'autre sandwich. [38]

➤ En 2012, une autre étude faite par Hami B, Irekti A, Aribi C, Buzzati B. [40] sur le thème Détermination des caractéristiques mécaniques d'une structure Sandwich multicouche renforcé par des fibres de verres. Ce travail consiste à élaborer des structures sandwichs multicouche, qui se compose de quatre couches stratifiées à base d'une résine époxyde renforcée par des fibres de verre tissée et mât ; entre lesquelles se trouvent trois plaques de liège aggloméré empilées alternativement avec les couches stratifiées. Des éprouvettes Ont été découpées à partir des panneaux sandwichs Qu'ils ont élaborés au niveau de l'unité de recherche matériaux, procédés et environnement (URMPE). sur lesquelles ils ont effectué des essais de type mécanique (flexion trois et quatre points), dans le but de déterminer les caractéristiques intrinsèques du sandwich. La réalisation des structures sandwich est faite avec une pression de 50 Kg/cm² à l'aide d'une presse hydraulique de type SIMI.



Figure II.7. Les dimensions des éprouvettes étudiées pour les essais de flexion ; longueur ($L=300\text{mm}$), largeur ($l=40\text{mm}$) et épaisseur ($e=20\text{mm}$). [40]

Ils ont déterminé les caractéristiques mécaniques de la structure sandwich multicouche, les résultats d'Essai de flexion trois et quatre points sont représentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.14. Les résultats de calcul des contraintes et des modules. [40]

	$\sigma_{3 \text{ Points}}$ (MPa)	$\sigma_{4 \text{ Points}}$ (MPa)	Module « D » (N/mm ²)	Module « N » (N)	Module « Ga » (N)
valeurs	30.22	26.04	3396.51	5488.67	6.77

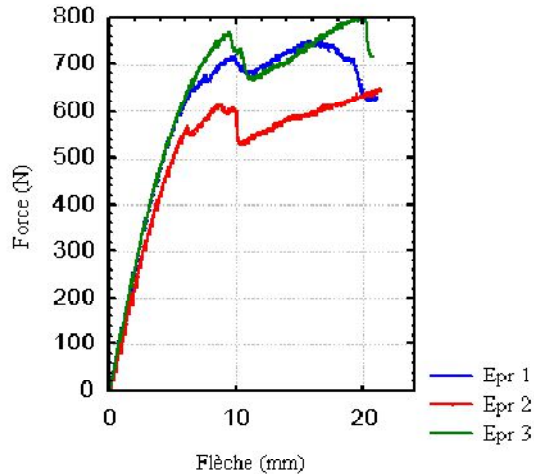


Figure II.8. Évolution de la force en fonction de la flèche pour l'essai de flexion 3 pts. [40]

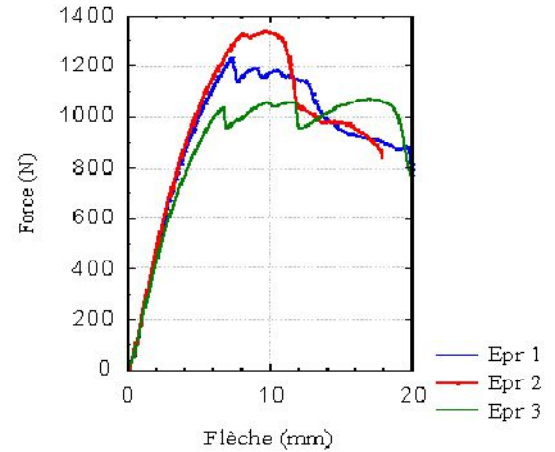


Figure II.9. Évolution de la force en fonction de la flèche pour l'essai de flexion 4 pts. [40]

Ils ont remarqué que, un comportement de la flexion 4 presque identique que celui de la flexion 3 pts, par contre ils ont remarqué que la force à la rupture est plus grande dans le cas de la flexion 4 pts, ça s'explique par la répartition de la force sur toute la surface de l'éprouvette (Fig II.8). Et une rupture du liège qui peut être expliquée par la faible résistance au cisaillement du liège, par rapport au stratifié (Fig II.9).

Ils ont conclu que, le comportement en flexion trois et quatre points est presque identique pour la structure sandwich multicouche.

II.3. Les essais de compression :

➤ En 2014 une autre étude faite par BENFADEL Karima [38] sur le thème Élaboration et caractérisation de panneaux sandwichs à matrice cimentaire destinés à la construction

L'essai de compression sur des cubes équivalents de 7x7x7 cm, a été réalisé sur une machine de compression de type Zwick équipée d'un capteur et piloté par un micro ordinateur.

Sa capacité maximale est de 3000 KN. Elle est programmée pour les essais de compression et cela pour différentes dimensions des corps d'épreuves (éprouvettes cylindriques ou prismatiques).

Les résultats sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau II.15. Résistance à la compression des différentes variantes des sandwichs, à 28 jours d'âge. [38]

	témoin	1//1	2//2	3//3	
30 % Matrice	0,88	0,93	0,89	0,9	
40 % Matrice	1,27	2,03	1,42	2,225	
50 % Matrice	1,76	1,97	2,1	2,2	
sandwich témoin					1,97

D'après les résultats (Tableau. II.15.), ils ont conclu que les résistances à la compression augmentent en fonction du dosage en billes de polystyrène quel que soit le nombre et la répartition des fibres de verre. Ceci est dû à la formulation du béton, d'où la densité de l'échantillon, tel que La résistance à la compression augmente avec l'augmentation de la densité du béton.

➤ En 2014 BOUZIT Fatima [34] à étudié les caractéristiques mécaniques, en statique et en fatigue, des panneaux sandwichs à base de renforts naturels. Le comportement mécanique des sandwichs est réalisé avec un essai de compression perpendiculaire suivant la norme NF T54-602.

L'essai est effectué sur des éprouvettes à base carrée de section 50x50 mm. Ces dernières sont placées entre deux plateaux parallèles d'une machine universelle type Zwick 250 de capacité 250 kN avec un pilotage et acquisition des données par ordinateur à l'aide du logiciel TextXpert 9.0 la vitesse d'essai est de 3mm/mn. [34]

Les résultats sont représentés sur la Figure II.10. et Tableau II.16.

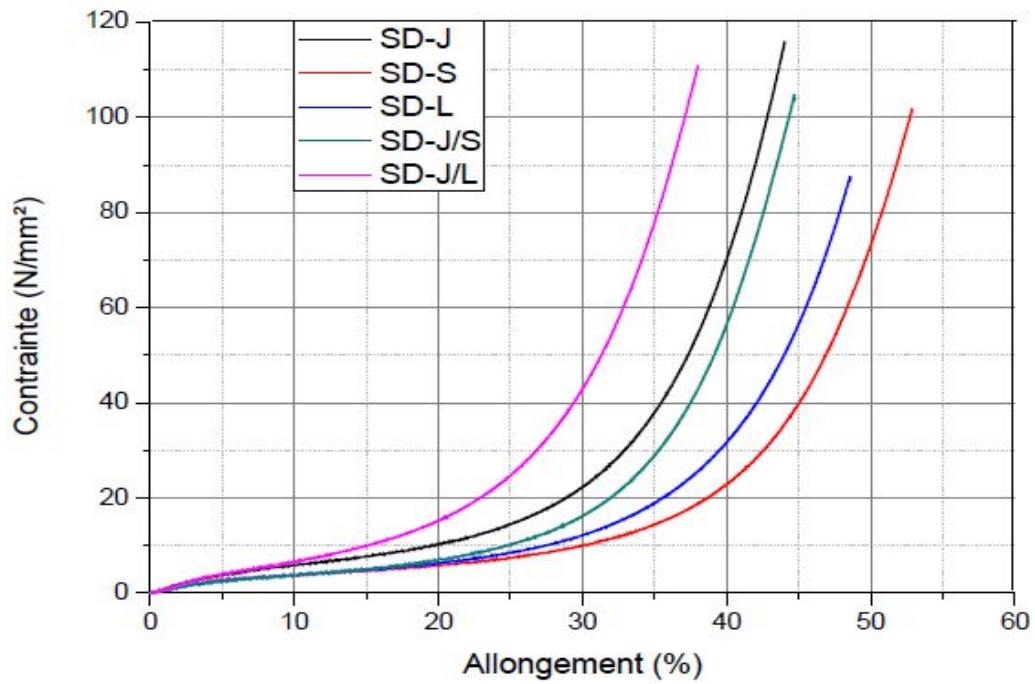


Figure II.10. Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwichs.

[34]

Tableau II.16. Caractéristiques mécaniques en compression perpendiculaire des sandwichs. [34]

Sandwich	Contrainte $\varepsilon = 10\%$, σ_{10} (MPa)	Déformation maximale ε_{\max} (%)	Module d'élasticité apparent E_a (MPa)
SD-J	5.89	42.82	95
SD-S	3.78	52.7	68.3
SD-L	3.78	48.58	58.8
SD-J/S	3.78	44.43	60.1
SD-J/L	6.59	38.69	71.4

D'après les résultats ils ont observé que Le comportement mécanique en compression se déroule en 3 étapes :

D'abord un comportement élastique linéaire pour des petites déformations ne dépasse pas 5% pour toutes les structures sandwiches.

Par la suite, la progression de la contrainte est quasi-constante jusqu'à une déformation qui avoisine 25% pour les SD-S, SD-L et SD-J/S, et 15% pour les structures SD-J et SD-J/L. Cette progression constante de la contrainte s'explique par l'effondrement des granules du liège agglomère.

En fin, une reprise de la rigidité (l'effondrement complet des granulés) de la structure qui conduit à une augmentation prononcée de la contrainte pour atteindre des valeurs maximale de l'ordre de 100MPa. [34]

➤ En 2012, une autre étude faite par HACHEMANE Belkacem [41] sur le thème analyse expérimentale du comportement mécanique d'un composite soumis à des sollicitations d'impacts. Le but de leur étude est de voir l'influence de l'énergie d'impact et de la densité du liège sur le comportement mécanique des plaques composites stratifiées et sandwichs. (force et déplacement) et la taille des dommages, une campagne d'essai dynamique instrumenté a été réalisée.

Les dimensions éprouvette et le type d'essai utilisé dans cette étude sont représentés dans le tableau suivant :

Tableau II.17. Dimensions normalisées des différents échantillons de sandwichs. [41]

Type d'essai	Epaisseur h (mm)	Longueur L (mm)	Largeur b (mm)
impact	14.26±0.63	300	100.36±0.10
Flexion			
Compressions perpendiculaire	14.40±0.91	50.10±0.19	50.16±0.03

Les plaques de liège aggloméré utilisées dans l'élaboration des panneaux sandwichs sont de trois types :

1. Les plaques de lièges agglomérés de grande densité, sont constituées de petits grains de dimension 1 à 2 mm (une densité de 310 Kg/m³).
2. Les plaques de lièges agglomérés de moyenne densité, sont constituées de grains de dimensions 2 à 3 mm et une densité de 270Kg/m³.
3. Les plaques de liège aggloméré de faible densité, sont composées de grains de grosseurs 4 à 16 mm avec une densité de 160 Kg/m³. [41]

Tableau II.18. Appellation des sandwichs en fonction de la densité du liège. [41]

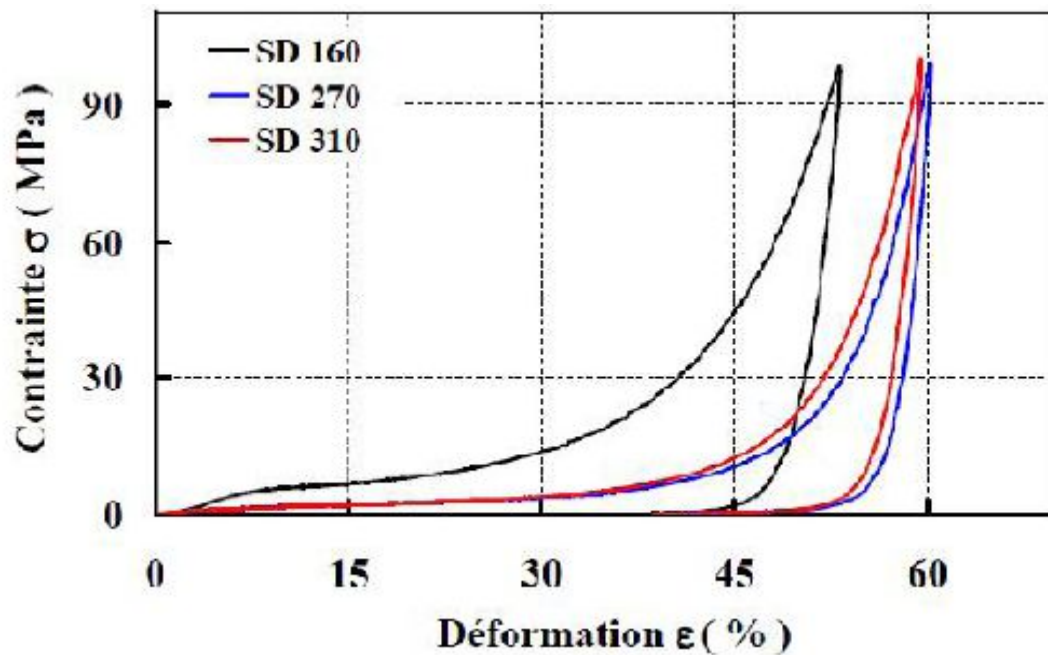
Densité du liège Kg/m ³	Peaux	sandwich
160	Jute/époxy	SD 160
270	//	SD270
310	//	SD310

- **Essais de compression perpendiculaire :**

L'essai de compression perpendiculaire est effectué sur une machine de compression de type SCHENCK PCS 0019 avec un capteur de force de 450KN, avec une vitesse d'essai est de 3mm/mn. L'essai est réalisé suivant la norme NF T 54-602

Tableau II.19. Principales propriétés mécaniques sandwichs jute/époxy_liège. [41]

Référence sandwich	Déformation maximale $\epsilon_{\max}(\%)$	Module d'élasticité apparent E_a (MPa)	Contrainte à $\epsilon=10\% \cdot \sigma_{10}$ (MPa)	Taux de relaxation $\eta(\%)$
SD160	54.11±1.64	71.72±10.11	5.04±0.84	66.59±3.82
SD270	59.56±0.51	15.39±1.39	1.36±0.06	100.85±2.51
SD310	60.95±0.94	14.43±1.33	1.23±0.18	103.72±9.64

**Figure II.11.** Courbe contrainte – déformation de trois matériaux sandwichs lors de la compression perpendiculaire. [41]

D'après d'une série d'essais de compression perpendiculaire (hors plan) sur les sandwichs ils ont observé que chaque matériau sandwich se comportent de manière élastique linéaire jusqu'à une certaine valeur de déformation notée ϵ_c . (Fig II.11) les valeurs de ϵ_c sont 7.5% et 10% pour SD160, SD270 et SD 310 respectivement. Par la suite un collapse élastique selon un plateau pratiquement horizontal s'étend jusqu'à une déformation qui avoisine 30% pour SD160 et 45% pour SD270 et SD310.

