

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



**Faculté De Génie De Construction
Département de Génie Mécanique**



Mémoire de Fin d'Etudes

Présenté par

M. SAIT Jugurtha

M. TOUATIOUI Mohammed

En vue de l'obtention du diplôme MASTER ACADEMIQUE

En Génie Mécanique

Spécialité :

Génie Des Matériaux

**REALISATION ET CARACTERISATION D'UN PANNEAU SANDWICH A
AME EN LIEGE ET PEAUX JUTE/RESINE EPOXY**

Soutenu le 29 /09/2024

MEMBRES DU JURY :

M. OULD OUALI Mohand	Président	Professeur, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Mme. MEGHLAOUI Bahia	Promotrice	MC-B, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou
Mme. HANNACHI Manel	Examinatrice	MCA, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

Sommaire

Sommaire

Liste des figures.....	iv
Liste des Tableaux.....	v
Remerciements	vi
Dédicaces.....	vii
Résumé.....	ix
Abstract	ix
Introduction Générale.....	1
I. Chapitre I : Etude bibliographique.....	2
I.1 Introduction sur les matériaux sandwich :.....	3
I.2 Les structures sandwich :.....	3
I.2.1 Définition des structures sandwich :	3
I.2.2 Les constituants d'une structure sandwich :.....	4
I.2.3 Caractéristiques géométriques des sandwiches :.....	6
I.2.4 Domaine d'application des sandwiches :.....	7
I.2.5 Technique D'assemblage des matériaux sandwiches :	8
I.3 Caractérisation mécanique des panneaux sandwich	8
I.3.1 Introduction :	8
I.3.2 Essais de caractérisation :.....	9
I.3.3 Calcul de la contrainte normale en flexion δ :.....	10
I.3.4 Calcul de la rigidité en flexion (D).....	10
I.4 Sollicitations mécaniques des panneaux sandwiches :	11
I.4.1 Flambement généralisé des peaux :.....	12
I.4.2 Rupture des peaux en traction ou en compression	13
I.4.3 Flambement généralisé de l'âme ou "crimping" :.....	13

I.4.4	Rupture de l'âme en cisaillement :.....	14
I.4.5	Flambement localisé "wrinkling" ou "dimpling" :.....	15
I.4.6	Dégradation de l'adhésive :.....	16
I.5	CONCLUSION :.....	17
II.	Chapitre II : Partie Expérimentale.....	18
II.1	Introduction :.....	18
II.2	Les constituants :.....	18
II.2.1	La partie semelle (peau) :.....	18
II.3	L'âme :.....	19
II.3.1	Le liège :.....	19
II.4	Elaboration de panneau sandwich :.....	21
II.5	Caractérisation des sandwichs :.....	24
II.5.1	Caractérisation des sandwichs en compression :.....	24
II.5.2	Conditions Expérimentales / Banc d'essais.....	26
II.6	Conclusion :.....	28
III.	Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussions.....	29
III.1	Introduction.....	29
III.2	Essais de compression :.....	29
III.3	Essai de flexion :.....	33
IV.	Conclusion Générale	38
IV.1	Conclusions.....	38
IV.2	Perspectives	39
V.	Références Bibliographiques.....	40
V.1	Liste des références bibliographiques :.....	41

Liste des figures

Figure I-1 : Schématisation d'une plaque sandwich.....	4
Figure I-2: Schéma représentatif d'un sandwich	7
Figure1-3 collage de peaux sur l'âme	8
Figure I-4: essai de flexion 3points	9
Figure I-5 : Essai de compression	11
Figure I-6 : Différentes sollicitations des panneaux sandwichs	12
Figure I-7 : Flambement généralisé des peaux du sandwich.	13
Figure I-8 : Rupture des peaux en traction ou en compression.	13
Figure I-9 : Flambement généralisé de l'âme ou crimping	14
Figure I-10 : Mode de rupture par cisaillement de l'âme.....	14
Figure I-11.: Flambement localisé « wrinkling ».....	15
Figure I-12 : Flambement localisé « dimpling ».....	15
Figure I-13.: Type de dégradation de l'adhésif	16
Figure I-14.: dégradation de l'adhésif entre les cellules	17
Figure II-1 : une feuille de fibre de jute	19
Figure II-2 : une plaque de liège	20
Figure II-3 la surface de travail sans et avec le nylon.....	21
Figure II-4 Assemblage de peau (fibre de jute) + l'âme (le liège).....	22
Figure II-5 <i>sandwich couvert par le nylon</i>	23
Figure II-6: application de l'opération sous vide sur le composite	23
Figure II-7 : panneau sandwich obtenu avant et après le découpage	24
Figure II-8 : Eprouvette de compression avec dimensions	24
Figure II-9: <i>dimension d'une éprouvette sandwich selon la norme NF T 54-606</i>	25
Figure II-10: <i>dimension des éprouvettes de flexion 3 point</i>	25
Figure II-11: sandwich liège, jute, résine époxy	25
Figure II-12: sandwich liège jute résine époxy	26
Figure II-13 : : machine de compression IBERTEST MOD.....	27
Figure II-14: machine de flexion type IBERTEST MOD	28
Figure III-1: Eprouvettes sollicité en compression (a) et (c) avant déformation, (b) et (d) après déformation	30

Figure III-2 : Courbes Force Déplacement pour l'essai de compression du composite.....	30
Figure III-3 : courbe contrainte déformation en compression du composite	31
Figure III-4: courbes contrainte déformation pour l'essai de compression.....	32
Figure III-5 : Eprouvettes sollicité en flexion	34
Figure III-6 : Courbes Force Déformation des essais de flexion sur composite époxy/jute/liège	35
Figure III-7 : Courbe de flexion force déplacement pour le liège seul et le composite	35
Figure III-8 : Courbes contrainte déformation pour la flexion 3 points.....	36

Liste des Tableaux

Tableau III-1 : mesures des pourcentages de retour sur la zone médiane	31
Tableau III-2 : mesures des pourcentages de retour sur les extrémités.....	31
Tableau III-3 : Comparaison des erreurs relatives au modules de Young par rapport à la moyenne	32
Tableau III-4: caractéristique mécanique obtenu de l'essai de compression	33
Tableau III-5 : Comparaison des erreurs relatives à l'amplitude de force maximale par rapport à la moyenne.....	37
Tableau III-6: caractéristique mécanique obtenu de l'essai de flexion 3point.....	37

Remerciements :

Tout d'abord, nous exprimons notre profonde gratitude à Dieu Tout-Puissant, qui nous a donné la force, la patience et la persévérance nécessaires pour mener à bien ce projet.

Nous adressons notre profonde gratitude à l'ensemble du corps enseignant du département de génie mécanique (UMMTO) ayant contribué à notre formation.

Nous remercions notre promotrice Mme MEGHLAOUI Bahia, MCB à l'université de Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, pour sa disponibilité et sa confiance en nos compétences pour mener à bien ce travail.

Que les membres du jury trouvent ici le témoignage de notre reconnaissance pour avoir bien voulu juger notre travail.

Nos remerciements vont aussi à nos familles et à nos amis et tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

A mes chers parents

, qui m'ont soutenu et encouragé pour atteindre mes objectifs, qu'ils trouvent ici le témoignage de ma profonde reconnaissance, amour et respect

A mes chère frères et sœur

Pour la force et le soutien qu'ils me donnent et pour leurs précieux conseils

Tous les autres qui je n'ai pas cité nommément et qui se reconnaissent dans ma dédicace

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

A mes très chers parents qui m'ont soutenue moralement et financièrement et de tendresse qu'ALLAH me les garde durant toute ma vie.

A mes très chers frère et sœur.

A un camarade.

Tous les autres qui je n'ai pas cité nommément et qui se reconnaissent dans ma dédicace.

Résumé

Dans cette étude, les panneaux sandwichs ont été élaborés à l'aide des couches de fibre de jute et résine polyester comme couche extérieure (peau) et en l'âme le liège d'épaisseur (4,5) cm. Le comportement de notre panneau a été testé à la compression et flexion à trois points les courbes de charge déplacement et le mode de rupture ont été analysés et discutés.

Le noyau de liège a donné une très bonne résistance en compression, et les couches de fibre de jute renforcent le panneau à la résistance en flexion. Ces panneaux sandwichs peuvent être utilisés comme matériau de construction non structuraux dans la construction, comme la séparation dans le domaine bâtiment.

Abstract

In this study, sandwich panels were developed using jute fiber layers and polyester resin as the outer layer (skin) and in the core the cork of thickness (4.5) cm. The behavior of our panel was tested in compression and bending at three points the load displacement curve and the failure mode were analyzed and discussed. The cork core gave a very good compressive strength, and the jute fiber layers reinforce the panel to the bending strength. These sandwich panels can be used as non-structural building material in construction, such as separation in the building field.

Introduction Générale

Introduction Générale

Le développement des technologies modernes exige que l'on utilise des matériaux présentant des propriétés mécaniques élevées spécifiques à leur emploi, mais dont les masses volumiques soient faibles. L'objectif est notamment de réduire la masse des structures. Les matériaux composites sont des matériaux qui répondent aux exigences précédentes. En raison de leur faible densité, grande résistance, rigidité importante et de leur excellente durabilité, les matériaux composites ont d'abord été utilisés dans de nombreuses composantes structurales, notamment dans le domaine de l'aéronautique. De nos jours, la diminution de leurs coûts de production permet l'utilisation de ces matériaux dans des applications de plus en plus variées (automobile, navigation, construction, etc.). Parmi les matériaux composites les plus utilisés, on notera les matériaux sandwichs. Les structures sandwichs se distinguent des autres matériaux comme les métaux, les céramiques et les polymères par le fait qu'ils sont constitués :

- De deux semelles ou peaux, de faibles épaisseurs. Ces peaux sont constituées de matériaux à relativement haute résistance.
- D'une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité.

Peaux et âmes sont séparables mécaniquement. On peut par conséquent modifier les propriétés de ces matériaux en variant les proportions de leurs constituants ou les propriétés des constituants eux-mêmes. Ces ajustements permettent donc d'atteindre les propriétés souhaitées pour répondre à des applications bien identifiées. Les structures sandwichs offrent donc de grandes potentialités aux concepteurs dans des secteurs très divers.

Ces matériaux sandwichs peuvent être réalisés en éléments très divers :

Pour les peaux : Aluminium, acier, bois, plastique, résines renforcées de fibres (jute)

Pour l'âme : le balsa, les nids d'abeilles, les mousses, le liège ...

Notre étude s'intéresse à des matériaux sandwichs dont les peaux sont des couches de fibre de jute renforcé par la résine époxy et le liège représente l'âme.

Se travail de mémoire se concentre sur l'élaboration et la caractérisation d'un matériau sandwich dont les peaux sont constituées de couches de fibre de jute renforcée par de la résine époxy, tandis que l'âme est en liège.

Le plan de notre travail se déroule sur trois parties :

Dans le premier chapitre on a fait une synthèse bibliographique sur les généralités des matériaux composites.

Introduction Générale

Dans le deuxième chapitre on a présenté les différents constituant de notre panneau sandwich et citer les différentes étapes de réalisation de ce dernier ainsi que les tests de comportement mécanique.

Dans le troisième et le dernier chapitre nous avons étudié et discuté les résultats obtenus à partir des essais réalisés sur les éprouvettes de notre panneau sandwich.

Enfin, une synthèse de tous ces résultats sont consignés dans une conclusion.

