

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL



DOMAINE : GENIE CIVIL
FILIERE : STRUCTURE

MEMOIRE FIN D'ETUDE

THEME

Conception et caractérisation expérimentale d'un panneau sandwich à base de mousse polyuréthane avec du liège

PRESENTE PAR :

- Mlle Beggaz Dyhia
- Mr Benakli Nabil

Devant le jury d'examen suivant :

- | | |
|------------------------|--------------|
| • Dr ALI AHMED Chafika | Présidente |
| • Dr BOUZEBODJA Fatma | Examinatrice |
| • Dr AIT TALEB Souad | Encadrante |

Soutenu en 20 septembre 2023

Sommaire

Remerciement

Dédicace

Table des figures

Table des tableaux

TABLES DES FIGURES..... - 4 -

TABLES DES TABLEAUX..... - 5 -

RESUME..... - 6 -

INTRODUCTION GENERALE - 1 -

I .1 INTRODUCTION..... - 3 -

I.2 Matériaux d'âme - 3 -

I.2.1 Le liège..... - 4 -

I.2.1.1 Anatomie et qualité du liège..... - 4 -

I.2.1.2 Propriétés mécaniques du liège..... - 5 -

I.2.1.3 Composition chimique - 6 -

I.2.2 Le chanvre..... - 7 -

I.2.2.1 Morphologie du chanvre - 7 -

I.2.2.2 De la plante à la fibre - 8 -

I.2.3 Le bois..... - 9 -

I.2.3.1 Généralités sur le matériau bois - 9 -

I.2.3.2 Composition chimique du bois - 9 -

I.2.3.3 Propriétés physiques et mécaniques - 10 -

I.2.3.4 Les sciures de bois..... - 11 -

I.2.4 Le jute - 11 -

I.2.5 Le lin..... - 12 -

I.2.6 Les mousses..... - 12 -

I.3 Matériaux de semelles (peaux) - 13 -

I.3.1 Les tissus composites..... - 13 -

I.3.1.1 Catégories de tissu et paramètres de définition importants - 13 -

I.3.1.2 Avantages et inconvénients des tissus [8] - 16 -

I.3.2 Polymères - 16 -

I.3.2.1 Le Polypropylène (PP) - 17 -

I.3.2.2 Les PVC renforcés - 17 -

I.4 Les adhésifs..... - 18 -

I.4.1 Les résines - 18 -

I.4.1.1 Les thermoplastiques..... - 18 -

I.4.1.2 Les résines thermodurcissables - 19 -

I.4.1.3	Propriétés des résines.....	- 19 -
I.4.2	Les colles.....	- 20 -
I.5	Conclusion	- 21 -
II	.1 INTRODUCTION.....	- 22 -
II.2	Sandwiches sous chargement mécanique.....	- 22 -
II.2.1	Normes de confection et d'essai	- 22 -
II.2.2	Sandwiches en flexion	- 24 -
II.2.2.1	Comportement en flexion.....	- 24 -
II.2.3	Flambement des structures sandwiches	- 26 -
II.2.4	Mécanisme de rupture	- 27 -
II.2.4.1	Flambement généralisé des peaux	- 27 -
II.2.4.2	Flambement généralisé de l'âme ou « Crimping »	- 28 -
II.2.4.3	Flambement local des sandwiches « Wrinkling » et « Dimpling »	- 28 -
II.2.4.4	Rupture des peaux en traction ou en compression	- 29 -
II.2.4.5	Modes locaux de rupture.....	- 30 -
II.2.4.6	Rupture de l'âme en cisaillement	- 30 -
II.2.4.7	Dégradation de l'adhésive	- 31 -
II.3	Sandwiches sous chargement thermique.....	- 32 -
	Thermo élasticité	- 34 -
II.4	Synthèse des travaux antérieurs sur les sandwiches.....	- 35 -
II.5	Conclusion	- 38 -
III	.1 INTRODUCTION.....	- 39 -
III.2	Matériaux utilisés	- 39 -
III.2.1	Liège	- 39 -
III.2.1.1	Préparation des granulats du liège	- 40 -
III.2.1.2	Caractérisation physique du liège.....	- 42 -
III.2.2	Mousse.....	- 43 -
III.2.2.1	Caractérisation physique du la mousse	- 44 -
III.3	Le polymère (PVC)	- 45 -
III.4	Préparation des panneaux multicouches	- 47 -
III.4.1	Préparation des âmes.....	- 47 -
III.4.1.1	Préparation et fabrication des moules	- 47 -
III.4.1.2	Mise en œuvre	- 50 -
III.5	Présentation des essais.....	- 51 -
III.5.1	Machine d'essai.....	- 51 -
III.5.1.1	Essai de flexion trois point	- 52 -
III.5.1.2	Essai de compression	- 52 -
III.5.1.3	Essai d'ultrason	- 53 -
III.6	Conclusion	- 54 -

IV .1 INTRODUCTION.....	- 55 -
IV.2 Résultats des essais de caractérisation des âmes.....	- 55 -
IV.2.1 Essai d’ultrason	- 55 -
IV.2.2 Résultats des essais à la compression	- 58 -
IV.3 Résultats de la flexion trois point	- 63 -
IV.4 Résultats des essais sur les panneaux sandwichs.....	- 69 -
IV.5 Conclusion	- 72 -
CONCLUSION GENERALE	- 74 -
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUE	- 76 -

Tables des figures

Figure I-1:Divers matériaux sont utilisés pour la fabrication des âmes des structures multicouches [1]	- 3 -
Figure I-2: Croissance secondaire de la plante[48].....	- 4 -
Figure I-3:Différentes sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle[49].	- 4 -
Figure I-4: Courbe contrainte-déformation typique du liège en compression [50].....	- 6 -
Figure I-5: Comportement mécanique en traction pour le liège dans toutes les directions [50]	- 6 -
Figure I-6: Processus d'extraction des fibres végétales [51].....	- 8 -
Figure I-7: Schéma à différentes échelles de la plante et de la fibre de chanvre [51]	- 9 -
Figure I-8: Directions principales dans une pièce de bois [52].	- 10 -
Figure I-9: Sciures et copeaux de bois Issus des scieries [53]	- 11 -
Figure I-10: a) plante et fibre de jute ; b) plante et fibre de lin [54].....	- 12 -
Figure I-11: Matériaux utilisés dans la fabrication des peaux des structures multicouches.	- 13 -
Figure I-12:tissus 2D (a) taffetas, (b) sergé de 2, (c) satin de 5 à décochement de 2[55].....	- 14 -
Figure I-13: Tissus 3D : (a) « Layer to Layer Angle Interlock », (b) « Through the thickness Angle Interlock », (c) orthogonal. [54]	- 14 -
Figure I-14: Les différents tissus : a) fibre de verre ; b) fibre de carbone c) ; fibre de kevlar	- 15 -
Figure II-1: Différentes méthodes d'essais de Caractérisation des sandwiches [16].	- 24 -
Figure II-2: Dimension des sandwiches selon la norme AFNOR [16].	- 24 -
Figure II-3: Différentes sollicitations (M, N, T) appliquées sur un sandwich [26]	- 24 -
Figure II-4: Plaque sandwich. [12].	- 25 -
Figure II-5: Flexion trois-points. [29].....	- 25 -
Figure II-6: Flexion 4 points. [29].....	- 26 -
Figure II-7:a) flambement global du sandwich b) flambement local du sandwich [32].	- 27 -
Figure II-8: Mode de ruine par « flambement généralisé » des peaux du sandwich [56].	- 28 -
Figure II-9: Flambement généralisé de l'âme du sandwich [57]	- 28 -
Figure II-10: Flambement localisé « Wrinkling » [57].	- 29 -
Figure II-11: Flambement localisé « Dampling» [57].	- 29 -
Figure II-12: Rupture des peaux en traction ou en compression [40] [29].....	- 30 -
Figure II-13: Modes locaux de rupture par indentation [40] [29]	- 30 -
Figure II-14: Rupture de l'âme en cisaillement [40] [29].	- 31 -
Figure II-15: Type de dégradation de l'adhésif [29].	- 32 -
Figure II-16:Flux d'énergie thermique à travers un mur[58].....	- 33 -
Figure II-17Conception proposée par Sivakur et Navir [73].	- 35 -
Figure II-18: onception proposée par Yuezhou et Pang[74].	- 36 -
Figure II-19: onception proposée par Hesham Tuwair et al [75].	- 36 -
Figure II-20: onception proposée par Hesham Tuwair et al[75].	- 37 -
Figure II-21: onception proposée par Megavannan et al [76].	- 37 -
Figure II-22: Conception proposée par Gama et al., (2019) [77].....	- 38 -
Figure III-1: liège	- 39 -
Figure III-2: Liège en morceau.....	- 40 -
Figure III-3: tamiseuse électrique.....	- 41 -
Figure III-4: diamètre 3 mm	- 42 -
Figure III-5: diamètre 1.25 mm	- 42 -
Figure III-6: font de tamis.....	- 42 -
Figure III-7: étape de l'essai de détermination de la densité du liège	- 42 -
Figure III-8: mousse polyuréthane	- 43 -
Figure III-9: pose de la mousse dans le moule prismatique	- 44 -
Figure III-10: étape de l'essai de détermination de la densité de la mousse	- 45 -
Figure III-11: plaque de PVC blanc	- 46 -
Figure III-12:. Comportement du la semelle en PVC à la traction.....	- 46 -
Figure III-13: illustration de tous les éprouvettes réaliser et leur designation	- 47 -
Figure III-14: Coffrage utilisé pour la confection des panneaux.....	- 49 -

Figure III-15: Procédure du moulage dans des éprouvettes.....	- 50 -
Figure III-16: machine d'essai IBERTEST	- 51 -
Figure III-17: flexion 3 point d'un panneaux sandwich	- 52 -
Figure III-18: compression d'un morceau de liège.....	- 53 -
Figure III-19: Appareille Pundit de détermination de la vitesse ultrasonore.....	- 53 -
Figure IV-1: éprouvettes sous essai d'ultrason.....	- 56 -
Figure IV-2: histogramme des variations de la vitesse selon le matériau	- 57 -
Figure IV-3: résistance à la compression du liège et de la mousse	- 58 -
Figure IV-4: résistance à la compression des mélanges selon le pourcentage de liège D 1.25	- 59 -
Figure IV-5: résistance à la compression des mélanges selon le pourcentage de liège D8	- 59 -
Figure IV-6: résistance à la compression des mélanges selon le pourcentage de fond de tamis.....	- 60 -
Figure IV-7: Eprouvettes soumises à la compression	- 62 -
Figure IV-8: histogramme des résistances a la compression de la totalité des mélanges	- 63 -
Figure IV-9: comportement du liège et de la mousse en flexion 3 points	- 64 -
Figure IV-10: résistance à la flexion 3 points des mélanges selon le pourcentage de liège D 1.25	- 64 -
Figure IV-11: résistance à la flexion 3 points des mélanges selon le pourcentage de liège D8	- 65 -
Figure IV-12: résistance à la flexion 3 points des mélanges selon le pourcentage de fond de tamis	- 65 -
Figure IV-13: quelque exemple d'éprouvettes soumise à la flexion 3 points	- 67 -
Figure IV-14: histogramme récapitulatif des résistances a la flexion 3 points.....	- 67 -
Figure IV-15: illustration des panneaux soumis à la flexion 3 points :	- 70 -
Figure IV-16 : graphique des résistances a la flexion 3 points des panneaux.....	- 71 -
Figure IV-17: histogramme des résistances.....	- 72 -

Tables des tableaux

Tableau I-1: Composition chimique du liège	- 7 -
Tableau I-2: caractéristiques des résines thermodurcissables [10]	- 19 -
Tableau I-3: caractéristiques des résines thermodurcissable [10].....	- 19 -
Le tableau III-1 récapitule les quantités du tamisât selon le diamètre	- 41 -
Tableau III-2 : tableau des quantités de liège selon le diamètre	- 41 -
Tableau III-3: Calcul des caractéristiques physique du liège	- 43 -
Tableau III-4: Calcul des caractéristiques physique du mousse.....	- 45 -
Tableau III-5: Variante des pourcentages d'ajout en liège.....	- 45 -
Tableau III-6: Propriétés évaluées des peaux composites en PVC.....	- 46 -
Tableau IV-1: tableaux des variations de la vitesse selon le matériau	- 57 -
Tableau IV-2: tableaux récapitulatifs des résistances a la compression	- 62 -
Tableau IV-3: tableaux récapitulatifs des résistances a la flexion 3 points.....	- 68 -
Tableau IV-4: résistances a la flexion 3 points des panneaux	- 71 -

Remerciements

Je tiens d'abord et avant tout à remercier ALLAH de m'avoir mis sur le droit chemin et qui m'a guidé à accomplir ce modeste travail.

Je tiens à remercies mes très chers parents et ma famille pour leur soutien énorme qu'il m'ont apporté depuis toujours

Je tiens à remercier chaleureusement nos encadrants Dr. Ait Taleb Souad et Dr Si Salem Abdelmadjid de nous avoir assisté tout le long de ce travail, nous ne les remercions jamais assez pour leurs précieux conseils, leurs temps, et leur valeureuse orientation sans laquelle ce +++modeste projet n'aurait pas abouti, ce fut un honneur et privilège d'avoir appris à leurs côtés.

J'adresse mes sincères remerciement aux membres du jury, pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de juger ce travail

Je voudrais également adresser mes sincères remerciement au personnel du laboratoire du département de Génie Civil, Mr Bouhraoua.R et Mme M. Fadila, pour m'avoir facilité le travail au laboratoire, et pour leur soutien et encouragement.

Mes remerciements vont aussi à toute personne qui a contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail.



DEDICACES

À ceux qui se sont toujours dévoués et sacrifiés pour moi, ceux qui m'ont encouragé et soutenu dans la lutte contre les aléas de la vie et dans mes efforts pour donner le meilleur de moi-même, je dédie essentiellement ce mémoire à mes parents.

À ma très chère sœur Kamelia, ainsi qu'à mes très chers frères Ghiles et Mohamed qui m'ont énormément aidé et à qui je témoigne toute mon affection et ma profonde admiration.

À celui qui a su m'épauler, m'encourager et surtout être patient avec moi, mon mari Omar, à qui je témoigne tendrement toute ma gratitude.

À la lumière de ma vie, mon amour, ma joie et ma fierté, je ne vis que pour son rire, son regard et son innocence. À ma fille Léana, qui un jour j'espère sera fière de sa maman.

a mes très chère amis qui mon aider pour ce travail
Yanis, Lynda, Thamila, Mahfoud et bien d'autre que je remercie du fond du cœur

À tous ceux que j'aime et qui m'ont aidé de près ou de loin à accomplir ce modeste travail...



Dyhia,



DEDICACES

A mon cher père Hocine qui n'a pas cessé de m'encourager et de se sacrifier pour que je puisse franchir tout obstacle durant toutes mes années d'études, que dieu me le garde en très bonne santé inchallah.

A ma plus belle étoile qui puisse exister dans l'univers : ma mère,
celle à qui je souhaite une longue vie.

A mon frère et ma sœur et à toute la famille Benakli.

Une deuxième personne qui a partagé ce travail avec moi dans les bons et mauvais moments ; à ma binôme Dyhia et toute sa famille.

A tous mes amis(es) de toute ma promotion de génie

Civil2022/2023, Surtout : Aziz ;

Anis ;Belkacem ;Nassim ;Tarik ;Fouad Yacine.



Nabil

Résumé

Les recherches dans le domaine de nouveaux matériaux de construction connaissent actuellement un essor très important. En effet, amples procédés et techniques sont développés dans la littérature scientifique pour réduire la consommation ou la déperdition énergétique. Pour cela, les structures sandwiches multicouches reçoivent une attention considérable et deviennent de plus en plus incontournables, grâce à leurs rapports : rigidité-poids, résistance élevée, capacité d'absorption d'énergie, ainsi que leur excellente durabilité. Ces structures sont destinées à des applications d'isolation de toiture et de parois de cloison, permettant ainsi d'améliorer les propriétés thermiques et acoustiques de la structure. Par conséquent, dans le présent travail, nous allons nous intéresser à élaborer et analyser expérimentalement une nouvelle structure sandwich constituée : d'une âme à base d'une mousse polyuréthane avec des ajouts granulaires issus de la récupération des déchets de liège et des semelles en PVC.

L'objectif principal de cette étude se résume sur la valorisation et recyclage des déchets de liège pour développer un nouveau matériau de construction durable et thermiquement isolant avec un seuil de résistance et de rigidité acceptable. En effet, ces panneaux ont été soumis à des charges en flexion à trois points et en compression, et les processus d'amorçage et de propagation des fissures ont été étudiés. Au cours de cette étude, nous avons examiné attentivement l'influence du pourcentage et du diamètre des granulats de liège sur les caractéristiques mécaniques des panneaux multicouches. Nous avons cherché à déterminer comment ces paramètres affectent les performances des panneaux composites et leur résistance face aux charges appliquées. En analysant différentes combinaisons de pourcentages et de diamètres de granulats de liège, nous avons pu mieux comprendre comment ces facteurs influent sur les propriétés mécaniques globales des panneaux multicouches.

Tous les résultats obtenus ont été présentés, notamment une comparaison des courbes force-déplacements et des histogrammes pour évaluer la résistance et le déplacement maximal des panneaux chargés. L'objectif était de mettre en évidence les performances mécaniques des structures composites développées.

Mots clés : Panneaux sandwichs, Valorisation des déchets, Mousse polyuréthane, Granulats de liège, Semelles PVC, Caractérisation expérimentale, Isolation thermique

Introduction générale

Introduction générale

Dans le domaine de la construction, les avancées technologiques continuent de redéfinir les normes de durabilité et d'efficacité énergétique. L'une des innovations les plus prometteuses est la création de structures sandwich, combinant deux feuilles de surface aux propriétés mécaniques remarquables, avec une couche de base composée d'un matériau léger. Toutefois, face aux défis environnementaux actuels, il est devenu impératif d'adopter des solutions plus respectueuses de notre écosystème.

Les panneaux sandwich présentent des effets bénéfiques sur l'environnement lorsqu'ils sont utilisés de manière durable. Leur isolation thermique efficace contribue à réduire la consommation énergétique des bâtiments, limitant ainsi les émissions de gaz à effet de serre. Fabriqués à partir de matériaux recyclés ou recyclables, ces panneaux favorisent la préservation des ressources naturelles. Leur faible poids allège la charge sur les structures de support, engendrant des économies de matériaux. De plus, ces panneaux minimisent les ponts thermiques, renforçant l'efficacité énergétique et le confort intérieur. Des études scientifiques telle que (Lakreb, 2015 ; Marouene, 2010 Ward et al. 2016) [1, 2, 78] explorent ces avantages, mettant en lumière leur impact positif sur l'efficacité énergétique et l'environnement des bâtiments.

C'est dans ce contexte que notre étude vise à repousser les limites de la construction durable en proposant une nouvelle approche novatrice. Notre objectif est de concevoir des panneaux multicouches écologiquement responsables, en remplaçant les matériaux conventionnels par des ressources naturelles à empreinte environnementale favorable. Ces panneaux combineront légèreté, robustesse mécanique, isolation efficace et coûts réduits, offrant ainsi une solution polyvalente pour les applications architecturales telles que cloisons et murs de séparation.

Cette étude vise à approfondir la conception et la caractérisation de panneaux composites multicouches qui présentent des propriétés mécaniques améliorées et une empreinte écologique favorable. Les principales composantes de ces panneaux sont les suivantes :

- Âme en mousse polyuréthane : La mousse polyuréthane, connue pour sa légèreté et ses propriétés isolantes, servira de couche centrale du panneau. Elle contribuera à conférer la structure globale du panneau et aidera à maintenir sa résistance et sa rigidité.
- Granulats de liège : Les granulats de liège, de différentes tailles et proportions, seront incorporés à la mousse polyuréthane. Le liège est un matériau naturel, renouvelable et respectueux de l'environnement. En l'intégrant dans la structure du panneau, on peut améliorer ses performances acoustiques et thermiques.
- Plaques de PVC : Les plaques de PVC seront utilisées comme semelles inférieures et supérieures du panneau, assurant ainsi une protection

supplémentaire et une surface solide pour le panneau composite. Le PVC est également apprécié pour sa résistance aux chocs et à la déformation.

La démarche expérimentale impliquera la fabrication de panneaux composites en combinant ces différentes composantes dans des proportions spécifiques. Ces panneaux seront ensuite soumis à des tests mécaniques pour évaluer leur résistance à la compression, leur rigidité, ainsi que leur comportement sous différentes charges et conditions. L'objectif ultime de cette étude est de fournir des données pour optimiser la formulation des panneaux composites multicouches et de déterminer les proportions idéales de chaque composant, en vue de créer des produits durables, performants et respectueux de l'environnement, adaptés à diverses applications de construction et d'isolation.

Pour y mener à terme ces objectifs posés dans ce travail, nous avons scindé le mémoire en deux grandes parties. La première partie est une synthèse bibliographique composée de deux chapitres :

❖ Le premier chapitre « **généralités sur les matériaux des sandwichs** », nous avons présenté un état de l'art les caractéristiques et les comportements des matériaux utilisés dans cette étude, à savoir les matériaux des structures composites sandwiches, les différents types de matériaux structuraux ainsi que leur comportement mécanique leurs avantages, et intérêts d'utilisation dans le domaine de génie civil.

❖ Le deuxième chapitre porte sur « **Le comportement des sandwichs stratifiés** » ce chapitre est dédié à la description du comportement des structures sandwiches sous différents chargements mécaniques ou bien thermique, les différentes théories ainsi que les modes de ruptures et les différents problèmes de la mécanique des structures. Enfin une synthèse des travaux antérieurs sur les sandwichs est réalisée, listant ainsi les différents travaux expérimentaux menés sur les structures sandwiches.

La deuxième partie est consacrée à la caractérisation des matériaux et des procédures expérimentales utilisées et ensuite l'analyse des résultats obtenus.

❖ Le troisième chapitre, « **Matériaux et procédure expérimentale** », donne un aperçu des caractéristiques des matériaux utilisés et de la méthode utilisée pour la réalisation des panneaux composites en mousse et liège ;

❖ Le quatrième chapitre regroupe **les principaux résultats** obtenus sur le comportement mécanique en termes de comportement globale (courbes force-déplacement) et la présentation des différents modes de rupture.

Enfin, une conclusion est dressée pour clôturer ce travail, ainsi qu'une liste de perspective au vu de travaux futurs.

Chapitre I

Généralités sur les
matériaux sandwichs

I.1 Introduction

Les travaux de recherche disponibles dans la littérature scientifique ont mis en évidence certaines limites de l'utilisation de matériaux traditionnels homogènes, qui ne conviennent que pour des applications spécifiques en raison de leurs caractéristiques intrinsèques. Cependant, de nouvelles perspectives se sont ouvertes avec l'introduction des matériaux composites, qui offrent la possibilité de répondre aux contraintes mécaniques imposées en sélectionnant judicieusement les renforts et les matrices.