Les principales propriétés mécaniques en compression perpendiculaire des sandwichs (tableau II .19) .montre que les déformations maximales est moindre pour le sandwich SD160 .donc ce sandwich est plus rigide que les autres .ils ont conclu que cette différence de rigidité est causée par la grande quantité de résine qui a infiltrée le liège à gros grains. Durant l'élaboration des plaques sandwichs par infusion .autres conséquences de la présence d'assez grande quantité de résine dans le matériau sandwich SD160 sont : Son module d'élasticité apparent E_a qui est plus élevé de 366% pour SD 270 et 397% pour SD310. Son taux de relaxation η inférieur d'environ 34% et 36% compare à ceux de SD270 et SD310. [41]

II.4. Conclusion :

Dans ce chapitre une étude bibliographique sur les structures sandwichs a été réalisée, des travaux de recherches sur la caractérisation mécanique par des essais de flexion 3 points et 4 points, ainsi que des essais de compression ont été présentés.

Le troisième chapitre de ce mémoire sera consacré à l'étude expérimentale sur les matériaux sandwich.

Dans ce chapitre, nous présentons les matériaux constituant les structures sandwichs (leurs mise en forme et caractéristiques mécaniques).

Dans un premier temps, on définit les techniques de caractérisations mécaniques des renforts. Par la suite, nous caractérisons les sandwichs mécaniquement (Essais de compression perpendiculaire, flexion trois et quatre points et essais ultra-son).

Tous les essais de cette étude sont réalisés au niveau de l'unité de recherche UR-MPE (Université de Boumerdès).

I. Techniques d'analyses :

I.1 Caractérisation mécanique des sandwichs :

La caractérisation mécanique des sandwichs réalisés dans cette étude est basée sur les essais mécaniques de type flexion 3 et 4 points suivant la norme AFNOR NF T54-606(1987) dans le but de déterminer la rigidité en flexion, et puis les essais de compression perpendiculaire pour déterminer la contrainte maximale des sandwichs.

I.2 Essai de flexion trois points :

Les essais de flexion 3 points sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle ZO10 au niveau de l'unité de recherche UR-MPE (Figure III.1), dotée d'un capteur de force de capacité 10 kN. Cette machine est pilotée par ordinateur à l'aide de logiciel TextXpert 12.0 qui enregistre la courbe (force – déplacement). La vitesse d'avance est de 2mm/mn.

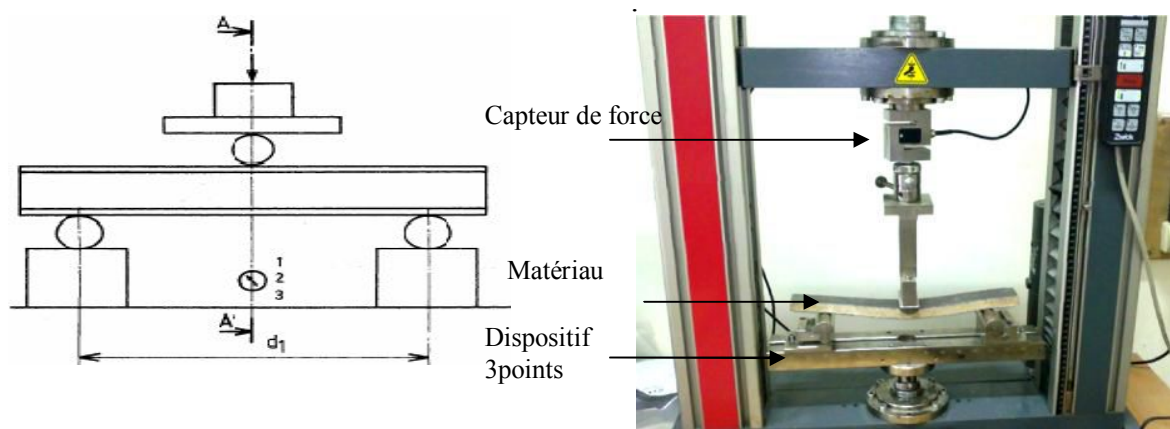


Figure III.1. Essai de flexion 3 points.

La contrainte normale en flexion σ exprimée en N/mm^2 ou MPa est appelée aussi résistance en traction ou en compression des semelles (NF T 54-606).

$$\sigma = (3F_{\max} L) / bh^2 \quad (\text{III.1})$$

Avec :

σ : Contrainte (MPa);

F_{\max} : la force maximale de rupture (N) ;

L : la distance entre appuis (mm) ;

b : largeur de l'éprouvette (mm) ;

h : l'épaisseur de l'éprouvette (mm).

Le module de flexion est donné par l'équation (III.2), avec :

λ : la flèche maximale (mm).

$$E = (FL^3) / (4bh^3\lambda) \quad (\text{III.2})$$

I.3 Essai de flexion quatre points :

Les essais de flexion quatre points sont effectués sur la machine utilisée pour les essais de flexion trois points. Nous avons gardé les mêmes conditions expérimentales.

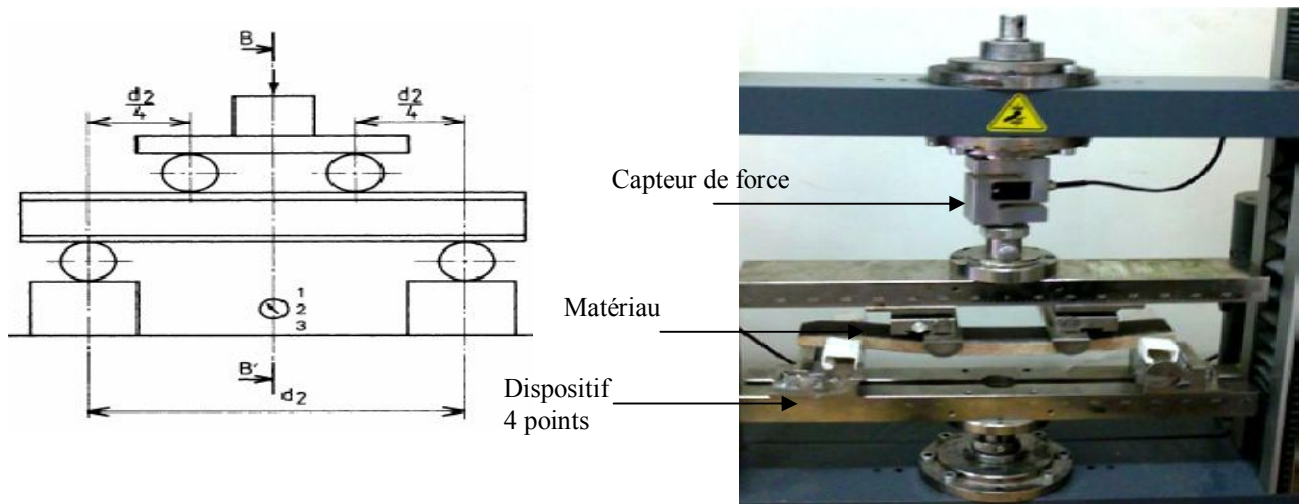


Figure III.2. Machine universelle Zwick/Rolle ZO10.

La contrainte normale en flexion 4 points σ (MPa) appelée aussi résistance en traction ou en compression des semelles (NF T 54-606). La contrainte est définie par l'équation suivante :

$$\sigma = \frac{P2d2}{4es(h+ea)b} \quad (\text{III.3})$$

Avec :

σ : contrainte (MPa);

P2 : Effort maxi (N);

d2 : distance entre appuis (mm);

es : épaisseurs des semelles (mm);

ea : épaisseur de l'âme (mm);

h : hauteur totale (mm);

b : largeur (mm).

I.4 Essai de Compression perpendiculaire :

Les essais de compression sont effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle Z250 au niveau de l'unité de recherche UR-MPE (Figure III.3), dotée d'un capteur de force de capacité 250 kN. Cette machine est pilotée par ordinateur à l'aide du logiciel TextXpert 12.0 qui enregistre la courbe (contrainte – allongement). La vitesse d'avance est de 2mm/mn. Les essais de compression perpendiculaire sont réalisés suivant la norme NF T54-602, l'éprouvette est à base carrée de section (50 x 50 mm).

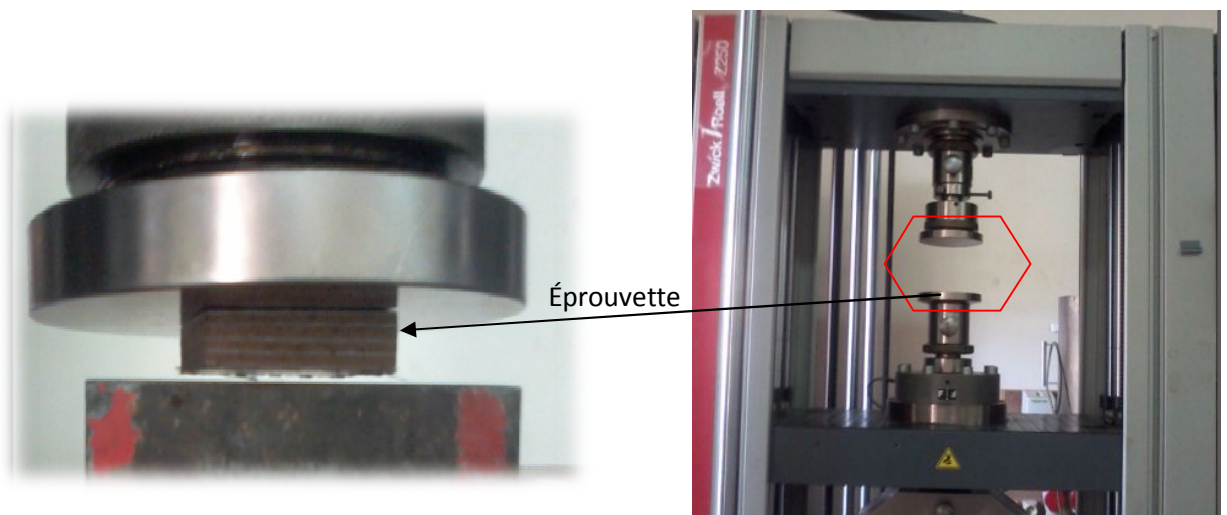


Figure III.3. Essais de compression perpendiculaire.

La contrainte σ (MPa) en compression est défini par l'équation (III.4).

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad (\text{III.4})$$

Avec :

σ : Contrainte (MPa);

F_{\max} : la force maximale de rupture (N) ;

S : la section de l'éprouvette (mm²).

Module d'élasticité apparent E (MPa) est défini par l'équation suivante :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{III.5})$$

Avec

E : Module d'élasticité apparent (MPa) ;

σ : Contrainte (MPa);

ε : Allongements (%)

I.5 Essai Ultra-son :

C372-01 est un appareil à Ultrasons TICO. Selon la norme EN 12504-4, il permet de mesurer la vitesse de propagation du son dans les matériaux et plus particulièrement dans le béton. À partir de la mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore. Avec mémoire non volatile d'une capacité de 25 mesures. Plage de mesure 0.1 à 6553.5 μ s, résolution 0.1 μ s, impulsion de tension 1 kV, taux d'impulsion 1/s, avec 4 batteries 1.5V, 2 transducteurs 54 kHz, câble, barre étalon, sortie RS 232 pour PC,

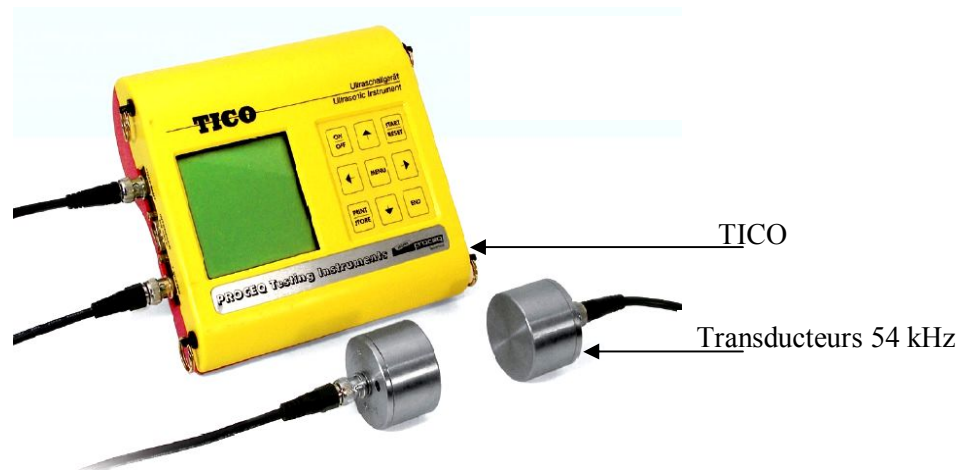


Figure III.4. C372-01 Appareil à Ultrasons TICO.

II. Matériaux utilisés :

II.1 Résine Epoxyde :

La résine utilisée est une résine organique à performances élevées de type époxy fournie par la société GRANITEX (fiche technique annexe A) (Algérie) son nom est Medapoxy STR destiné à la stratification sur différents support à cause de leur très bonne liaison chimiques et sa très bonne adhérence sur les supports béton et acier. Le Medapoxy STR se présente sous formes de kit prés dosés de deux composantes :

- Élément A : la résine.
- Élément B : le durcisseur (Fiche technique annexe B).

Tableau III.1. Caractéristiques de la résine Medapoxy STR (Fiche technique annexe A).

Densité	1.1 ± 0,05	
La viscosité (MPa)	11000 à 25°C	
Durée pratique d'utilisation	1h 15mn à 20°C 65% HR	
Temps de durcissement à 20°C et 65% HR	Hors poisse	6h
	dur	12h
Résistance à la compression (MPa)	>70	
Résistance à la flexion (MPa)	>25	
Durée de mise en service	10j à 20°C	

II.1.1 Conditions d'utilisation de la Résine Epoxyde :

- Ne pas appliquer lorsque la température ambiante ou celle du support est inférieure à 10°C ou supérieure à 30°C.
- L'humidité relative de l'air doit être inférieure à 80%.