I. Chapitre I : Etude bibliographique

I.1 Introduction sur les matériaux sandwich :

Les matériaux sandwich sont des structures composées de couches multiples avec des propriétés différentes, souvent utilisées pour améliorer la résistance, la légèreté et d'autres caractéristiques des matériaux de base. Cette configuration stratifiée offre une combinaison unique de performances mécaniques, thermiques et acoustiques, les rendant indispensables dans une variété d'applications industrielles, notamment dans l'aérospatiale, l'automobile, la construction navale et le génie civil. Les premiers exemples des matériaux sandwich remontent à l'Antiquité, mais leur utilisation moderne a émergé au début du 20^{ème} siècle avec le développement des composites stratifiés. Depuis lors, les avancées dans les techniques de fabrication, les matériaux de base et les designs ont considérablement élargi le champ d'application des matériaux sandwich. Les matériaux sandwich sont généralement composés d'un noyau léger et résistant, appelé âme ou cœur, entre deux couches de matériaux plus rigides, appelées peaux. Le noyau peut être constitué de divers matériaux, tels que les mousses, les panneaux nid d'abeilles, les composites fibreux, le liège, ou même des structures métalliques alvéolaires. Les peaux sont souvent des matériaux composites, des métaux, ou des polymères renforcés de fibres. Les matériaux sandwich offrent une gamme étendue de propriétés avantageuses, telles que la haute résistance spécifique, la rigidité élevée, la légèreté, ainsi que la capacité d'absorption d'énergie. Ces caractéristiques en font des choix attrayants pour les applications nécessitant une haute performance tout en minimisant le poids et la consommation de matériaux. En raison de leurs propriétés uniques, les matériaux sandwich sont largement utilisés dans divers domaines industriels, dans l'industrie aérospatiale, par exemple, ils sont utilisés dans la construction de fuselages, d'ailes et de panneaux de contrôle pour réduire le poids tout en maintenant la résistance structurelle. Dans l'industrie automobile, les matériaux sandwich sont utilisés pour fabriquer des panneaux de carrosserie légers mais robustes. Dans le génie civil, ils sont utilisés dans les structures de ponts et les panneaux de façade pour leur capacité à supporter des charges élevées tout en minimisant le poids.

I.2 Les structures sandwich :

I.2.1 Définition des structures sandwich :

Les structures sandwich, largement utilisées dans l'ingénierie moderne, se distinguent par leur conception composite, composée de deux surfaces externes, souvent rigides, appelées peaux, maintenues à une distance fixe par un noyau léger et généralement peu dense [1].

Les trois parties du sandwich sont liées par un film d'adhésif, la liaison entre deux couches successives est appelée l'interface, Ces couches peuvent être de nature différente.[2]

Ces structures offrent une combinaison unique de légèreté, de rigidité et de résistance, ce qui les rend idéales pour une gamme variée d'applications dans des domaines tels que l'aérospatiale, l'automobile, la construction navale et la construction légère.[3].

En plus de leur haute résistance structurelle, les structures sandwich présentent également d'excellentes propriétés d'isolation thermique et acoustique, ce qui les rend particulièrement adaptées pour des applications nécessitant une régulation thermique ou une atténuation du bruit.[4]

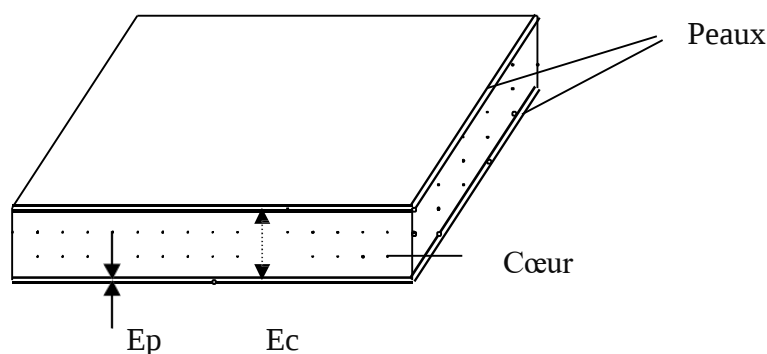


Figure I-1 : Schématisation d'une plaque sandwich

I.2.2 Les constituants d'une structure sandwich :

Les structures sandwich sont composées de trois principaux constituants : les faces externes (ou peaux), le noyau (ou l'âme) et l'adhésif.

Les faces externes (les peaux) : Les peaux sont les couches externes de la structure sandwich. Elles sont généralement fabriquées à partir des matériaux composites qui offrent une résistance élevée tout en restant relativement légers, ce qui contribue à la performance globale de la structure

Le noyau (l'âme) : Le noyau est la couche intermédiaire entre les faces externes. Il peut être composé de différents matériaux composites, spécialement conçus pour fournir une résistance structurelle tout en minimisant le poids. Le choix du matériau du noyau dépend des exigences spécifiques de la structure en termes de résistance, de rigidité et de poids

L'adhésif : est utilisé pour relier les faces externes au noyau, assurant ainsi l'intégrité structurelle de l'ensemble. Les adhésifs spéciaux sont choisis en fonction des matériaux des peaux et du noyau, ainsi que des conditions environnementales auxquelles la structure sera

exposée. Ils doivent garantir une liaison solide et durable pour assurer la stabilité et la durabilité de la structure dans son ensemble.

1. **Les peaux :** dans une structure sandwich, les peaux sont les couches externes qui enveloppent le matériau isolant au centre. Ces couches extérieures sont conçues pour fournir une protection structurelle, résister aux contraintes mécaniques, et souvent, pour offrir des propriétés d'isolation thermique et acoustique.[5] Elles peuvent être de plusieurs matériaux différents, un matériau isotrope, ou orthotrope, ou un matériau composite. Pour minimiser le poids de la structure on préfère généralement des peaux en matériaux composites [6]. La sélection des matériaux de peau dépend souvent des exigences spécifiques de l'application du panneau sandwich.[5].
2. **L'âme :** L'âme d'un panneau sandwich est la couche centrale qui se situe entre les peaux externes. Cette partie assure principalement la résistance mécanique et la stabilité structurelle du panneau, ainsi que son isolation thermique et acoustique. Les matériaux d'âme les plus courants incluent les mousses rigides, les panneaux en nid d'abeille en aluminium, les panneaux en bois, ou d'autres matériaux composites. Le choix de l'âme dépend des exigences spécifiques de performance du panneau et des conditions d'utilisation prévues.[7]

Les âmes des panneaux sandwich peuvent revêtir différentes formes pour répondre à des besoins spécifiques en matière de performance et d'application. Parmi les formes courantes d'âmes, on trouve :

- **Forme plane :** Les âmes planes sont les plus simples et consistent en une couche uniforme de matériau isolant ou de structure interne, telle que de la mousse rigide ou un noyau en nid d'abeille, disposée de manière plate entre les peaux externes.
- **Nid d'abeille :** Les âmes en nid d'abeille présentent une structure hexagonale ou en forme de nid d'abeille, offrant une résistance mécanique élevée avec un poids minimal. Ce type d'âme est souvent utilisé dans les applications nécessitant une rigidité et une légèreté maximales, comme dans l'aérospatiale
- **Forme ondulée :** Certains panneaux sandwich utilisent des âmes ondulées pour augmenter la rigidité et la résistance mécanique tout en réduisant le poids. Ces âmes peuvent être fabriquées à partir de matériaux comme le carton ondulé ou le plastique.

- **Forme profilée :** Les âmes profilées sont conçues avec des profils spécifiques pour répondre à des exigences particulières en termes de performance mécanique ou d'écoulement des fluides. Elles sont souvent utilisées dans les applications aérodynamiques ou hydrodynamiques [7]

3. L'interface : L'interface ou bien l'adhésif est un composant essentiel dans les matériaux sandwichs, est utilisée pour coller les différentes couches des panneaux sandwich, il permet un bon assemblage de la structure et une transmission de charge, ainsi il assure une liaison solide entre les panneaux extérieure rigides et isolant contribuant ainsi à la stabilité, à l'isolation thermique et acoustique et à l'étanchéité du panneau.

Les adhésifs doivent être sélectionnée en fonction des propriétés mécanique requis, de la compatibilité avec le matériau et des condition environnementales attendues. [8][9][10].

I.2.3 Caractéristiques géométriques des sandwichs :

En modifiant la composition des peaux (qu'elles soient identiques ou non), le noyau et l'épaisseur des sandwichs, les propriétés mécaniques peuvent être ajustées au cours du Processus de fabrication.

L'épaisseur des peaux, notée t_f , reste constante dans toutes les phases. De plus, le rapport t_f/h_c (l'épaisseur du noyau) se situe dans la plage de 0,01 à 0,1. Comme le souligne [Allen H. G] [11], les sandwichs peuvent être classés en fonction de la valeur du rapport d/t_f , où d représente la distance entre les axes neutres des peaux du sandwich

- Pour un rapport de d/t_f inférieur à 5.77, le sandwich est dit à peaux épaisses.
- Pour un rapport de d/t_f compris entre 5.77 et 100, le sandwich est dit à peaux fines.
- Pour un rapport de d/t_f supérieur à 100, le sandwich est dit à peaux très fines

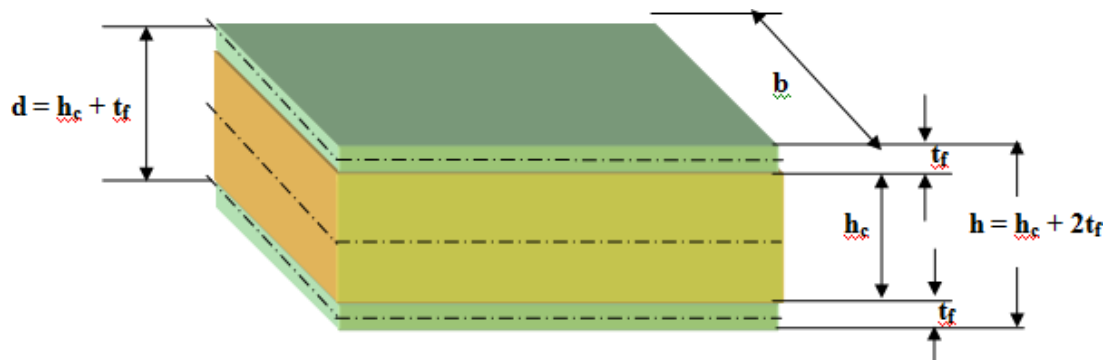


Figure I-2: Schéma représentatif d'un sandwich

I.2.4 Domaine d'application des sandwichs :

Le concept de structures sandwich est apparu au début des années 1800, offrant un immense potentiel dans diverses industries. L'objectif principal est d'améliorer le rapport rigidité/poids en incorporant des matériaux légers au cœur de ces structures. Les applications des structures sandwich couvrent plusieurs secteurs, permettant une utilisation dans divers domaines.

Les structures sandwich trouvent une application dans l'industrie de la construction en raison de leurs propriétés d'isolation thermique exceptionnelles, soigneusement étudiées. De plus, des facteurs tels que le coût, la stabilité, la résistance aux chocs et la durée de vie sont également pris en compte.

- **Construction aérospatiale :**

L'application des panneaux sandwich dans le domaine aérospatial constitue une avancée significative dans la conception et la fabrication de structures légères et robustes pour les avions. Mécaniques, composés de deux feuilles métalliques ou composites rigides avec un noyau léger en sandwich entre elles, offrent une excellente résistance aux charges mécaniques tout en réduisant considérablement le poids de la structure. Cette caractéristique est essentielle dans l'aérospatiale, où chaque kilogramme compte pour optimiser les performances et l'efficacité des véhicules spatiaux et des avions. Les panneaux sandwich sont largement utilisés dans la fabrication de fuselages, d'ailes, de volets et d'autres composants structurels, contribuant ainsi à améliorer la sécurité, la durabilité et les performances des avions. Des recherches approfondies ont été menées pour optimiser la conception des panneaux sandwich, en mettant l'accent sur les matériaux composites avancés, les techniques de fabrication innovantes et les analyses de performance pour répondre aux exigences rigoureuses de l'aérospatiale.

- **Construction automobile et ferroviaire :**

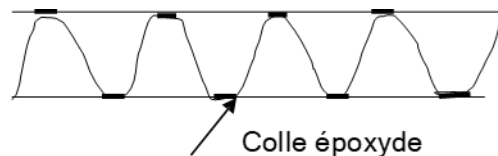
Les matériaux sandwich sont utilisés et assemblés par collage dans la création de véhicules comme les bus et les camions ; dans ce domaine, des peaux stratifiées verre/polyester et des âmes en mousse de polystyrène expansé peuvent être utilisées.