Les structures multicouches sont composées de couches extérieures rigides et de matériaux intérieurs à faible densité. Pour obtenir des propriétés mécaniques intéressantes, il est essentiel de ne pas se concentrer uniquement sur la rigidité des couches extérieures, mais aussi de prendre en compte les matériaux intérieurs, qui doivent présenter à la fois des performances mécaniques élevées et une légèreté.

Dans ce chapitre, nous aborderons une revue sur les matériaux qui constituent les structures sandwichs, en décrivant leur mise en forme ainsi que leurs caractéristiques physiques et mécaniques.

I.2 Matériaux d'âme

La figure présente un organigramme récapitulant les principaux matériaux utilisés pour fabriquer les âmes des structures multicouches.

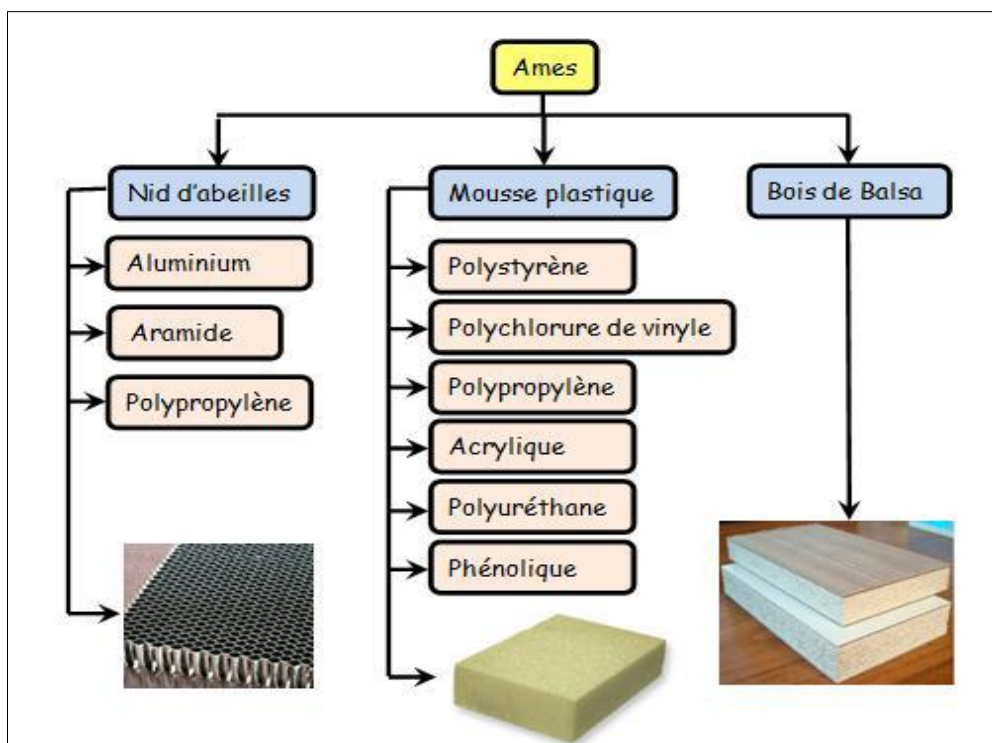


Figure I-1: Divers matériaux sont utilisés pour la fabrication des âmes des structures multicouches [1]

I.2.1 Le liège

Le liège est un matériau naturel et vivant qui provient d'une variété de chêne-liège. Il a la particularité de régénérer son écorce chaque année après la récolte. L'épaisseur du liège produit par l'arbre varie de 1 à 10 mm en fonction de l'âge de l'écorce. Sur le plan thermique et acoustique, le liège se comporte comme un isolant de mauvaise conductivité. Son utilisation initiale remonte à l'Antiquité, où il était utilisé dans la fabrication de ruches pour ses propriétés isolantes.

En ce qui concerne son utilisation dans la construction, on trouve des traces de ses premières utilisations en tant qu'isolant thermique chez les populations primitives d'Afrique du Nord. Ils utilisaient le liège en plaques mélangées avec de l'argile pour construire les murs de leurs habitations.

I.2.1.1 Anatomie et qualité du liège

D'un point de vue botanique, l'écorce désigne la croissance en épaisseur ou croissance secondaire de la tige d'une plante. Cette croissance est le résultat de l'activité des méristèmes présents à la périphérie de la tige, à savoir le cambium et le phellogène. Une fois formée, cette structure secondaire est enveloppée par un tissu protecteur appelé le périderme.

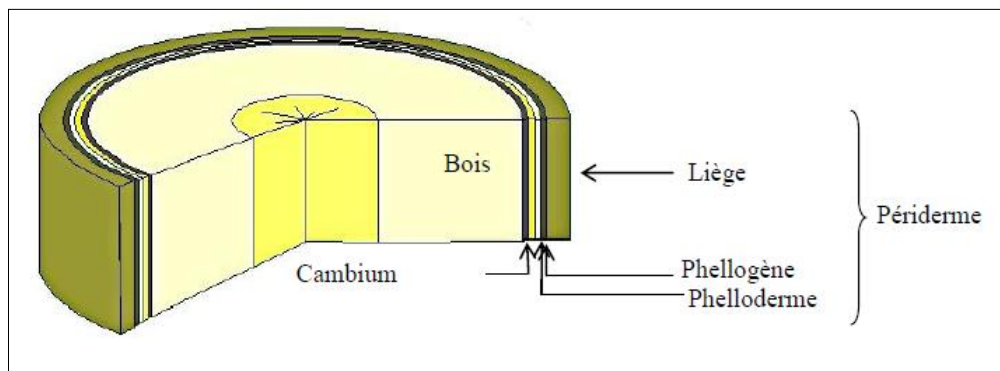


Figure I-2: Croissance secondaire de la plante[48].

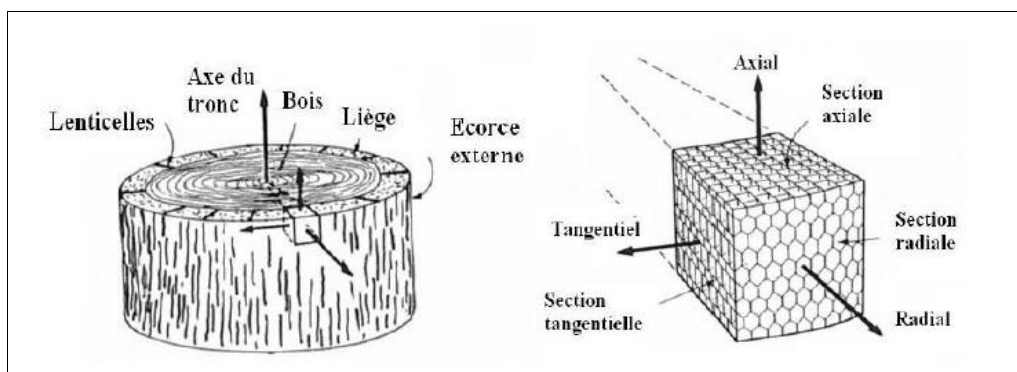


Figure I-3: Différentes sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle[49].

La disposition des cellules dans la section radiale du liège forme une structure en "nid d'abeilles" avec des formes principalement hexagonales (voir Figure II.3). Certaines cellules peuvent avoir cinq, sept ou huit côtés. Cette configuration des cellules suggère

que le liège est un matériau isotrope dans le sens radial, ce qui signifie que les directions axiale et tangentielle sont équivalentes [2].

Le liège possède de nombreuses propriétés grâce à sa composition et à sa structure :

- **Résilient et souple** : Le liège a la capacité de retrouver sa forme d'origine après une compression grâce à sa mémoire élastique. Il résiste aux charges de compression sans se déformer de manière permanente. De plus, il présente une grande stabilité dimensionnelle et une dilatation minimale face aux variations d'humidité et de température [3].
- **Légèreté** : Le liège est léger en raison de sa faible densité, qui est variable selon sa qualité. Cette caractéristique est due à l'air contenu dans ses cellules.
- **Adhérence** : Le liège possède une capacité d'adhérence grâce à la force d'expansion d'une matière élastique et à la présence de micro ventouses au contact des parois.
- **Imperméabilité** : Le liège est imperméable en raison de la contre-pression exercée par les gaz contenus dans ses cellules et de la présence de substances grasses dans ses membranes. Il absorbe moins de 18 à 20 % d'eau en augmentant de volume principalement par la dilatation des gaz contenus dans ses cellules.
- **Naturel, recyclable et biodégradable** : Le liège contribue au développement durable en étant un matériau naturel, recyclable et biodégradable.
- **Faible conductivité phonique et thermique** : Le liège présente une faible conductivité thermique ($0.2963 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ pour le liège en planche), ce qui en fait un excellent isolant. Il offre également une bonne isolation acoustique. Lorsqu'il est comprimé, la pression de l'air emprisonné dans ses cellules ferme les capillarités, renforçant ainsi ses propriétés isolantes.
- **Mauvaise combustibilité** : Le liège est difficilement inflammable car il nécessite une grande quantité d'oxygène pour brûler. De plus, lorsqu'il est exposé à la chaleur, il se carbonise en surface, formant une couche qui limite la propagation du feu.
- **Résistant à la friction** : Le liège offre une excellente résistance à la friction et à l'usure causée par de nombreux passages. Il ne s'effrite pas et conserve son intégrité même après une utilisation intense.

I.2.1.2 Propriétés mécaniques du liège

Le liège présente des propriétés mécaniques particulières qui se manifestent dans la courbe contrainte-déformation en compression. Cette courbe montre trois régions distinctes, chacune correspondant à des mécanismes spécifiques responsables des propriétés des matériaux alvéolaires flexibles.

D'après la (figure II.4), la première région de la courbe (jusqu'à une déformation d'environ 7%) est caractérisée par une flexion élastique des parois cellulaires. Ensuite, on observe un plateau presque horizontal qui s'étend jusqu'à une déformation d'environ 70%. Ce plateau est causé par le flambage progressif des parois cellulaires. Enfin, la

courbe présente une augmentation abrupte due à l'écrasement des parois cellulaires et à l'effondrement complet des cellules.

En ce qui concerne la courbe contrainte-déformation en traction (figure II.5), on observe un comportement mécanique différent selon les deux directions considérées. Une zone intermédiaire avec des dentelures est présente et s'explique par l'apparition de microfissures successives qui se propagent à travers quelques cellules environnantes.

Ces caractéristiques spécifiques de la courbe contrainte-déformation en compression et en traction témoignent des mécanismes complexes qui se produisent au niveau des cellules du liège et influencent ses propriétés mécaniques.

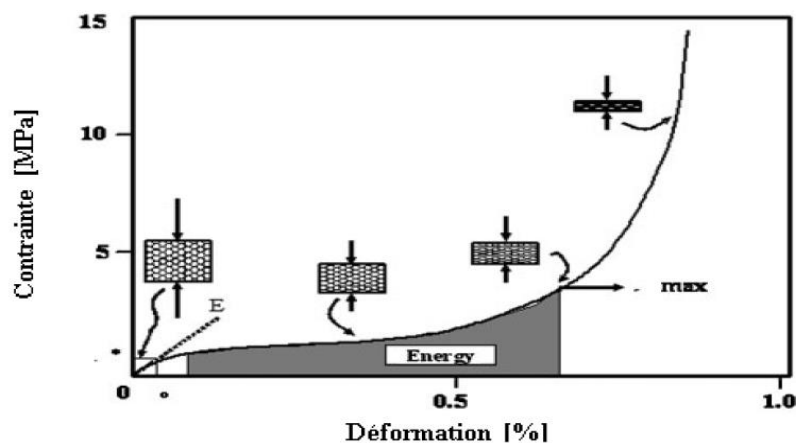


Figure I-4: Courbe contrainte-déformation typique du liège en compression [50]

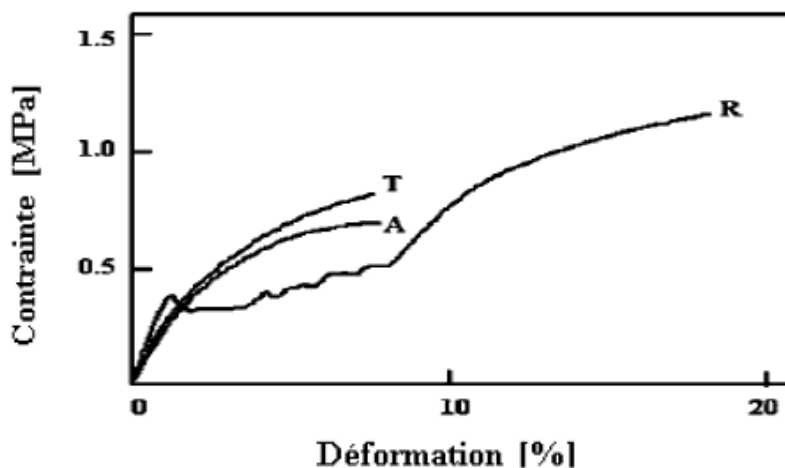


Figure I-5: Comportement mécanique en traction pour le liège dans toutes les directions [50]

I.2.1.3 Composition chimique

La composition du liège provenant du chêne est extrêmement complexe. Des études ont été menées pour analyser sa composition chimique, mais les résultats obtenus peuvent parfois être contradictoires en raison des différentes méthodes utilisées. La plupart des constituants du liège ne sont accessibles qu'après une dépolymérisation et les proportions de ces constituants peuvent varier en fonction de l'âge de l'écorce et de

l'environnement dans lequel le chêne liège pousse. Les principaux constituants du liège, répertoriés dans le tableau II.1, comprennent :

- La subérine : c'est le composant principal des cloisons cellulaires du liège et il est responsable de son élasticité.
- La lignine : elle joue un rôle essentiel dans la liaison entre les différents composants du liège. C'est ce que l'on appelle le "composé agglomérant".
- La cellulose et les polysaccharides : ils sont présents dans les cloisons cellulaires et contribuent à la texture du liège.
- Les tanins : ils sont responsables de la couleur caractéristique du liège.
- Les céroïdes : ils sont des composés hydrophobes qui confèrent au liège son imperméabilité.
- D'autres composants, tels que l'eau, la glycérine et divers ingrédients, sont également présents dans des proportions d'environ 4% [4].

La composition complexe du liège, avec ses différents constituants, contribue à ses propriétés uniques et variées, telles que son élasticité, son imperméabilité et sa texture.

Tableau I-1: Composition chimique du liège [54]

Composants	Subérine	Lignine	Cellulose et Polysaccharides	Tanins	Cires	Cendres et autres
Proportions	45%	27%	12%	6%	5%	5%

I.2.2 Le chanvre

Le chanvre, une plante appartenant à la famille des Cannabinacées, est l'une des premières plantes domestiquées par l'homme. Sa culture remonte à l'ère néolithique, et il est originaire d'Asie. Au fil du temps, le chanvre a été transporté lors de migrations et de conquêtes, ce qui a contribué à sa propagation sur tous les continents. Le chanvre est une angiosperme dicotylédone, et il est divisé en quatre sous-espèces : Sativa, Indica, Afghanistanica et Ruderalis. Parmi ces sous-espèces, le chanvre cultivé est connu sous le nom de Cannabis Sativa.

I.2.2.1 Morphologie du chanvre

Le chanvre (*Cannabis sativa* L.) est une plante annuelle herbacée caractérisée par des feuilles palmées. Sa tige est constituée de fibres longues, appelées filasse, qui se trouvent à l'extérieur, ainsi que de fibres intérieures plus courtes et fortement lignifiées. Les fibres longues sont récupérées par un traitement mécanique, laissant ainsi la chènevotte, également connue sous le nom de bois de chanvre.

La filasse représente environ 30% de la masse sèche de la tige et est utilisée dans divers domaines tels que le textile, les textiles techniques, le papier, ainsi que dans la construction et l'isolation.

Quant au bois de chanvre, il constitue environ 70% de la masse de la tige. Il trouve également des applications dans les matériaux de construction, notamment dans la fabrication de bétons de chanvre, les litières pour animaux, ainsi que comme paillis pour les sols.

I.2.2.2 De la plante à la fibre

Les fibres libériennes, telles que celles du chanvre et du lin, sont extraites d'une partie spécifique de la tige appelée faisceau, située dans la paroi secondaire de la plante. La structure des végétaux est principalement composée de quatre polymères : la cellulose, l'hémicellulose, les pectines et la lignine. Une fois que la plante a atteint sa maturité, elle est récoltée, et la tige est séparée des feuilles et des graines.

Les tiges de chanvre sont ensuite déposées dans les champs pour subir un processus appelé rouissage, qui permet de décomposer les tissus de la plante. Il existe différents types de rouissage, tels que le rouissage à terre, à l'eau, chimique ou enzymatique [MEI11]. Une fois que le taux d'humidité des tiges est réduit à environ 11%, elles passent par différentes opérations d'extraction, telles que la décortication, la séparation et l'affinage.

Ces opérations permettent d'obtenir différents produits : des amas de faisceaux, des faisceaux de fibres, des granulats appelés chènevottes, qui correspondent aux fractions centrales de la tige, communément appelées bois, ainsi que des poudres (voir Figure I.6).

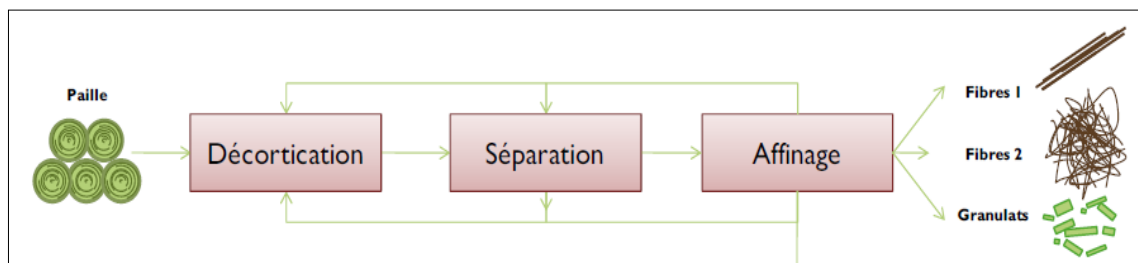


Figure I-6: Processus d'extraction des fibres végétales [51]



Figure I-7: Schéma à différentes échelles de la plante et de la fibre de chanvre [51]

Après diverses opérations d'extraction (voir Figure I.7), la fibre unitaire est obtenue à partir de la tige de la plante. L'opération de teillage permet de regrouper les fibres en un faisceau. Ensuite, grâce à l'opération de peignage, on obtient ce qu'on appelle une fibre technique, dont le diamètre se situe entre 50 et 100 μm . À partir de cette fibre technique, les fibres unitaires sont extraites, avec un diamètre compris entre 20 et 50 μm [5].

I.2.3 Le bois

I.2.3.1 Généralités sur le matériau bois

Le bois est un matériau composite d'une grande complexité, caractérisé par une hétérogénéité à différentes échelles physiques, ce qui lui confère un comportement fortement anisotrope. Il est constamment en interaction avec l'air qui l'entoure, cherchant à atteindre un équilibre hygrothermique. Cet équilibre se traduit par une teneur en humidité spécifique et des propriétés définies du bois. En raison de son anisotropie, le bois présente des caractéristiques physiques et mécaniques différentes dans différentes directions. On peut identifier trois directions principales : la direction longitudinale, la direction tangentielle et la direction radiale.

I.2.3.2 Composition chimique du bois

Le bois est composé de trois polymères principaux : la cellulose, la lignine et les hémicelluloses. Ces composants sont étroitement entrelacés dans les parois cellulaires. La cellulose est concentrée à l'intérieur des fibres, tandis que la lignine et les hémicelluloses constituent les parois externes. La lignine joue un rôle essentiel dans la

liaison entre les fibres. En plus de ces trois constituants principaux, le bois contient également des substances de faible poids moléculaire, appelées extractibles, ainsi que des cendres. Ces substances supplémentaires sont généralement spécifiques à certaines espèces de bois.

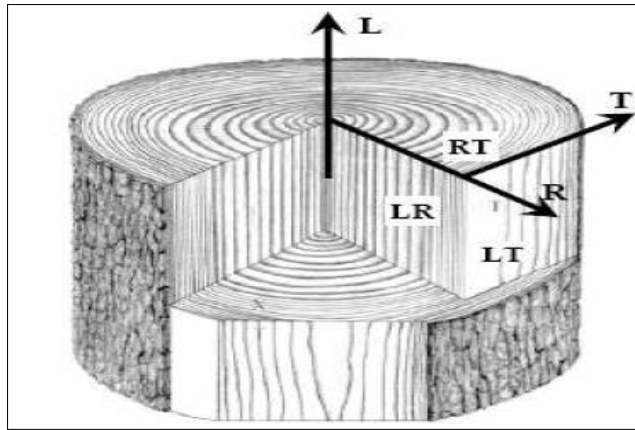


Figure I-8: Directions principales dans une pièce de bois [52].

I.2.3.3 Propriétés physiques et mécaniques

Voici des détails supplémentaires sur certaines propriétés du bois :

- Humidité : L'humidité du bois est la quantité d'eau présente dans le matériau exprimé en pourcentage de sa masse anhydre. Elle est déterminante car la plupart des autres propriétés du bois en dépendent. La mesure de l'humidité est réalisée après un séchage à température élevée pour obtenir une masse constante.
- Conductivité thermique : Le bois, en tant que matériau cellulosique, est un faible conducteur thermique en raison de son faible nombre d'éléments libres et de sa porosité élevée. Il est donc souvent utilisé comme matériau isolant ou coupe-feu, ainsi que dans la fabrication de produits dérivés du bois. Cependant, la conductivité thermique du bois est plus élevée dans la direction longitudinale en raison de la continuité de la matière, tandis qu'elle est plus faible dans les directions transversales. Elle est également proportionnelle à la densité du bois et à son taux d'humidité.
- Retrait : Les dimensions du bois varient en fonction de son humidité. Lorsque l'eau contenue dans les parois cellulaires s'évapore, le bois subit un retrait proportionnel à la perte d'humidité. L'anisotropie du bois se manifeste particulièrement dans ce phénomène de retrait, où le retrait tangentiel est souvent deux à trois fois plus important que le retrait radial.
- Gonflement : Le gonflement est le phénomène inverse du retrait. Lorsque le bois absorbe de l'eau, sa teneur en humidité augmente et il a tendance à augmenter de

volume. Tout comme le retrait, le gonflement est proportionnel au gain d'humidité jusqu'à atteindre le point de saturation des fibres.