II.2 Fibres de verre :

La fibre de verre utilisée dans cette étude est d'une structure tissu (0°, 90°) et une épaisseur de 0.39 mm.

Le tableau III.2 regroupe les caractéristiques mécaniques principales de la fibre de verre tissée.

Tableau III.2. Propriétés mécaniques de la fibre du verre.

Propriétés	Masse volumique (kg/m ³)	Module de flexion (GPa)	Résistance en flexion (MPa)	Résistance en compression (MPa)	Résistance en traction (MPa)	Module de cisaillement (GPa)
Fibre de verre	2600	74	1100	900	3200	30

II.3 Liège aggloméré :

Dans cette étude, nous avons utilisé du liège comme âme isolante dans le sandwich. Le liège est un aggloméré blanc de moyenne densité 2/3 et 1/2, fourni par l'entreprise Taleza Liège située à l'Est de l'Algérie (*Fiche technique annexe C*). L'épaisseur des plaques utilisées est (16mm et 4mm).

Les caractéristiques fournies par l'entreprise nationale des lièges sont les suivantes :

- ❖ Densité: 180 à 270 kg/m³ + ou – 20 kg (données à titre indicatif vu les différents types de granulés utilisés 1/2, 2/3 et 3/5), dans ce qui suit la densité des plaques du liège aggloméré est calculée pour chaque type de granulé,
- ❖ Allongement: 5%,
- ❖ Comportement aux rayons solaires: Léger jaunissement après une année d'exposition,
- ❖ Résistance aux acides: (Après une heure dans l'acide chlorhydrique concentré fumant) avec une concentration massique d'acide chlorhydrique 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,
- ❖ Dimensions: 1028x514x2 à 30mm, 500x500x2 à 30mm.
- ❖ Stabilité dimensionnelle: Bonne stabilité,
- ❖ Variétés: Gamme assez variée.



(a)



(b)

Figure III.5. Lièges agglomérés de moyenne densité
(a) granulés 1 à 2 mm, (b) 2 à 3 mm.

III. Technique d'élaboration :

Les techniques de fabrication jouent un rôle considérable dans les matériaux composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le produit fini. De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépendent surtout des caractéristiques mécaniques, de la géométrie du produit et l'importance des séries.

Dans ce travail, nous avons utilisé une des technologies manuelles de transformation qui est le moulage au contact.

III.1 Moulage au contact :

III.1.1 Principe :

Le procédé de moulage au contact est manuel, il consiste à nettoyer d'abord le moule avec la cire qui est un agent de démoulage (dans notre cas on recouvre le moule par un papier cellophane sur laquelle on met le mélange de la résine pour coller les renforts et les plaque de lièges). Ensuite, on procède à la disposition des couches successives de renfort et de liège imprégné (au moyen d'un pinceau et d'un d'ébulleur qui sert à compacter et chasser les bulles d'air), d'une résine polymérisant à température ambiante. L'ensemble est maintenu dans cet état sous pression (100 bar) jusqu'à la fin de la gélification. A la fin de la polymérisation nous procédons au démoulage.

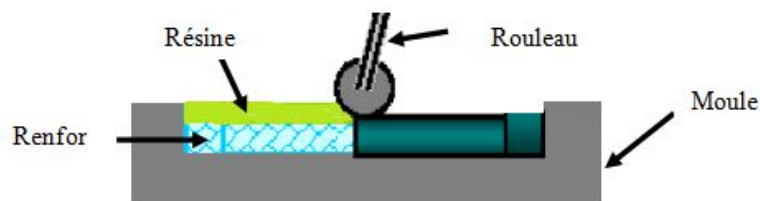


Figure III.6. Procédé du moulage au contact.

III.2 Elaboration des plaques sandwiches par Moulage au contact :

Les plaques sandwiches ont été élaborées au sein de l'atelier bois de l'URMPE. Différentes plaques sandwiches sont élaborées. Elles sont constituées du liège aggloméré d'épaisseur de 16 mm et 4 mm pour l'âme, et pour les peaux, nous avons utilisé des nappes en fibre de verre (tissu).

III.2.1 Découpage des renforts :

Le renfort doit être découpé attentivement tout en respectant les dimensions (450×450 mm) à l'aide de scie métallique (tissu de fibres de verre).



Figure III.7. Plaque de renfort (tissu) découpé

III.2.2 Préparation de mélange de résine :

La préparation de la résine se fait dans l'ordre suivant :

✚ Le rapport de mélange de la résine est :

Élément **B** = 1/3 de l'élément **A** sachant que (A est une résine et B est un durcisseur).

- Pour chaque plaque de sandwich on utilise 200g de l'élément A et 100g de l'élément B.
- On agite pendant 3 à 5min pour assurer une dispersion totale du mélange
- La durée de réticulation du mélange est courte, pour cela il faut l'utiliser juste après sa préparation.

III.2.3 Moulage des sandwichs :

On recouvre le moule en bois par un papier cellophane sur laquelle on met le mélange de la résine sur les renforts et liège.

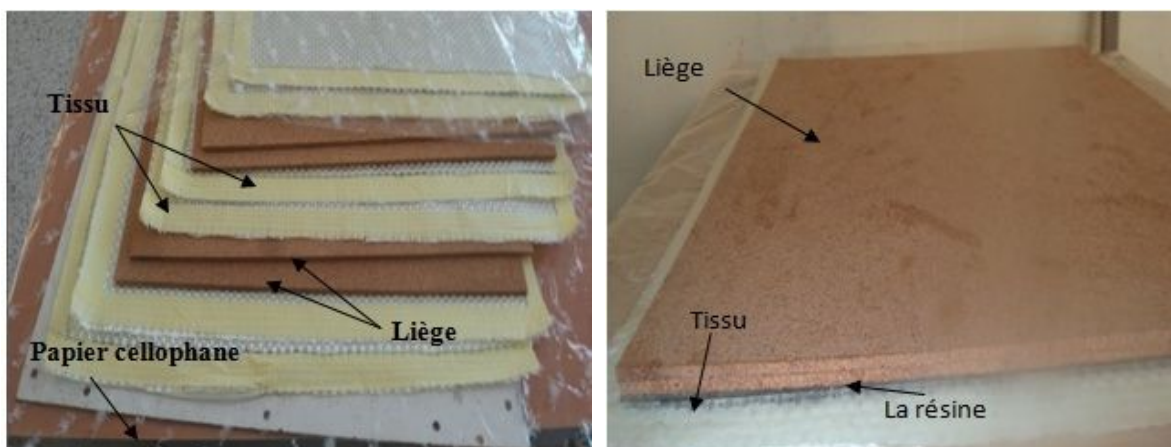


Figure III.8. Mise en œuvre des plaques sandwiches.

1. Sandwich (SDW1) :

On met deux plis de tissu (stratifié) sur la plaque, on fait verser une quantité de mélange sur ce pli et presse à l'aide d'une spatule. Avant de mettre le liège. Une autre quantité de mélange presse sur le liège (16 mm). Après une autre stratifié (2 plis de tissu + la résine entre les plis)



Figure III.9. Superposition de Sandwich (SDW1).

2. Sandwich (SDW2) :

D'élaboration de Sandwich (SDW2) mais les plis sont disposés selon l'ordre suivant :

- ▶ deux plis de tissu → liège (4mm) → deux plis de tissu → liège (4mm) → deux plis de tissu → liège (4mm) → deux plis de tissu → liège (4mm) → deux plis de tissu
- ▶ on fait verser une quantité de mélange sur chaque pli et presse à l'aide d'une spatule.



Figure III.10. Superposition de Sandwich (SDW2).

3. Sandwich (SDW3) :

On fait verser une quantité de mélange sur les plis et les plaques de liège et presse à l'aide d'une spatule. Les plis et le liège (4 mm) sont disposés selon l'ordre suivant :

- deux plis de tissus → deux plaque de liège (4 mm) → deux plis de tissus →
deux plaque de liège (4 mm) → deux plis de tissus.



Figure III.11. Superposition de Sandwich (SDW3).

Après les étapes de moulage de ces sandwiches, on les recouvre par des feuilles de cellophane avant de les mettre dans la presse sous pression de 100 MPa durant 24 heures à une température ambiante.

La presse est hydraulique constituée de deux plaques dont la plaque supérieure est immobile et la plaque inférieure est mobile destinée à presser plusieurs matériaux à chaud et à froid comme les plaques, les portes, le bois... avec un maximum de pression qui peut atteindre 650 MPa.

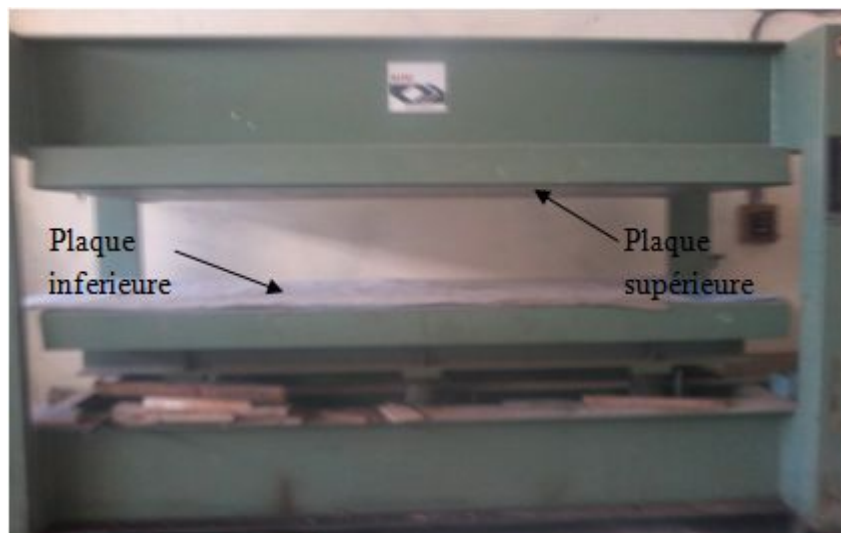


Figure III.12. La presse hydraulique (Chambon Paris).

III.2.4 Démoulage des sandwiches :

Après 24 heures on enlève la plaque de la presse et puis on enlève le papier cellophane.

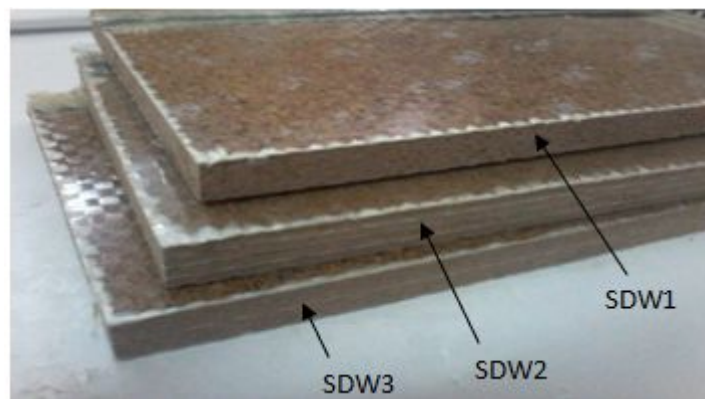


Figure III.13. Les plaques des sandwichs après démoulage.

On met les sandwichs dans l'étuve pendant 8 heures à 80°C afin d'accélérer la réticulation de la résine. Après cela, les sandwichs sont découpés et préparés sous forme d'éprouvettes destinées à l'étude de leurs propriétés.

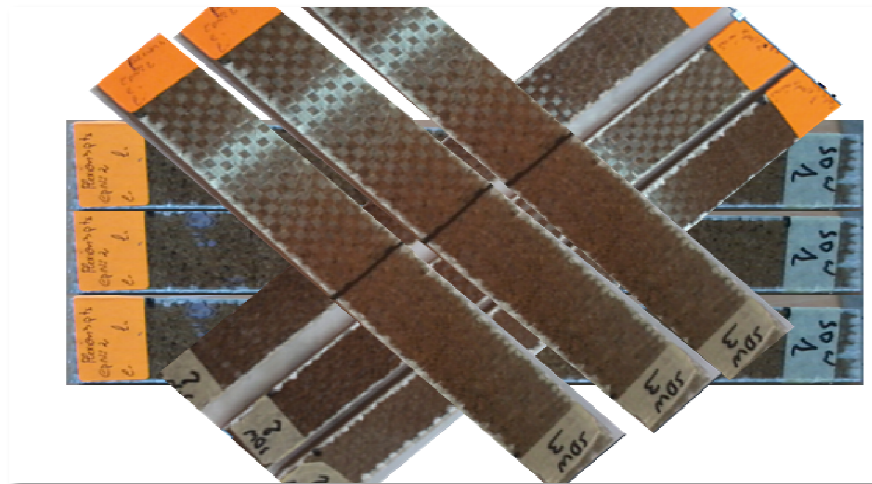


Figure III.14. Echantillons de sandwichs découpés suivant la norme AFNOR NF T 54-606.

IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans la confection des structures sandwichs, leur mise en forme ainsi que les méthodes de caractérisation mécanique utilisées dans cette étude (essai de compression perpendiculaire, de flexion trois points et flexion quatre points, et essais ultra-son).

Les matériaux sandwichs sont un bon compromis entre résistance et légèreté. De ce fait, les domaines d'application très variés font qu'il est intéressant de connaître leurs propriétés mécaniques. Ces matériaux sandwichs sont composés de plusieurs parties interagissant entre elles. Il sera donc possible d'associer judicieusement les propriétés des peaux et celles des matériaux d'âme. L'assemblage de ces deux parties se réalise par collage en mettant en jeu un autre composé de comportement différent. Le but de ce chapitre est de présenter et d'analyser les résultats obtenus en flexion, compression, l'ultrason et analyse hygrothermique des structures sandwichs.

I. Comportement mécanique des structures sandwiches :

La caractérisation des échantillons sandwichs est effectuée à travers des essais de flexion 3 et 4 points suivant la norme AFNOR NF T54-606 (1987).

Cette caractérisation permet de déterminer :

- ✓ La résistance (contrainte) en flexion de la structure sandwich « σ »;
- ✓ Le module de flexion la structure sandwich « E ».