Les matériaux sandwich trouvent un marché lucratif dans le métro et les tramways, où des arrêts fréquents sont nécessaires. Les portes d'accès, construites avec des panneaux sandwich, comportent des peaux en composites verre/polyester ou aluminiums collés entre elles à l'aide d'adhésifs intérieurs. De plus, les portes sont composées de panneaux sandwich avec une âme en aluminium Nida ou Nomex.

I.2.5 Technique D'assemblage des matériaux sandwichs :

- **Le collage de peaux sur l'âme :**

Pour que les structures sandwich remplissent efficacement leur fonction, il est impératif d'établir une connexion transparente entre l'âme et les peaux afin de répartir uniformément les forces entre elles. Le processus d'assemblage, illustré à la figure I-3. Consiste à lier les matériaux entre eux à l'aide de résines compatibles avec les matériaux existants.



1- Collage de tôle ondulée ou raidisseur ω sur tôle



2- Panneaux avec tube carrés

Figure1-3 collage de peaux sur l'âme

I.3 Caractérisation mécanique des panneaux sandwich

I.3.1 Introduction :

Les performances des structures sandwich sont largement influencées par les propriétés mécaniques des matériaux constitutifs et leur structure spécifique. Afin de concevoir et

d'optimiser efficacement ces structures, il est crucial de comprendre et de quantifier leurs propriétés mécaniques. La caractérisation de ces propriétés implique une série de tests et d'analyses, conçus pour évaluer le comportement du matériau dans différentes conditions de charge et de contrainte. [12]

L'objectif est d'étudier les principales techniques de caractérisation mécanique des matériaux sandwich, en mettant en évidence à la fois les méthodes expérimentales et les cadres théoriques utilisés pour évaluer leurs propriétés. Les tests clés, notamment la compression et la flexion, seront abordés parallèlement aux critères de mesure des performances des matériaux. De plus, nous accorderons une attention particulière à la manière dont les caractéristiques des couches individuelles et les interfaces entre ces couches influencent le comportement global de la structure sandwich. [13]

I.3.2 Essais de caractérisation :

I.3.2.1 Essai de flexion trois points :

L'essai de flexion à trois points est une technique expérimentale fondamentale pour l'analyse des propriétés mécaniques des matériaux, notamment dans le contexte des matériaux sandwich. Ce test est conçu pour évaluer la résistance en flexion d'un matériau ou d'un échantillon.

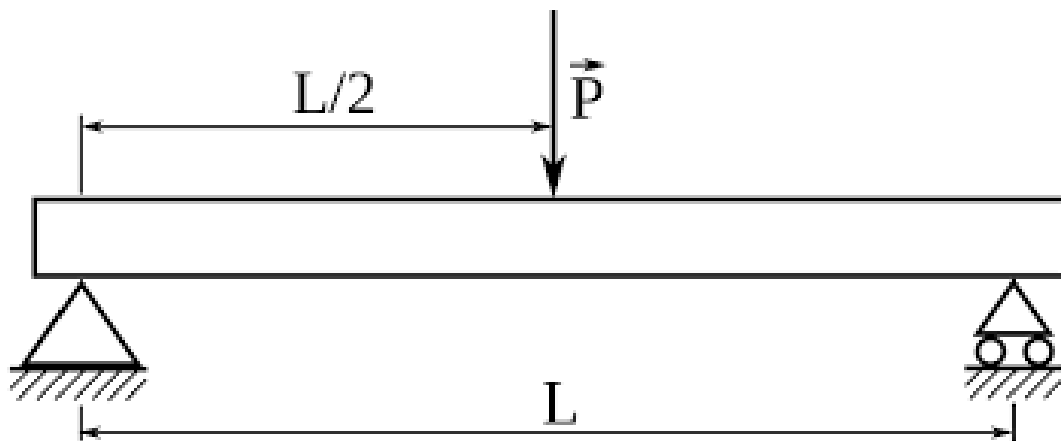


Figure I-4: essai de flexion 3points

Le principe de base de l'essai de flexion à trois points est relativement simple. L'échantillon est posé sur un dispositif de support à 3 points. Ce dispositif comporte 3 points d'appuis, deux sous les deux extrémités de l'échantillon et 1 sur un point situé au milieu de l'échantillon. L'équipement d'essai applique une charge à la surface supérieure de l'échantillon. Cette charge courbe l'échantillon. Alors que la charge augmente graduellement, on enregistre le comportement de flexion de l'échantillon.

L'essai de flexion trois point permet de caractériser les propriétés mécaniques des matériaux, en particulier la résistance à la flexion, la rigidité, et permet d'évaluer la résistance à la rupture, le module de flexion ou le module d'élasticité, permet aussi d'analyser la façon dont le matériau réagit lorsqu'il est soumis à une charge progressive, permet aussi de vérifier si la combinaison liège-jute-époxy améliore la résistance et la rigidité par rapport au liège seul. [14]

I.3.3 Calcul de la contrainte normale en flexion δ :

Si l'on obtient une rupture des semelles en traction ou en compression, on calcule la résistance des semelles par les formules suivantes :

➤ **L'essai de flexion en trois points**

$$\delta = \frac{p_1 \cdot d_1}{2 \cdot es \cdot (h + ea)} \quad (1)$$

- p_1 : la charge à la rupture des semelles, exprimée en newtons, pour l'essai de flexion en trois points
- d_1 : la distance entre appuis, exprimée en millimètres, pour l'essai de flexion en trois points
- es : l'épaisseur des semelles, exprimée en millimètres : épaisseur totale de la structure sandwich, exprimée en millimètre
- ea : épaisseur de l'âme, exprimée en millimètre
- b : la largeur de l'éprouvettes, exprimée en millimètre

I.3.4 Calcul de la rigidité en flexion (D)

➤ **L'essai de flexion 3 points :**

Calculer le rapport $\frac{W_1}{P_1}$ à partir de la courbe Force Déplacement et il est égal à :

$$\frac{W_1}{P_1} = \frac{d_1^3}{48 \cdot D} + \frac{d_1}{4} \quad (2)$$

- d_1 : la distance entre appuis (encore appelée portée), exprimée en millimètre
- p_1 : la charge concentrée, exprimée en newtons, égal à la moitié de la charge de rupture.

- w_1 : le déplacement mesuré à mi- portée sous la charge p_1 . Elle est mesurée en millimètre.
- D : la rigidité en flexion de la structure sandwich, exprimée en newtons. Millimètres carrés.
- N : la rigidité en cisaillement de la structure sandwich, exprimée en newtons.

I.3.4.1 Essai de compression :

L'essai de compression est une méthode clé pour déterminer la résistance des matériaux, Il consiste à appliquer une force de compression progressive sur un échantillon jusqu'à ce qu'il se fracture ou subisse une déformation, fournissant des informations cruciales telles que la limite élastique et la contrainte ultime. Depuis les premiers travaux de Robert Hooke, cette méthode est devenue standardisée et joue un rôle essentiel dans l'analyse des matériaux modernes comme les composites, sous diverses conditions environnementales [15]

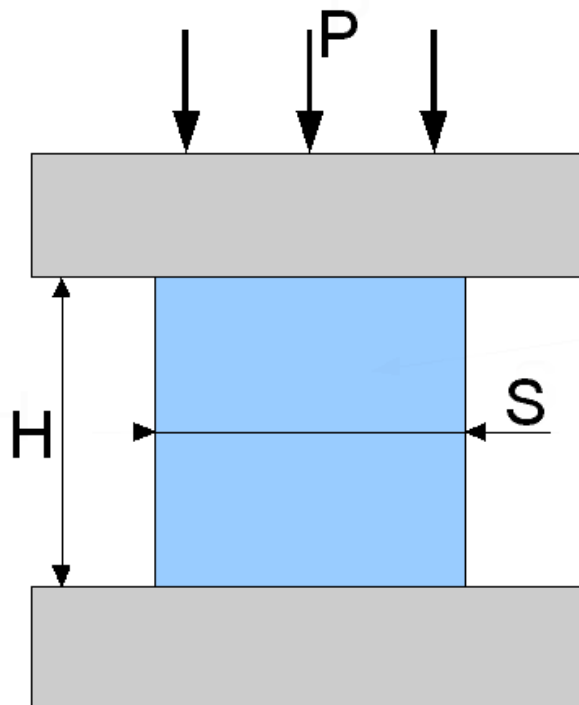


Figure I-5 : Essai de compression

I.4 Sollicitations mécaniques des panneaux sandwichs :

Un sandwich peut être soumis aux sollicitations mécaniques données par la figure suivante :

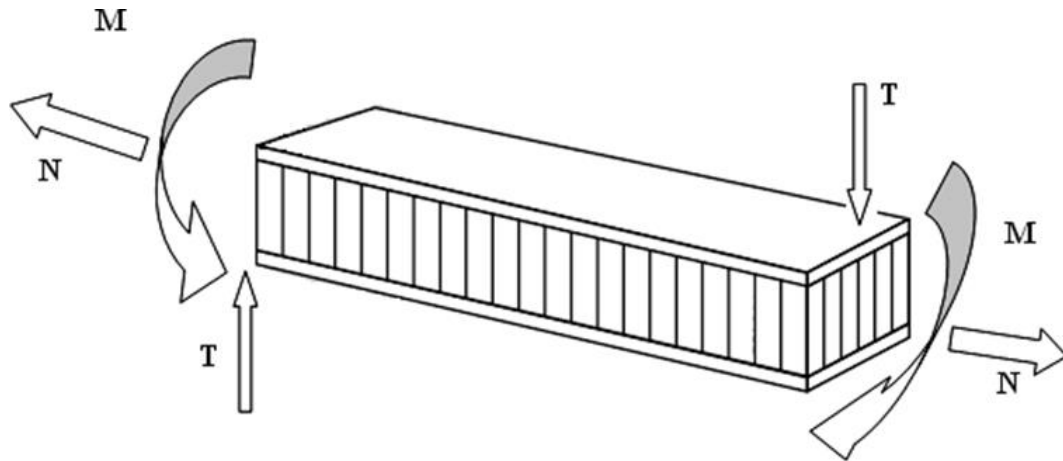


Figure I-6 : Différentes sollicitations des panneaux sandwichs

- Un effort tranchant T .
- Un effort normal N .
- Un moment de flexion M .

I.4.1 Flambement généralisé des peaux :

Phénomènes résistances à la rupture dépassent les contraintes dans les peaux et l'âme, un phénomène appelé flambement généralisé se produit. La charge de flambement, qui détermine le moment où la structure sandwich s'effondre, est influencée par divers facteurs, notamment les dimensions de la poutre et les conditions aux limites. Si certains paramètres peuvent être ajustés au cours du processus de conception, d'autres sont spécifiques au type de sandwich utilisé, tels que la rigidité en flexion, l'épaisseur de la peau, les propriétés élastiques, l'épaisseur du noyau et le module de cisaillement. Ces grandeurs jouent un rôle crucial dans la détermination de la charge de flambage.