- **Caractéristiques mécaniques :** Les caractéristiques mécaniques du bois sont difficiles à déterminer en raison de la grande dispersion des résultats, qui est due aux variations de qualité même au sein de la même essence d'arbre ou de la même pièce de bois. Cela s'explique par différents facteurs tels que les conditions de croissance, l'âge de l'arbre, la densité du bois, etc.

I.2.3.4 Les sciures de bois

Les copeaux et les particules de bois sont des matériaux obtenus à partir des scieries et des menuiseries, et ils présentent une grande variété de formes et de facteurs de formes. Ils sont composés de fragments de fibres et de fibres de bois liés ensemble par la lignine. En raison de cette composition, ils constituent un matériau très hétérogène mélangé à de la poussière. Afin de préparer ce matériau pour une utilisation appropriée, il est nécessaire de le soumettre à des broyages successifs à sec et à un tamisage. Cette préparation, réalisée à l'aide d'un raffineur, est une étape essentielle pour obtenir un matériau homogène et exploitable.



Figure I-9: Sciures et copeaux de bois Issus des scieries [53]

I.2.4 Le jute

Le jute est obtenu à partir de l'écorce de la plante de jute blanc, et dans une moindre mesure, de la corète potagère. Cette fibre naturelle présente un aspect soyeux et est souvent surnommée "fibre d'or" en raison de ses reflets caractéristiques. Le jute est l'une des fibres naturelles les plus longues et les plus utilisées, et elle est appréciée pour sa douceur et sa brillance. Sa longueur varie généralement de 1 à 4 mètres, tandis que son diamètre est compris entre 17 et 20 microns. La composition de la fibre de jute est principalement constituée de cellulose végétale et de lignine, qui sont respectivement les principaux composants des fibres végétales et des fibres de bois.

Le processus de séparation de l'écorce filamenteuse de la tige, appelé rouissage, peut être réalisé de manière biologique ou chimique, bien que les méthodes biologiques soient plus courantes en raison du coût des produits chimiques. Le jute est entièrement biodégradable et recyclable, ce qui en fait une fibre respectueuse de l'environnement. En plus de cela, le jute présente d'autres avantages. Il est un bon isolant, possède des

propriétés antistatiques intéressantes et présente une faible conductivité thermique. Sa capacité à retenir l'humidité est moyenne [6].

I.2.5 Le lin

Le lin cultivé (*Linum usitatissimum*) est une plante annuelle appartenant à la famille des Linaceae. Il est principalement cultivé pour ses fibres, mais aussi pour ses graines riches en huile. Le lin est considéré comme l'une des fibres naturelles les plus précieuses, mais sa production demande beaucoup de main-d'œuvre, ce qui en limite la quantité produite. Néanmoins, le tissu de lin est très apprécié pour sa fraîcheur exceptionnelle par temps chaud.

La composition du lin est principalement constituée de 70% de cellulose, tandis que les 30% restants comprennent de la pectine, des cendres, des tissus ligneux et de l'humidité. Le lin a été largement utilisé dans la fabrication du linge de maison, de toiles, et d'autres produits. Cependant, il connaît également un nouvel essor avec l'utilisation de non-tissés et de matériaux composites dans l'industrie et la construction.

Les fibres de lin sont végétales et solides, mais elles sont peu élastiques et se froissent facilement. Elles présentent une surface relativement lisse et une excellente capacité d'absorption. Le lin est un bon conducteur de chaleur et résiste aux mites et aux insectes des tapis. Cependant, il est sensible à la moisissure, à la transpiration et aux agents de blanchiment [7].



Figure I-10: a) plante et fibre de jute ; b) plante et fibre de lin [54]

I.2.6 Les mousses

Les mousses sont des matériaux cellulaires rigides utilisés dans de nombreux domaines de l'industrie. Elles peuvent être de nature organique, métallique ou céramique. Elles présentent plusieurs propriétés intéressantes, notamment :

- Allégement : Les mousses organiques ont des densités très faibles, ce qui permet de réduire le poids d'une structure tout en conservant ses propriétés mécaniques.
- Isolation thermique : Les mousses possèdent des pores, idéalement fermés, nombreux et de petite taille, ce qui améliore l'isolation thermique. Ces pores

créent une discontinuité au sein de la structure, ce qui entraîne une diminution significative de la conductivité thermique.

- Isolation phonique : Les pores, de préférence ouverts, présents dans les mousses introduisent des tortuosités et des chemins qui améliorent l'isolation phonique.

Pratiquement tous les matériaux peuvent être transformés en mousse. Les polymères sont les exemples les plus courants. La méthode générale pour produire une mousse à partir d'un matériau solide consiste à provoquer la croissance de pores internes en utilisant des surpressions localisées dans un matériau, généralement à l'état pâteux.

I.3 Matériaux de semelles (peaux)

L'organigramme de la figure II.11 résume les principaux matériaux utilisés pour les peaux des structures multicouches.

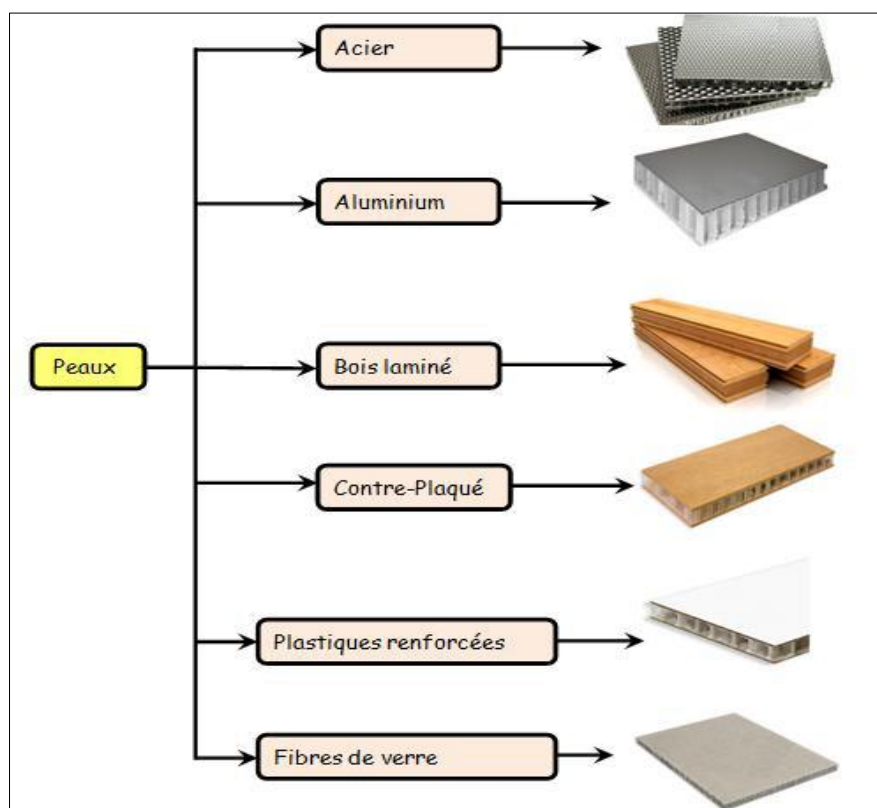


Figure I-11: Matériaux utilisés dans la fabrication des peaux des structures multicouches.

I.3.1 Les tissus composites

I.3.1.1 Catégories de tissu et paramètres de définition importants

Les tissus sont caractérisés par la composition d'un réseau de torons de chaîne et d'un réseau de torons de trame, dans le cas des tissus 2D, qui s'entrelacent de manière périodique avec un angle de 90° entre eux. Dans le cas des tissus 3D, un troisième réseau de torons de renfort est ajouté pour renforcer la préforme sèche dans la direction de l'épaisseur. Différents paramètres sont utilisés pour définir la structure du tissu, et leur nombre dépend de sa complexité. Cependant, certains paramètres sont incontournables pour tous les tissus :

- **Plan de tissage** : Il définit l'armure du tissu (taffetas, sergé, interlock, etc.) en déterminant le parcours des torons les uns par rapport aux autres. Le chemin moyen d'un toron est défini par la ligne centrale du toron, également appelée "ligne moyenne".
- **Distances entre torons** : Les distances entre les torons déterminent la densité des torons dans le plan du tissu. Dans le cas des tissus 2D, la distance entre les trames et la distance entre les chaînes permettent de rendre compte de l'équilibre du tissu. Si leur rapport est différent de 1, le tissu est considéré comme "non équilibré".
- **Nombre de fibres dans les torons** : Associé aux propriétés de la fibre (diamètre et masse volumique), il détermine le volume de fibres présent dans le tissu, ce qui est essentiel pour calculer le taux de fibres dans le composite.

En manipulant ces paramètres, il est possible de créer un nombre illimité de configurations de tissus. Cependant, différentes catégories de tissus se dégagent. Pour les renforts tissés bidimensionnels, on trouve des préformes telles que le taffetas, le sergé et le satin. Pour les tissus tridimensionnels, les différentes catégories de préformes sont regroupées sous le terme générique de "tissus multicouches", comprenant des types tels que le "Layer to Layer Angle Interlock", le "Through the thickness Angle Interlock" et l'"Orthogonal". Chacune de ces catégories est caractérisée par les chemins empruntés par les torons de chaîne et de renfort à travers l'épaisseur du tissu.

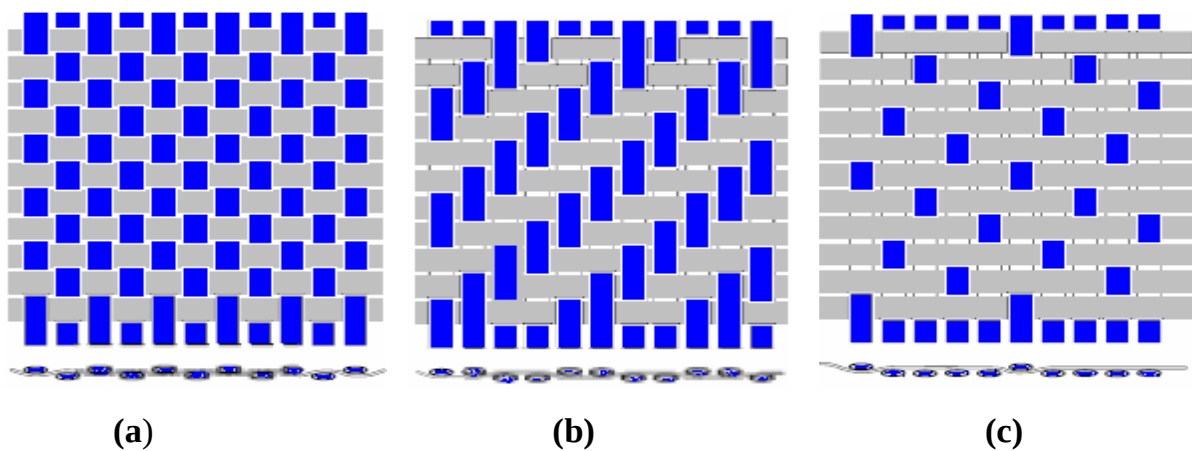


Figure I-12:tissus 2D (a) taffetas, (b) sergé de 2, (c) satin de 5 à décochement de 2[55].

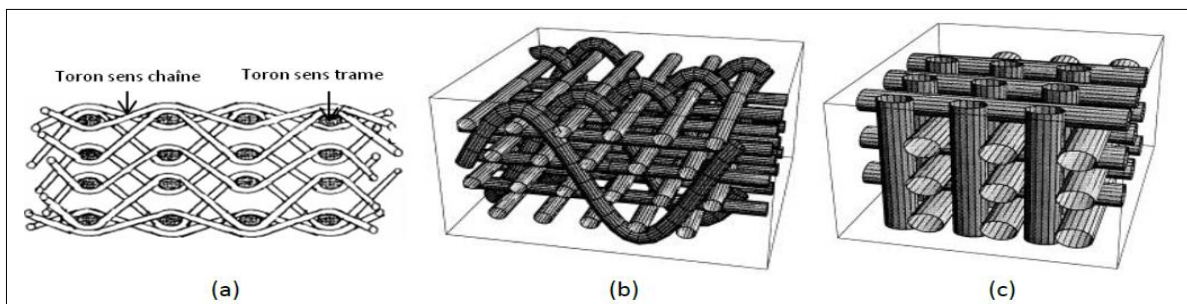


Figure I-13: Tissus 3D : (a) « Layer to Layer Angle Interlock », (b) « Through the thickness Angle Interlock », (c) orthogonal. [54]

I.3.1.1.1 Fibres de verre

Les fibres de verre sont largement utilisées comme renforts dans la construction de structures composites en raison de leur excellent rapport performance-prix. Elles se distinguent par un module de traction relativement faible, mais une résistance en traction intéressante. Les fibres de verre sont composées de silicate avec un diamètre d'environ 10 μm et sont considérées comme des matériaux isotropes.

I.3.1.1.2 Fibre de Carbone

Les fibres de carbone présentent une structure similaire à celle du graphite. Elles sont dérivées de fibres acryliques et de brai. Actuellement, il existe deux procédés de préparation des fibres de carbone : l'un permet d'obtenir des fibres de type HM (Haut Module) et THM (Très Haut Module), tandis que l'autre produit des fibres HR (Haute Résistance) et HT (Haute Ténacité). Une étape de graphitisation, réalisée après les étapes d'oxydation et de carbonisation, différencie les deux procédés de préparation des fibres HM et THM.

Les fibres de carbone se caractérisent par leur faible densité, leur résistance élevée à la traction et à la compression, leur flexibilité, leur bonne conductivité électrique et thermique, leur résistance à des températures élevées, ainsi que leur inertie chimique.

I.3.1.1.3 Fibre d'aramide (kevlar)

Les fibres aramides, dont les plus connues sont le Kevlar, existent également sous d'autres noms commerciaux tels que Technora et Twaron. Ces fibres présentent un comportement similaire à celui des métaux, étant élastiques sous faible charge et devenant plastiques lorsqu'elles sont soumises à de fortes contraintes. Elles offrent un bon compromis entre les fibres de carbone et les fibres de verre. Les fibres aramides ont une bonne résistance au feu. Cependant, lorsqu'elles sont utilisées dans des composites, on observe une faible résistance à la compression et à la flexion, probablement en raison d'une mauvaise adhérence avec les résines. C'est pourquoi de nouvelles fibres hybrides, telles que les fibres verre-Kevlar et carbone-Kevlar, sont développées pour améliorer leur adhérence. Les fibres aramides sont largement utilisées dans l'industrie en raison de leur résistance aux chocs et de leur légèreté.

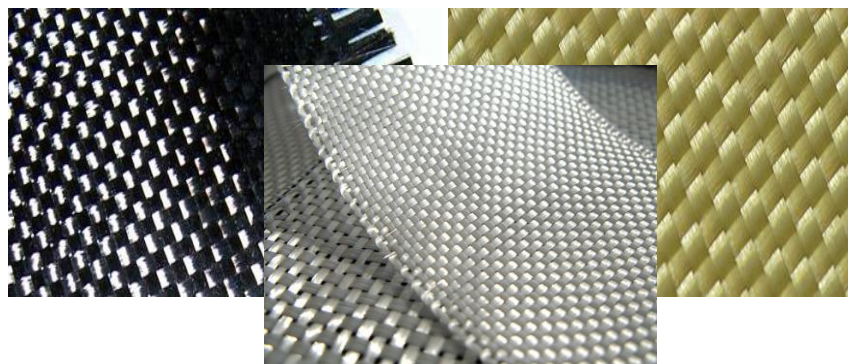


Figure I-14: Les différents tissus : a) fibre de verre ; b) fibre de carbone c) ; fibre de kevlar

I.3.1.2 Avantages et inconvénients des tissus

a) Avantages

- Meilleure résistance au délaminage : Le tissage des fibres dans le matériau composite permet de renforcer la résistance au délaminage, c'est-à-dire la séparation des couches du matériau.
- Tolérance à l'endommagement grâce au tissage des fibres : Le tissage des fibres offre une meilleure résistance aux dommages, car les fibres sont entrelacées, ce qui permet de disperser les contraintes et d'éviter les propagations de fissures.
- Épaisseur régulière grâce au maintien latéral des fibres : Le tissage des fibres permet de maintenir une épaisseur régulière dans le matériau, ce qui contribue à une meilleure qualité et stabilité du produit final.
- Propriétés mécaniques dans le sens transverse : Le tissage des fibres confère au matériau des propriétés mécaniques améliorées dans le sens transverse, ce qui renforce sa résistance dans différentes directions.
- Durabilité : Les tissus tissés offrent une meilleure durabilité, ce qui signifie qu'ils peuvent être plus facilement façonnés et adaptés à des formes complexes.

b) Inconvénients

- Rigidité et résistance mécanique diminuées dans le plan du tissu : En raison de la structure tissée, la rigidité et la résistance mécanique peuvent être réduites dans le plan du tissu par rapport aux fibres unidirectionnelles.
- Fraction volumique de fibres réduite dans le composite : En raison de la structure du tissu, la fraction volumique de fibres dans le matériau composite peut être réduite, ce qui peut affecter certaines propriétés mécaniques.
- Gauchissement des structures minces dans certains cas : Les tissus tissés peuvent être sensibles au gauchissement, en particulier dans les structures minces, ce qui peut nécessiter des précautions supplémentaires lors de leur utilisation.
- Coût plus élevé (opération de tissage) : Le processus de tissage peut entraîner des coûts supplémentaires par rapport à d'autres méthodes de renforcement, ce qui peut rendre le matériau plus cher à produire.

I.3.2 Polymères

Les polymères, également connus sous le nom de matières plastiques, font référence à une large gamme de matériaux qui sont synthétiquement extraits de substances organiques et qui ont la capacité d'être façonnés par chauffage. Les matières plastiques partagent certaines caractéristiques communes. Leurs propriétés dépendent du choix

parmi les nombreuses architectures moléculaires possibles, ainsi que des procédés de synthèse utilisés pour les produire.

I.3.2.1 Le Polypropylène (PP)

Le polypropylène est un polymère extrêmement polyvalent, qui trouve des applications à la fois en tant que thermoplastique et en tant que fibre. En tant que thermoplastique, il est couramment utilisé pour fabriquer des boîtes alimentaires résistantes au lave-vaisselle. Sa température de fusion élevée (160°C) lui confère une excellente résistance à la chaleur. En tant que fibre, le polypropylène est largement utilisé dans la fabrication de revêtements de sol intérieurs et extérieurs, notamment dans les espaces entourant les piscines et les terrains de golf miniature. Sa facilité de coloration et sa résistance à l'absorption d'eau en font un choix idéal pour les revêtements extérieurs. Le polypropylène offre ainsi une combinaison unique de propriétés qui le rendent extrêmement prisé dans de nombreux domaines.

I.3.2.2 Les PVC renforcés

Le polychlorure de vinyle (PVC) est un matériau largement utilisé en raison de ses avantages économiques, de sa facilité d'installation et d'entretien. Il est devenu l'un des matériaux les plus couramment utilisés dans de nombreux domaines. Le PVC est une matière thermoplastique de synthèse composée de carbone, d'hydrogène et de chlore. Son développement industriel a commencé au début des années 1930.

Le PVC présente une combinaison unique de propriétés mécaniques et physiques, ce qui le rend adapté à de multiples applications. Il est résistant à la corrosion, à la plupart des produits chimiques et à l'humidité, ce qui en fait un matériau durable et polyvalent. De plus, le PVC est facilement modifiable selon les besoins, offrant ainsi une grande flexibilité dans sa conception et son utilisation.

Le PVC est couramment utilisé dans la construction pour la fabrication de revêtements de sol, de fenêtres, de portes, de tuyaux et de raccords. Il est également utilisé dans l'industrie automobile pour les garnitures intérieures, les câbles et les pièces d'isolation. Dans le domaine médical, le PVC est utilisé pour les tubes, les sacs de perfusion et les équipements médicaux. Il est également présent dans les produits de consommation tels que les emballages, les jouets et les revêtements de mobilier.

La popularité du PVC réside également dans sa rentabilité. Il est généralement moins coûteux que d'autres matériaux, ce qui le rend attrayant pour de nombreuses applications. De plus, sa facilité d'installation et d'entretien en fait un choix pratique pour de nombreux utilisateurs.

Cependant, il est important de noter que la production et l'élimination du PVC peuvent avoir un impact sur l'environnement en raison de la présence de chlore et d'autres additifs chimiques. Des efforts sont faits pour améliorer la durabilité du PVC en promouvant des pratiques de production plus respectueuses de l'environnement et en encourageant le recyclage des produits en fin de vie.

I.4 Les adhésifs

I.4.1 Les résines

Le rôle principal de la résine dans les matériaux composites est d'assurer l'adhérence et l'union entre les fibres. Elle joue également un rôle crucial dans le transfert des charges mécaniques à travers la structure composite et dans la protection des fibres contre les agressions extérieures telles que la corrosion.

Les résines utilisées dans les composites doivent présenter des caractéristiques spécifiques pour assurer leur bon fonctionnement. Elles doivent être suffisamment déformables pour permettre la répartition des contraintes entre les fibres et résister aux sollicitations mécaniques. De plus, elles doivent être compatibles avec les fibres pour assurer une bonne adhérence et une bonne transmission des charges.

Un autre aspect important est la masse volumique de la résine. Pour conserver les propriétés mécaniques spécifiques élevées des composites, il est souhaitable que la résine ait une masse volumique faible, ce qui contribue à réduire le poids global du matériau.

I.4.1.1 Les thermoplastiques

Les résines thermoplastiques sont des polymères constitués de chaînes moléculaires reliées entre elles par des liaisons faibles. Elles se distinguent par leur recyclabilité et leur capacité à être ramollies et reformées plusieurs fois à des températures élevées. Les thermoplastiques représentent la plus grande part de la production de polymères en raison de leur facilité de mise en œuvre et de leurs coûts relativement bas. Parmi les thermoplastiques les plus couramment utilisés, on trouve le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène (PE), le polypropylène (PP), le polyamide (PA), les polycarbonates (PC), et bien d'autres. Leur recyclabilité et leur capacité à être réversibles sur le plan thermique sont des avantages majeurs.

Il existe également des thermoplastiques spécifiques conçus pour résister à des températures élevées, pouvant atteindre 200°C ou plus[9]. Ces matériaux sont utilisés dans des applications où une résistance thermique élevée est requise.

Les matériaux thermoplastiques les plus performants présentent des caractéristiques mécaniques exceptionnelles, telles qu'une résistance élevée et une faible masse volumique. Ces propriétés permettent d'obtenir des matériaux à la fois légers et solides, adaptés à de nombreuses applications industrielles. Les caractéristiques mécaniques et la masse volumique de certains thermoplastiques sont récapitulées dans le tableau II.2.