I.1 Essai de flexion trois points :

Les essais de flexion trois points sont effectués sur trois types de structures sandwichs, de dimensions des éprouvettes qui ont été découpées des structures sandwichs sont de 320 x 40 mm. (Figure IV.1). Ces essais ont été effectués sur une machine universelle de type Zwick/Rolle ZO10 au niveau de l'unité de recherche UR-MPE dotée d'un capteur de force de capacité 10 kN.



Figure IV.1. Montage de l'essai de flexion trois points.

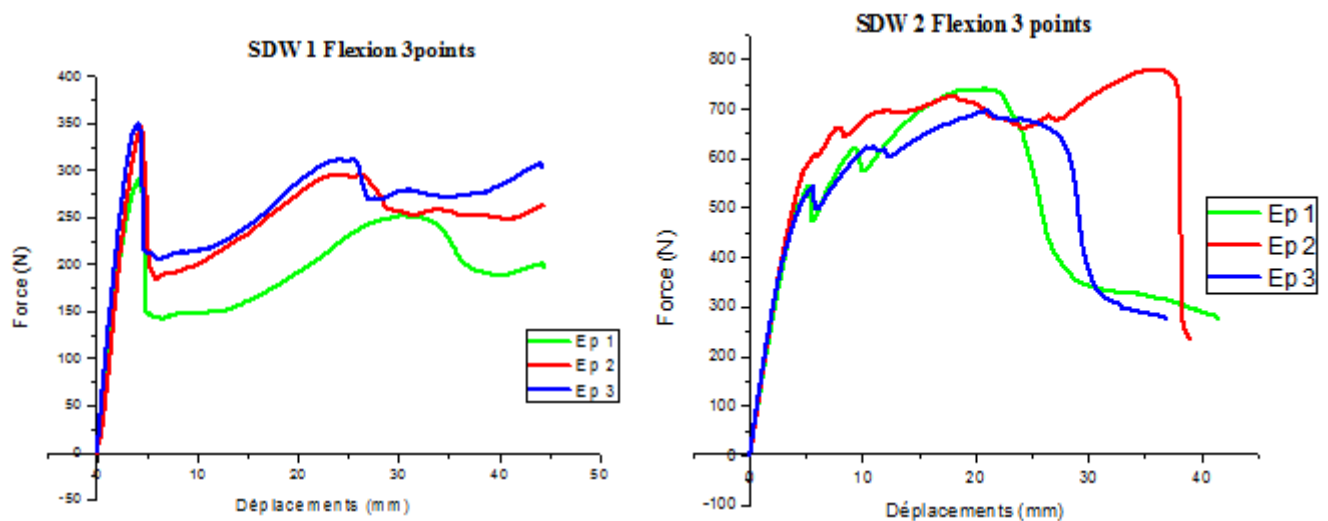
La figure IV.2 montre l'évolution de la force appliquée en fonction de déplacement pour les éprouvettes de différents sandwichs. Le comportement mécanique enregistré par cet essai est non linéaire. La contrainte maximale varie d'un type de structure (selon le renfort qui constitue le sandwich).

Cette évolution se déroule principalement en trois phases :

- ✓ la première phase correspond à une augmentation linéaire de la force appliquée avec le déplacement ;
- ✓ la deuxième phase présente un comportement non linéaire, dont laquelle la charge maximale est atteinte ;
- ✓ la troisième et la dernière phase où l'on observe une diminution de la force appliquée jusqu'à la rupture de certaines éprouvettes.

On observe que les sandwichs SDW 2 et SDW 3 donnent des forces maximales supérieures par rapport à ceux de sandwich SDW 1.

Parmi les trois sandwichs en trouve que, le sandwich SDW 1, donnent la force à la rupture la plus faible (environ 329 N pour un déplacement de 5mm) par rapport aux deux autres structures (SDW 2 et SDW 3). Pour le SDW 3, la force maximale la rupture est atteinte de 625.87 N c'est-à-dire 52% plus grand à celle de SDW1, par conséquent, le SDW 2, possède la forces à la rupture la plus grande (environ 738.19 N pour un déplacement de 15 mm).



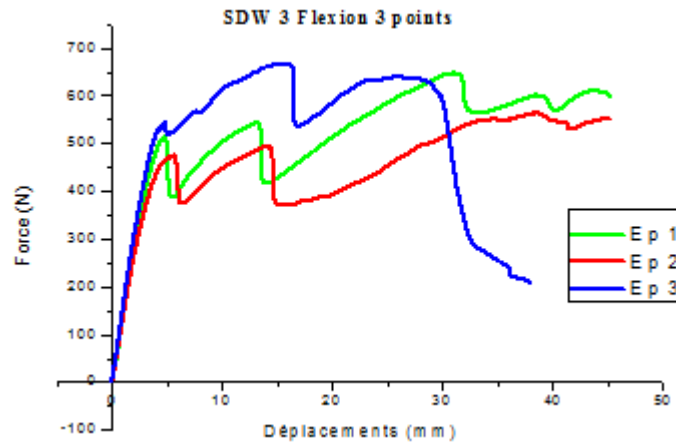


Figure IV.2. Courbes (force-déplacement) en flexion 3 points des trois type structure sandwiches.

D'après la figure IV .3 et le tableau IV .1 on remarque que, la contrainte augmente d'une structure sandwich à une autre, cela peut être expliqué par le nombre des nappes des fibres de verre existant dans chaque type de structure sandwich. Pour le SDW 2 représente la contraint la plus élevée 30.9 MPa (pour 10 nappes des fibres de verre) et le SDW 3 (29.41 MPa pour 6 nappes des fibres de verre), par contre, le SDW 1, possède la contrainte la plus faible (environ de 15 MPa pour 4 nappes des fibres de verre).

Les valeurs de la contrainte et du module de flexion sont représentées dans le tableau IV.1.

Tableau IV.1. Représentes les dimensions des éprouvettes et les résultats des essais mécaniques en flexion trois points des trois types des sandwiches. (NF T54-606)

sandwich	h (mm)	b (mm)	l (mm)	Flèche à F_{max} (mm)	Ecart (mm)	F_{max} (N)	σ (MPa)	E (MPa)
SDW1	12,25	41,56	12,85	4,27	195,95	329,4	15.52	1898,55
SDW2	14,09	40,65	14,48	26,01	225,39	738,19	30.9	754,61
SDW3	12,56	40,66	13,17	28,62	200,91	625,87	29.41	644,44

Pour cette raison cette caractérisation prene une bonne partie dans ce travail, toutes les valeurs obtenues sous formes des histogrammes pour bien éclaircir la différence en valeur entres les différents échantillons étudiés. Ce qui présenté la figure suivante :

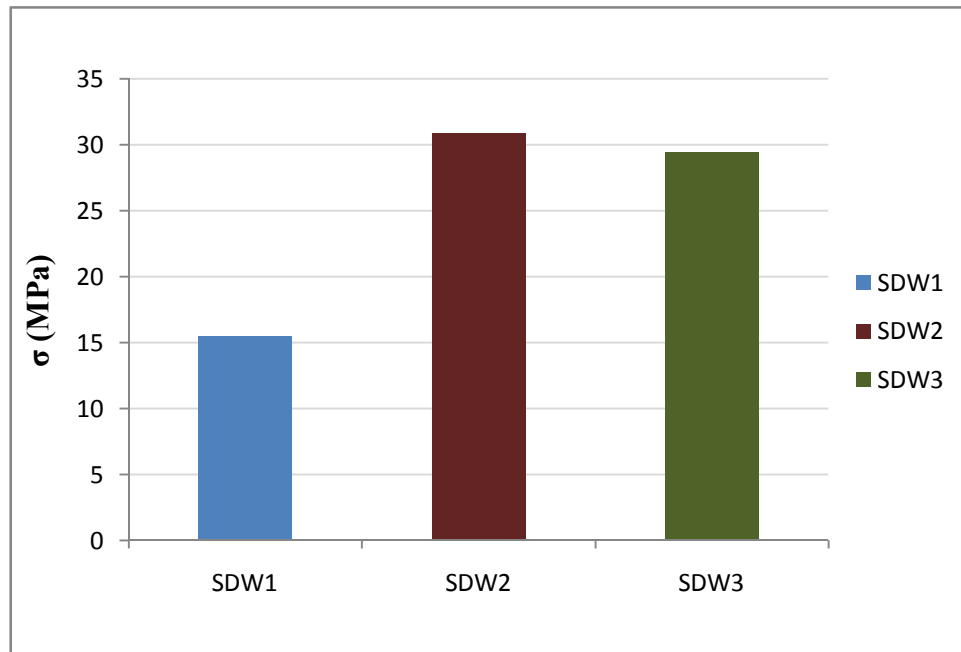


Figure IV. 3. Histogrammes de la contrainte de flexion 3 points des trois structures sandwichs.

I.1.1 Analyse des modes de rupture en flexion trois points :

D'après les observations des éprouvettes des trois types de structures sandwichs testés (figure IV.4), deux modes de rupture ont été observés : une rupture totale de l'éprouvette et une rupture par indentation de la peau supérieure.

On note que la rupture totale des éprouvettes ne s'est produite que dans les sandwichs constitués de deux semelles (une inférieure et une supérieure) avec deux nappes du renfort pour chaque semelle et l'âme qui le liège avec une épaisseur de 16 mm (SDW1). Lorsque on exerce une force de flexion trois point sur cette structure sandwich, la semelle supérieure est soumise à la compression par contre la semelle inférieure est soumise à la traction, c'est dans cette dernière que la rupture va avoir lieu, une fois la contrainte maximale de traction est atteinte, une rupture de la semelle inférieure va se produire, puis elle se propage à l'intérieur de l'âme, ensuite l'éprouvette se casse en deux parties sous l'effet de la charge appliquée en son milieu [figures IV.4 (a)].

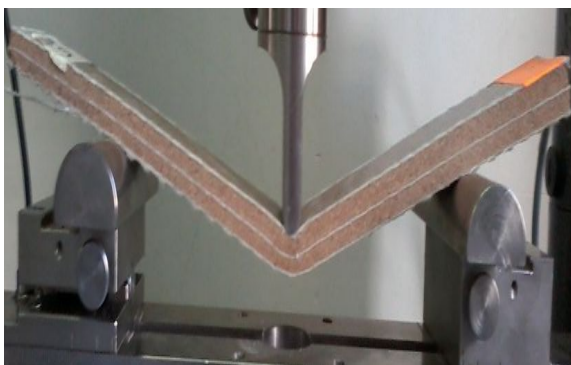
Pour les deux autres sandwichs SDW2 et SDW3, on observe un délaminage entre l'âme et les peaux des structures sandwichs (figures IV.4 (b) et (c)). Dans ces deux cas, l'augmentation du nombre de peaux dans les structures sandwichs, trois peaux pour SDW2 et quatre peaux pour SDW3, a augmenté la résistance à la rupture de ces structures, par la répartition des charges sur l'ensemble des peaux, c'est pour cette raison qu'il n'y a pas de rupture complète de ces sandwichs, par contre on observe une rupture par cisaillement de l'âme (liège) des structures sandwichs SDW2 et SDW3, cela peut être expliqué par la faible résistance au cisaillement du liège, par rapport au stratifié.



(a)SDW1



(b) SDW2



(c) SDW3

Figure IV.4. Modes de rupture en essai de flexion trois points des différents sandwichs.

I.2 Essai de flexion quatre points :

Les essais de flexion quatre points sont effectués sur la machine utilisée pour les essais de flexion trois points. Nous avons gardé les mêmes conditions expérimentales.



Figure IV.5. Montage de l'essai de flexion trois points.

La figure IV.6 représente la courbe (charge- déplacement) des sandwichs en flexion 4 points. Le comportement mécanique enregistré par cet essai est non linéaire. Cette évolution se déroule principalement en différentes phases :

Le SDW 1 présente la force la plus faible dans la série des sandwichs testés, cette charge est de 645.72 N. Pour le SDW 3, la force maximale est de 1101.04 N c'est-à-dire une augmentation de 41% seulement par rapport à la force maximale atteinte par le SDW 1, mais pour le SDW 2 supporte une force maximale plus élevée en flexion quatre points de 1110.08 N par rapport aux deux autres structures (SDW 1 et SDW 3).

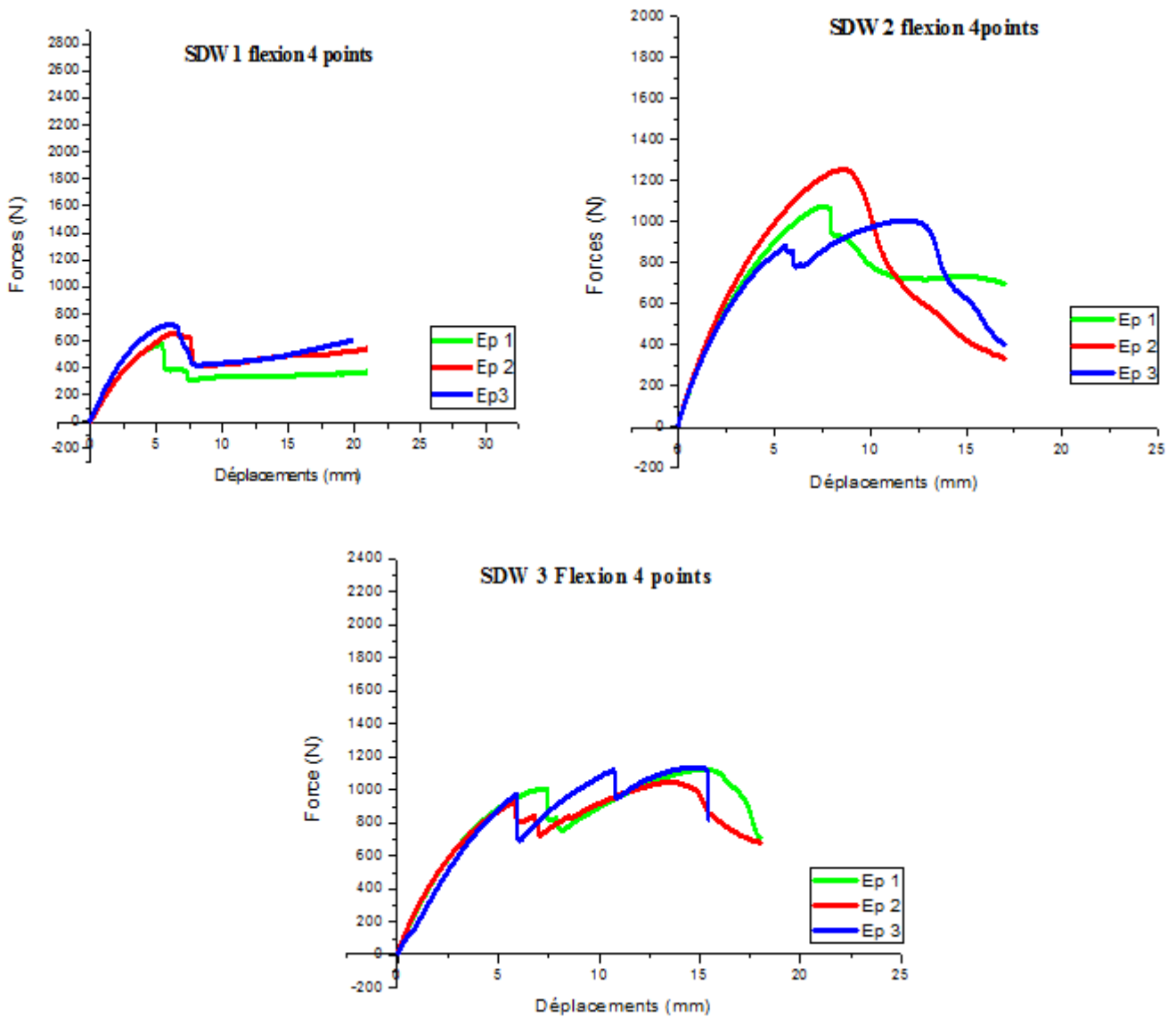


Figure IV.6. Courbes (force-déplacement) en flexion 4 points des trois structures sandwichs.