Pour répondre aux préoccupations liées au flambage généralisé, il est possible d'utiliser des peaux possédant un module d'élasticité plus élevé, tout en optant pour un matériau d'âme avec un module de cisaillement élevé. [16] [17]

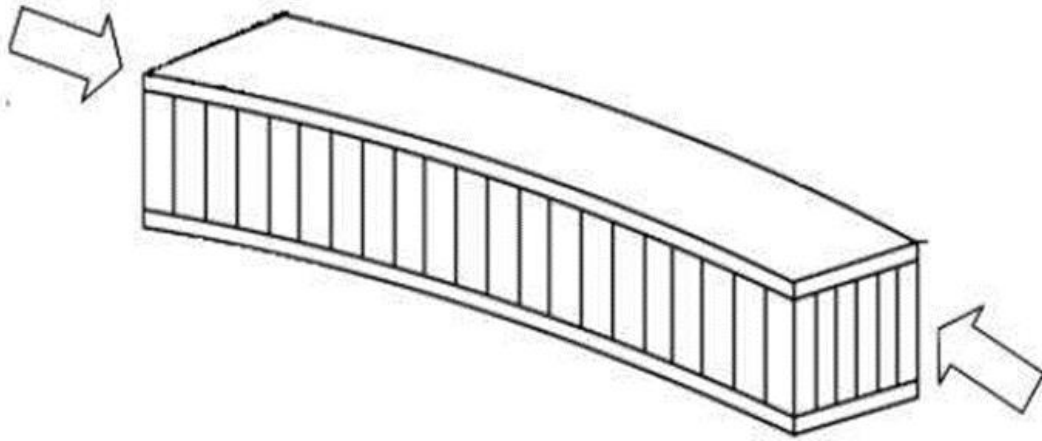


Figure I-7 : Flambement généralisé des peaux du sandwich.

I.4.2 Rupture des peaux en traction ou en compression

Pour éviter l'apparition de ce phénomène, il est indispensable soit d'utiliser des matériaux présentant des contraintes de rupture plus élevées, soit d'augmenter l'épaisseur des peaux, car les contraintes exercées sur les peaux dépassent les contraintes admissibles du matériau qui les compose.[18]

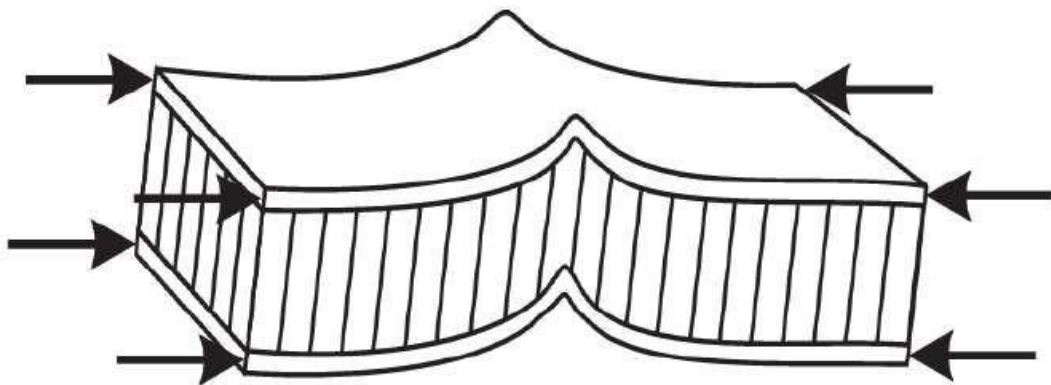


Figure I-8 : Rupture des peaux en traction ou en compression.

I.4.3 Flambement généralisé de l'âme ou "crimping" :

Si le rapport longueur/épaisseur est faible et que le module de cisaillement est faible par rapport au module de flexion, le flambement généralisé se manifeste par un flambement de l'âme. Le flambement de l'âme dépend principalement de l'épaisseur de l'âme et du module d'élasticité de l'âme, mais est principalement indépendant des propriétés des peaux. Pour améliorer la résistance à cette force critique, le moyen le plus efficace consiste à augmenter l'épaisseur de l'âme ou à utiliser une âme avec un module de cisaillement plus élevé.[19]

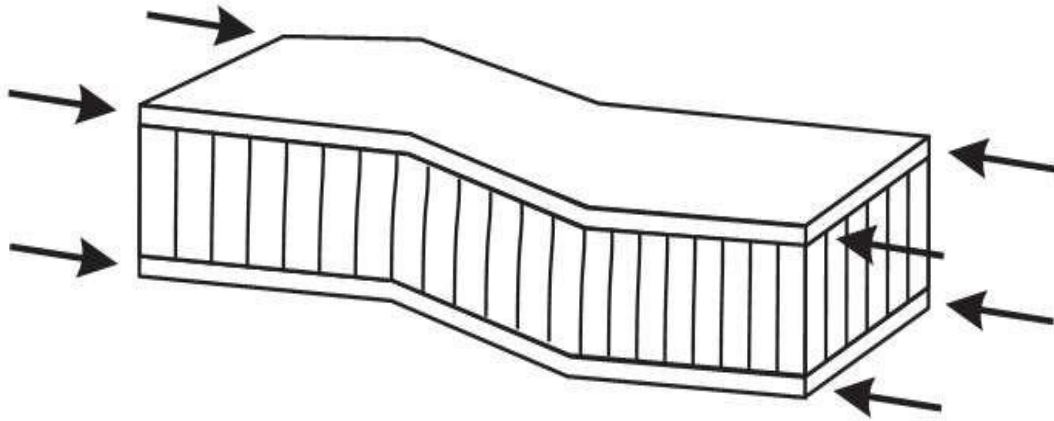


Figure I-9 : Flambement généralisé de l'âme ou crimping

I.4.4 Rupture de l'âme en cisaillement :

Si la contrainte de cisaillement (qui est la plus élevée dans l'âme) est supérieure à la résistance au cisaillement du l'âme, le noyau se brisera. Si cela est vrai, vous pouvez soit utiliser un matériau de l'âme ayant une force de cisaillement plus élevée, soit augmenter l'épaisseur du l'âme.

Cependant, utiliser un matériau différent pour les peaux, ou changer leur épaisseur n'aura pas d'effet.

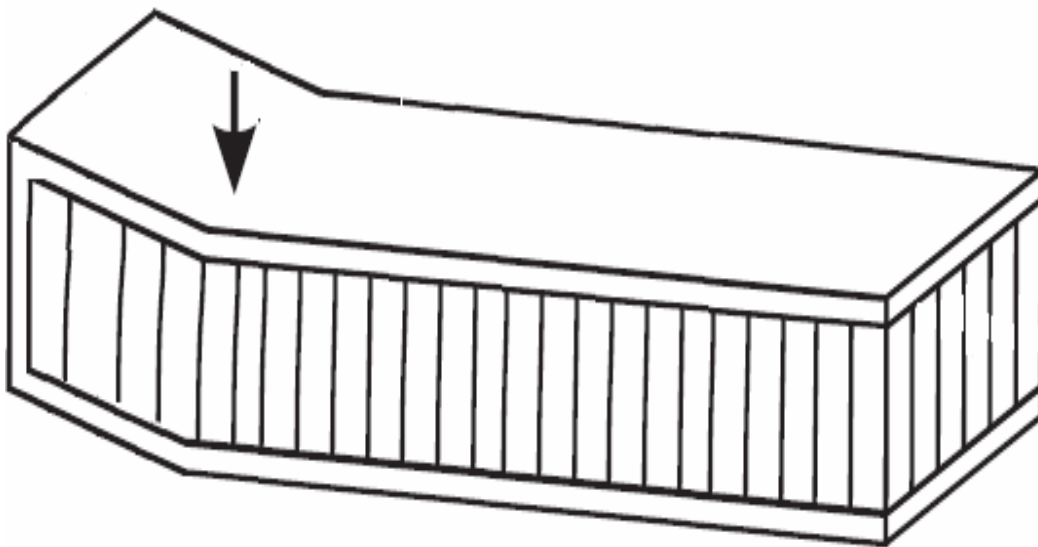


Figure I-10 : Mode de rupture par cisaillement de l'âme.

I.4.5 Flambement localisé “wrinkling” ou “dimpling” :

Les peaux considérées seules, sans connexion avec l'âme, flambent très facilement à cause de leur faible épaisseur. L'âme empêche leur flambement, Cependant, si on atteint la contrainte limite, il se peut que l'âme soit incapable d'empêcher le flambement Dans ce cas, le flambement localisé des peaux ou “wrinkling” se produit.[20]

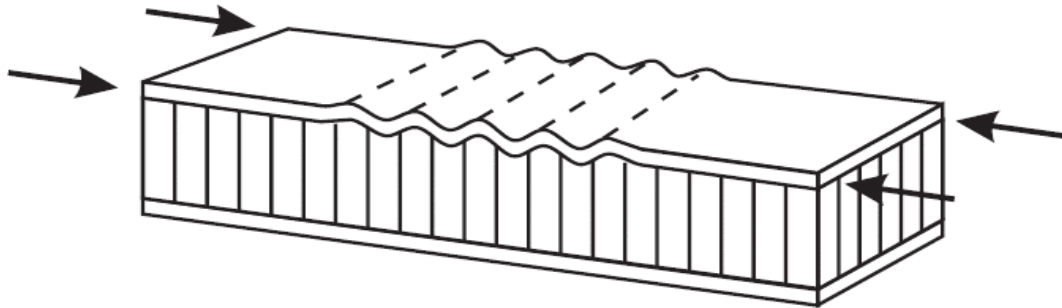


Figure I-11.: Flambement localisé « wrinkling »

Le flambement localisé, contrairement au flambement généralisé, peut se manifester dans diverses configurations qui ne sont pas déterminées par la géométrie de la structure ou par les conditions aux limites. Cependant, il est influencé par les modules d'élasticité des peaux et de l'âme, ainsi que par le module de cisaillement de l'âme.

Pour éviter l'apparition de flambages localisés dans la peau, nous avons deux options : soit sélectionner un matériau pour les peaux avec un module élastique plus élevé, soit choisir un matériau pour l'âme avec des propriétés élastiques plus élevées. Lors de l'utilisation d'une âme en nid d'abeilles, il est important de noter qu'en plus des ruptures « ridées », il existe un autre type de rupture provoquée par le flambage de la peau en alvéoles. Le terme utilisé pour décrire ce phénomène est appelé « dimpling ».[19]

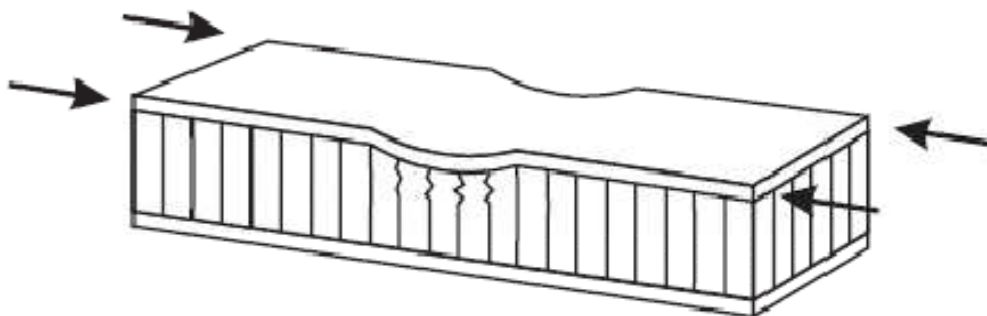


Figure I-12 : Flambement localisé « dimpling »

I.4.6 Dégradation de l'adhésive :

La dégradation de l'adhésive, entre les peaux et le cœur, se fait généralement selon trois types.

- Dégradation de l'adhésive entre les peaux et le cœur,
- Dégradation de l'attachement des cellules du cœur,
- Dégradation de l'attachement du nœud des cellules du cœur.