En résumé, les résines thermoplastiques offrent des avantages significatifs tels que la recyclabilité, la thermo-réversibilité et des coûts relativement bas. Elles sont utilisées dans une large gamme d'applications, des plastiques traditionnels aux matériaux haute performance résistants à des températures élevées.

Tableau I-2: caractéristiques des résines thermodurcissables [10]

Résine	T°(C)	ρ (Kg/m ³)	σ_f^R (MPa)	E(GPa)
Polyamide	65 à 100	1140	60 à 85	1,2 à 2,5
Polypropylène	900	1200	20 à 25	1,1 à 1,4

I.4.1.2 Les résines thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des polymères qui subissent une réaction chimique irréversible lorsqu'ils sont chauffés, ce qui les rend impossibles à remodeler une fois durcis. Cependant, ils présentent des propriétés mécaniques et thermomécaniques supérieures à celles des thermoplastiques. Cette famille de polymères comprend des matériaux tels que les polyesters insaturés (vinyles, dérivés allyliques, polyesters condensés, etc.), les résines époxy, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques, etc.).

Tout comme les résines thermoplastiques, les matériaux thermodurcissables les plus performants se caractérisent par des propriétés mécaniques élevées et une faible masse volumique. Ces caractéristiques sont récapitulées dans le tableau 1.3.

En résumé, les résines thermodurcissables sont des polymères qui durcissent de manière irréversible lorsqu'ils sont chauffés. Ils offrent des propriétés mécaniques et thermomécaniques supérieures aux thermoplastiques. On retrouve différents types de résines thermodurcissables dans cette catégorie, chacun ayant ses propres applications spécifiques. Les matériaux thermodurcissables les plus performants présentent des caractéristiques mécaniques élevées et une faible masse volumique, ce qui les rend adaptés à une variété d'applications industrielles.

Tableau I-3: caractéristiques des résines thermodurcissables [10]

Résines	T°(C)	ρ (Kg/m ³)	ε_f^R (%)	σ_f^R (MPa)	E(GPa)
Polyesters	60 à 100	1120	2 à 5	50 à 85	2,8 à 3,6
Phénoliques	120	1140	2,5	40	3 à 5
Epoxydes	290	1 100 à 1 500	2 à 5	60 à 80	3 à 5

I.4.1.3 Propriétés des résines

La viscosité et la cinétique de polymérisation sont deux propriétés clés d'une résine. La viscosité mesure la capacité d'une résine à transférer la quantité de mouvement. Une résine à viscosité élevée présente un frottement interne important entre les particules, ce qui rend son déplacement plus difficile. La viscosité a une influence significative sur

l'écoulement de la résine et les temps de remplissage dans le procédé RTM (Resin Transfer Molding).

La viscosité d'une résine est généralement représentée par sa viscosité dynamique, mesurée en Pascal-seconde (Pa.s) ou en Poiseuille (Pois). Dans le cas du procédé RTM, la résine est considérée comme un fluide newtonien, ce qui signifie que sa viscosité ne dépend pas du taux de cisaillement. La viscosité d'une résine thermodurcissable varie principalement avec la température et le degré de polymérisation. Le degré d'avancement de la polymérisation est compris entre 0 et 1, où 1 représente une résine entièrement polymérisée et 0 correspond au début de la réaction chimique de polymérisation. L'avancement de la réaction dépend de la température et du degré de polymérisation. Une température plus élevée accélère la réaction et produit de la chaleur (réaction exothermique) [11].

Les modèles de polymérisation peuvent être de deux types : mécanistiques, basés sur les réactions chimiques elles-mêmes, ou phénoménologiques, déterminés à partir de données expérimentales recueillies. Ces modèles permettent de prédire et de comprendre les propriétés de polymérisation des résines.

En résumé, la viscosité et la cinétique de polymérisation sont des propriétés importantes des résines. La viscosité influence l'écoulement de la résine et les temps de remplissage dans le procédé RTM, tandis que la cinétique de polymérisation décrit l'avancement de la réaction chimique et dépend de la température et du degré de polymérisation. Différents modèles peuvent être utilisés pour étudier et prédire ces propriétés, qu'ils soient basés sur les réactions chimiques elles-mêmes ou sur des données expérimentales.

I.4.2 Les colles

Une colle, également appelée glu, est un produit liquide, gélatineux ou pâteux utilisé pour relier des pièces entre elles par contact. Ces pièces peuvent être de même nature ou de natures différentes. Les colles synthétiques sont principalement fabriquées à partir d'hydrocarbures. La composition des colles, qui comprend principalement un liant et une phase de dissolution, détermine si une colle est considérée comme « écologique » ou « naturelle ».

Il existe deux catégories principales de colles :

- Les colles en phase solvant, également appelées « colles en solution », contiennent des solvants organiques qui représentent plus de la moitié du produit et s'évaporent complètement lors du séchage. Ces solvants organiques sont des composés volatils nocifs pour l'organisme. Certains éthers de glycol sont également utilisés dans leur composition, parfois en proportions plus élevées que les produits à base d'eau.
- Les colles en phase aqueuse, également appelées « colles en dispersion aqueuse » ou « colles en émulsion », utilisent principalement l'eau comme solvant, mais contiennent néanmoins des solvants organiques en quantités inférieures à 5%, ce qui peut être nocif pour la santé. L'eau permet la

dispersion des petites particules de résine, tandis que le solvant organique favorise la formation du film adhésif lors du séchage. Ces colles sont aussi efficaces que les colles contenant des solvants organiques, mais leur utilisation est généralement limitée aux applications sur papier, carton, verre, PVC et bois.

En résumé, les colles sont des produits utilisés pour lier des pièces entre elles, et leur composition détermine si elles sont considérées comme écologiques ou naturelles. Les colles en phase solvant contiennent des solvants organiques volatils, tandis que les colles en phase aqueuse utilisent principalement de l'eau comme solvant, avec une petite quantité de solvants organiques.

I.5 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons examiné les différents composants utilisés dans la fabrication des structures multicouches. Il est remarquable de constater l'essor de l'utilisation de ces nouveaux matériaux. Cette évolution n'est pas le fruit du hasard, mais résulte d'un développement étudié et judicieux, en raison des besoins qu'ils ont satisfaits dans divers domaines techniques, économiques et chimiques, par rapport aux matériaux traditionnels. Cette recherche bibliographique nous a conduit à orienter notre travail de recherche vers une proposition de nouvelle structure composite multicouche. Cette structure est composée d'une âme à base de mousse et de liège. Les semelles inférieure et supérieure sont respectivement constituées de PVC. Cette conception présente à la fois un poids propre réduit et une résistance suffisante, ce qui la rend adaptée à des applications d'isolation entre les parois. Ainsi, elle permet d'améliorer les propriétés thermiques et acoustiques de la structure.

Chapitre II

Comportement des
sandwichs stratifiés

II.1 Introduction

Les structures sandwichs sont largement utilisées dans la construction de pièces composites. Contrairement aux composites traditionnels monolithiques, leur principal avantage réside dans leur rigidité spécifique très élevée. En modifiant la nature et l'épaisseur de la peau et/ou de l'âme, on peut adapter le matériau de la structure de manière optimale. Ainsi, l'amélioration de la rigidité, qui reflète le comportement en flexion du matériau, peut être obtenue en augmentant l'épaisseur de l'âme pour augmenter son moment d'inertie, ou en augmentant le module d'élasticité des peaux. Étant donné que l'âme du sandwich a une faible densité, la masse du composite n'augmente pas de manière significative [12]. Afin d'optimiser les caractéristiques des matériaux de l'âme et de la peau pour une application spécifique, il est donc important de connaître leur comportement vis-à-vis de ce type de sollicitation.

L'objectif de cette section est de mettre en évidence le comportement des structures sandwichs vis-à-vis de différentes sollicitations mécaniques et thermiques. À cette fin, ce chapitre commence par une description réglementaire de la conception des structures, suivie d'une présentation de leur comportement sous diverses sollicitations. Après avoir énuméré les différents mécanismes de défaillance, une revue de la littérature sur les travaux antérieurs concernant le comportement des structures sandwichs est présentée.

II.2 Sandwichs sous chargement mécanique

L'analyse du comportement mécanique élastique d'une structure constituée de matériaux sandwichs est généralement réalisée en utilisant la théorie des plaques sandwichs [13][14]. Cette approche repose sur la théorie des stratifiés, qui prend en compte le cisaillement en considérant qu'une normale au plan moyen d'un stratifié reste une ligne droite lors de la déformation, mais n'est cependant pas perpendiculaire au plan moyen. La théorie des plaques sandwichs se concentre principalement sur la déformation par cisaillement de l'âme du matériau sandwich, en négligeant les déformations de flexion des peaux externes [14, 15].

II.2.1 Normes de confection et d'essai

Pour évaluer les performances structurelles des panneaux sandwichs, il est nécessaire de réaliser différents tests mécaniques afin de vérifier leur conformité aux spécifications requises. La recherche de normes permet de recenser les méthodes d'essai existantes pour les panneaux sandwichs, de définir les procédures à suivre, les dimensions des échantillons et l'interprétation des résultats [16]. Ces tests permettent de caractériser les propriétés mécaniques des panneaux sandwichs, tels que leur résistance à la flexion, leur résistance à la compression, leur rigidité ou leur résistance aux chocs. Ils contribuent à évaluer la capacité des panneaux sandwichs à supporter les charges auxquelles ils seront soumis dans leur utilisation réelle, ainsi qu'à garantir leur sécurité et leur durabilité.

Il existe plusieurs normes utilisées dans l'évaluation des panneaux sandwichs, telles que les normes CEN, les normes AFNOR, les normes ASTM [18][18][12], les normes

militaires MIL-STD-401, DIN53291, etc. [19]. Différentes méthodes d'essai couramment utilisées pour les composites sandwichs à nid d'abeilles, en mousse et les constructions en composites stratifiés sont spécifiées dans les normes ASTM, ainsi que dans certaines normes AFNOR. Les figures II.1 et II.2 [17][18] schématisent quelques-unes de ces méthodes d'essai. Ces normes définissent les procédures détaillées à suivre, les équipements requis, les échantillons à préparer, les conditions d'essai et l'interprétation des résultats. Elles permettent d'assurer une approche normalisée et reproductible dans l'évaluation des performances des panneaux sandwichs, facilitant ainsi la comparaison des résultats entre différentes études et garantissant la fiabilité des tests.

Normes AFNOR :

- Test de compression perpendiculaire NF T54-602 (1983) [20] [21]: Figure II.2.1.
- Test de traction perpendiculaire NF T 54-603 (1983) [22] [21]: Figure II.2.2.
- Test de compression pure NF T54-604 (1986) [23] [21]: Figure II.2.3.
- Test de compression avec flambage NF T54-604 (1986) [24] [21]: Figure II.2.4.
- Test de cisaillement NF T 54-605 (1983) [24] [19] : Figure II.2.5.
- Test de flexion 3 points, NF T 54-606 (1987) [25] [21] : Figure II.2.6.
- Test de flexion 4 points NF T 54-606 (1987) [25] [21] : Figure II.2.7.

Normes ASTM :

- Test de flexion 3 et 4 points, ASTM C-393 : Figure II.1.a.
- Test de traction à plat, ASTM C-297 : Figure II.1.b.
- Test de compression à plat, ASTM C-365 : Figure II.1.c.
- Test de compression debout, ASTM C-364 : Figure II.1.d.
- Test de cisaillement, ASTM C-273 : Figure II.1.e.

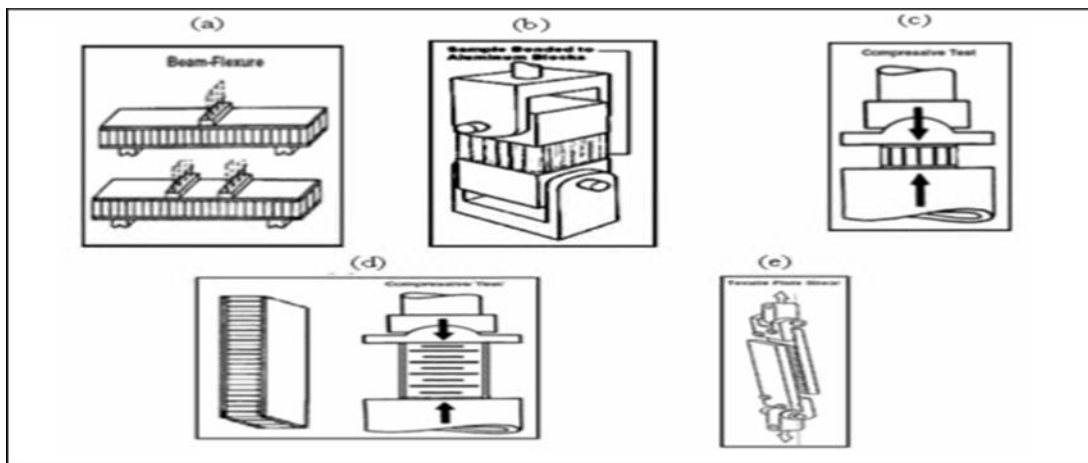


Figure II-1: Différentes méthodes d'essais de Caractérisation des sandwichs [16].

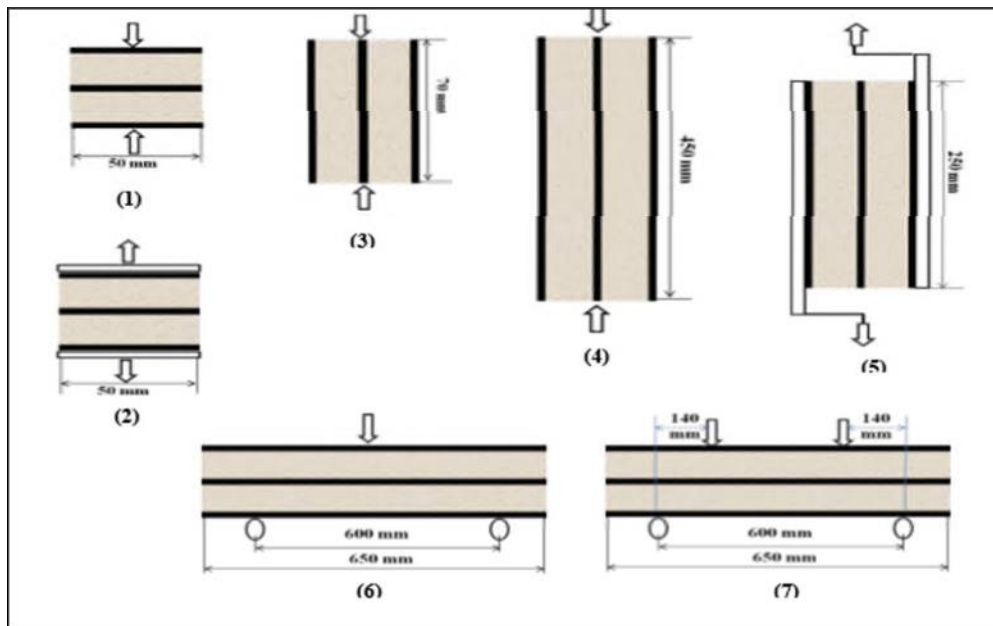
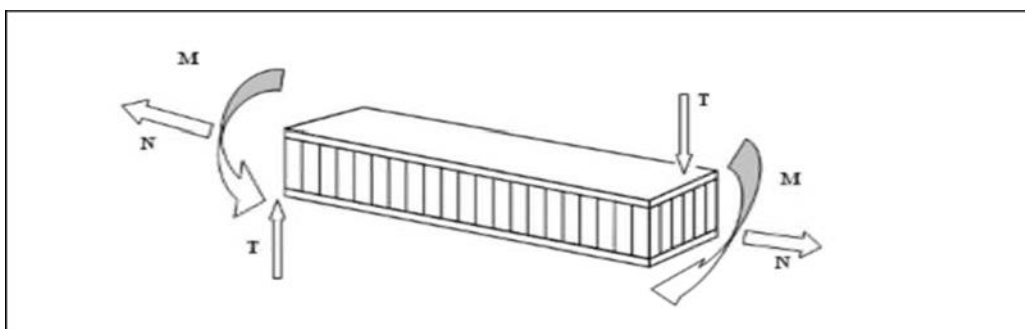


Figure II-2: Dimension des sandwichs selon la norme AFNOR [16].

II.2.2 Sandwiches en flexion

L'objectif de cette section est de mettre en évidence le comportement des matériaux sandwich lorsqu'ils sont soumis à différentes sollicitations mécaniques. Les panneaux sandwichs peuvent être exposés à divers types de sollicitations, telles qu'illustrées dans la Figure II.3 :

Figure II-3: Différentes sollicitations (M , N , T) appliquées sur un sandwich [26]

II.2.2.1 Comportement en flexion

Dans les structures multicouches, les contraintes normales dans les peaux diminuent de manière quadratique par rapport à l'épaisseur de l'âme. Cela conduit à une augmentation significative de la rigidité en flexion de la structure. Les contraintes normales résultant de la flexion sont principalement supportées par les peaux. L'âme joue un rôle crucial dans la cohésion de l'ensemble en évitant notamment le flambement des peaux. Lors de

la flexion, des contraintes de traction se développent dans la peau inférieure tandis que des contraintes de compression se produisent dans la peau supérieure. Ces contraintes ont tendance à se rapprocher de l'axe neutre (compression de l'âme) et à s'éloigner de celui-ci (traction de l'âme). Par conséquent, l'âme d'une structure sandwich joue un rôle essentiel pour résister aux contraintes importantes d'arrachement, de compression et de cisaillement [16].

Les structures sandwichs sont généralement soumises à des charges de flexion ou de flambement. Les essais de flexion à trois ou quatre points sont couramment utilisés pour caractériser leur comportement mécanique et leur résistance aux dommages. Par conséquent, il est important de comprendre le comportement mécanique de l'âme et des peaux de ces structures dans le contexte de telles sollicitations [16].

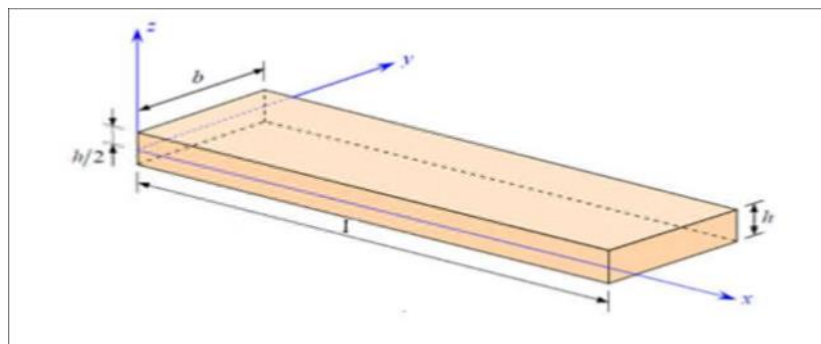


Figure II-4: Plaque sandwich. [12].

➤ Flexion en trois points

L'essai de flexion à trois points est une méthode mécanique utilisée pour évaluer la résistance d'une poutre. Dans cet essai, la poutre est placée sur deux appuis simples, qui sont en contact ponctuel avec la poutre aux extrémités. Une charge concentrée est appliquée au milieu de la poutre. Le contact entre la charge et la poutre est également considéré comme une liaison ponctuelle [28][27]. En augmentant progressivement la charge, sans dépasser la limite de résistance pratique, la poutre se déforme en formant une courbure déterminée en fonction des matériaux constituant la poutre [27].

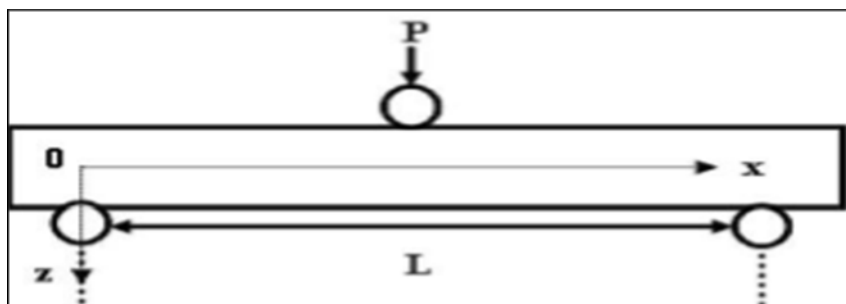


Figure II-5: Flexion trois-points. [29]

➤ Flexion quatre points

Dans le cas de l'essai de flexion à quatre points, on utilise les mêmes appuis simples, mais deux charges sont appliquées au lieu d'une seule charge concentrée. En augmentant

progressivement la charge sans dépasser la limite de résistance pratique, la poutre se déforme en formant une courbure déterminée en fonction des matériaux constituant la poutre. L'essai de flexion à quatre points permet spécifiquement de créer un moment de flexion pure dans la zone centrale de la poutre. Ces essais sont normalisés et largement utilisés en raison de leur simplicité de mise en œuvre. Ils permettent de déterminer certaines caractéristiques telles que :

- Les caractéristiques élastiques des peaux (lors de l'essai de flexion à quatre points) et de l'âme (lors de l'essai de flexion à trois points).
- Les résistances de l'âme ou des peaux en fonction des modes de rupture. Ces modes de rupture dépendent de la longueur de l'éprouvette :
- Pour une éprouvette courte : rupture par cisaillement de l'âme.
- Pour une éprouvette longue : rupture statique des peaux.

Ces essais permettent de caractériser et d'évaluer les performances mécaniques des matériaux constituant la poutre et sont essentiels pour comprendre le comportement de la structure en conditions de flexion. [27]

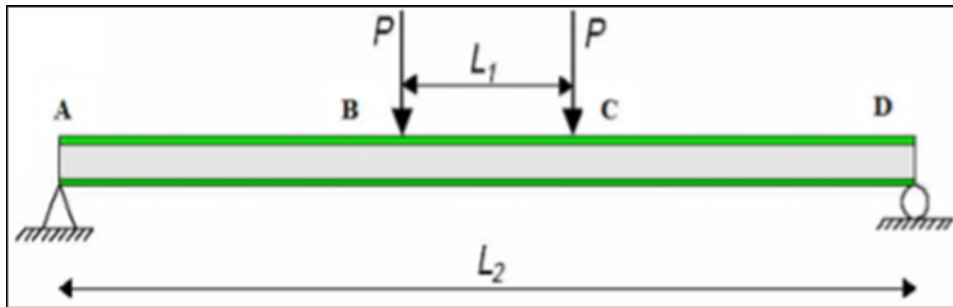


Figure II-6: Flexion 4 points. [29].

II.2.3 Flambement des structures sandwichs

Le flambement est un phénomène d'instabilité qui se produit lorsqu'une structure est soumise à une charge de compression axiale et qu'elle tend à fléchir et se déformer dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression, passant ainsi d'un état de compression à un état de flexion [27][30].