D'après la figure IV .7, on remarque que, la contrainte augmente d'un sandwich à autre par rapport à le nombre des nappes de fibre de verre existant. Pour le SDW 2 représente la contraintes le plus grand atteinte 24.70 MPa et le SDW 3 environ de 24.67 MPa, par suite, le SDW 1, possède la contrainte la plus faible (environ de 14.43 MPa pour 4 nappes des fibres de verre).

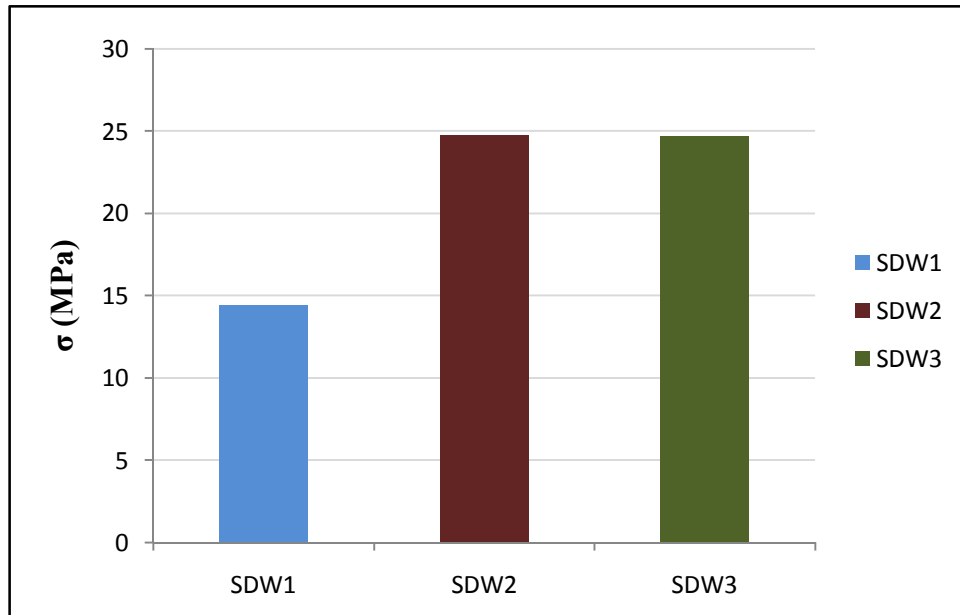
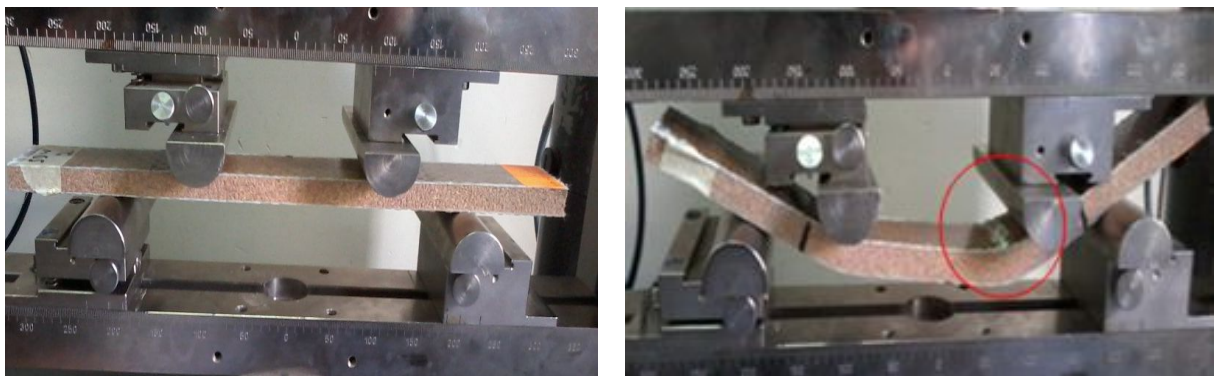


Figure IV. 7. Histogrammes de la contrainte à la flexion 4 points des différents sandwichs

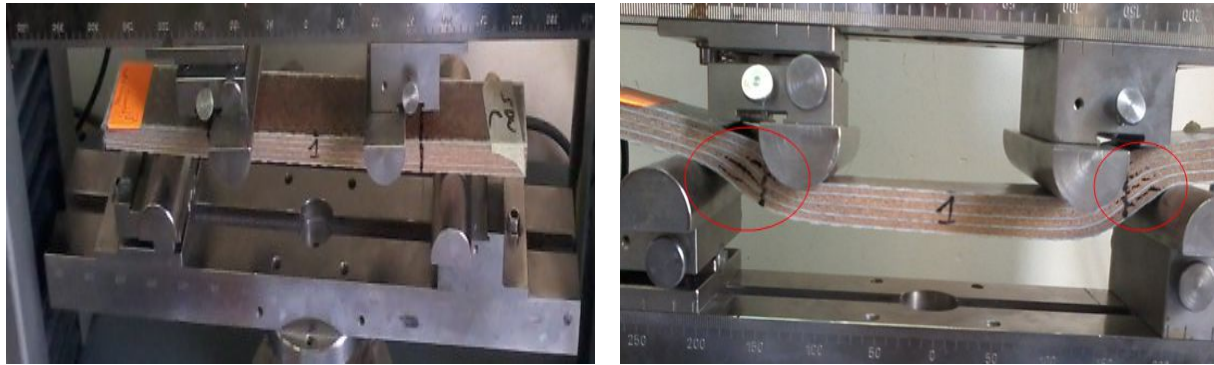
I.2.1 Modes de rupture en flexion quatre points :

Dans l'essai de flexion quatre points, La rupture débute par une fissuration de la semelle supérieure, et avec l'augmentation de la charge, la rupture se propage en parallèle de l'interface peau supérieure/âme ce qui entraîne l'arrachement des particules du liège (absence de délaminage a l'interface peau/âme) (Figure IV.8). La charge atteinte sa limite supérieure produisant ainsi la rupture de liège. Lorsque l'âme est endommagée, la rupture continue sa propagation dans les particules du liège près de l'interface âme/peau inférieure.

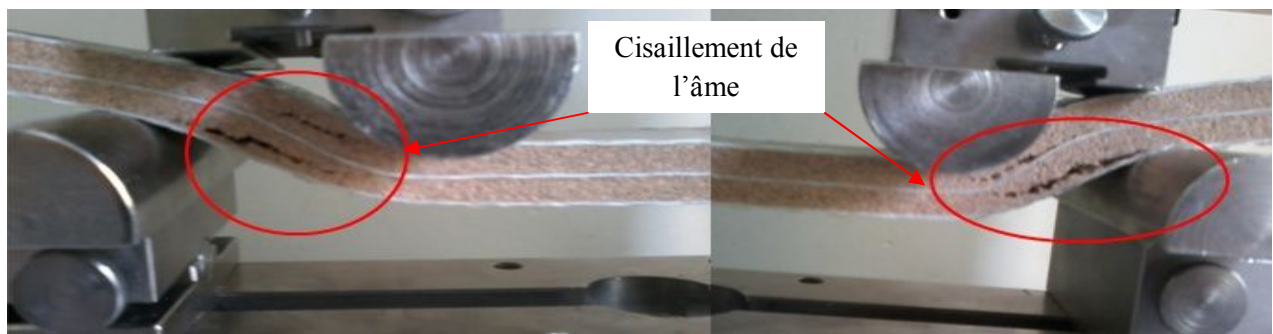
Ce mode de rupture observé pour tous les échantillons est la rupture par cisaillement de l'âme.



(a)SDW1



(b) SDW 2



(c) SDW 3

Figure IV.8. Modes de rupture en flexion quatre points des trois type de structure sandwichs.

Les résultats de l'essai de flexion quatre points sont présentes dans le tableau IV.2 (Selon la norme NF T54-606).

Tableau IV.2. Résultats de l'essai de flexion quatre points pour les trois structures sandwichs.

sandwich	h (mm)	b (mm)	l (mm)	Fleche à F_{max} (mm)	Ecart (mm)	F_{max} (N)	σ (MPa)	E (MPa)
SDW1	12,73	41,67	41,77	6	203,73	645,72	14,43	2645,79
SDW2	13,29	40,57	42,02	9.41	212,59	1110,08	24,70	3120,69
SDW3	13,22	40,55	42,15	14.69	211,63	1101,04	24,67	1894,84

La figure IV.9 représente les histogrammes comparatifs entre les forces maximales et les contraintes de flexion 3 et 4 point.

D'après cette figure on remarque que les forces maximales en flexion 4 points est plus élevée par rapport en flexion 3 points et la force varie d'un sandwich à l'autre par rapport au nombre des nappes de fibre de verre (stratifié) existante dans le sandwich. Chaque force donne une contrainte propre qui varie selon le nombre des renforts et le type de liège. Par exemple la force maximale en flexion 3 points est donnée par la structure de sandwich SDW 2 (environ de 738N) et même structure possède la contrainte la plus élevée de 30.9 MPa. Même remarque pour les structures en flexion 4 points la force maximale donnée par SDW 2 (1110.08N) et la contrainte de 24.70MPa.

D'après les résultats, on conclut que les échantillons qui ont un nombre important de fibres (stratifié) présentent une évolution importante de la résistance à la flexion.

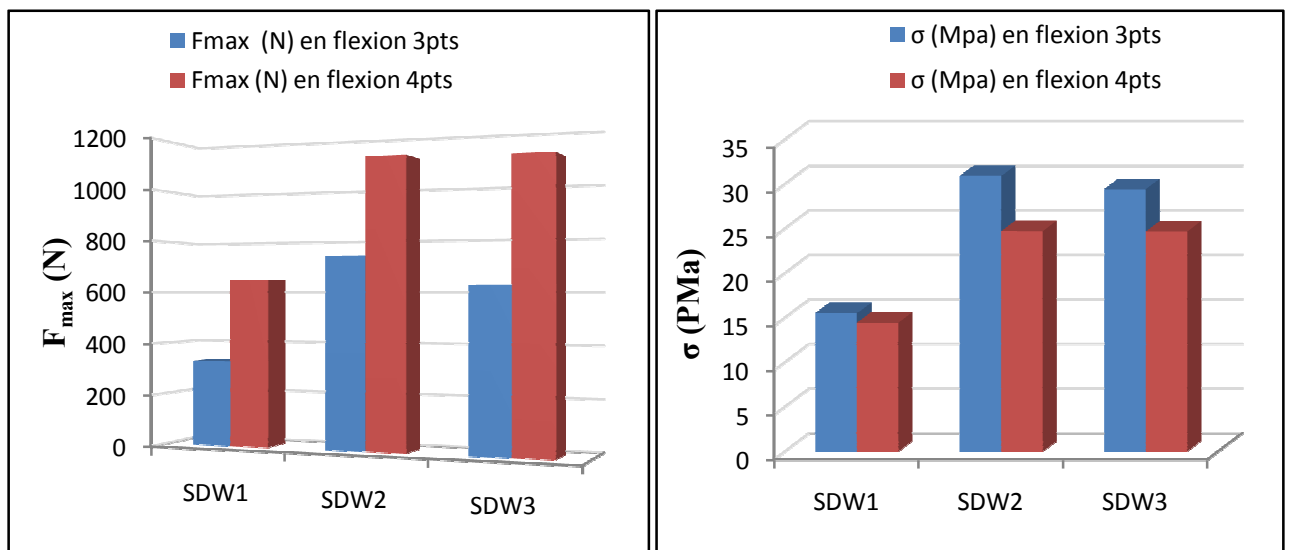


Figure IV.9. Histogrammes comparatifs des valeurs des forces maximales et des contraintes des éprouvettes en essai de flexion 3 et 4 points.

I.3 Essais de compression perpendiculaire :

La rigidité en flexion d'un matériau sandwich dépend de la distance entre les peaux, et lors de l'application des charges, cette distance doit être maintenue pour conserver une bonne rigidité en flexion. Par ailleurs, sous l'effet de la charge localisée, le matériau sandwich est soumis à des poinçonnements localisés. Ainsi le comportement en compression dans l'épaisseur des panneaux joue un rôle important pour conserver au matériau sandwich de bonnes propriétés pour les charges élevées.

L'essai de compression perpendiculaire est réalisé suivant la norme NF T54-602 pour l'identification du comportement.

L'essai est effectué sur des éprouvettes à base carrée de section 50x50 mm. Ces dernières sont placées entre deux plateaux parallèles d'une machine universelle type Zwick 250 de capacité 250 kN avec un pilotage et acquisition des données par ordinateur à l'aide du logiciel TextXpert 12.0 la vitesse d'essai est de 2mm/mn.