La Figure (I.13, I.14). Illustre les modes de dégradation de l'adhésif. L'exposition à l'humidité provoque des dégradations remarquables de la résistance de l'adhésif ce qui peut changer le mode de dégradation et causer la ruine avancée du panneau sandwich. [21]

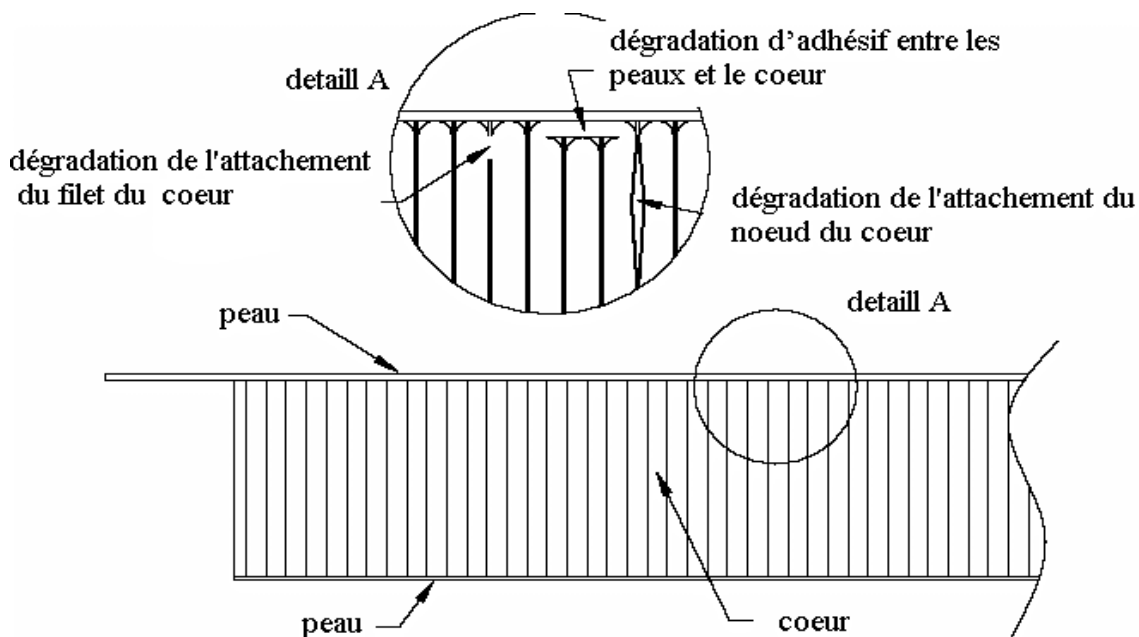


Figure I-13.: Type de dégradation de l'adhésif

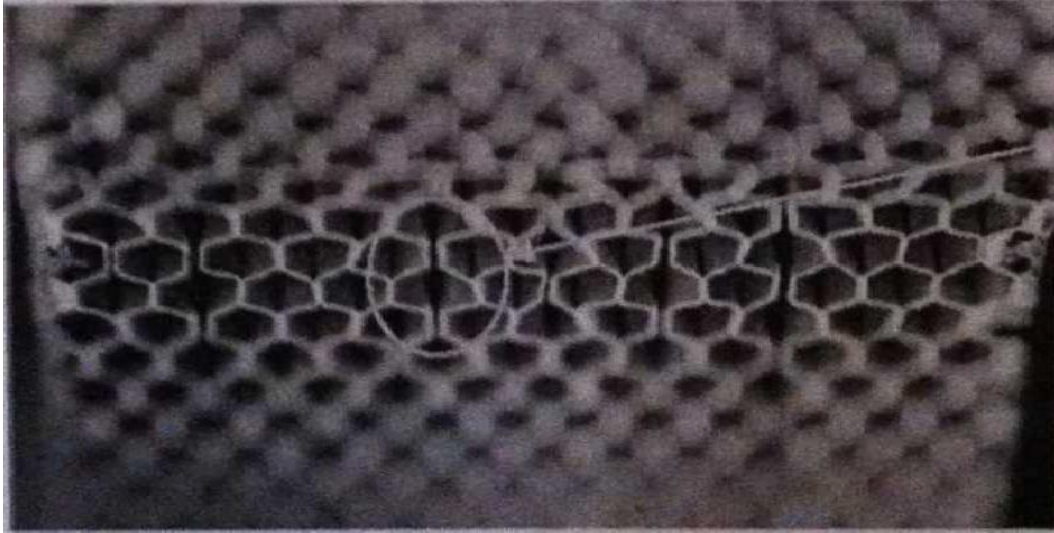


Figure I-14.: dégradation de l'adhésif entre les cellules

I.5 CONCLUSION :

Les sandwichs à âme en nid d'abeille sont de nouveaux matériaux particulièrement utilisés dans le domaine de l'aéronautique, bâtiments et de l'aérospatial. Leurs avantages résident principalement dans la forte rigidité en flexion, l'excellente résistance à la fatigue, l'isolation thermique et le faible poids. Ces derniers ont poussé d'autres industries telle que l'automobile et le ferroviaire à s'y intéresser. Le seul problème est leur mode de rupture ou de ruines qui reste imprévisible :

- Indentation du cœur,
- Cisaillement du cœur,
- Rupture des peaux,
- Dégradation de l'adhésive.

D'autre part, en plus d'avoir présenté les différents matériaux utilisés dans la confection des structures sandwiches, nous avons aussi parler leur mise en forme ainsi que les méthodes de caractérisation mécanique utilisées dans cette étude (essai de compression et flexion trois points). Cette dernière partie est revue en détail dans le chapitre suivant qui présente les essais et les résultats obtenus en plus de leurs analyses et discussions.

II. Chapitre II : Partie Expérimentale

II.1 Introduction :

Dans le cadre de ce travail, l'élaboration et la caractérisation d'un panneau sandwich à âme en liège et à peau en fibre de jute, rempli de résine époxy, sont au cœur de notre étude.

L'objectif principal de ce chapitre est de présenter les différentes étapes de l'élaboration de ce panneau sandwich, ainsi que les méthodes employées pour évaluer ses propriétés mécaniques et physiques, après avoir sélectionné les matériaux constitutifs, nous détaillerons les procédures de fabrication et de mise en œuvre, depuis la préparation des fibres de jute et du liège jusqu'à l'application de la résine époxy, ensuite les tests de caractérisation, tels que les essais de flexion 3 point et de compression, seront décrits pour évaluer les performances du panneau.

II.2 Les constituants :

Les constituants utilisés dans cette étude comme suite :

II.2.1 La partie semelle (peau) :

II.2.1.1 La résine :

Dans notre étude on a utilisé la résine polyester voici une petite définition de ce dernier. La résine époxy est un matériau polymère thermodurcissable qui durcit lorsqu'il est mélangé à un durcisseur, elle est reconnue pour sa forte adhérence, sa résistance chimique et sa durabilité. Utilisée dans les adhésifs, les revêtements, et les composites renforcés (comme la fibre de jute), elle est idéale pour les applications nécessitant une grande résistance mécanique et chimique.

Ses caractéristiques sont, mentionnée dans le tableau suivant :

Tableau II.1 : caractéristique de la résine époxy

Caractéristique	Valeur
Module d'élasticité	2,5 GPa
Durabilité	Bonne (coefficient de frottement typique 0,2-0,4)
Densité	1,1 à 1,4 g/cm ³
Température de service	Jusqu'à 150°C (avec certains durcisseurs, peut atteindre 200°C)
Rentrer leur du durcissement	Faible, entre 1% et 5%

II.2.1.2 Le renfort (fibre de jute)

Le renfort utilisé pour la réalisation le panneau sandwich est la fibre de jute et ses caractéristiques sont mentionnées dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.2 : caractéristique du la fibre de jute

Nom	Type	Géometrie des fibres	Epaisseur	Densité	Poids spécifique	Autres
Fibre de jute	Naturelle	Longue	6 mm	1,5 1,7	1100 1500	Renouvelable biodégradable



Figure II-1 : une feuille de fibre de jute

II.3 L'âme

Dans notre panneau sandwich on utilise le liège, voici si dessous une petite définition :

II.3.1 Le liège

Le liège est un matériau naturel qui a des caractéristiques très intéressantes, telles que sa faible densité, sa grande capacité à se comprimer, son isolant thermique, acoustique et vibratoire, sa stabilité chimique et sa longévité. Les cellules de liège sont principalement constituées de subérine et de lignine (respectivement 40 et 22 %) et de cellulose à haut de 9%.

Tableau II-3 : caractéristique de liège

Référence	Epaisseur	Densité
DF CORTIPE O5	45mm	200Kg/m ³

*Figure II-2 : une plaque de liège*

La méthode de fabrication de panneau sandwich que nous avons déduite à partir des observations et des analyses effectuées lors de la réalisation de nos propres échantillons est présentée de la manière suivante :

- 1) Préparation de moule
- 2) Mise en œuvre et élaboration de panneau sandwich
- 3) Séchage

I. Préparation de moule

Pour réaliser les matériaux, il est essentiel d'avoir une surface de travail plane. Dans notre cas il s'agit d'une plaque d'acier plane entourée avec un nylon.

*Sans le nylon(a)**Avec le nylon(b)**Figure II-3 la surface de travail sans et avec le nylon*

II.4 Elaboration de panneau sandwich :

De manière courte, nous exposons comment le panneau sandwich a été élaboré en suivant les étapes suivantes :

1. Découper la surface nécessaire de nylon et la fibre de jute. :
2. Étaler la cire sur le nylon.
3. Après avoir installé le nylon sur la surface de travail, on peut placer la plaque en fibre de jute coupée, la résine époxy doit être coulée sur la surface, puis répartie à l'aide d'un rouleau sur toute la surface sans laisser aucune zone sèche.
4. Poser la plaque de liège sur la résine puis on refait la 3ème étape.
5. Ferme le composite avec le nylon entouré avec un ruban adhésif.
6. Lancé l'opération sous vide.

Le panneau sandwich est fabriqué en utilisant le jute, liège et de résine époxy. Il est composé d'une plaque de deux couches de fibre de jute renforcé par la résine époxy et d'une âme en liège. Cette procédure se déroule en différentes étapes :

Étape 1 :

On applique un film de mise sous vide ainsi qu'un nylon vert sur la plaque plane, puis on le fixe avec un ruban adhésif afin d'éviter qu'il ne dérobe pendant le travail. Cette partie présente l'avantage de couvrir tout le dispositif de travail pour préparer la plaque et en extraire l'air à la fin.

Étape 2 :

On étale la résine sur le nylon puis on dépose la feuille de fibre de jute après la voir coupé avec les dimensions requises. Dans notre cas, il s'agit d'une plaque de dimension (50 x 49 cm).

Étape 3 :

Après avoir assuré un bon étalement de la résine sur la surface de la fibre de jute on dépose l'âme qu'il s'agit d'une plaque de liège avec même dimension puis on étale la résine sur la surface pour mettre la deuxième couche de fibre de jute.



Figure II-4 Assemblage de peau (fibre de jute) + l'âme (le liège)

Étape 4 :

Après avoir déposé la couche de fibre de jute on étale la résine sur toute la surface puis on le couvre avec le nylon qui doit fermer avec un ruban adhésif souple et pâteux pour appliquer l'opération de mise sous vide.



Figure II-5 *sandwich couvert par le nylon*

Étape 5 :

On lance l'opération de mise sous vide, qui implique de dégager l'air qui va permettre d'avoir une surface lisse.



Figure II-6: *application de l'opération sous vide sur le composite*

Étape 6 :

Après avoir polymérisé, on effectue le démoulage puis on découpe les bords de la plaque selon les dimensions souhaitées (50 x 49) cm.



Avant le découpage (a)



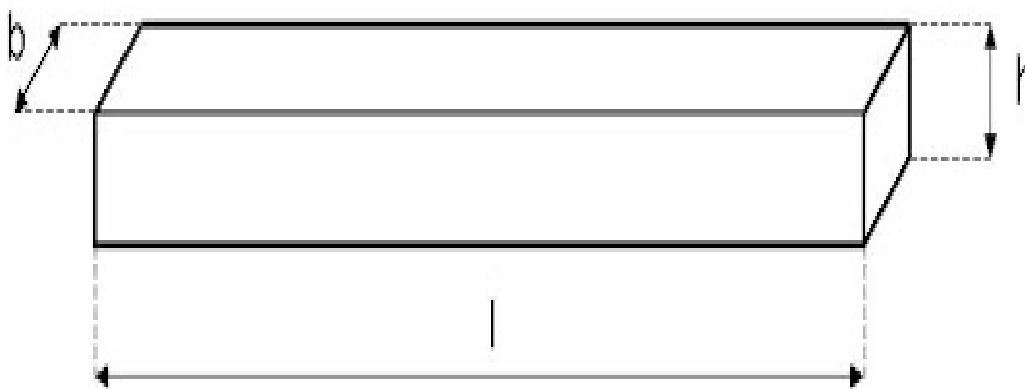
après le découpage (b)

Figure II-7 : panneau sandwich obtenu avant et après le découpage

II.5 Caractérisation des sandwiches :

II.5.1 Caractérisation des sandwiches en compression :

Pour les essais de compression, les éprouvettes sont toutes identiques, suivant la norme NF EN 826.