Le flambement est généralement observé dans des éléments minces et élancés tels que les poteaux, les colonnes et les barres comprimées. Il peut se produire le long des deux axes principaux de la section de l'élément. Si les conditions d'appui sont identiques le long de ces deux axes, le flambement se produira selon l'axe qui présente l'inertie la plus faible [29][31].

La Figure II.7 illustre le cas d'une poutre sandwich chargée axialement. Ce type de chargement peut entraîner des instabilités globales, telles que le flambement de la poutre, ou des instabilités locales, telles que le voilement des peaux, si la charge appliquée dépasse certaines limites [29][31].

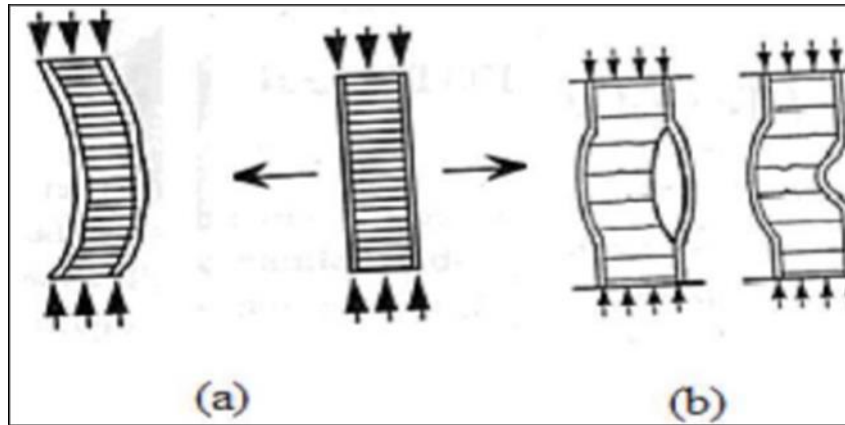


Figure II-7: a) flambement global du sandwich b) flambement local du sandwich [32].

II.2.4 Mécanisme de rupture

Les chercheurs ont étudié les différents modes d'endommagement et de ruine des structures sandwichs dans ce domaine [33][34][35][36][37][38][16]. Il a été démontré que le processus d'endommagement lors du chargement en flexion à trois points dépend de la charge appliquée, du rapport entre la longueur des appuis et l'épaisseur des peaux, ainsi que de la densité de l'âme. Les chercheurs Triantafillou et Gibson [34][17] ont répertorié les différents modes de dégradation d'un sandwich soumis à la flexion, qui incluent :

- Rupture des peaux en traction ou en compression.
- Flambement de la peau en compression ou "Wrinkling".
- Flambement des cellules de l'âme.
- Rupture de l'âme en cisaillement.
- Rupture de l'âme en traction ou en compression.
- Rupture de l'interface entre l'âme et les peaux.

II.2.4.1 Flambement généralisé des peaux

Le flambement généralisé peut se produire lorsque les contraintes dans les peaux et dans l'âme sont inférieures aux résistances à la rupture. Ce type de déformation est généralement causé par une épaisseur insuffisante de la structure ou par une faible rigidité de l'âme [16]. Lorsque la structure sandwich est soumise à des charges de flexion importantes, elle peut fléchir de manière globale et perdre sa stabilité, ce qui peut entraîner des déformations irréversibles et la ruine de la structure. Ce phénomène est particulièrement préoccupant lorsque la structure est sujette à des contraintes de compression, car il peut conduire à une défaillance catastrophique si les contraintes de compression dépassent la résistance à la rupture des matériaux constituant la structure. Il est donc essentiel de concevoir les structures sandwichs avec une épaisseur et une rigidité appropriée pour éviter le flambement généralisé et garantir leur intégrité structurale.

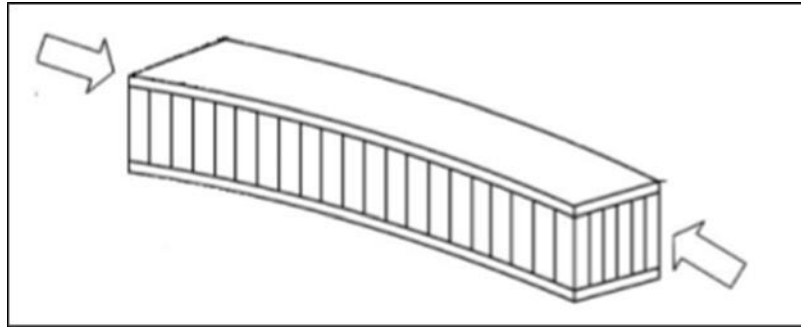


Figure II-8: Mode de ruine par « flambement généralisé » des peaux du sandwich [56].

II.2.4.2 Flambement généralisé de l'âme ou « Crimping »

Ce type de flambement est également connu sous le nom de flambement irrégulier. Il se produit lorsque le module de résistance au cisaillement est insuffisamment élevé (charge critique). Afin d'augmenter cette charge critique, il est nécessaire soit d'augmenter l'épaisseur de l'âme, soit d'utiliser une âme présentant un module de cisaillement plus élevé [29]. En effet, lorsque le module de cisaillement de l'âme est faible, la structure sandwich devient plus sujette au flambement irrégulier, ce qui peut entraîner des déformations et une défaillance de la structure. Ainsi, pour améliorer la résistance au flambement irrégulier, il est important de choisir une âme avec des propriétés de cisaillement adéquates ou d'augmenter l'épaisseur de l'âme afin d'augmenter la résistance globale de la structure.

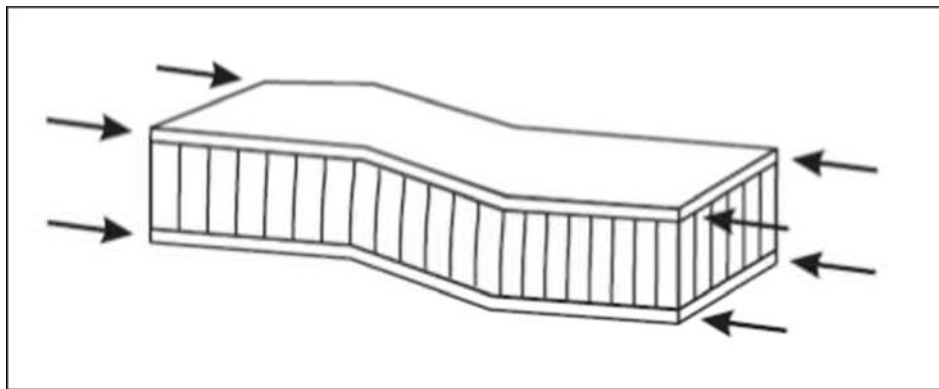


Figure II-9: Flambement généralisé de l'âme du sandwich [57]

II.2.4.3 Flambement local des sandwichs « Wrinkling » et « Dimpling »

Si la contrainte de compression dans les peaux dépasse un certain seuil, il est possible que l'âme ne puisse plus empêcher le flambement. Dans ce cas, le flambement localisé des peaux, également connu sous le nom de "wrinkling" (Figure II.10), se produit. Contrairement au flambement généralisé, le flambement localisé peut prendre différentes configurations qui ne dépendent ni de la géométrie de la structure ni des conditions aux limites.

Cependant, il est influencé par les modules élastiques des peaux, l'élasticité de l'âme et le module de cisaillement de l'âme. Un autre mode de rupture associé au flambement

localisé de la peau est appelé "dimpling" (Figure II.11) [16]. Dans ce cas, les peaux se déforment en formant des creux ou des fossettes. La formation de ces fossettes est influencée par les propriétés élastiques des peaux et de l'âme de la structure.

Il est important de prendre en compte ces différents modes de flambement localisé, tels que le wrinkling et le dimpling, lors de la conception et de l'analyse des structures sandwichs. La résistance au flambement localisé dépendra des propriétés élastiques des matériaux utilisés et de leur configuration, ce qui nécessite une attention particulière pour garantir la stabilité et la durabilité de la structure.

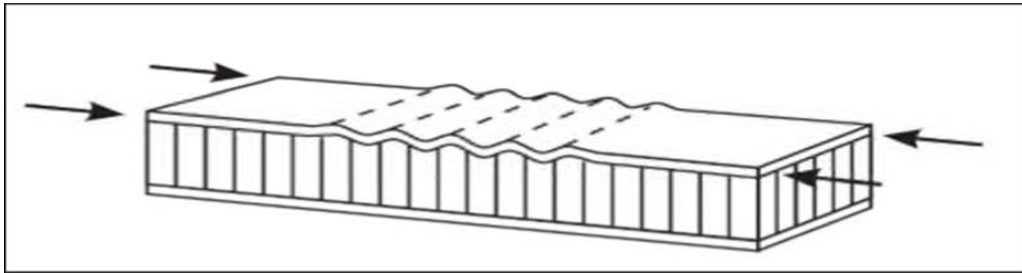


Figure II-10: Flambement localisé « Wrinkling » [57].

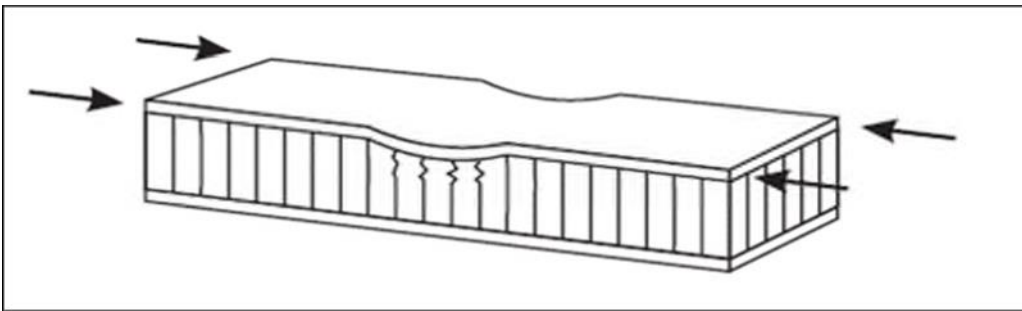


Figure II-11: Flambement localisé « Dimpling » [57].

II.2.4.4 Rupture des peaux en traction ou en compression

Ce cas survient lorsque les contraintes dans les peaux dépassent les limites admissibles pour le matériau constituant les peaux (Figure II.12). Pour éviter ce phénomène, plusieurs solutions sont possibles. On peut utiliser un matériau avec une résistance à la rupture plus élevée, augmenter l'épaisseur des peaux (ce qui réduit les contraintes appliquées) ou augmenter l'épaisseur de l'âme (ce qui réduit également les contraintes dans les peaux). La solution la plus appropriée consiste généralement à augmenter l'épaisseur de l'âme. Il est important de noter que l'utilisation d'une âme plus dense (plus rigide) n'affecte pas directement les contraintes dans les peaux [29]. En optimisant l'épaisseur de l'âme, on peut réduire les contraintes dans les peaux et ainsi éviter les défaillances dues à des contraintes excessives.

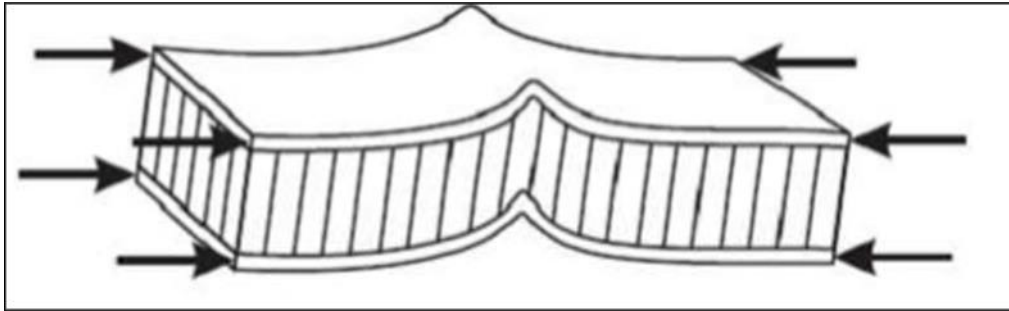


Figure II-12: Rupture des peaux en traction ou en compression [40] [29].

II.2.4.5 Modes locaux de rupture

L'indentation locale est un mode de rupture localisé qui se produit en raison d'une concentration de contraintes résultant soit de l'application d'une charge localisée, soit de la présence d'un appui de type ponctuel ou linéique (Figure II.13). Lorsqu'une charge est appliquée de manière ponctuelle ou lorsque la structure est soutenue par des points d'appui spécifiques, les contraintes se concentrent au niveau de ces zones, ce qui peut entraîner une déformation excessive, des défaillances locales et éventuellement une rupture de la structure. L'indentation locale peut se produire dans les matériaux des peaux ou de l'âme, selon les conditions de chargement et la résistance des matériaux utilisés. Il est donc important de prendre en compte ces phénomènes d'indentation locale lors de la conception et de l'analyse des structures sandwichs afin de garantir leur résistance et leur durabilité.

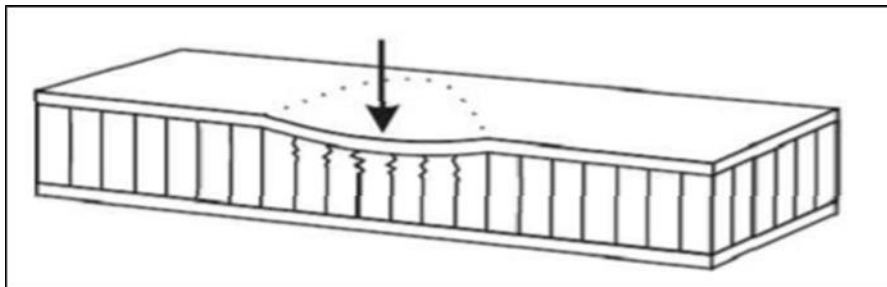


Figure II-13: Modes locaux de rupture par indentation [40] [29]

II.2.4.6 Rupture de l'âme en cisaillement

Si la contrainte de cisaillement, qui prédomine dans l'âme de la structure sandwich, dépasse la résistance au cisaillement du matériau de l'âme, cela entraîne la rupture de l'âme (Figure II.14). Dans cette situation, il est possible de prendre plusieurs mesures pour remédier au problème. On peut choisir un matériau d'âme ayant une résistance au cisaillement plus élevée ou augmenter l'épaisseur de l'âme. Cependant, il est important de noter que l'utilisation d'un matériau différent pour les peaux ou de modifier leur épaisseur n'aura pas d'effet direct sur cette rupture de l'âme [29]. Par conséquent, la résolution la plus appropriée consiste généralement à sélectionner un matériau d'âme avec une résistance au cisaillement adéquate ou à augmenter l'épaisseur de l'âme pour éviter les défaillances liées à la rupture de l'âme.

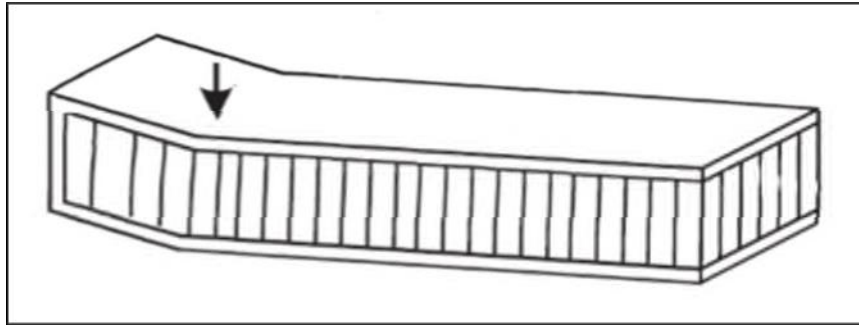


Figure II-14: Rupture de l'âme en cisaillement [40] [29].

II.2.4.7 Dégradation de l'adhésive

La dégradation de l'adhésif entre les peaux et l'âme en nid d'abeille se produit généralement selon trois types :

- Dégradation de l'adhésif entre les peaux et l'âme : Cette dégradation peut se produire en raison de l'exposition à des conditions environnementales sévères, des cycles de température, de l'humidité, etc. Les contraintes et les contraintes thermiques peuvent entraîner une dégradation de l'adhésif, affaiblissant ainsi l'interface entre les peaux et l'âme.
- Dégradation de l'attachement des cellules de l'âme : Les cellules de l'âme en nid d'abeille peuvent également subir une dégradation de leur attachement. Cela peut se produire en raison de forces de cisaillement excessives, de contraintes dynamiques répétées, de cycles thermiques, etc. L'adhésif qui maintient les cellules en place peut perdre de sa résistance et entraîner un décollement ou une détérioration de l'attachement des cellules.
- Dégradation de l'attachement du nœud des cellules de l'âme : Les nœuds des cellules de l'âme peuvent également être soumis à une dégradation. Les contraintes de cisaillement, les charges appliquées et les conditions environnementales peuvent affaiblir la résistance de l'adhésif au niveau des nœuds, provoquant un affaiblissement de l'ensemble de la structure en nid d'abeille.

La Figure II.15 illustre les différents modes de dégradation de l'adhésif. L'exposition à l'humidité est particulièrement préoccupante car elle peut entraîner des dégradations significatives de la résistance de l'adhésif, ce qui peut changer le mode de dégradation et conduire à une ruine avancée du panneau sandwich [29]. Il est donc crucial de prendre en compte la dégradation de l'adhésif dans la conception et l'utilisation des structures sandwichs, et de mettre en place des mesures de protection et d'entretien appropriées pour prévenir ces problèmes.

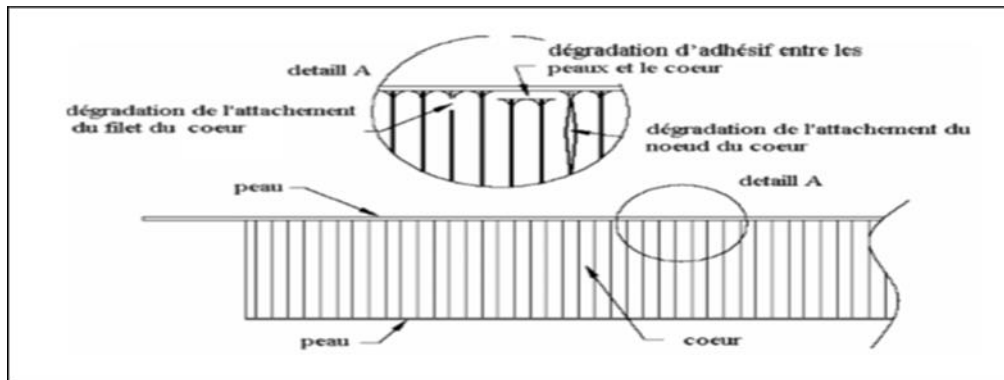


Figure II-15: Type de dégradation de l'adhésif [29].

II.3 Sandwichs sous chargement thermique

Le transfert thermique, également connu sous le nom de chaleur, est l'un des modes d'échange d'énergie thermique entre deux systèmes. Contrairement au travail, la chaleur est le bilan des transferts d'énergie microscopiques et désordonnés. On distingue trois types de transfert thermique qui peuvent coexister :

- La conduction : il s'agit de la diffusion progressive de l'agitation thermique à travers la matière.
- La convection : il s'agit du transfert thermique qui accompagne les déplacements macroscopiques de la matière.
- Le rayonnement : il correspond à la propagation de photons.

La présence de deux composants dans les composites les rend sensibles aux variations de température. À l'échelle microscopique, la différence entre le coefficient d'expansion thermique des fibres et celui de la matrice génère des contraintes locales dans le composite. Par exemple, lorsque des fibres de carbone sont utilisées, dont le coefficient d'expansion thermique est négatif contrairement à celui de la matrice, une variation de température négative entraîne une expansion des fibres tandis que la matrice se contracte. Dans un stratifié où les fibres sont tissées, l'orientation des fils de fibres les uns par rapport aux autres peut également générer des contraintes à l'intérieur du pli.

À l'échelle macroscopique, l'empilement de plis orientés entraîne des variations des propriétés à travers l'épaisseur. D'un pli à l'autre, le coefficient d'expansion thermique varie en fonction de l'orientation du pli, ce qui permet d'obtenir des stratifiés avec des coefficients d'expansion thermique globaux presque nuls. C'est notamment ce qui rend les matériaux composites particulièrement avantageux pour des applications où la stabilité dimensionnelle est importante. Cependant, lorsque le stratifié subit des variations de température, la variation du coefficient d'expansion thermique entre les plis génère des contraintes qui peuvent rapidement devenir importantes.

C'est souvent le cas pour les stratifiés croisés unidirectionnels où les plis sont tous orientés à 0 ou 90 degrés. Enfin, à l'échelle d'une plaque sandwich, la différence entre le coefficient d'expansion thermique de la matrice et de l'adhésif utilisé pour assembler la structure génère également des contraintes dans le stratifié.

Le phénomène de fatigue thermique se révèle donc important et complexe pour les matériaux composites, car il est présent à plusieurs échelles dans le matériau [41].

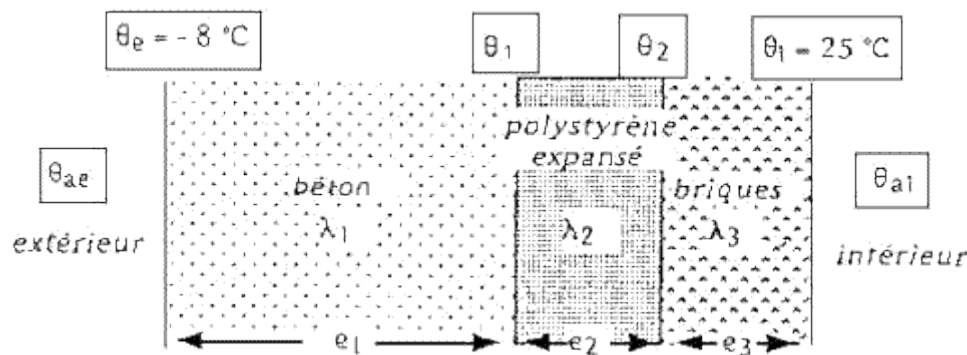


Figure II-16: Flux d'énergie thermique à travers un mur [58].

• Transfert de chaleur par conduction

Le transfert de chaleur par conduction correspond à un transfert d'énergie interne dû aux interactions entre les particules constituant le système thermodynamique (par exemple, les chocs entre les molécules dans les gaz, les vibrations dans les solides cristallins, etc.). Joseph Fourier a expérimentalement établi en 1822 la relation entre la densité de flux de chaleur et le champ de température, connue sous le nom de loi de Fourier [26]. Cette loi décrit comment la chaleur se propage à travers un matériau en fonction du gradient de température, conduisant à un équilibre thermique. Selon la loi de Fourier, la densité de flux de chaleur est proportionnelle au gradient de température et à la conductivité thermique du matériau. Ainsi, plus le gradient de température est élevé et la conductivité thermique est grande, plus le transfert de chaleur par conduction est important. La conduction thermique est un phénomène fondamental dans de nombreux domaines de la science et de l'ingénierie, jouant un rôle crucial dans la conception et l'optimisation des systèmes de transfert de chaleur.

$$\vec{q} = -k \text{grad} T$$

T : Température (K) ;

K : Conductivité thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) ;

q: Vecteur densité de flux thermique ($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$) ;

Le flux de chaleur à travers une surface S s'obtient par intégration sur S

$$Q = \iint_S \vec{q} \cdot \vec{n} dS$$

n Vecteur normal à la surface S.