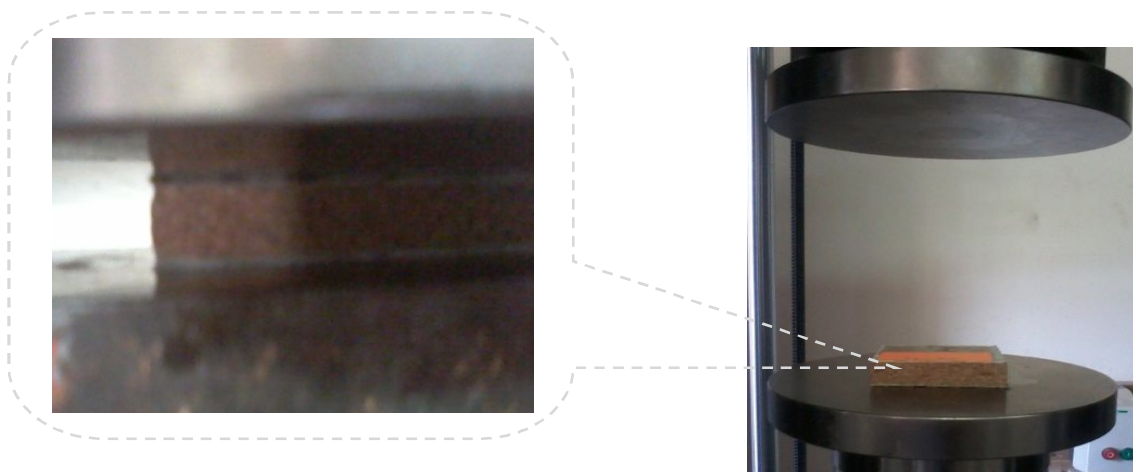


Figure IV.10. Montage de l'essai de compression perpendiculaire avant et après essais sur les sandwichs

Le comportement en compression du liège dans les structures sandwichs est reporté par la figure IV.11. Cette figure donne les courbes (contrainte-Allongement). On observe un comportement qui se déroule en 3 étapes : d'abord un comportement élastique linéaire pour des petites déformations ne dépasse pas 5% pour toutes les structures sandwichs. Par la suite, la progression de la contrainte est quasi-constante jusqu'à une déformation qui avoisine 20% pour les SDW1, SDW3, et 15% pour les structures SDW2. Cette progression constante de la contrainte s'explique par l'effondrement des granules du liège agglomérés. En fin, une reprise de la rigidité (l'effondrement complet des granulés)

de la structure qui conduit à une augmentation prononcée de la contrainte pour atteindre des valeurs maximales de l'ordre de 60MPa pour SDW2 et SDW3, une valeur de 40 MPa pour SDW1.

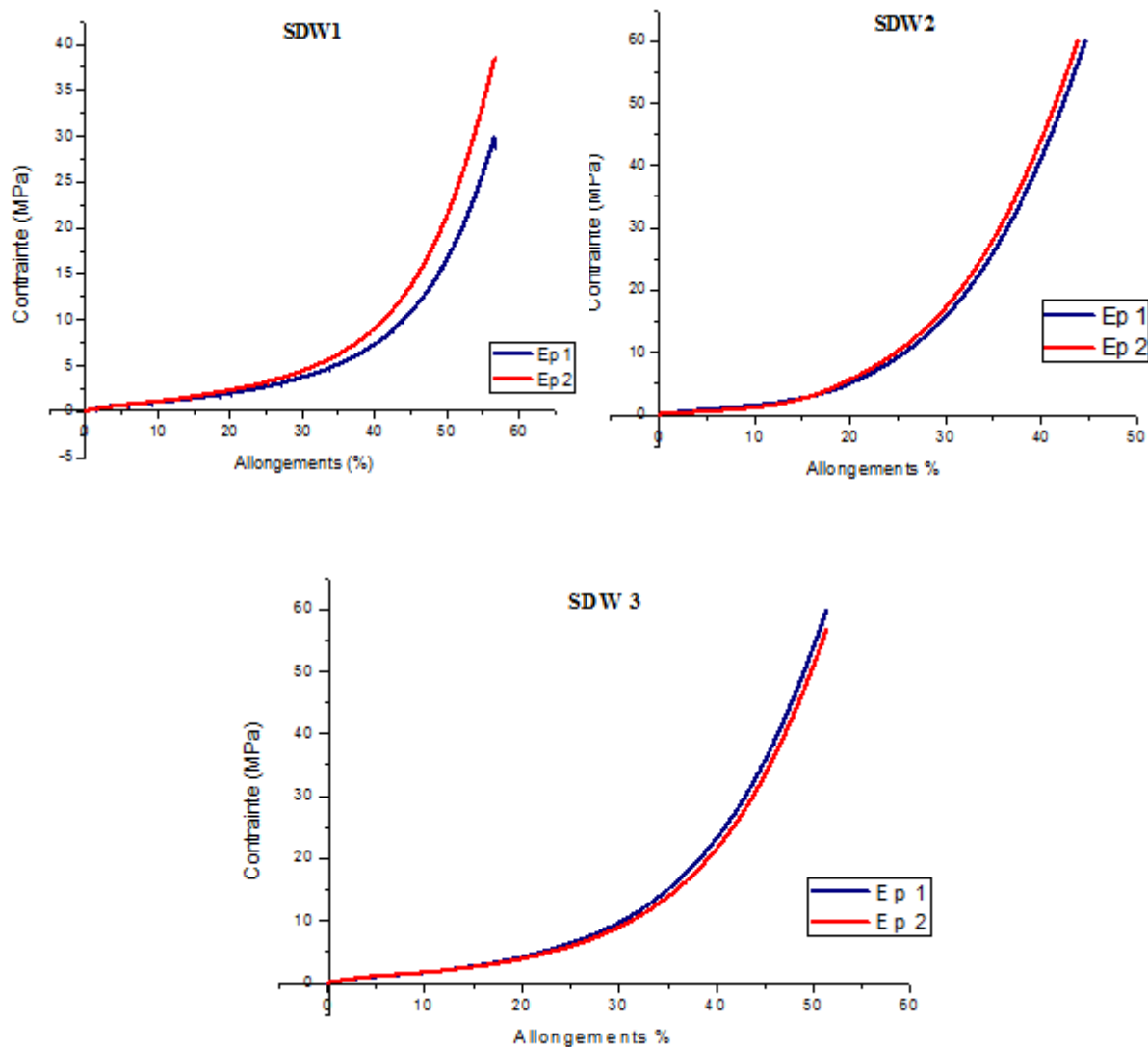


Figure IV.11. Comportement en compression perpendiculaire des structures sandwichs.

Nous avons représenté dans le tableau IV.3, les caractéristiques mécaniques déduites de l'essai de compression perpendiculaire effectuée sur les différentes structures sandwichs.

Ce tableau donne les valeurs du module d'élasticité apparent E , de la déformation maximale ϵ_{\max} et de la contrainte à 20% de déformation.

Tableau IV.3. Caractéristiques mécaniques en compression perpendiculaire des sandwichs.

Sandwich	Contrainte à $\varepsilon=20\%$, σ_{20} (MPa)	Déformation maximale ε_{max} (%)	Module d'élasticité apparent E (MPa)
SDW 1	2.11	58.03	72.02
SDW 2	5.25	44.32	94.23
SDW 3	3.77	51.90	82.33

II. Essai Ultra-son :

Les essais de l'Ultrasons sont effectués sur des éprouvettes de différents sandwichs et liège. De dimensions 100x100mm. Selon la norme EN 12504-4, Ces essais sont effectués sur Appareil TICO, qui permet de mesurer la vitesse de propagation, à partir de la mesure du temps de propagation de l'onde ultrasonore. Une substance de contact est utilisée (graisse) à la surface pour assurer un meilleur contact entre les transducteurs et les échantillons.

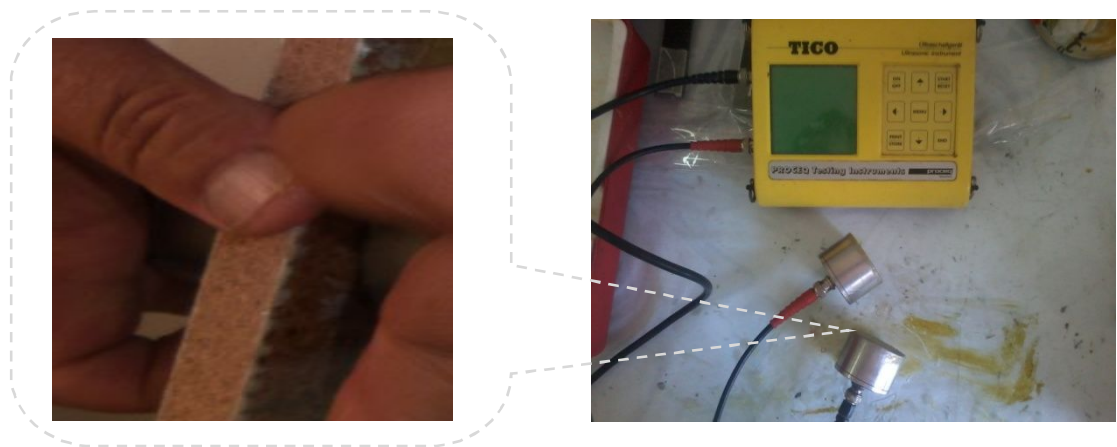


Figure IV.12. Montage de l'essai d'ultrasons.

D'après le tableau IV.4 et la figure IV.13, on remarque que la vitesse de propagation varié d'un échantillon à un autre, selon le type des échantillons. En observe que, le liège possède la vitesse la plus faible (210 à 320m/s) à cause de l'existence des pores a l'intérieure de leur structure qui atténue la vitesse de sons.

Cette vitesse augmente dans les sandwichs jusqu'à atteindre les valeurs suivantes : 510m/s pour SDW 1 (une couche de liège 16mm avec 2 stratifié) et 530m/s pour les deux autres sandwichs SDW 2 et SDW 3 les valeurs sont égales parce que les deux sandwichs possèdent le même nombre de couche de liège (4 couche de liège de 4mm) cette augmentation est expliquée par la pénétration de la résine à l'intérieure des pores du liège, par conséquent la porosité des deux structures sera diminuée et la vitesse de propagation de l'onde sonore augmente.

En comparant les résultats obtenus sur les trois types de structures sandwichs avec des résultats d'autres matériaux, tel que le béton et le bois, on constate que la vitesse de propagation des structures sandwichs est beaucoup plus faible que celles du béton et du bois, parce que le liège est un bon isolant acoustique.

Les résultats de l'ultra-son sont présents dans le tableau IV.4 (Selon la norme EN 12504-4)

Tableau IV.4. Résultats de la vitesse de propagation des différents échantillons.

Echantillon	Temps (μ s)	Epaisseur (m)	Vitesse de propagation (m/s)
Liège 16mm	49.9	0.016	320
Liège 4mm	19.3	0.004	210
SDW 1	25.4	0.013	510
SDW 2	28.3	0.015	530
SDW3	26.2	0.014	530
Bétons	/	0.15	3700 à 4200
Bois	/	0.05	1950 à 2100

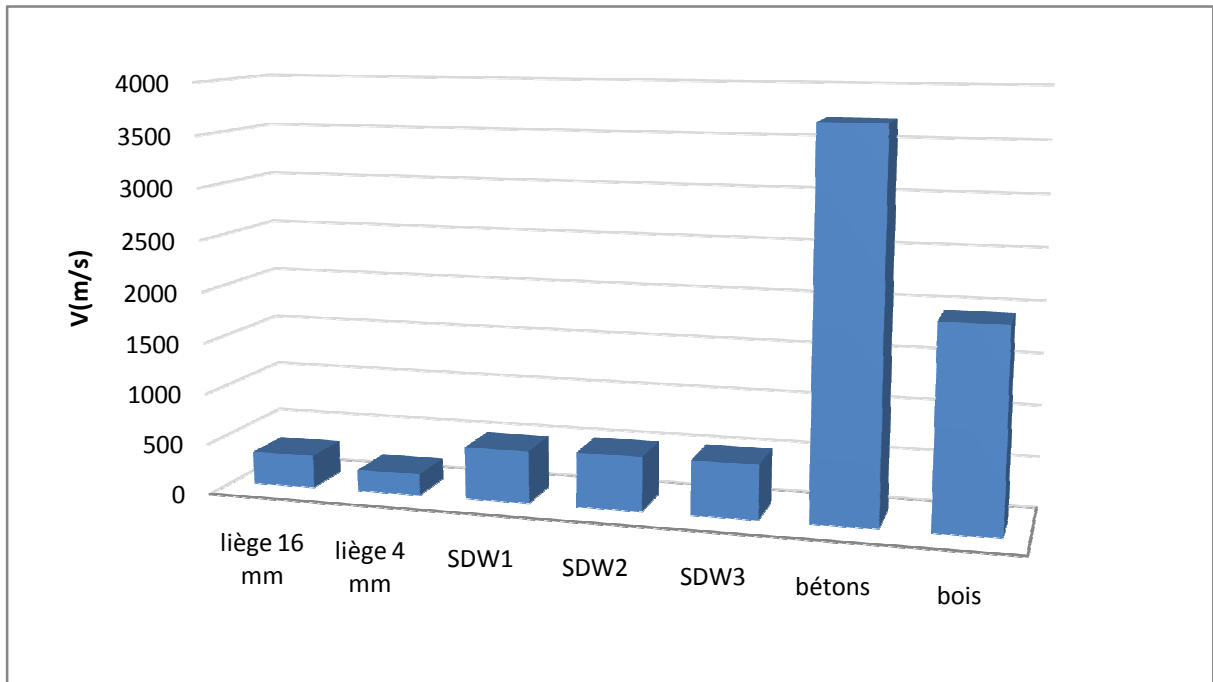


Figure IV.13. Histogrammes comparatifs des valeurs de la vitesse de propagation entre le liège, les structure des sandwiches et d'autres matériaux.

III. Caractérisation hygrothermique de liège et matériaux composite :

III.1 Masse volumique:

La masse volumique d'échantillon a été déterminée pour les différents sandwichs suivant la norme NF EN12390 – 7. L'essai a été réalisé sur des éprouvettes de (50x50) mm², qui possèdent un volume réel (V), les éprouvettes ont été séchées dans l'étuve jusqu'à obtention d'une masse (m) constante.

La masse volumique est déterminée par la formule suivante :

$$\rho = M/V \quad (IV.1)$$

Les résultats sont représentés dans le tableau suivant.

Tableau IV.5. Masse volumique et densité du liège et matériaux sandwich.