*Figure II-8 : Epreuve de compression avec dimensions*

b = Largeur de l'éprouvette = 45mm

h = épaisseur de l'éprouvette = 80mm

l = Longueur de l'éprouvette = 120 mm

II.5.1.1 Caractérisation des sandwiches en flexion :

Les dimensions des éprouvettes ont été définies suivants les spécifications de la norme NFT54-606.

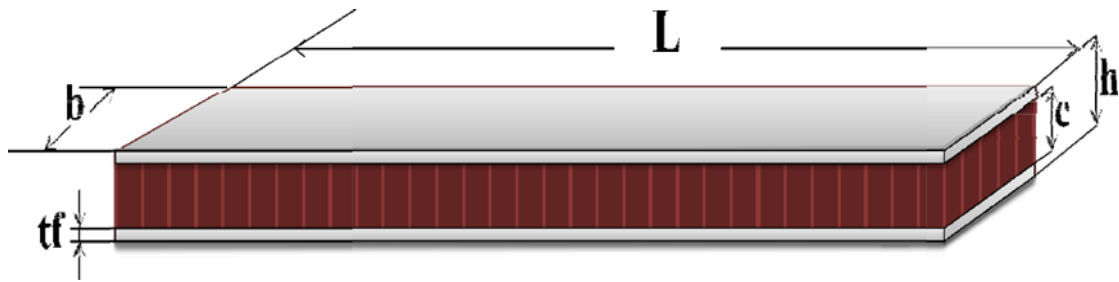


Figure II-9: dimension d'une éprouvette sandwich selon la norme NF T 54-606

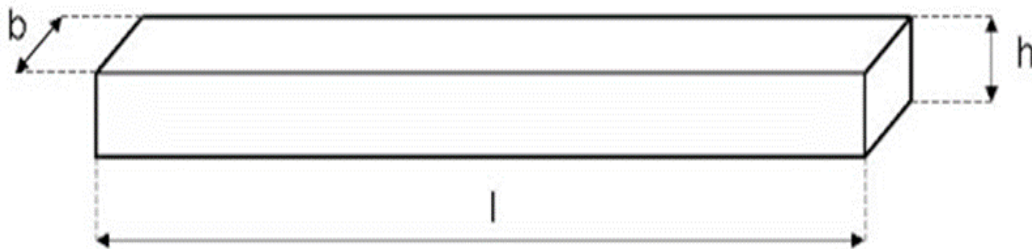


Figure II-10: dimension des éprouvettes de flexion 3 point

b = Largeur de l'éprouvette = 80 mm

h = épaisseur de l'éprouvette = 45mm

l = Longueur de l'éprouvette = 250 mm



Figure II-11: sandwich liège, jute, résine époxy



Figure II-12: sandwich liège jute résine époxy

II.5.2 Conditions Expérimentales / Banc d'essais

II.5.2.1 Essais de compression

Les tests mécaniques ont été réalisés en utilisant une machine électromécanique universelle d'essai de type IBERTEST MOD. ELIB-200 E/W, qui est Dotée d'un capteur de force et pilotée par ordinateur, par le laboratoire du génie civil de l'université mouloud MAMMERI. La capacité de compression de cette machine est de 200 KN.

II.5.2.1.1 Condition de l'essai

Les conditions de de l'essai de compression sont déterminés sur la base des dimensions des éprouvettes (figure II.13), l'alignement de l'échantillon, l'application de la charge d'une manière axiale perpendiculaire aux faces de l'échantillon, une vitesse de chargement de 10mm par minute, et une force de 200KN, avec la norme NF EN 826.

Deux essais sont réalisés pour la compression figure, avec une vitesse d'essai de 10mm /min a une température ambiante et une charge de 200KN.



Figure II-13 : : machine de compression IBERTEST MOD

II.5.2.2 Essais de flexion à 3 points

Le test mécanique à été réalisés en utilisant une machine électromécanique universelle d'essai de type IBERTEST MOD. ELIB-200 E/W, qui est Dotée d'un capteur de force et pilotée par ordinateur, par le laboratoire du génie civil de l'université mouloud MAMMERI. La capacité de flexion de cette machine est 30 à 50 KN en flexion.

II.5.2.3 Condition de l'essai

Les conditions de l'essai de flexion 3 points, sont contrôlés, pour garantir des résultats fiables et reproductible, qui sont les dimensions de notre éprouvette, figure (II .12), la distance entre les appuis, la vitesse de la charge qui est de 10 mm par minute, et une charge perpendiculaire au milieu de notre échantillon à un seul point au centre, avec la norme NF T54-606.



Figure II-14: machine de flexion type IBERTEST MOD

II.6 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 et flexion trois points).

III. Chapitre III : Résultats Expérimentaux et Discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les résultats expérimentaux, relatifs aux caractéristiques mécaniques obtenues sur les éprouvettes en matériaux sandwichs ayant subi les divers tests mécaniques sujets de cette étude. Nous commençons par la présentation des résultats de l'essai de flexion 3 points des 3 éprouvettes, et les résultats de l'essai de compression des 2 éprouvettes, ensuite, nous passerons à l'analyse des courbes pour chaque éprouvette. Aussi, une comparaison du comportement suivant le sens de chargement en flexion, soit sur la facette supérieure ou inférieure, sera menée et discutée.

Enfin nous présenterons les résultats obtenus en termes de module de cisaillement de l'âme pour l'ensemble des panneaux sandwichs testés.

III.2 Essais de compression :

Les essais de compression réalisés sur le panneau sandwich à âme en liège et peaux jute époxy selon la norme NF EN 826 avaient pour objectif de déterminer la capacité de la résistance du matériau aux charges compressives. Cependant, il est important de noter que la capacité maximale de la machine de compression limitée à 200 kN.

Les résultats expérimentaux des panneaux sandwichs en compression seront présentés dans les sections ci-dessous, permettant ainsi de déduire les paramètres influençant la résistance structurelle du matériau d'étude.

La figure III.1 représente le dispositif de compression et les éprouvettes utilisées.



(a)



(b)



(c)

(d)

Figure III-1: Eprouvettes sollicité en compression (a) et (c) avant déformation, (b) et (d) après déformation

Une fois les essais réalisés, nous avons obtenus les courbes suivantes :

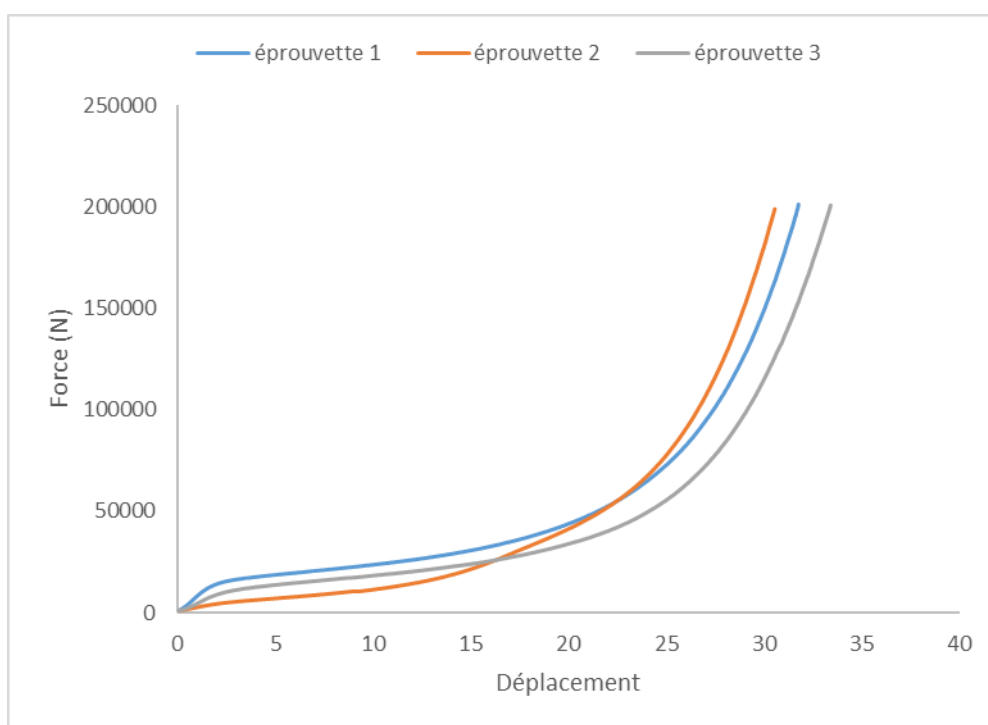


Figure III-2 : Courbes Force Déplacement pour l'essai de compression du composite

Afin de les convertir en contrainte déformation, nous avons utilisé les équations suivantes

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (3)$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (4)$$

Avec :

- F la force en Newton,
- S_0 La section initiale en mm^2 ,
- σ la contrainte en MPa
- ε La déformation,
- ΔL L'allongement
- L_0 La longueur initiale

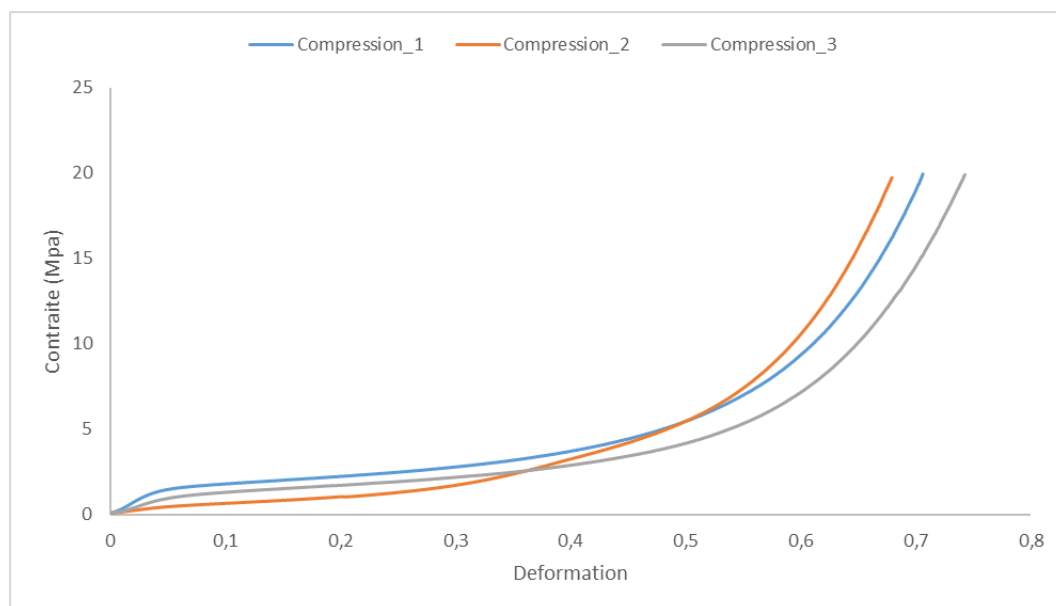


Figure III-3 : courbe contrainte déformation en compression du composite

Après avoir finis les essais, nous avons remarqué que les éprouvettes montrent un retour élastique après les avoir enlevés des mors de la machine de compression, un décalage entre les extrémités et le centre est aussi observé. Nous avons mesuré à l'aide d'un pied à coulisses ces retours et le décalage puis calculer la valeur du retour par rapport au déplacement en fin d'essais pour la zone du milieu et les extrémités des éprouvettes de compression. Ces deux tableaux ci-dessous résume nos trouvailles :

Tableau III-1 : mesures des pourcentages de retour sur la zone médiane

Test	Compression			
Eprouvettes	1	2	3	Moyenne
Epaisseur au Milieu	31,65	32,76	31,91	32,11
Epaisseur Fin d'Essais	13,23567	14,44483	11,59258	13,09102667
Pourcentage de Retour	58,18%	55,91%	63,67%	59,25%

Tableau III-2 : mesures des pourcentages de retour sur les extrémités

Test	Compression			
Eprouvettes	1	2	3	Moyenne

Epaisseur Moyenne Extrémité	37,09	39,16	37,61	37,61
Epaisseur Fin d'Essais	13,23567	14,44483	11,59258	13,09102667
Pourcentage de Retour	64,31%	63,11%	69,18%	65,53%

Nos éprouvettes montrent donc un retour moyen de **59,29%** sur la partie centrale et **65,53%** sur les extrémités montrant ainsi la capacité d'amortissement de notre matériau et sa durabilité en plus de sa capacité à résister aux charges importantes.