Lorsque le champ de température est uniforme, le flux de chaleur est nul, ce qui indique que le système est en équilibre thermique. En revanche, lorsque des variations spatiales

de température se produisent, le flux de chaleur augmente. De plus, pour un gradient de température donné, le flux de chaleur est d'autant plus élevé que la conductivité thermique k du matériau est grande. En d'autres termes, une conductivité thermique élevée favorise un transfert de chaleur plus efficace, permettant une augmentation du flux de chaleur en réponse à un gradient de température donné.

- **Transfert de chaleur Par rayonnement.**

Lorsqu'un point matériel est chauffé, il émet un rayonnement électromagnétique dans toutes les directions situées d'un même côté du plan tangent au point matériel. Lorsque ce rayonnement entre en contact avec un objet, une partie peut être réfléchi, une autre peut traverser l'objet (si celui-ci est transparent au rayonnement), et le reste est absorbé sous forme de chaleur. Lorsque deux corps capables d'émettre un rayonnement thermique sont placés dans une enceinte à des températures différentes, il se produit un échange de chaleur entre ces deux corps dû à l'absorption et à l'émission de rayonnements thermiques.

Dans de nombreux problèmes liés à la transformation d'énergie thermique, les trois modes de transfert de chaleur (conduction, convection et rayonnement) coexistent. Cependant, il est souvent possible de négliger au moins l'un de ces modes, ce qui simplifie l'analyse mathématique du problème.

Thermo élasticité

Un incrément de déformation dans un solide peut résulter à la fois d'un changement de contrainte et d'un changement de température imposé au système. Lorsqu'un solide est soumis à un gradient de température ($\Delta\theta$), les effets thermiques, tels que la dilatation thermique, se superposent aux effets de l'élasticité. La loi de comportement thermoélastique de Duhamel-Neumann exprime cette relation de la manière suivante :

$$\sigma_{ij} = 2\mu\varepsilon_{ij} + \lambda\varepsilon_{kk}\delta_{ij} - 3K\alpha\theta\delta_{ij} ;$$

Soit en écriture matricielle

$$\sigma = 2\mu\varepsilon + \lambda\text{Tr}(\varepsilon)\mathbf{I} - 3K\alpha\theta\mathbf{I}$$

Soit en déformations

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1+\nu}{E}\sigma_{ij} - \frac{\nu}{E}\sigma_{kk}\delta_{ij} + \alpha\theta\delta_{ij}$$

Le coefficient de dilatation linéique est représenté par α , tandis que le coefficient de dilatation volumique est $3K\alpha$. En thermoélasticité linéaire, lorsque l'on considère une variation de température ($\Delta\theta$) dans un état de contrainte nulle, on obtient l'expression de la déformation ε ($\varepsilon = \alpha\Delta\theta$).

La littérature scientifique abonde en études sur le comportement thermomécanique des structures et des panneaux sandwich. Parmi les travaux pertinents, on peut citer :

- Les essais de Zhai et al. [42] menés sur les performances thermiques du murs sandwichs à base de mortier de ciment ;
- Les essais de K. Mak et al. [43] portés sur des panneaux exposés à différentes températures ;

II.4 Synthèse des travaux antérieurs sur les sandwichs

- **Sivakumar et Navir Kumar (2022) [73]**

L'étude réalisée par les auteurs porte sur l'amélioration des caractéristiques a la flexion d'une mousse de polyuréthane renforcer par des semelles en fibres de basalte. La conception proposée ainsi la procédure expérimentale et chargement sont montrés sur la figure II-17.

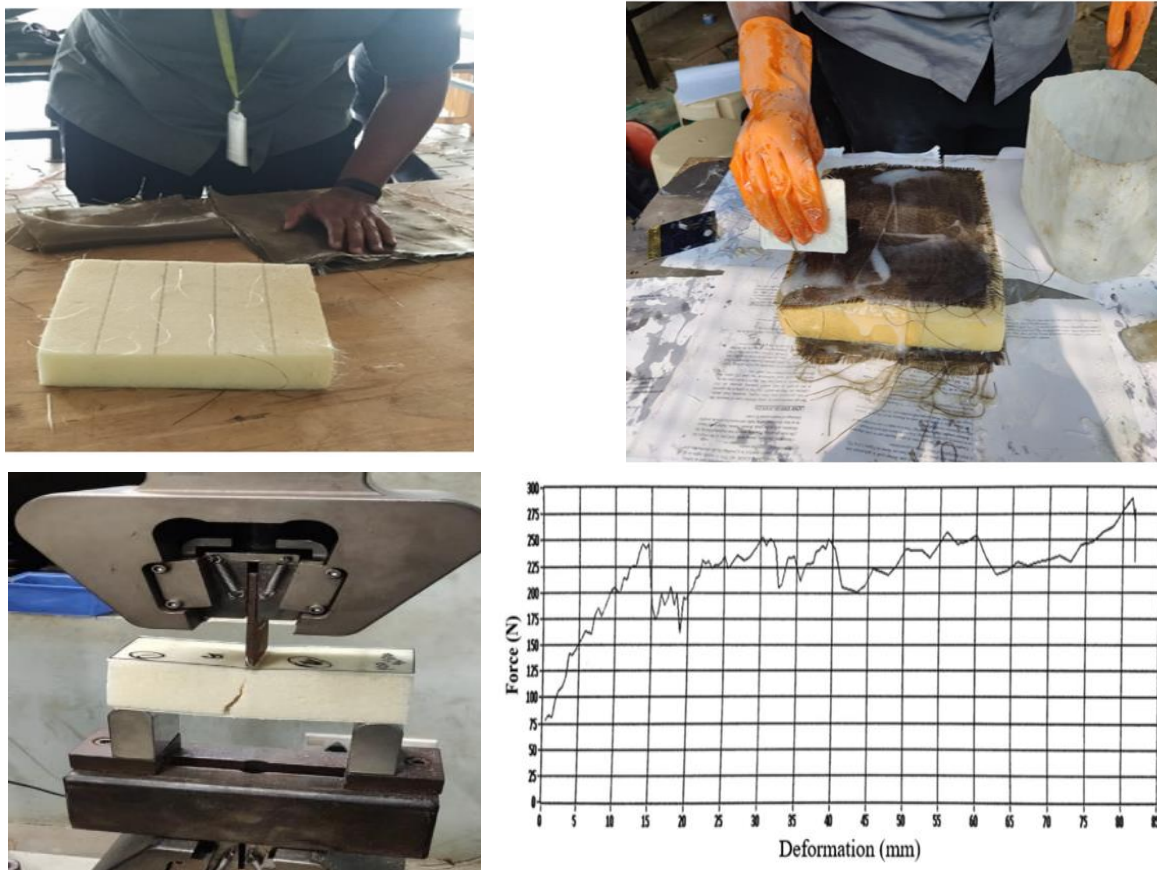


Figure II-17 Conception proposée par Sivakur et Navir [73].

Yuezhao Pang et al., (2022) [74]

Deux types de structures sandwich mousse/fibre ont été préparés par les auteurs, sur lequel des tests d'impact à faible vitesse ont été effectués. La réponse en force, l'absorption d'énergie spécifique et le mode de rupture des deux structures sandwichs

sous différentes énergies d'impact, formes de marteaux et positions d'impact ont été étudiées.

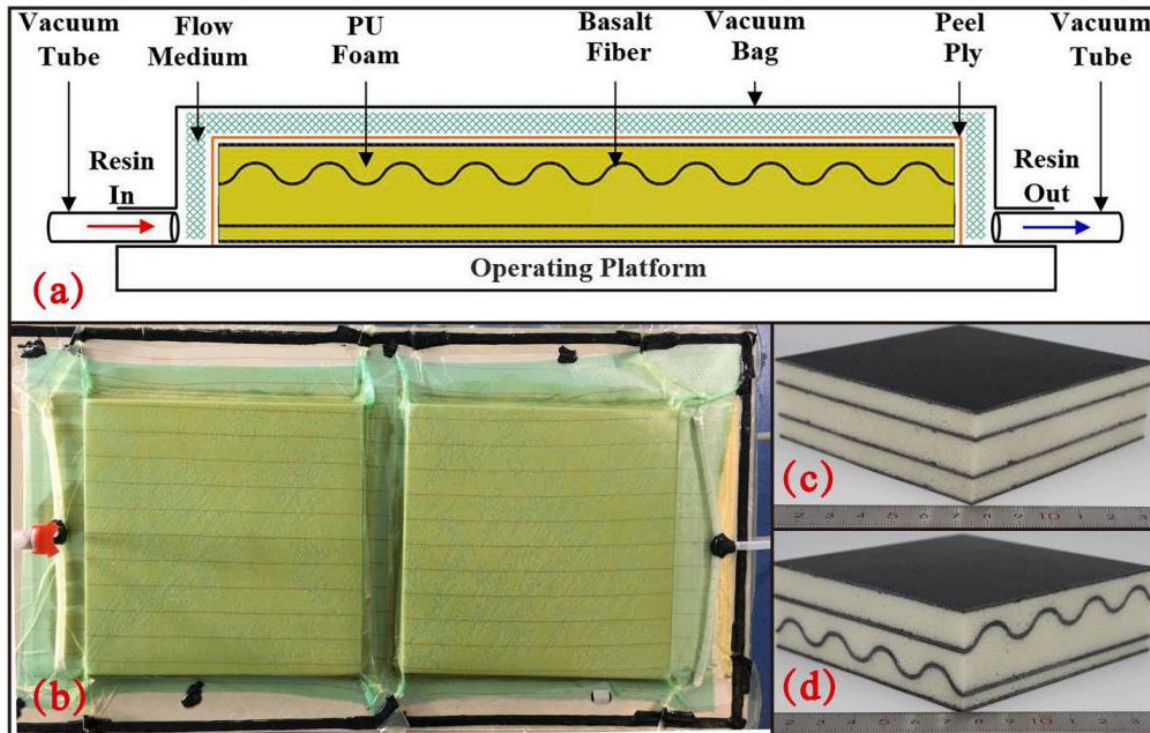


Figure II-18: onception proposée par Yuezhou et Pang[74].

- **Hesham Tuwair et al., (2015) [75]**

L'objectif de l'étude menée par ces auteurs était d'évaluer trois alternatives potentielles à l'âme des panneaux sandwich à âme en mousse de polymère renforcé de fibres de verre (GFRP). Le système proposé pourrait réduire les coûts de production initiaux et les difficultés de fabrication tout en améliorant les performances du système.

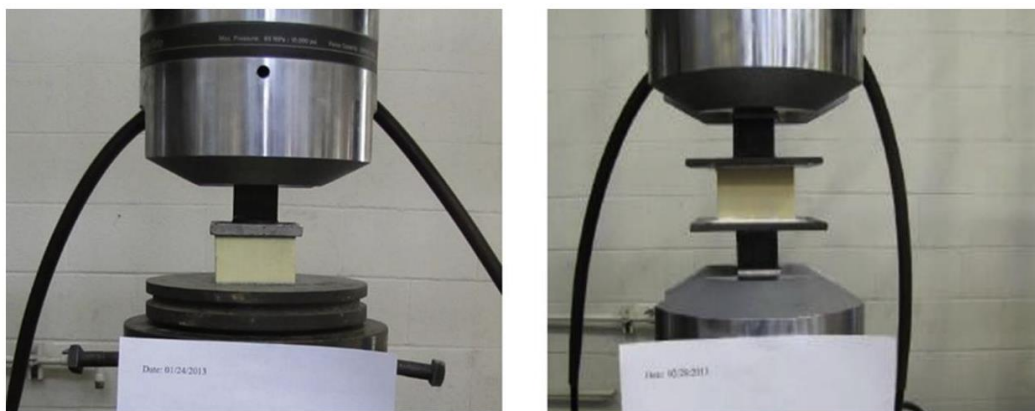


Figure II-19: onception proposée par Hesham Tuwair et al [75].

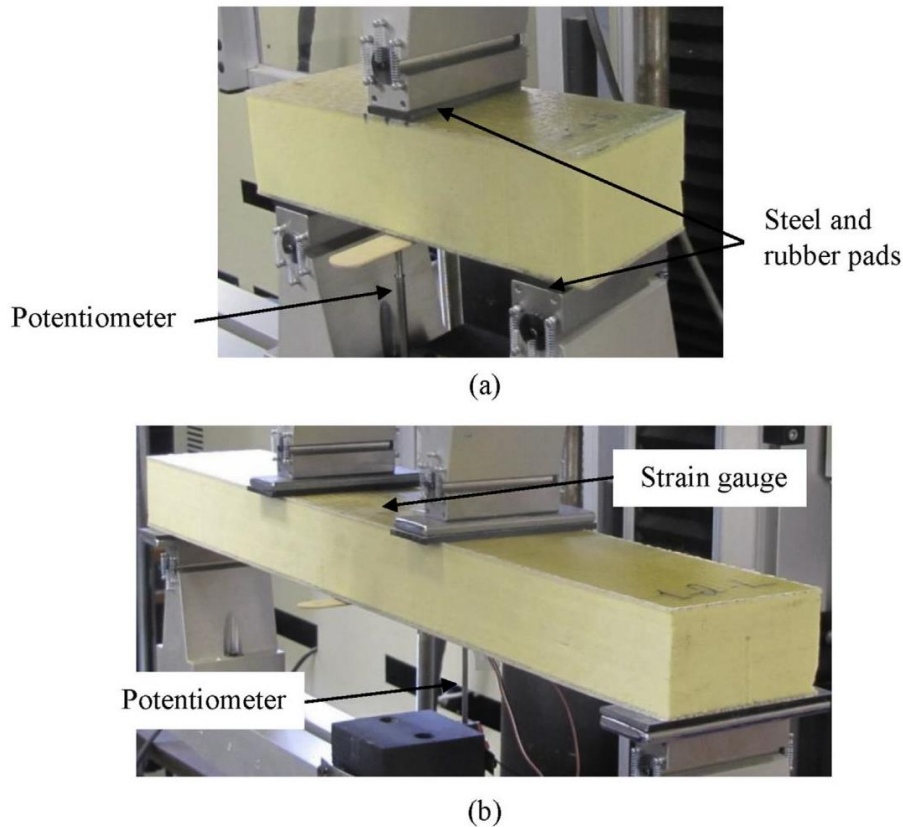


Figure II-20: onception proposée par Hesham Tuwair et al[75].

- **Megavannan Mani et al., (2023) [76]**

Le travail mené par les auteurs porte sur l'exploration de la meilleure fonctionnalité des résistances aux chocs des panneaux sandwich polymères. Ces constructions sont construites à partir de matériaux en mousse de polyuréthane (PUR) avec des structures en kevlar, carbone, verre et polymère époxy.

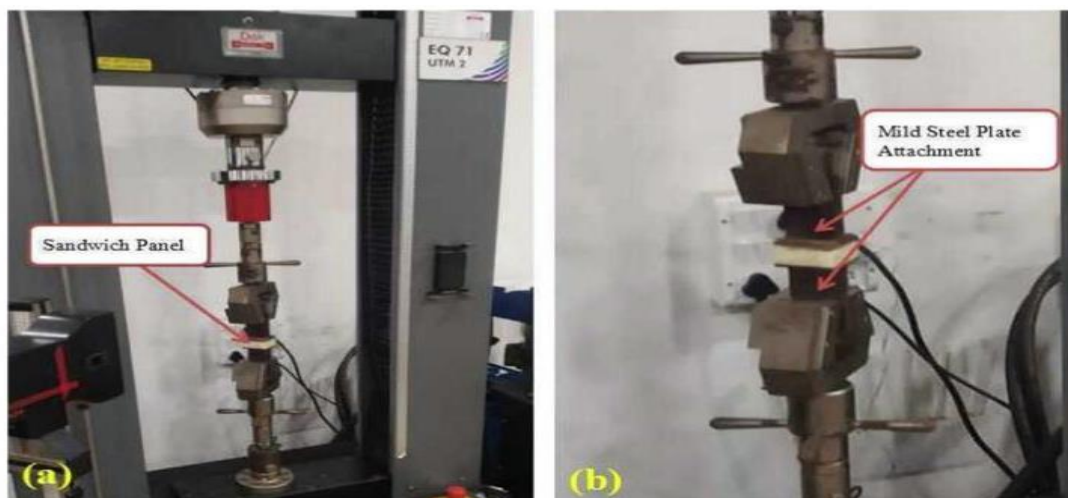


Figure II-21: onception proposée par Megavannan et al [76].

- Gama et al., (2019) [77]

Dans le présent travail, une approche préliminaire est faite concernant l'application potentielle de mousses PU imprimées en 3D pour des applications thermiques avec des propriétés mécaniques améliorées. Pour cette proposition, le liège a été utilisé pour améliorer les propriétés des mousses composites imprimées en 3D résultantes. D'après les résultats obtenus, il a été observé que l'ajout de liège diminuait la densité et la conductivité thermique des mousses obtenues. La rigidité des composites résultants a également été réduite. Cependant, l'utilisation du liège n'a pas affecté la stabilité thermique des composites.

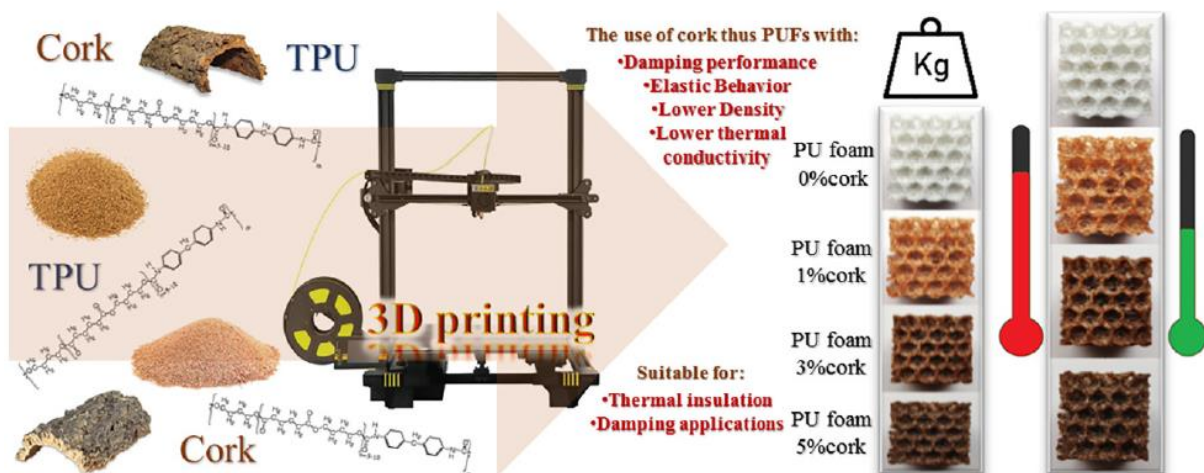


Figure II-22: Conception proposée par Gama et al., (2019) [77]

II.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le comportement des structures sandwichs stratifiées soumises à des charges thermiques et mécaniques, ainsi que certaines recherches expérimentales menées sur ces types de structures. Voici les principaux points abordés :

- Comportement mécanique des sandwichs : Nous avons examiné les normes de fabrication, les différentes sollicitations mécaniques telles que la flexion et le flambement, ainsi que les mécanismes de rupture associés.
- Comportement thermique des sandwichs : Nous avons discuté du transfert de chaleur, y compris la conduction, le rayonnement, et les aspects de thermoélasticité liés aux variations de température.
- Synthèse des travaux antérieurs : Nous avons recensé les différentes études expérimentales réalisées sur les structures sandwichs, mettant en évidence les avancées et les résultats obtenus.

Dans le prochain chapitre, nous allons entamer les différentes étapes de l'élaboration et la caractérisation expérimentale de la structure sandwich.

Chapitre III

Matériaux et procédures
expérimentales

III.1 Introduction

Dans ce chapitre, nous allons décrire les différentes phases de l'étude expérimentale réalisée au laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Les éléments de base d'un panneau sandwich sont la peau, l'âme et l'adhésif. Notre objectif est de fabriquer un panneau sandwich en utilisant de la mousse de polyuréthane et de liège et le placés entre deux plaques de PVC.

Après avoir présenté les matériaux utilisés, la première étape consiste à définir les plages granulométriques du liège par le biais d'une analyse granulométrique, ainsi qu'à étudier la densité du liège et de la mousse. Ensuite, la deuxième étape comprend la fabrication des échantillons et des panneaux composites. Enfin, nous présenterons les tests mécaniques effectués sur ces panneaux.

III.2 Matériaux utilisés

III.2.1 Liège

Le liège est un matériau qui possède de nombreuses caractéristiques avantageuses. Il est renouvelable, recyclable et réutilisable. Lorsqu'il est aggloméré sans l'ajout d'additifs, sous l'effet de la vapeur et de la pression, la propre résine du liège permet d'obtenir un matériau présentant une excellente isolation phonique, une absorption acoustique efficace, ainsi qu'une grande stabilité dimensionnelle et une résistance élevée à l'écrasement



Figure III-1: liège séché (foret Yakouren)

Dans notre étude, nous avons utilisé un matériau entièrement naturel qui est extrait de forêts gérées de manière durable dans la région de TIZI-OUZOU. Le liège est récupéré à l'état brut, sans subir de transformations majeures.