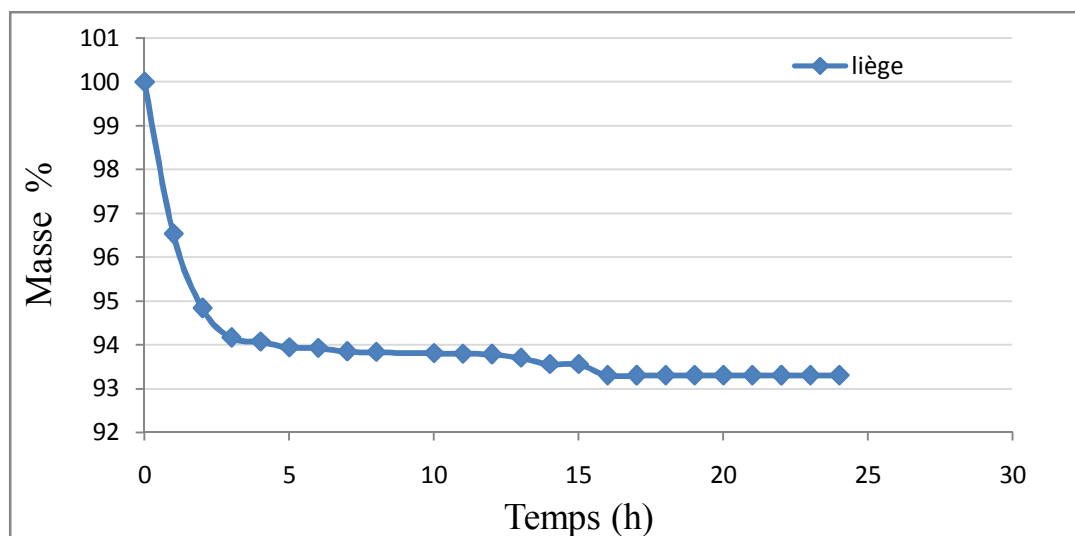
Matière	Masse volumique (Kg/m ³)	Densité
Liège 16mm (2/3)	269.875	269.875
Liège 4mm (1/2)	290.46	290.46
SDW 1	628.25	628.25
SDW 2	950.04	950.04
SDW 3	790.36	790.36

III.2 Séchage en étuve :

L'analyse de la variation de la masse du liège en fonction du temps est effectuée à une température de 100°C dans une étuve pendant 24 heures. Les échantillons de lièges testés se caractérisent par les dimensions suivantes 50 x 50 mm. Les échantillons ont été pesés avant l'essai, par la suite, les pesées ont été effectuées chaque heure pendant 24 heures pour quantifier la perte de masse.

La figure IV.14 montre la variation de la masse du liège aggloméré en fonction du temps de séchage dans une étuve à 100°C.

Le liège perd dans les 5 premières heures 6% de sa masse, ensuite 0.18% jusqu'à 24 heures.

**Figure IV.14.** Variation de la masse du liège en fonction du temps de chauffage à 100°C.

III.3 Pouvoir d'absorption d'eau:

Ces essais ont été réalisés suivant la norme NF EN 1609 à température et humidité contrôlées. Le tableau IV.6 représente la masse initiale m_0 des spécimens testés avant l'immersion, la surface en contact avec l'eau, la masse après 24 heures ainsi que pouvoir d'absorption Wp (kg/m^2) des trois types de structures sandwichs. Par la suite les spécimens partiellement immergés dans l'eau durant 24 heures sont maintenus par un poids pour ne pas flotter sur l'eau (voir figure IV.15). Après 24 heures en immersion dans l'eau, l'égouttage des échantillons se fait pendant 10 minutes, les échantillons sont placés verticalement (figure IV.16).

L'équation IV.2 donne le pouvoir d'absorption de l'eau Wp (kg/m^2).

$$Wp = \frac{m_{24} - m_0}{A_p} \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

Wp : pouvoir d'absorption (kg/m^2);

m_0 : masse initiale (kg);

m_{24} : masse après 24h (kg);

A_p : (aire) longueur x largeur (m^2).

Tableau IV.6. Valeurs des masses d'échantillon avant et après immersion dans l'eau.

Matières	Masse initiale m_0 (Kg)	Aire A_p (m^2)	Masse après 24h m_{24} (kg)	Pouvoir d'absorption Wp (kg/m^2)
Liège 16mm	10.07×10^{-3}	2.5×10^{-3}	15.96×10^{-3}	2.356
Liège 4mm	2.74×10^{-3}	2.5×10^{-3}	6.73×10^{-3}	1.596
Liège avec résine	8.74×10^{-3}	2.5×10^{-3}	9.07×10^{-3}	0.132
SDW 1	18.95×10^{-3}	2.5×10^{-3}	19.32×10^{-3}	0.148
SDW 2	23.67×10^{-3}	2.5×10^{-3}	24.64×10^{-3}	0.388
SDW 3	21.41×10^{-3}	2.5×10^{-3}	22.08×10^{-3}	0.268

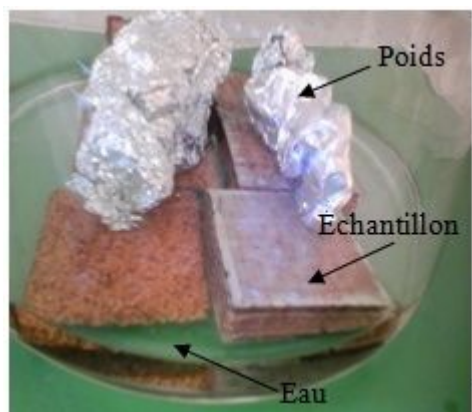


Figure IV.15. Immersion partielle du liège dans un bac à eau.



Figure IV.16. Egouttage des échantillons pendant 10 minutes.

La figure IV.17 donne les valeurs du pouvoir d'absorption d'eau du liège aggloméré sans résine et avec résine et les matériaux sandwichs en immersion partielle dans un bac d'eau pendant 24 heures.

On remarque que le pouvoir d'absorption du liège aggloméré sans résine est très important comparé au liège avec résine. Le liège sans résine possède un pouvoir d'absorption de l'ordre de 2.356 Kg/m^2 pour liège de 16 mm et le liège avec résine de l'ordre de 0.132 Kg/m^2 .

Cette différence est liée à l'existence de résine entre les granulés de liège qui empêche l'eau de pénétrer à l'intérieur de liège. Même remarque pour les sandwichs, d'après l'histogramme du pouvoir d'absorption d'eau de la figure IV.17, on note que le pouvoir d'absorption des trois types de structures sandwichs varie entre 0.148 et 0.388 kg/m^2 , ces derniers sont faibles comparativement à ceux de liège aggloméré, cette diminution du pouvoir d'absorption des structures sandwichs est due principalement à la présence des couches de stratifié et aussi la résine qui pénètre dans les pores du liège aggloméré et de ce fait l'absorption des structure sandwichs seras réduit.

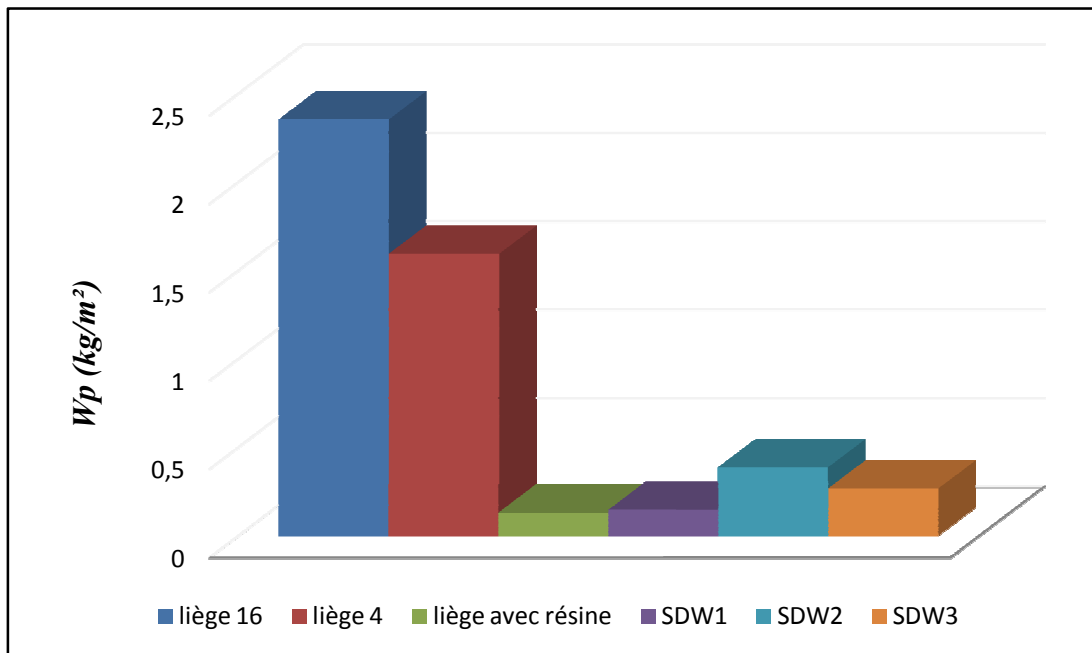


Figure IV.17. Histogramme du pouvoir d'absorption d'eau des lièges et des sandwichs.

IV. Conclusion :

La identification des caractéristiques mécaniques est la première étape dans la compréhension des matériaux sandwichs, pour cette raison nous avons abordé dans ce chapitre quelques méthodes permettant d'estimer les propriétés mécaniques et hygrothermiques des sandwichs et les matériaux constituant ces derniers.

Lorsque nous comparons les résultats expérimentaux avec ceux qui ont été abordés dans le deuxième chapitre, nous constatons un léger écart. Cette différence est très raisonnable compte tenu des défauts résultant lors de processus de fabrication des structures sandwichs, notamment la présence des bulles d'air et aussi des erreurs qui peuvent apparaître lors de la manipulation des appareils d'essais. Ainsi que la qualité des matériaux utilisés pour la fabrication des matériaux sandwichs multicouche peuvent avoir une influence sur les caractéristiques physico-mécaniques de ces derniers.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a fait l'objet de l'étude du comportement mécanique des structures sandwichs constitués de stratifiés en fibre de verre tissu et une âme en liège aggloméré blanc de moyenne densité (1/2 (4mm) et 2/3(16mm)). La résine utilisée dans l'élaboration des structures sandwichs est de nature époxyde.

Le premier chapitre théorique a permis de faire le point sur les connaissances dans le domaine des matériaux composites et des différents renforts.

Le deuxième chapitre est consacré aux différentes études bibliographiques faites dans le domaine des matériaux composites multicouches.

Le troisième chapitre résume tous les techniques expérimentales utilisées pour déterminer les caractérisations mécaniques et hygrothermiques des structures sandwichs et des matériaux constituants (renforts, stratifiés et liège). Cette caractérisation nous a permis de déterminer les propriétés intrinsèques des matériaux élaborés.

Les structures sandwichs sont élaborées par la méthode de moulage au contact. Après réticulation complète de la matrice, une caractérisation destructive et non destructive est effectuée sur des éprouvettes normalisées. Nous intéressons dans cette étude au comportement mécanique en flexion trois et quatre points, compression perpendiculaire et l'essai ultrason pour mesurer la propagation de son à travers ces structures.

Ces essais montrent certaines variabilités liées en grande partie à la nature du renfort. Les essais mécaniques en flexion trois et quatre points effectués, ont montré un comportement commun pour les trois types des sandwichs avec des modes de rupture différents dont on note une rupture totale des éprouvettes par indentation de la peau supérieure dans le cas de flexion trois points et rupture par cisaillement de l'âme dans le cas de flexion quatre points, et les meilleurs résultats sont enregistrés par les structures sandwich SDW2.

Les essais de flexion ont permis aussi de calculer le module d'élasticité apparent et la contrainte à la rupture des sandwichs selon la norme NF T54-606. Le module d'élasticité de sandwich SDW2 est de 754,61MPa et de 3120,69MPa en flexion 3 et 4 points respectivement, contrairement à la contrainte en flexion déterminée par la même norme qui nous donne une valeur moyenne de 30.9MPa en flexion 3 points et de 24,70MPa en flexion 4 points pour la même structure sandwich SDW2.

Les essais mécaniques par compression perpendiculaire réalisés sur les trois structures sandwichs selon la norme NF T54-602, nous montrent une contrainte maximale de 60 MPa pour SDW2 et SDW3, une valeur de 40 MPa pour SDW1.

Le comportement est élastique et identique pour les trois structures sandwichs.

D'après les résultats des essais ultrasons on remarque que les structures sandwich multicouches montrent une isolation acoustique est dix fois moins par rapport aux matériaux béton et bois.

L'analyse hygrothermique a montré l'influence de la température et du temps de chauffe sur la masse du sandwich. Cette analyse a présenté aussi l'influence de type de renfort sur le pouvoir d'absorption d'eau en immersion partielle. D'après les essais réalisés, on constate la bonne compatibilité entre les renforts, le liège aggloméré et la résine époxy.

En conclusion, les résultats de cette étude contribuent à la compréhension du comportement des structures sandwich soumises à des charges statiques. Néanmoins, certains points pourront être développés et étudiés dans le futur. En effet, à partir des résultats expérimentaux de cette étude, une étude des propriétés chimiques et physique pourrait être faite pour prédire son comportement à son environnement d'utilisation. En outre, une observation au microscope électronique à balayage serait sans doute utile afin de pouvoir mieux identifier les modes de rupture et les phénomènes d'adhésion.