Puis pour la suite de l'analyse, afin de déduire les caractéristiques mécaniques de notre matériau, nous avons procédé à une étude statistique en calculant la moyenne des modules d'Young, les résultats de cette étude sont sur le tableau suivant :

Tableau III-3 : Comparaison des erreurs relatives au modules de Young par rapport à la moyenne

Test	Compression			
Eprouvettes	1	2	3	Moyenne
E (MPa)	37,5561	8,35378	22,305	22,73819
Err	0,59%	0,57%	0,02%	

Ceci nous ramène donc à utiliser la courbe du 3ème échantillon pour la suite de notre étude car c'est celui le plus proche de ma moyenne.

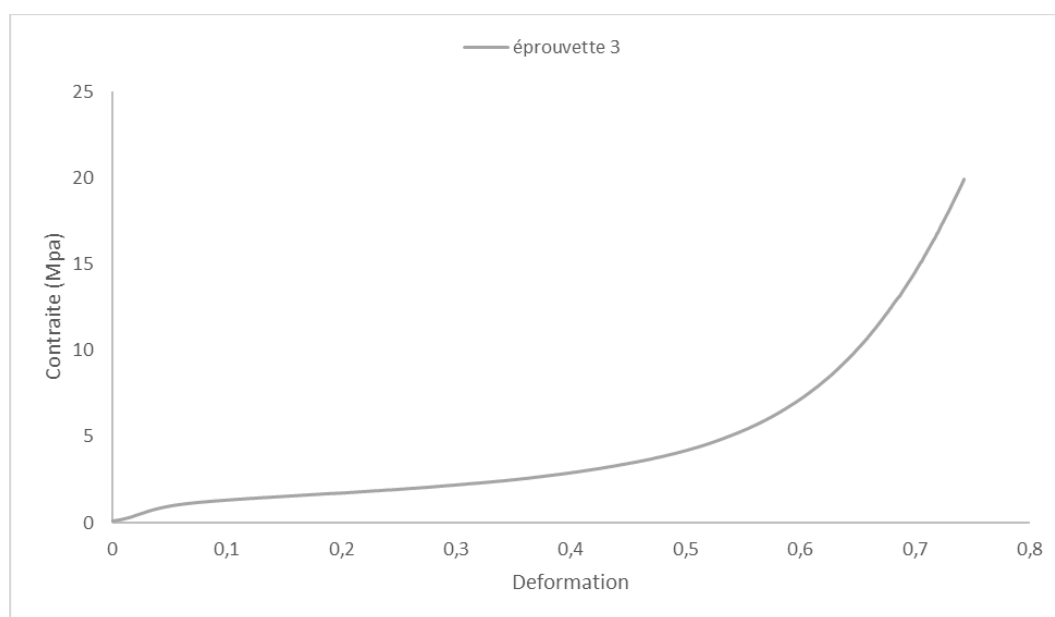


Figure III-4: courbes contrainte déformation pour l'essai de compression

D'après la courbe de contrainte -déformation pour le composite époxy/jute/liège ,on constate que le matériau montre un allongement à la rupture de 31,76mm pour une charge maximale de 201;25KN limitée par la machine ;la figure III.4 montre que le composite sandwich peut se diviser en 3 zone principales, d'abord un comportement élastique linéaire jusqu' à un allongement de 0,03 correspondant à une contrainte de 4,8 MPa puis au-delà de cette valeur, nous notons un décalage prononcé dans l'allure de la courbe qui augmente de plus en plus avec le relâchement graduel de la contrainte

Les principales caractéristiques mécaniques sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-4: caractéristique mécanique obtenu de l'essai de compression

Propriétés	Valeurs
Limite d'élasticité (MPa)	4,8
E (MPa)	22,305
$\sigma_{\max}$ (MPa)	19,92268849
ϵ_f	0,742387111
Force max (N)	200820,7
Déplacement max(mm)	33,40742

III.3 Essai de flexion :

Dans le cadre de la présente étude expérimentale, les panneaux sandwichs réalisés sont testés suivant la norme **NF T 54-606**. Pour chaque essai, 3 éprouvettes ont été testées afin de s'assurer de la bonne reproductibilité des résultats obtenus.

Concernant les conditions de l'essai de flexion à 3 points, le chargement est appliqué à mi-travée du panneau sandwich et la distance entre appuis est de 200 mm

Les résultats expérimentaux des panneaux sandwichs en flexion seront présentés dans les sections ci-dessous, permettant ainsi de déduire les paramètres influençant la résistance structurelle du matériau d'étude.

La figure **III.5** représente le dispositif de flexion et les éprouvettes utilisées.



Figure III-5 : Eprouvettes sollicité en flexion

Lors de l'essai de flexion, plusieurs phénomènes se produisent et chaque composant du panneau contribue de manière différente à la réponse mécanique. On a observé que dans les 3 éprouvettes le même comportement avec une compression de la partie centrale ainsi qu'un même mode de rupture avec une fissure qui démarre de l'extrémité inférieure de l'âme de l'éprouvette. Il est aussi important de noter l'absence de délamination des couches du panneau sandwich montrant la qualité du protocole d'élaboration.

Les résultats des 3 essais de flexion sont regroupés dans la figure ci-dessous :

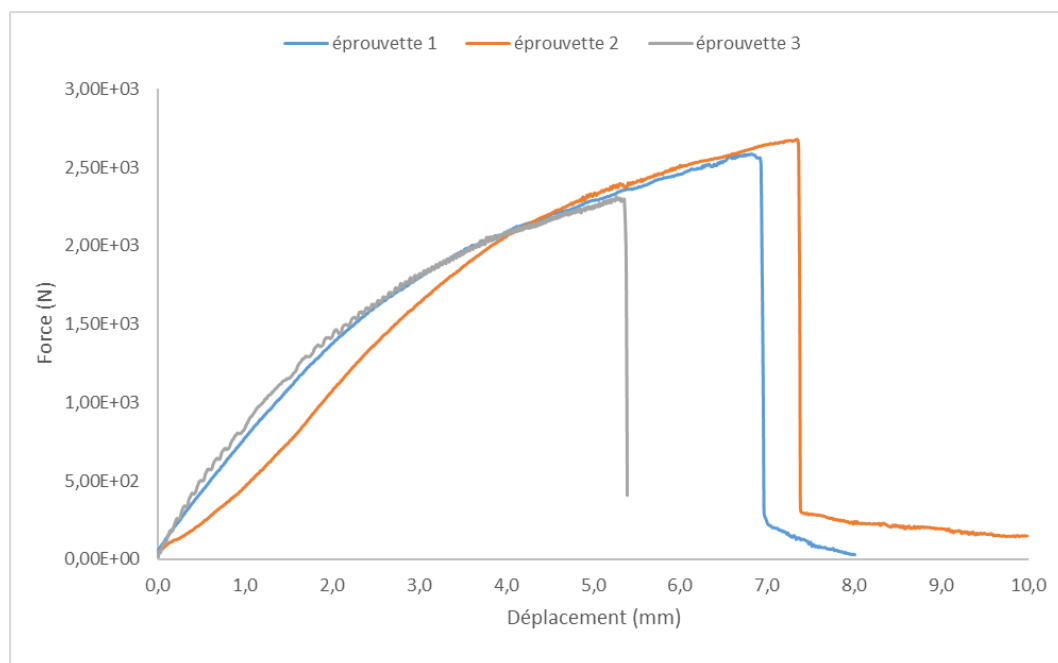


Figure III-6 : Courbes Force Déformation des essais de flexion sur composite époxy/jute/liège

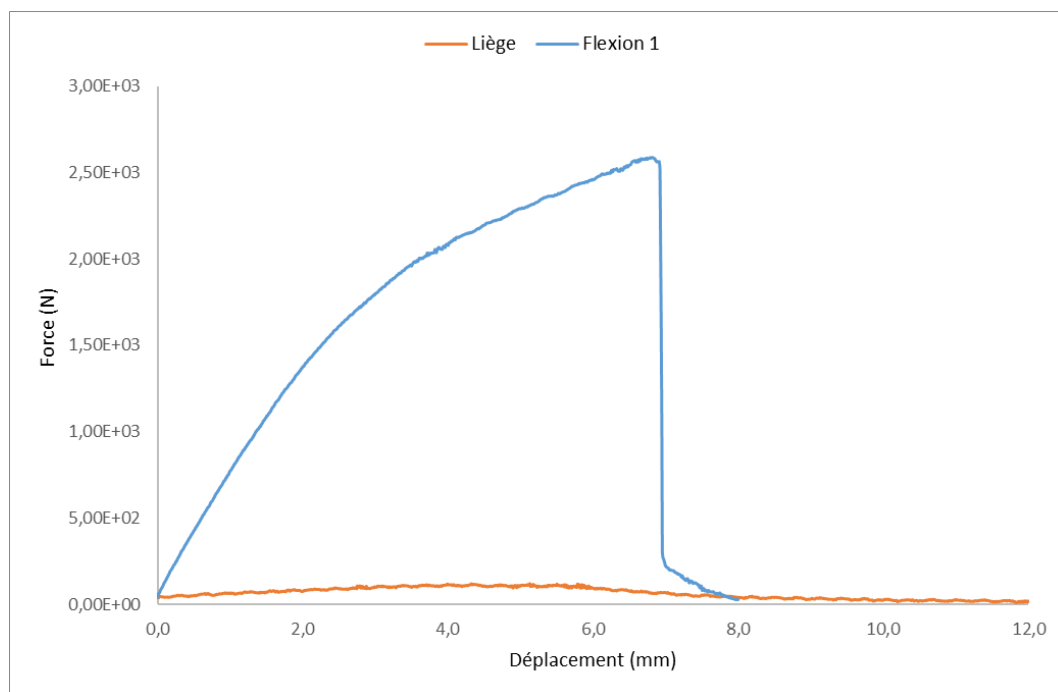


Figure III-7 : Courbe de flexion force déplacement pour le liège seul et le composite

La figure ci-dessus représente les résultats d'essais de flexion à 3 points sur le composite époxy/jute/liège et liège seul, en force déplacement suivant une direction de chargement ou l'effort est perpendiculaire. La figure III.7 montre que le composite supporte une charge de 2,59KN importante par rapport au liège seul qui atteint seulement 119,44N. Cependant le déplacement à la rupture dans le cas liège est plus grand avec une valeur de 12,28mm, en comparaison avec celui du

composite qui n'atteint que 8mm de flèche. Dans le cas du liège uniquement, l'excès d'allongement peut être expliqué par le phénomène d'effondrement des granulés de liège au sein de la plaque contrairement au composite ou une rupture brutale survient brusquement à environ 7mm d'allongement, ceci peut être expliqué par la réponse de la résine époxy qui montre un comportement fragile par rapport au liège, fragilisant ainsi la structure du matériau.