Figure III-2: Liège en morceau sec

Le liège a été ensuite broyer puis des tests de caractérisation ont été réalisés

III.2.1.1 Préparation des granulats du liège

Cet essai est réalisé suivant la norme NF P 18-560. L'échantillon représentatif doit avoir une masse comprise entre 200D et 600D, où D représente la plus grande dimension des granulats à analyser. On appelle tamisât ou passant l'ensemble des grains qui passent à travers le tamis, et refus l'ensemble des grains qui sont retenus sur le tamis. Un exemple de tamiseuse électrique permettant de réaliser l'essai est présenté sur la figure suivante :



Figure III-3: tamiseuse du labo (UMMTO)

Le tableau III-1 récapitule les quantités du tamisât selon le diamètre

Tableau III-2 : tableau des quantités de liège selon le diamètre

Maille des tamis en (mm)	Masse (g)
8	490
5	308
2.5	235
1.25	255
0.63	160
0.315	236
0.16	540
0.08	326
Fond de tamis	670
Total	3220

Après tamisage du liège nous nous sommes intéressées à 3 diamètres différents que nous allons utiliser dans notre expérience qui sont le diamètre 3 mm, diamètre 1.25 mm et le fond de tamis (poudre), qui sont montrés sur les figures ci-dessous



Figure III-4: diamètre 3 mm



Figure III-5: diamètre 1.25 mm



Figure III-6: font de tamis

III.2.1.2 Caractérisation physique du liège

Pour la détermination de la densité du liège nous avons réalisé le protocole suivant :

- Nous avons pris une fiole jauger que nous avons préalablement mesuré la masse vide
- Remplir la fiole d'eau puis mesure la masse de la fiole + l'eau pour déterminer la masse d'eau
- Remplir la fiole de liège en morceaux sans eau et mesurer la masse
- Remplir la fiole d'eau et de liège en morceau pour terminer la densité du liège dans l'eau

La figure suivante montre les étapes conduites pour la détermination la densité du liège



(a)



(b)



(c)



(d)

Figure III-7: étape de l'essai de détermination de la densité du liège

P5% = 2.8 g

P10% = 5.6 g donc voici les pourcentages de liège que nous avons ajouté dans

P15% = 8.4 g dans notre mélange selon notre encadreur

Tableau III-3: Calcul des caractéristiques physique du liège

$V_{app}(m^3)$	$5 \times 5 \times 5 = 125 \text{ cm}^3 = 125 \times 10^{-6} m^3$
$M_{app}(kg)$	$17.6 \text{ g} = 0.0176 \text{ kg}$
$\rho_{vapp} (kg/m^3)$	$\frac{17.6 \times 10^{-3}}{125 \times 10^{-6}} = 140.8 \text{ kg/m}^3$
$V_{abs\text{eau}}(m^3)$	$V_2 - V_1 = 280.3 - 200 \text{ ml} = 80.3 \text{ ml}$
$M_{app}(kg)$	0.0176 kg
$\rho_{vabs} \text{ kg/m}^3$	$\frac{17.6 \times 10^{-3}}{80.3 \times 10^{-6}} = 219.17 \text{ kg/m}^3$
$\rho_{\text{eau}} (kg/m^3)$	$999.973 = 1000$
Densité	$\frac{219.17}{1000} = 0.219$

III.2.2 Mousse

La mousse de polyuréthane, grâce à ses propriétés uniques, offre de nombreux avantages en tant que matériau de base dans les structures sandwich. Elle se compose de cellules fermées remplies d'un gaz, ce qui lui confère une faible densité et une légèreté exceptionnelle. Cela permet de réduire le poids global de la structure sans compromettre sa résistance mécanique, ce qui est particulièrement crucial dans des applications où le rapport poids/résistance est un facteur critique.

Outre sa légèreté, la mousse de polyuréthane présente également une excellente isolation thermique et acoustique, ce qui en fait un choix idéal pour les applications nécessitant une régulation de la température ou une atténuation du bruit. Sa capacité à résister à l'humidité et à l'eau ajoute également à sa durabilité, ce qui en fait un matériau adapté aux environnements difficiles ou exposés aux intempéries.



Figure III-8: mousse polyuréthane

III.2.2.1 Caractérisation physique de la mousse

Pour la détermination de la densité de la mousse nous avons réalisé le protocole suivant :

- a) Nous avons pris une fiole jaugée que nous avons préalablement mesurer la masse vide ;
- b) Remplir la fiole d'eau puis mesurer la masse de la fiole + l'eau pour déterminer la masse d'eau ;
- c) Remplir la fiole de mousse en morceaux sans eau et mesurer la masse ;
- d) Remplir la fiole d'eau et de mousse en morceau pour terminer la densité de la mousse dans l'eau.



Figure III-9: pose de la mousse dans le moule prismatique

La figure suivante montre les étapes conduites pour la détermination la densité de la mousse

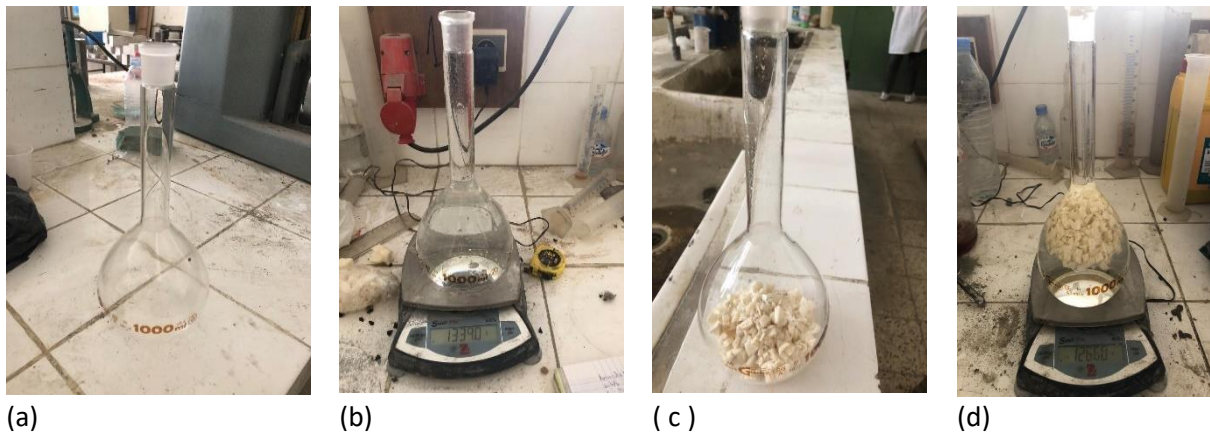


Figure III-10: étape de l'essai de détermination de la densité de la mousse

Tableau III-4: Calcul des caractéristiques physique du mousse

$V_{app}(m^3)$	$5 \times 5 \times 5 = 125 \text{ cm}^3 = 125 \times 10^{-6} m^3$
$M_{app}(kg)$	16 g = 0.016 kg
$\rho_{vapp} (kg/m^3)$	$\frac{16 \times 10^{-3}}{125 \times 10^{-6}} = 128 \text{ kg/m}^3$
$V_{abs\text{eau}}(m^3)$	$V_2 - V_1 = 1115.1 - 1000 \text{ ml} = 115.1 \text{ ml}$
$M_{app}(kg)$	0.016 kg
$\rho_{vabs} \text{ kg/m}^3$	$\frac{16 \times 10^{-3}}{115.1 \times 10^{-6}} = 139 \text{ kg/m}^3$
$\rho_{\text{eau}} (kg/m^3)$	999.973 = 1000
Densité	$\frac{139}{1000} = 0.139$

D'après le calcul de la densité des éléments, nous avons déterminé les pourcentages de liège à utiliser

Le tableau suivant nous montre les valeurs à utiliser :

Tableau III-5: Variante des pourcentages d'ajout en liège

Masse volumique absolue kg/m^3	Volume moule vide (m^3)	Pourcentage	Volume % (m^3)	$M_{\text{liège}} \% (g)$
219 Kg/m^3	$4 \times 4 \times 16 = 256 \cdot 10^{-6}$	5 %	$0.05 \times 256 \cdot 10^{-6} = 12.8 \cdot 10^{-6}$	2.8g
		10 %	$0.10 \times 256 \cdot 10^{-6} = 25.6 \cdot 10^{-6}$	5.6g
		15 %	$0.15 \times 256 \cdot 10^{-6} = 38.4 \cdot 10^{-6}$	8.4g

III.3 Le polymère (PVC)

Le PVC, ou polychlorure de vinyle, est une matière plastique largement utilisée dans des applications courantes. Il est composé à 57% de chlore et à 43% d'éthylène, ce qui

en fait la seule matière plastique d'usage courant constituée par plus de 50% de matière première d'origine minérale existant abondamment dans la nature.



Figure III-11: plaque de PVC blanc

Le recours aux plaques de PVC comme peau de panneaux se justifie par leur coût relativement modéré et leurs bonnes propriétés mécaniques. En effet, la feuille PVC est souple et présente une bonne résistance aux chocs. La plaque de PVC utilisée représentée sur la figure 1.c se présente sous la forme d'un rouleau de 50 mm de largeur et 1 mm d'épaisseur. Afin d'évaluer les propriétés de traction des tôles usagées face et adhésif, un essai de traction directe a été réalisé selon la norme. Chiffre. La figure 8 représente les courbes contrainte-déformation de trois coupons identiques, tandis que le tableau 4. Recapitalise les principales valeurs de traction obtenues.

Tableau III-6: Propriétés évaluées des peaux en PVC

Semelles Composites	Epaisseur (mm)	Charge ultime (N)	Déplacement ultime (mm)	Résistance à la traction (Mpa)	Module de Young (Mpa)
PVC	1.0	316.16	7.68	29.01	1081.09

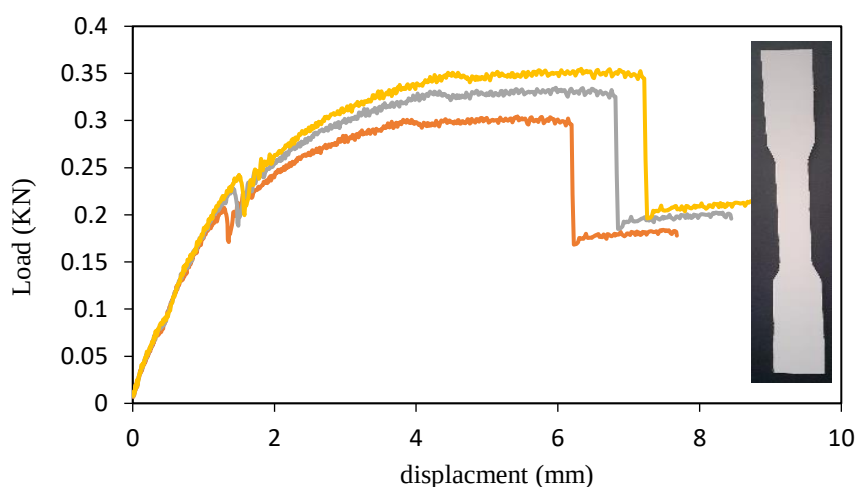


Figure III-12: Comportement du la semelle en PVC à la traction

III.4 Préparation des panneaux multicouches

Pour le besoin de notre étude nous réalisons des éprouvettes prismatiques pour les essais de flexion trois point et de compression selon les normes en vigueur citées en chapitre II précédent.

III.4.1 Préparation des âmes

- Liège moulue de différent diamètre
- Mousse polyuréthane de type AKFIX 600

III.4.1.1 Préparation et fabrication des moules

Nous avons fabriqué plusieurs coffrages en alucobande permettant le coulage de plusieurs panneaux à la fois et de composition différente donc la dimension des éprouvettes sera 4x4x16 selon la norme NF EN 196-1



Figure III-13: illustration de tous les éprouvettes réalisés et leur désignation



Figure III-14: Coffrage utilisé pour la confection des panneaux





Figure III-15: Procédure du moulage dans des éprouvettes

III.4.1.2 Mise en œuvre

Dans cette partie nous allons donner les étapes de réalisation des panneaux composites

- Nous prenons d'abord une plaque de PVC que nous avons préalablement poncés pour améliorer la cohésion avec la mousse ;
- Mélanger une masse de 10% de liège avec la mousse (le diamètre diffère pour chaque formulation) ;
- Poncer une deuxième plaque de PVC ;
- Mettre tous les composants cités précédemment dans un moule puis le fermer ;
- Attendre un délai de 3 jours pour que la mousse et le temps de prendre et avoir une bonne cohésion entre la mousse et le PVC
- Décoffrer les panneaux et les conserver dans des conditions de labo avant les essais.

III.5 Présentation des essais

III.5.1 Machine d'essai

Les essais mécaniques sont effectués sur une presse hydraulique de marque IBERTEST pilotée par un ordinateur (voir la figure III-16). C'est une machine universelle qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion. Sa capacité maximale de 200 KN. Elle est programmée pour les essais de compression et les essais de flexion pour des éprouvettes normalisées. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à sa rupture.



Figure III-16: machine d'essai IBERTEST

III.5.1.1 Essai de flexion trois point

Les essais de compression et de flexion 3 points sont réalisés à l'aide de la machine IBERTEST, avec une vitesse de chargement fixée à 0,1 KN/S.

L'essai de flexion 3 points, les éprouvettes sont placées horizontalement sur un dispositif de flexion équipé de deux appuis. La distance entre le point de chargement et les appuis est de 15 cm. Les panneaux sont dimensionnés selon la norme NF T54-606, avec les dimensions suivantes : Longueur totale : 37 cm, Largeur : 6 cm, Hauteur totale : 1.7 cm, Hauteur de l'âme : 1.5 cm.

Toutes les données résultantes de ces essais sont enregistrées sur l'ordinateur de commande de la machine, permettant ainsi de collecter et d'analyser les informations essentielles concernant les propriétés mécaniques des matériaux testés.



Figure III-17; flexion 3 point d'un panneaux sandwich (mousse 1)

III.5.1.2 Essai de compression

Le but de l'essai est de déterminer la résistance du liège et de la mousse à la compression après l'application d'un chargement, sur des éprouvettes cubiques $4 \times 4 \times 4 \text{ mm}^3$, selon la norme : NFT54-602. La vitesse de charge appliquée demeure constante au fil du temps jusqu'à leur écrasement.



Figure III-18: compression d'un morceau de liège 1

III.5.1.3 Essai d'ultrason

C'est un essai non destructif très important, qui nous permet de d'évaluer à la fois plusieurs caractéristiques des matériaux telles que : le degré de compacité, le taux de fissuration, les dommages causés par le gel ou l'écart de température...etc.

Cet essai consiste à mesurer la vitesse longitudinale d'une onde ultrasonore traversant le béton, à l'aide d'un appareil comportant une boîte de mesure, et deux têtes (une émettrice et l'autre réceptrice) et tout cela selon la norme NF EN 12504-4.



Figure III-19: Appareille Pundit de détermination de la vitesse ultrasonore

Deux méthodes peuvent être utilisées pour mesurer la vitesse ultrasonore :

- Mesure en surface (semi-directe ou indirecte)
- Mesure en transparence (directe).

Cette dernière représente la meilleure méthode. Elle consiste à presser les deux têtes de mesure sur les deux faces opposées de l'éprouvette à tester, en utilisant une pâte de contact qui facilite la transmission de l'onde. La surface du béton doit être raisonnablement plane et bien nettoyée.

Une fois l'appareil mis en marche, on peut lire le temps de propagation en microseconde. La vitesse de propagation est donnée alors par l'équation suivante :

$$V = \frac{L}{t}$$

- V : vitesse de propagation en m/sec.
- L : distance entre les têtes en (mètre) mesurée avec une précision de 1 %
- t : temps en microseconde

A partir de cette vitesse on peut déterminer aussi le module d'élasticité dynamique par la relation suivante :

$$E_{dyn} = \rho \cdot V^2 \cdot \frac{(1 - 2\nu) \cdot (1 + \nu)}{1 - \nu}$$

Où :

- E_{dyn} : module de Young dynamique du matériau.
- ρ : masse volumique du béton en Kg/m³.
- ν : coefficient de poisson du liège/mousse.
- V : vitesse de propagation du son dans le béton en m/sec.

Les essais ultrasoniques ont été réalisées sur toutes les éprouvettes destinées à être testées.

III.6 Conclusion

Au cours de ce chapitre, nous avons procédé à une présentation exhaustive des différents matériaux utilisés dans notre étude, en détaillant leurs caractéristiques spécifiques, ainsi que la formulation des différents mélanges employés. Une attention particulière a été portée à la variation des paramètres, notamment en ce qui concerne les matériaux en liège, avec des variations de pourcentage et de diamètre.

Par ailleurs, nous avons effectué l'identification et la caractérisation minutieuse de chaque matériau utilisé dans notre recherche. Nous avons également exposé le programme expérimental que nous avons adopté pour cette étude, en détaillant les méthodes de préparation des éprouvettes prismatiques et des panneaux.

Dans le chapitre suivant, nous concentrerons notre attention sur les résultats obtenus lors des essais en flexion 3-points et en compression, ainsi que les résultats issus des essais par ultrasons. Une analyse approfondie de ces résultats sera réalisée pour permettre une meilleure compréhension du comportement de ces structures étudiées. Ces analyses nous aideront à tirer des conclusions significatives sur les performances et les propriétés mécaniques des matériaux et des mélanges examinés dans notre recherche.

Chapitre IV

Résultats et analyse

IV.1 Introduction

Ce chapitre traite des démarches entreprises pour effectuer des essais sur les différents panneaux composites multicouches, ainsi que de l'interprétation des résultats obtenus. Toutes les épreuves mécaniques ont été réalisées au Laboratoire de Génie Civil de l'Université de Tizi Ouzou. Ces essais mettent en évidence les nombreux avantages des structures composites multicouches, notamment leur légèreté, leur excellent rapport rigidité/masse, ainsi que leurs propriétés isolantes remarquables tant sur le plan thermique que phonique.

Une fois que la mousse et les grains de liège ont atteint un niveau de maturité approprié, nous avons effectué des ajustements pour les essais de compression, d'ultrasons et de flexion trois points. Ces ajustements concernaient la machine utilisée, les paramètres spécifiques ainsi que la configuration des essais. Les résultats obtenus à partir de chaque série de panneaux sandwichs nous ont fourni des informations essentielles pour comprendre leur comportement mécanique et les mécanismes de rupture. Ces caractéristiques sont cruciales dans le choix d'un matériau de construction adapté à nos besoins.

Au cours de cette étude, nous avons examiné quatre variantes de panneaux, chacune ayant des diamètres de grains de liège différents. Nous avons également inclus une variante sans liège. En plus de cela, nous avons réalisé une étude séparée sur la mousse de polyuréthane et les granulats de liège individuellement, avant de les combiner pour former les panneaux multicouches.

IV.2 Résultats des essais de caractérisation des âmes

IV.2.1 Essai d'ultrason

Avant de soumettre nos matériaux et panneaux aux tests de compression et flexion trois points, nous avons effectué des essais à l'appareil à ultrasons Pundit. Les vitesses des ultrasons ont été déterminées par la mesure du temps pris par l'onde ultrasonore pour parcourir les éprouvettes. 3 éprouvettes pour chaque matériau ont été testées pour leurs capacités acoustiques. Le mode utilisé est celui de la transmission directe car celui-ci nous offre les meilleurs résultats en termes de précision. La fréquence utilisée lors des essais fut de 150 kHz. Pour améliorer la précision, nous avons répété le test trois fois sur chaque échantillon et calculé la moyenne des trois mesures obtenues sur chaque échantillon.

Ces résultats sont représentés dans le tableau (VI-1) et reportés sur un histogramme tel que schématisé sur la figure (VI-1)

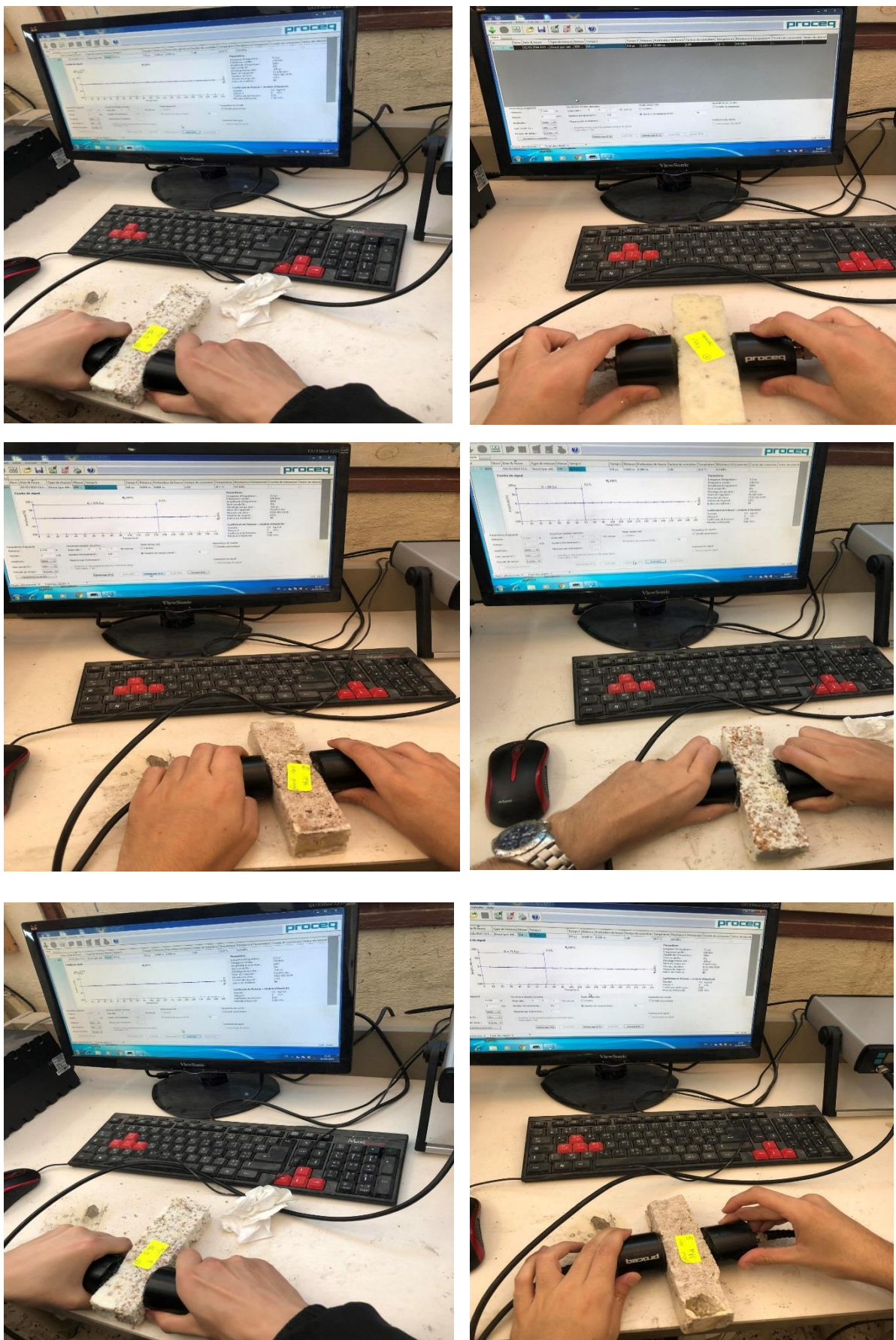


Figure IV-1:épreuves sous essai d'ultrason

Tableau IV-1: tableaux des variations de la vitesse selon le matériau

Matériau x	D 1.2 5 5%	D 1.2 5 10 %	D 1.2 5 15 %	D 8 5%	D 8 10 %	D 8 15 %	FON D 5%	FON D 10%	FON D 15%	LIEG E	MOUSS E
Vitesse (m/s)	384	555	442	499	643	789	419	389	439	658	526