Références bibliographiques

- [1] **MEBARKI ABD ELYAMINE**, Analyse dynamique libre des plaques composites multicouches, Mémoire de magister, Université Mentouri Constantine. 2009.
- [2] **Mustapha MALHA**, Mise en œuvre, caractérisation et modélisation de matériaux composites : polymère thermoplastique renforcé par des fibres de doum. Thèse de doctorat, université Mohammed v – AGDAL Rabat. 2013
- [3] **CARMA_ glossaire des matériaux composites. Décembre 2004**
- [4] **Nouredine ARABI**, contribution à l'étude du composite ciment-verre et durabilité des fibres de verre. Thèse de doctorat, université BM-ANNABA. 2006
- [5] **Vincent Plana**, caractérisation par méthode inverse et modélisations des propriétés thermo physiques orthotropes des matériaux composites. Thèse de doctorat. Ecole SUPAERO de France. 2003 page 9-10
- [6] **ARIBI Chouaib**, étude comparative du comportement des différents matériaux composites (différentes matrices).Mémoire de magister, Université de Boumerdès. 2011
- [7] **Jeanne SEYVET**, Etude prospective stratégique sur les matériaux composites. L'industrie française des matériaux composites, Rapport de synthèse. 2001
- [8] **Yamina AIMENE**, Hyper-élastique pour la simulation des renforts fibreux en grands transformations. Thèse de doctorat, l'institut national des sciences appliquées de Lyon. 2007
- [9] http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/BrochureDataSheets/Prepreg_Technology.pdf
- [10] **BOUNADJA Aicha**, Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort métallique sollicités en flexion 3 points. Mémoire de magister, Université de Boumerdès. 2006
- [11] **yahiaoui Souad**, Etude expérimentale de la durabilité des éléments fissures en béton armé rigidifiés par les matériaux composites. Mémoire de magister. Université de Boumerdès. 2006
- [12] **Mustapha ASSARAR**, Étude expérimentale et modélisation du comportement dynamique des composites stratifiés et sandwichs. Thèse de doctorat, Université du MAINE. 2007

- [13] **BELKACEMI Cherifa**, Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifié à renfort en matière végétale. Mémoire de magister, Université de Boumerdès.2006
- [14] **Mohamed El Hadi BOURAHLI**, Caractérisation d'un composite verre / époxy. Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas-Sétif 1. 2013
- [15] **HADDADI Manel**, " Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermo -physiques des matériaux composites à matrice polymère. " mémoire de master, Université de Batna. 2010
- [16] **ZAIDI Ali**, "Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (Effet du vieillissement)." Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou. 2014
- [17] **Jean-Robert Yersin**, détermination des propriétés et applications des composites. Gymnase Auguste Piccard Lausanne. 2009
- [18] **ROUAM Kamila**, Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles. Mémoire de magister, Université de Boumerdès.2013
- [19] **A.RASKIN**, Les résines composites. Support de Cours (Version PDF) Université Médicale Virtuelle Francophone. 2009
- [20] **S. BOUKAIS**, comportement mécanique et dureté de la résine époxy renforcée de charges. 9^{ième} congrès de mécanique FS. Senlalia. Marrakech. 2009
smsm.fsac.ac.ma/congres/9congres/Proceedings-PDF/VOLUME-I/T-03/0304.pdf
- [21] **S. Grishchuk**, Structure, thermal and fracture mechanical properties of benzoxazine-modified amine-cured DGEBA epoxy resins. eXPRESS Polymer Letters Vol.5, No.3 (2011) 273–282.2011 www.expresspolymlett.com
- [22] **Amar BOUDEFEL**, Propriétés diélectriques de polymères composites et leurs applications en microélectronique. Thèse de doctorat, Université BM-ANNABA. 2009
- [23] **Cheng-Fu Yang, Li-Fen Wang, Sang-Mao Wu and Chean-Cheng Su**, characterization and curing kinetics of Epoxy /Silica nano-hybrids. *Materials* 2015 Article, 8(10) 7032-7040. 2015 <http://www.mdpi.com/1996-1944/8/10/5357/pdf>
- [24] **ZABATA_MASSOT Céline**, synthés des matériaux composites par Co-broyage en voie sèche, caractérisation des propriétés physico-chimiques et d'usages des matériaux. Thèse de doctorat, l'institut national polytechnique de Toulouse. 2004

- [25] **Lionel GENDRE**, Matériaux composites et structures composites. ens cachan, université de paris-Saclay. 2011
- [26] **SANDALI Abdeljalil, RABHI Nabil**, Comportement au choc des stratifiées composites renforcées par des fibres naturelles (fibre de cactus). Mémoire Master professionnel, université kasdi Marbah Ouargla. 2012
- [27] **S. BENSAID**, "Contribution a la caractérisation et a la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes," Engineering Sciences, HAL Id: tel-00424804, l'Université de Nantes, 2006. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00424804>
- [28] **Safia SAHRI**, Etude du comportement mécanique d'un matériau composite thermoplastique (PP) verre : Effet de différents milieux. Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou. 2012
- [29] **N. Gupta**, "Characterization of syntactic foams and their sandwich composites: modeling and experimental approaches," The Graduate Faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, for the degree of Doctor of Philosophy, 2003. etd.lsu.edu/docs/available/etd-0627103-093457/.../Gupta_dis.pdf
- [30] **Moustapha IDRIS**, Analyse expérimentale et par éléments finis du comportement statique et vibratoire des matériaux composites sandwichs sains et endommagés. Thèse de doctorats, Université du Maine. 2013
- [31] **Zenkert, D.** The Handbook of Sandwich Construction. Engineering Materials Advisory Services Ltd, **ISBN-10: 0947817964.** 1997
<https://www.amazon.com/Handbook-Sandwich-Construction.../09>
- [32] **Alili M^{ed}.Elhadi, Khabbar Nasreddine**, Homogénéisation numérique des matériaux cellulaires. Mémoire Master professionnel, université kasdi Marbah Ouargla .2012
- [33] Le Centre d'Etudes et de services Technologiques de l'Industrie des Matériaux de construction "Evaluer l'impact technico-économique d'une stratégie "composites". " 2015
<http://www.cetim.fr/Prestations/Nos-solutions-globales>
- [34] **BOUZIT Fatima**, Élaboration et caractérisation mécanique, en statique et en fatigue, des panneaux sandwichs à base de renforts naturels. Mémoire de Magistère, Université de Boumerdès. 2014

- [35] **ARBAOUI Jamal Eddine**, Étude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches. Thèse de doctorat, université Paul Verlaine – Metz. 2009
- [36] **K.AIT TAHAR, K.SAIDANI et H.AIT AIDER**, Analyse expérimentale d'une structure composite de type sandwich. Journal d'ingénierie clé Matériaux Vol. 482, ACMA 2012, Fès, Maroc. http://www.ummo.dz/IMG/pdf/Ait_tahar_all_ummo-ALG.pdf
- [37] **LAKREB Nadia**, Elaboration, caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich multicouches à base de liège et bois de déroulage. Thèse de doctorat, Université de Boumerdès. 2014
- [38] **BENFADEL Karima**, Élaboration et caractérisation de panneaux sandwichs à matrice cimentaire destinés à la construction. Mémoire de magister, Université de Boumerdès. 2014
- [39] **CHEMAMI Abdenacer**, Etude de la Performance des Matériaux Composites Sandwichs - Application en Fatigue. Thèse de doctorat, Université B.M ANNABA. 2012
- [40] **Hami B, Irekti A, Aribi C, Bezzazi B**, Détermination des caractéristiques mécaniques d'une structure Sandwich multicouche renforcé par des fibres de verres. SNMPE .ISBN: 978-9931-9090-0-2, IV (No. I-2-212). 2012
<http://dlibrary.univboumerdes.dz:8080/jspui/handle/123456789/692>
- [41] **HACHEMANE Belkacem**, analyse expérimentale du comportement mécanique d'un composite soumis à des sollicitations d'impacts. Thèse de doctorat, Université de Boumerdès. 2012

Annexe A : fiche technique de la résine Epoxyde

NOTICE TECHNIQUE

3 2 2 6

MEDAPOXY STRClassification selon la norme AFNOR NFT36 005 :
Famille 1 ; Classe 6bRevêtement époxydique
par stratification**DESCRIPTION**

Le **MEDAPOXY STR** est une résine époxy destinée à la stratification sur différents supports. Le **MEDAPOXY STR** se présente sous forme de kit pré dosé de 2 composants :

- Élément A : Résine
- Élément B : Durcisseur

DOMAINES D'APPLICATION

- Stratification à la fibre de verre des réservoirs ou bassins contenant des produits chimiques (acides, bases, solvants, pétrole, etc.)
- Vitrification (sans fibre de verre) des bassins et réservoirs en béton et en acier.

PROPRIÉTÉS

- Très bonne tenue aux produits chimiques (nous consulter)
- Très bonne adhérence sur supports béton et acier
- Bonne mouillabilité du support et de la fibre de verre

CARACTÉRISTIQUES

- Rapport pondéral :
 - Élément A : 1kg
 - Élément B : 0,666 kg
- Densité (ISO758) :1,1 ± 0,05
- Viscosité(NF T76-102) :11000 mPaS à 25 ° C
- DPU (NFP18 810) :1h 15mn à 20 ° C et 65% HR
- Temps de durcissement à 20 ° C et 65% HR
 - Hors poëse : 6 h
 - Dur :16 h
- Rc (NA 427) :>70 MPa
- Rf (NA 234) :>25 MPa
- Adhérence sur béton (NFP18 858) :>3 MPa
- Durée de mise en service10 j 20°C

MODE D'EMPLOI**Conditions d'utilisation :**

- Ne pas appliquer lorsque la température ambiante ou celle du support est inférieure à 10°C ou supérieure à 30°C.
- L'humidité relative de l'air doit être inférieure à 80%.

Préparation du support (NF P 74-203/DTU 59-3):**Support béton ou mortier :**

- Les bétons ou mortiers "supports" doivent avoir au moins 28 jours d'âge.
- Le support doit être sec, propre et débarrassé des parties non adhérentes. Toutes traces d'huiles, graisses, peintures, laitance ou autres souillures doivent être éliminées. Nettoyer soigneusement et dépeussier avant l'application du primaire **MEDA-IMPREGNATION**

Supports métalliques :

- Décaper (mécaniquement ou chimiquement)
- Puis dépeussier les surfaces avant l'application d'une résine anti-corrosion **MEDAPOXY PRIMAIRE AC**

Mélange :

- Procéder au mélange des deux composants une fois que la préparation des supports soit terminée.
- Préparer que la quantité de mélange pouvant être utilisée durant ce temps.
- Il est très important de bien remuer les deux éléments constituant le **MEDAPOXY STR** jusqu'à l'obtention d'un mélange homogène.
- Verser l'**Élément B** (durcisseur) dans l'**Élément A** (résine).
- Vider complètement les récipients afin de respecter le rapport du mélange.
- Remuer pendant 3 minutes avec un agitateur électrique à faible vitesse de rotation. Raclez plusieurs fois les parois du récipient afin d'assurer une dispersion totale.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Granitex

Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger

Tél: (213) 021 51 66 81 & 82

Fax: (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23

www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



149

Annexes B : fiche technique de durcisseur

NOTICE TECHNIQUE

2 1 5 3

MEDAFLOW 3041 RConforme à la norme EN EN 934-2: TAB 1, TAB 11.1
ET TAB 11.2 NA 774.**Super plastifiant haut
réducteur d'eau****DESCRIPTION :**

Le MEDAFLOW 3041 R est un super plastifiant haut réducteur d'eau formulé à base de polymères de synthèse et combinés ce qui améliorent considérablement les propriétés des bétons. Le MEDAFLOW 3041 R représente un effet retardataire comme action secondaire.

DOMAINES D'APPLICATION :

- Bétons à hautes performances
- Bétons architecturaux
- Bétons précontraints
- Béton transporté sur de longues distances > 1 h 30.

PROPRIÉTÉS :

Grâce à ses propriétés le MEDAFLOW 3041 R permet :

Sur béton frais :

- Obtention d'un rapport E/C très bas
- Amélioration de la fluidité
- Avoir un long maintien d'ouvrabilité
- Éviter la ségrégation
- Faciliter la mise en œuvre du béton

Sur béton durci :

- Diminuer la porosité
- Augmenter la durabilité
- Diminuer le retrait



	Temps de prise	
	Début	Fin
Yemen (CPJ 42.3)	3h05	4h10
0,8% MEDAFLOW 3041 R	7h05	8h55

Temps de prise du ciment selon EN196-3 (CPJ 42.5)

CARACTÉRISTIQUES :

- Aspect..... Liquide
- Couleur..... Brun clair
- pH..... 6 – 6,5
- Densité..... 1,08 ± 0,01
- Teneur en chlore..... < 0,1 g/l
- Extrait sec..... 30% + 1

MODE D'EMPLOI :

Il est recommandé d'ajouter l'adjuvant dans le béton après que 50 à 70% de l'eau de gâchage ait déjà été introduit. Le MEDAFLOW 3041 R peut être aussi ajouté directement dans le camion malaxeur (toupie). Malaxer à grande vitesse : 1 min/m³. NB : utiliser toujours des agrégats propres.

DOSAGE :

Plage de dosage recommandée :
0,5 à 2% du poids de ciment soit 0,46 litres à 1,85 litres pour 100 Kg de ciment.

Les renseignements donnés dans cette notice sont basés sur notre connaissance et notre expérience à ce jour. Il est recommandé de procéder à des essais de convenance pour déterminer la fourchette d'utilisation tenant compte des conditions réelles de chantier.



Zone industrielle Oued Smar – BP85 Oued Smar – 16270 Alger
Tél : (213) 021 51 66 81 & 82
Fax : (213) 021 51 64 22 & 021 51 65 23
www.granitex-dz.com - E-mail: granitex@granitex-dz.com



Annexe C : fiche technique de liège aggloméré

E.P.E TALEZA - LIEGE COLLO	
Spa au Capital de 510.325.000 Dinars	
FILIALE DE EAGR	
Adresse : BP 84 Route de Taléza COLLO	
WILAYA DE SKIKDA	
TEL : 213 (038) 71. 72. 14 & 038.71.67.47	F A X : 213 (038) 71. 68 . 02

FICHE TECHNIQUE**Liège aggloméré blanc Moyenne densité :**

- DENSITE :280 kg/M3 +/- 20
- GRANULEES : 1/2 - 2/3 - 3/5 et 5/12
- COLLE : Polyuréthane Alimentaire
- RESISTANCE SOUS CHARGE STATIQUE :
- COMPRESSION :22 %
- RECUPERATION :89 %
- TENSION DE RUPTURE A LA TRACTION :6 DAN/CM 2
- ELASTICITE : ALLONGEMENT A LA RUPTURE :5 %
- COMPORTEMENT AUX RAYONS SOLAIRES : léger jaunissement après une Année d'exposition au soleil
- RESISTANCE AUX ACIDES(Après 1 heure l'acide chlorique concentré fumant a 100 E/P 2° / 1019 G/M) aucune désagrégation de l'aggloméré
- RESISTANCE A L'EAU BOUILLANTE DURANT 3 H : aucune désagrégation
- EFFET D'ISOLATION :Isolation thermique et phonique
- RESISTANCE AU FEU :Brûle difficilement
- DIMENSIONS :300 x 300 – 500 x 500 – 450 x 450 – 1000 x 500
Epaisseurs : selon demande
- STABILITE DIMENSIONNELLE : Bonne stabilité
- VARIETESGamme variée
- **DECORATIF HAUTE GAMME :**
 - Densité :400 KG / M3
 - Dimensions :300 x 300 x 3 MM

Tension de rupture a la traction = 8 DAN / M2