Les équations (1) et (2) ci-dessous permettent de calculer la contrainte à la rupture en flexion et la déformation à la rupture en flexion, respectivement.

$$\sigma_f = \frac{3PL}{2bd^2}$$

$$\varepsilon_f = \frac{6Dd}{L^2}$$

La figure ci-dessous montre la courbe contrainte déformation pour l'éprouvette 1 en composite époxy/jute/liège sollicité en flexion 3 points :

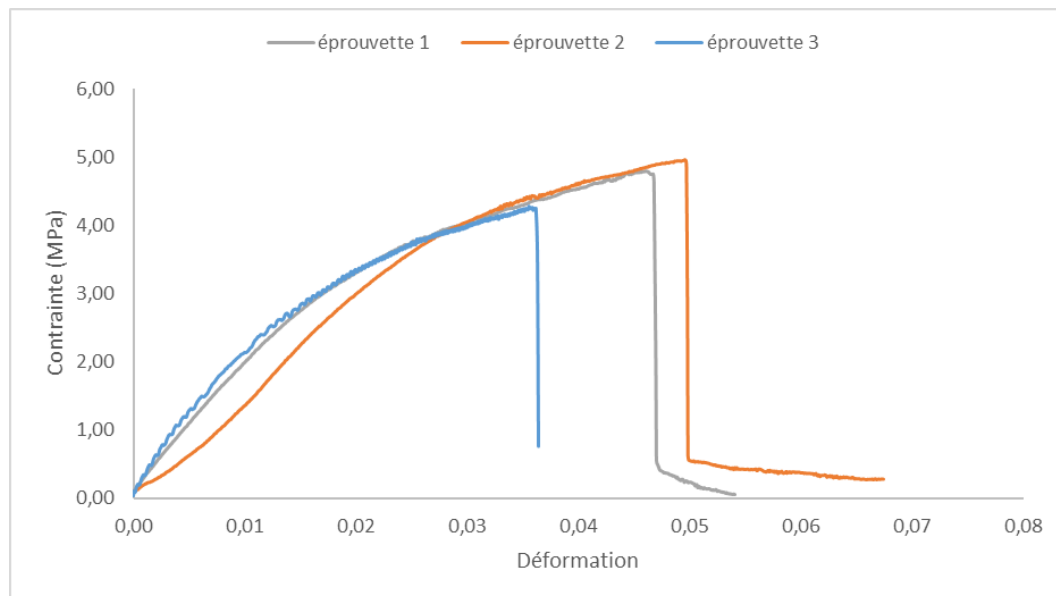


Figure III-8 : Courbes contrainte déformation pour la flexion 3 points.

De la même façon que les courbes de compression, nous avons conduit une étude statistique afin de déduire la meilleure courbe pour la suite de notre travail, à l'exception que cette fois-ci nous avons comparé l'amplitude maximale de la force. Les pourcentages d'erreur sont regroupés dans le tableau ci-dessous.

Tableau III-5 : Comparaison des erreurs relatives à l'amplitude de force maximale par rapport à la moyenne

Test		Flexion		
Eprouvettes	1	2	3	Moyenne
F_max (N)	2586.337	2676.932	2313.72	2525.663
Erreur	2.40%	5.99%	8.39%	

Dans ce cas, c'est l'éprouvette numéro 1 qui a été sélectionné pour la suite de l'étude afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de notre composite en flexion.

Les principales caractéristiques mécaniques sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau III-6 : caractéristique mécanique obtenu de l'essai de flexion 3point

Propriétés	Valeurs
E (MPa)	197 ,727
$\sigma_{\max}$ (Mpa)	4,79 ^{E+00}
ϵ_f	5,40 ^{E 02}
Force max (N)	2,59 ^{E+03}
Déplacement max (mm)	8,00279

IV. Conclusion Générale

Conclusion Générale et perspective

IV.1 Conclusions

Dans notre étude, nous avons abordé l'élaboration et la caractérisation d'un panneau sandwich, constitué d'une âme en liège et de peau en fibre de jute imprégnées d'époxy, pour objectif d'évaluer ses caractéristiques mécaniques. Dans le premier chapitre, nous avons mis en lumière leur conception, leurs caractéristiques géométriques et leurs domaines d'applications. Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous nous sommes concentrés sur le procédé d'élaboration, nous avons utilisé une technique sous vide pour imprégner la résine dans les fibres de jute afin de garantir une bonne répartition uniforme de la résine. Toutefois, les performances de la pompe sous vide ont montré certaines limites, enfin, dans le troisième chapitre, nous avons réalisé des essais mécaniques, incluant des tests de compression, et des tests de flexion à 3 points.

L'essai de compression nous a permis d'obtenir et d'analyser les caractéristiques mécaniques du matériau sandwich suivant, et ont révélé les résultats suivants :

- ❖ La distribution des charges se fait d'une façon uniforme, montrons ainsi la qualité du panneau sandwich, et ainsi la validité de notre mode d'élaboration.
- ❖ Une bonne résistance mécanique, qui peut supporter des charges beaucoup plus élevées, la machine de compression utilisée fixée à 200KN, n'a pas permis de tester toute la capacité de résistance de notre matériau.
- ❖ L'analyse de la courbe force-déplacement, montre que le panneau sandwich peut supporter des charges très importantes par rapport au liège seul.
- ❖ La résine époxy, et les fibres de jute, jouent un rôle crucial dans l'amélioration de la résistance mécanique du notre matériau.
- ❖ L'analyse de la courbe contrainte-déformation, montre que le panneau sandwich subit un léger écrouissage au début causé par l'effondrement des granules puis il se prononce davantage vers la fin où la rigidité du matériau augmente correspondant à l'effondrement total des granules de liège.

Par ailleurs, des tests de flexion à 3 points ont été réalisés, ils nous ont permis d'obtenir et d'analyser les caractéristiques mécaniques du matériau sandwich, et ont révélé les résultats suivants :

- ❖ Dans le cas du liège seul, la rupture se fait d'une manière progressive, le liège se déforme de manière significative avant de céder, ce qui peut être expliqué par le phénomène d'effondrement des granules au sein de la plaque.
- ❖ Contrairement au composite où une rupture brutale survient brusquement à environ 7mm d'allongement.

Conclusion Générale et perspective

- ❖ Le déplacement à la rupture dans le cas liège est plus grand avec une valeur de 12,28mm, par rapport celui du composite qui n'atteint que 8mm.
- ❖ L'analyse de la courbe force-déplacement montre que le matériau sandwich supporte une charge significativement plus élevée comparé au liège seul, le composite supporte une charge de 2,59KN supérieure à celle du liège seul qui atteint seulement 119,44N.

La résine époxy, et les fibres de jute, jouent un rôle crucial dans la résistance de la structure sandwich.

Perspectives

En perspective, l'utilisation d'un autoclave aurait sans doute amélioré le résultat, En effet, un autoclave permet de mieux contrôler la pression et la température, assurant ainsi une imprégnation plus homogène et une réduction des défauts liés aux bulles d'air ou à une répartition inégale de la résine. Une piste d'amélioration serait de réduire les dimensions des éprouvettes pour les essais de compression, permet d'obtenir des résultats plus précis et atteindre la rupture de l'échantillon. Il serait intéressant d'effectuer des essais de flexions à quatre points, qui permettraient de mieux répartir les contraintes sur l'ensemble de l'échantillon, et de fournir une analyse plus précise. De plus, des tests de cisaillement permettraient d'évaluer la résistance du matériau au glissement entre les couches, il serait également pertinent de réaliser des tests d'absorption afin d'évaluer la performance du panneau au milieu humide. Enfin des tests acoustiques pourraient être envisagés pour évaluer la capacité du panneau sandwich à absorber les sons.

V. Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

V.1 Liste des références bibliographiques :

- [1] ASHBY, M.F. "MATERIALS SELECTION IN MECHANICAL DESIGN." BUTTERWORTH-HEINEMANN. (2013).
- [2] ZINKERT D , EMAS LTD . UK.1995
- [3] JONES, R.M. "MECHANICS OF COMPOSITE MATERIALS." CRC PRESS(1999).
- [4] ZENKERT, D. "AN INTRODUCTION TO SANDWICH CONSTRUCTION." ENGINEERING MATERIALS ADVISORY SERVICES LTD. (1995).
- [5] DOE, J. UNDERSTANDING SANDWICH PANELS: MATERIALS, DESIGN, AND APPLICATIONS. SPRINGER. (2020)
- [6] TIMOSHENKO SP., COODIER JN .(THEORY OF ELESTICITY), INTERNATIONAL STUDENT EDITION 1989
- [7] SMITH, A. ADVANCED MATERIALS FOR STRUCTURAL ENGINEERING: PROPERTIES, DESIGN, AND APPLICATIONS. ELSEVIER. (2019).
- [8] HARTSHORN, S. R. STRUCTURAL ADHESIVES: CHEMISTRY AND TECHNOLOGY .SPRINGER SCIENCE & BUSINESS MEDIA. (1996)
- [9] KINLOCH, A. J., & TAYLOR, A. C. (EDS).. ADHESION AND ADHESIVES: SCIENCE AND TECHNOLOGY (VOL. 1). ELSEVIER. (1985)
- [10] MITTAL, K. L. (ED.). ADHESION MEASUREMENT OF FILMS AND COATINGS. (2002)
- [11] ALLEN H. G.(ANALYSIS AND DESIGN OF STRUCTURAL SANDWICH PANELS), PERGAMON PRESS, OXFORD. 1969.
- [12] PETRAS, A., & SUTCLIFFE, M. P. F. (1999). FAILURE MODE MAPS FOR HONEYCOMB SANDWICH PANELS. COMPOSITE STRUCTURES, 44(4), 237-252
- [13] SONG, B., YU, Z., GUO, Y., & XU, J. (2012). THERMAL PERFORMANCE OF SANDWICH PANELS WITH A NOVEL COMPOSITE CORE. ENERGY AND BUILDINGS, 49, 447-454
- [14] CARLSSON, L. A., & KARDOMATEAS, G. A. (2011). STRUCTURAL AND FAILURE MECHANICS OF SANDWICH COMPOSITES. SPRINGER

Références Bibliographiques

- [15] HOOKE, R. (1678). LECTURES DE POTENTIA RESTITUTIVA, OR OF SPRING EXPLAINING THE POWER OF SPRINGING BODIES
- [16] MERTANI BOUBEKEUR MED BILEL.(MODELISATION NUMERIQUE ET EXPERIMENTALE DU COMPORTEMENT DES PANNEAUX SANDWICHES A AME EN NIDS D'ABEILLES), THESE DE MAGISTER, UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF (ALGERIE).2011
- [17] B. KESKES. (COMPORTEMENT EN FATIGUE DES COMPOSITES SANDWICHES A AME EN NIDS D'ABEILLES), THESE DE DOCTORAT UNIVERSITE FERHAT ABBAS – SETIF (ALGERIE), (2007).
- [18] SAIDANI K.(ANALYSE DES COMPOSITES SANDWICHES ET QUALIFICATION DE LEUR INTEGRITE VIS-A-VIS DE LA RUINE),THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE TIZI-OUZOU.2014
- [19] CHEMAMI ABDENACER,(ETUDE DE LA PERFORMANCE DES MATERIAUX COMPOSITES SANDWICHES - APPLICATION EN FATIGU), THESE DE DOCTORAT, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR – ANNABA (ALGERIA).2012
- [20] DJENANE ABDELMALEK. (ÉLABORATION ET CARACTERISATION DU COMPORTEMENT MECANIQUE DE DIFFERENTS COMPOSITES EN NIDS D'ABEILLES. ÉTUDE EXPERIMENTALE ET NUMERIQUE-), THESE DE MAGISTER, UNIVERSITE HOUARI BOUMEDIENE 2014
- [21] T.C.RADETTE, A. CHARON AND R.VODICKA, "ENVIRONMENTAL DEGRADATION OF HONEYCOMB SANDWICH STRUCTURE", AIRFRAMES AND ENGINES DIVISION AERONAUTICAL AND MARITIME RESEARCH LABORATORY.