Avec : D 1.25, D 8 et FOND le diamètre du liège dans le mélange et 5%, 10% et 15% pourcentage de liège dans le mélange

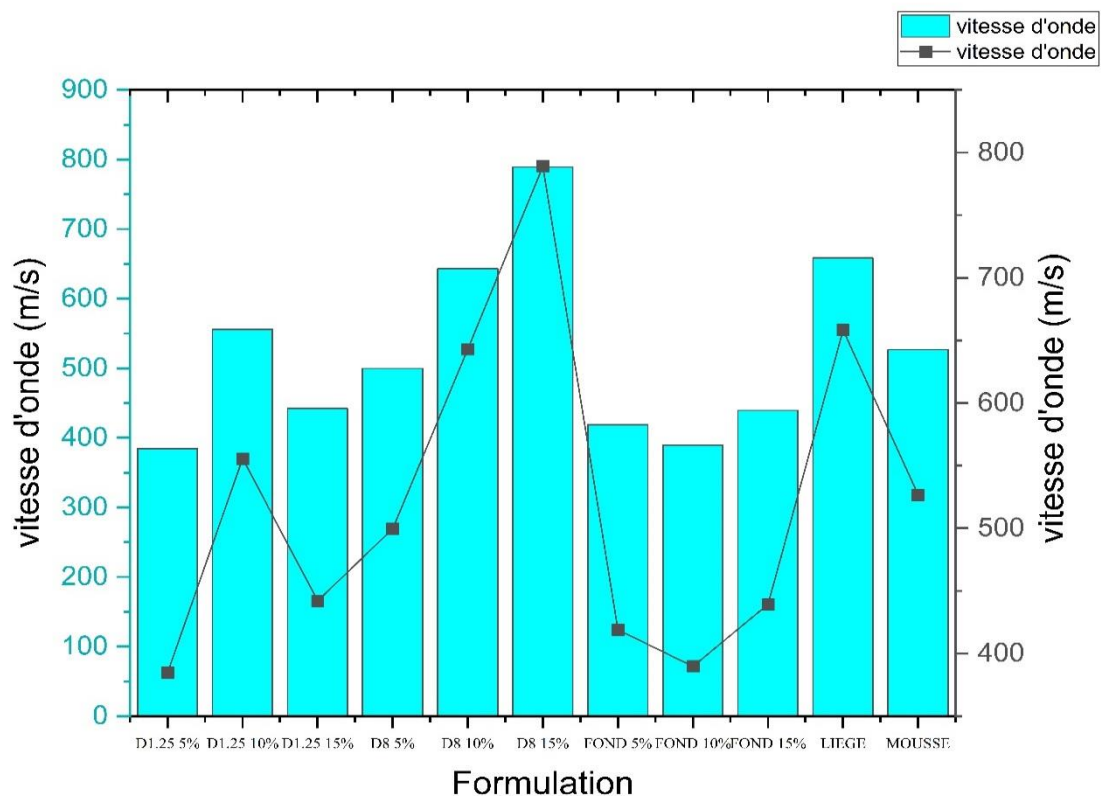


Figure IV-2: histogramme des variations de la vitesse selon le matériau

Nous pouvons remarquer de cet histogramme que la vitesse de propagation des ondes sonore varie d'un matériau a un autre et les points suivants peuvent être noté :

- Augmentation de la vitesse de propagation d'onde continue sur le mélange D8 avec une augmentation maximale à 15%
- Les mélange contenant le fond de tamis possède une propagation d'onde très faible, de ce fait on peut dire que le matériau est de faible densité.
- Le diamètre du liège joue un rôle sur la propagation d'onde des matériaux

On peut conclure de ce schéma que le matériau le plus dense donc le plus résistant devrait être le mélange D 8 15%.

IV.2.2 Résultats des essais à la compression

L'étude a porté sur la résistance à la compression des âmes des panneaux sandwichs composées de liège et de mousse polyuréthane. Nous avons évalué leur capacité à supporter des charges axiales appliquées dans le sens de leur épaisseur, afin de comprendre comment ces matériaux se comportent ensemble dans cette configuration spécifique. Les résultats de ces essais de compression ont fourni des informations cruciales sur la résistance et la stabilité mécanique.

➤ Mousse et liège

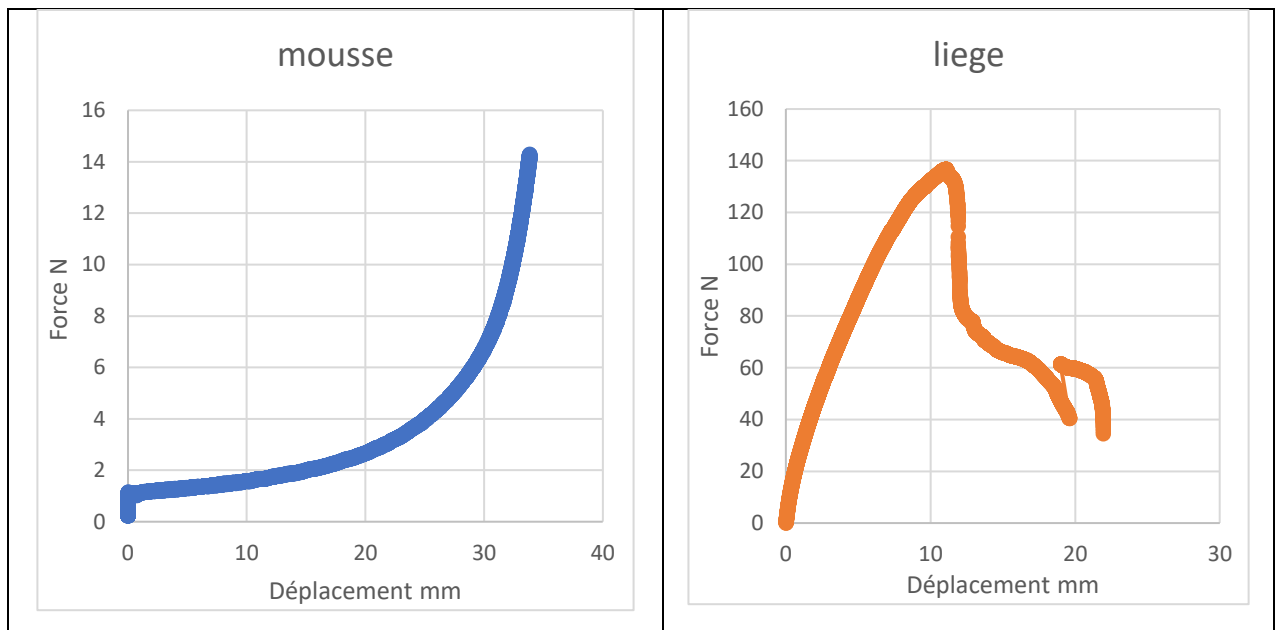


Figure IV-3: résistance à la compression du liège et de la mousse

Ce graphique nous montre les caractéristiques du liège et de la mousse en compression, nous pouvons remarquer que la mousse possède une résistance très faible à la compression avec un comportement relativement adoucissant et fragile après l'atteinte de sa capacité maximale. Le liège il est dix fois plus résistant que la mousse, avec un comportement relativement ductile, sans effondrement de l'éprouvette.

Tout les tests qui vont suivre ont été réalisés à l'unité de recherche de l'université de Boumerdes

➤ Mélange avec granulats diamètre 1.25 mm

La figure suivante montre la résistance à la compression des mélange mousse + granulats de liège diamètre 1.25 mm.

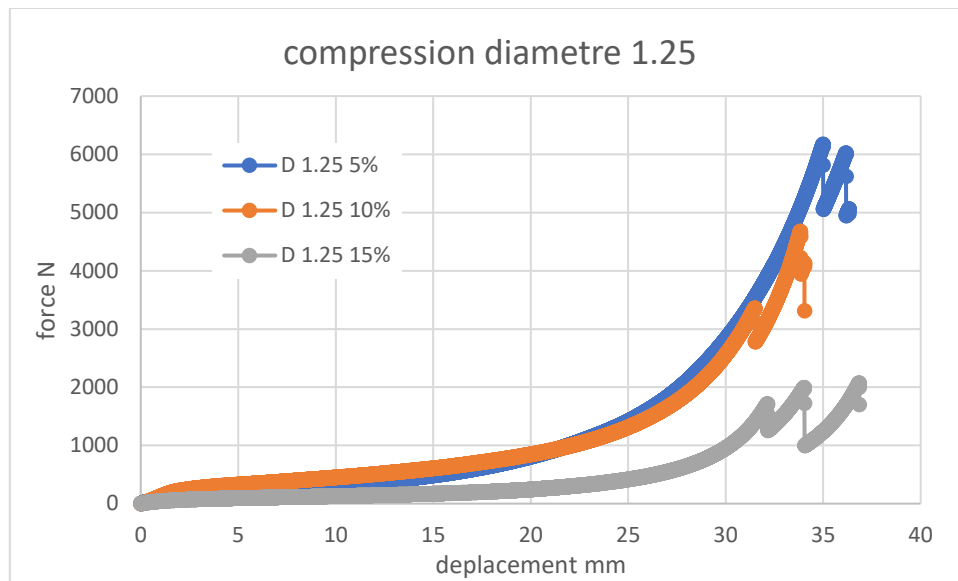


Figure IV-4: résistance à la compression des mélanges selon le pourcentage de liège D 1.25

Nous pouvons remarquer de ce graphique que le comportement en compression de notre mélange subit une diminution de la résistance plus le pourcentage de liège augmente, ce qui pourrait être dû au fait que le liège ayant une texture molle plus il est présent dans le mélange plus il perd de solidité et de dureté.

➤ **Mélange avec granulats diamètre 8 mm**

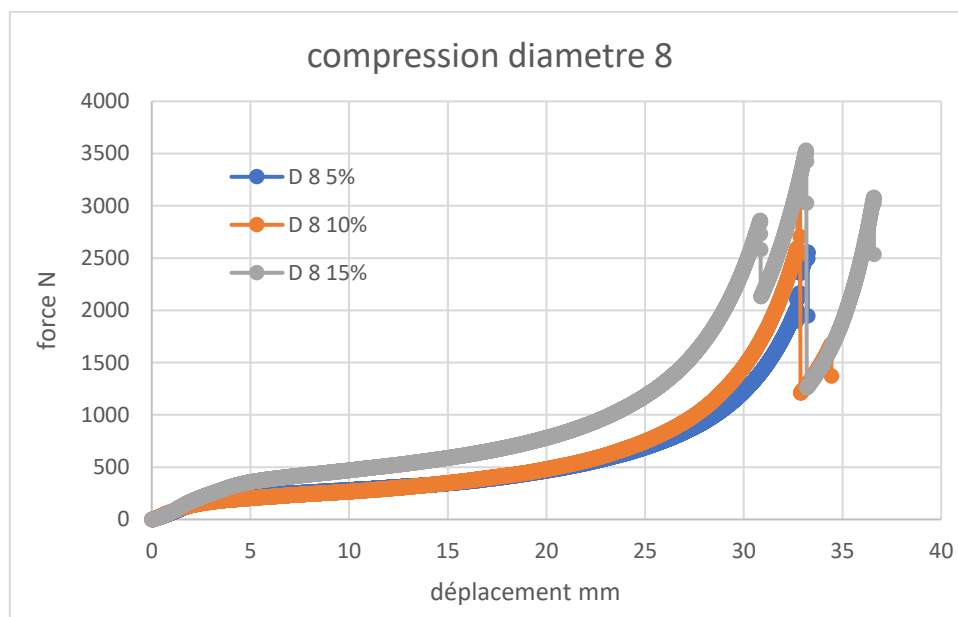


Figure IV-5: résistance à la compression des mélanges selon le pourcentage de liège D8

Nous pouvons remarquer dans ce graphique une augmentation de la résistance à la compression du mélange avec les granulats de liège de diamètre 8 mm plus le pourcentage augmente ce qui est contradictoire avec les résultats du mélange précédent, cela pourrait être dû au fait que vu que le diamètre est plus important ils permettent de reprendre une partie des charges ce qui augmente la résistance du mélange.

➤ **Mélange avec poudre de liège (fond de tamis)**

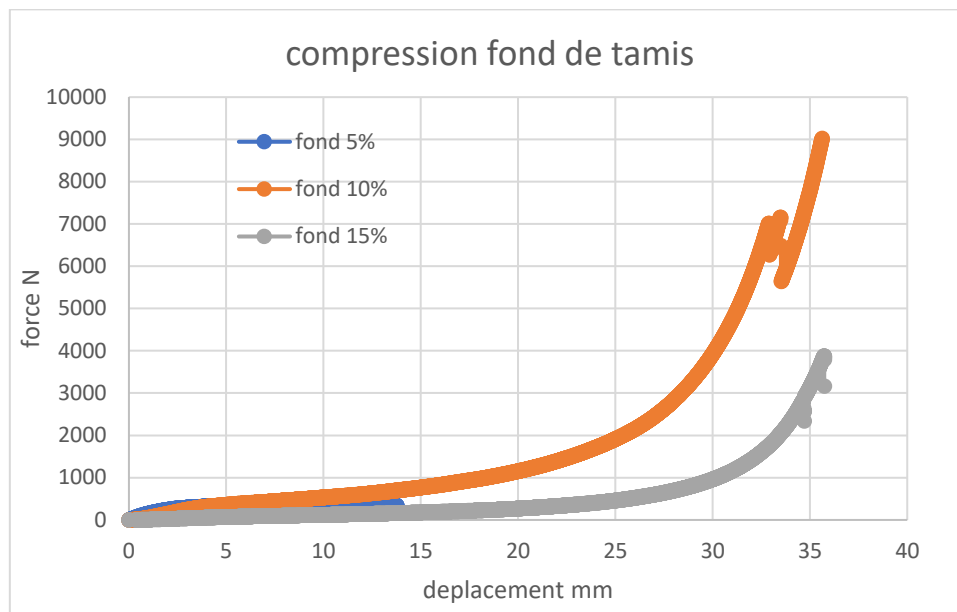


Figure IV-6: résistance à la compression des mélanges selon le pourcentage de fond de tamis

Nous remarquons sur le mélange mousse et poudre de liège que la résistance à la compression est la plus importante avec un pourcentage de 10%, en nous remarquons aussi que de tous les mélanges réalisés jusqu'à maintenant c'est celui avec la résistance la plus importante, ce qui pourrait être dû au fait que le fond de tamis étant sous forme de poudre donc il se mélange mieux avec la mousse de ce fait nous avons un mélange homogène donc compact et dense.

L'instrumentation des essais de compression des différentes éprouvettes testées ainsi que les modes de rupture obtenus sont illustrées sur les figures suivantes :





Figure IV-7: Eprouvettes soumises à la compression

Nous avons réalisé ensuite un histogramme récapitulatif des résistances de tous nos mélanges pour mieux les confronter. Il est important de noter que pour chaque configuration, trois éprouvettes ont été conçues et testées.

Tableau IV-2: tableaux récapitulatifs des résistances a la compression

Eprouvettes testées	Résistance à la compression (N)	Résistance à la compression moyenne (N)	Ecart-type (N)
D 1.25 5%-1	5063.360	6864.89	-0.070
D 1.25 5%-2	7106.570		-0.630
D 1.25 5%-3	8424.760		-0.160
D 1.25 10%-1	4548.250	4713.14	0.036
D 1.25 10%-2	4135.018		-2.005
D 1.25 10%-3	5456.180		-0.596
D 1.25 15%-1	2640.516	2570.49	-2.095
D 1.25 15%-2	3000.150		-0.036
D 1.25 15%-3	2070.806		-0.379
D 8 5%-1	1994.825	2134.436	-1.083
D 8 5%-2	2557.183		-0.903
D 8 5%-3	1851.300		-0.758
D 8 10%-1	1541.597	2824.024	-0.018
D 8 10%-2	5255.416		-0.018
D 8 10%-3	1675.060		-1.228
D 8 15%-1	5812.228	4416.022	-1.354
D 8 15%-2	3081.189		-1.174
D 8 15%-3	4354.650		-0.126
FOND 5%-1	340.700	375.903	-0.108
FOND 5%-2	374.770		-0.119
FOND 5%-3	412.240		-0.131
FOND 10%-1	9023.05	8781.577	-2.619
FOND 10%-2	8722.324		-1.409
FOND 10%-3	8599.357		-1.824
FOND 15%-1	3877.594	3175.469	-3.946
FOND 15%-2	2275.209		-3.739
FOND 15%-3	3373.604		-2.745
LIEGE -1	110.204	136811.0	-0.091
LIEGE -2	142.970		-0.028
LIEGE -3	157.260		-0.030
MOUSSE -1	12343.75	14298.173	0.204
MOUSSE -2	13578.12		0.225
MOUSSE -3	16972.65		0.281

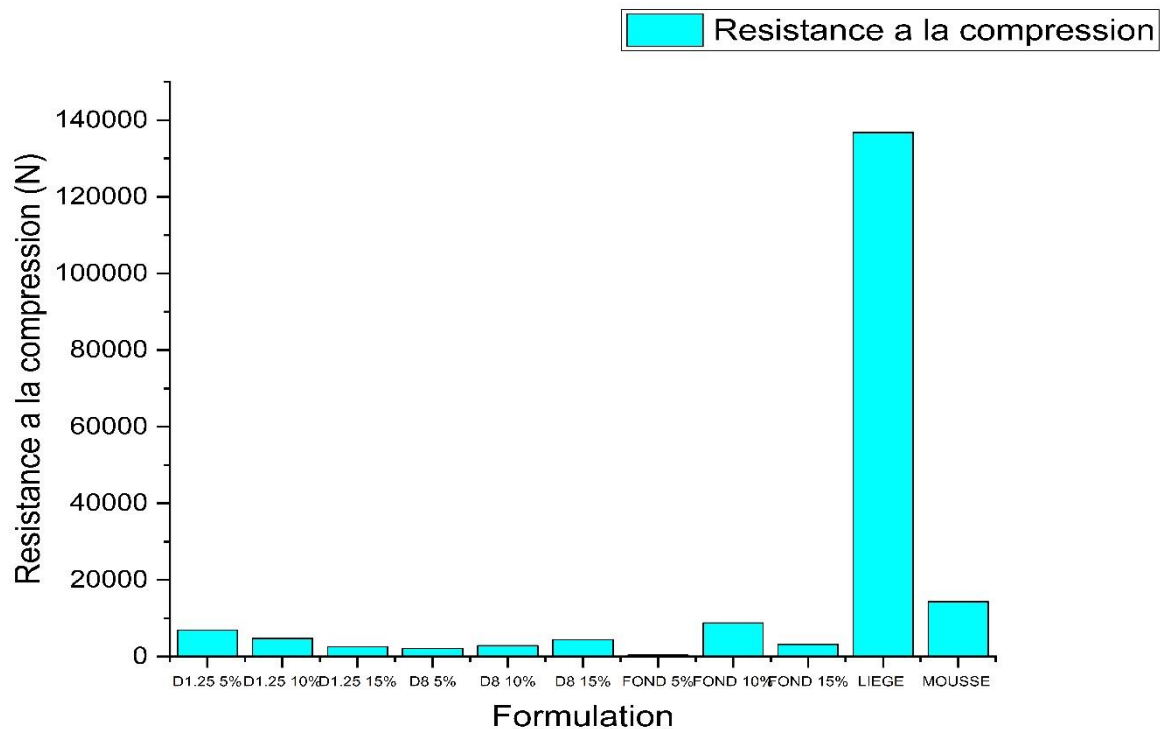


Figure IV-8: histogramme des résistances à la compression de la totalité des mélanges

Nous pouvons conclure à partir de cet histogramme récapitulatif que nous avons un segment de D 1.25 5% jusqu'à D 8 15% où la résistance augmente avec l'augmentation du pourcentage de granulats et l'augmentation du diamètre de celui-ci, et comme dit précédemment le mélange avec poudre de liège (fond de tamis) à 10% est le meilleur en niveau de résistances à la compression.

L'inclusion du granulat du liège a contribué à réduire les caractéristiques mécaniques de la mousse, cependant, elle a augmenté ses caractéristiques physiques, notamment la densité et le poids propre des spécimens.

IV.3 Résultats de la flexion trois point

Des essais de flexion 3-points sont effectués sur les mélanges préalablement puis finalement sur les panneaux multicouches de sections normalisées. Le chargement est appliqué à mi-travée du panneau composite et la distance entre appuis est de 6 cm. Les essais sont réalisés suivant la norme française NF T 54-606

➤ Mousse et liège

A partir des graphes de la figure IV.19, on peut remarquer que le comportement de la mousse est relativement ductile en traction et ceci est dû à sa grande capacité de déformation et flexibilité. Le liège est bien résistant à la traction, mais il présente une

chute considérable au-delà de sa capacité maximale, et ceci est causé par la décohésion de sa matrice granulaire.

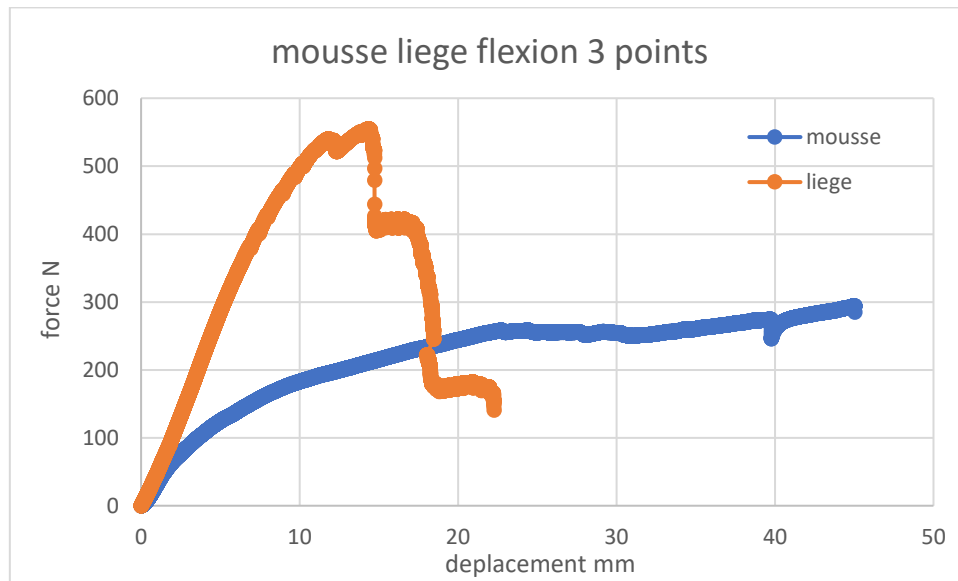


Figure IV-9: comportement du liège et de la mousse en flexion 3 points

➤ Mélange avec granulats diamètre 1.25 mm

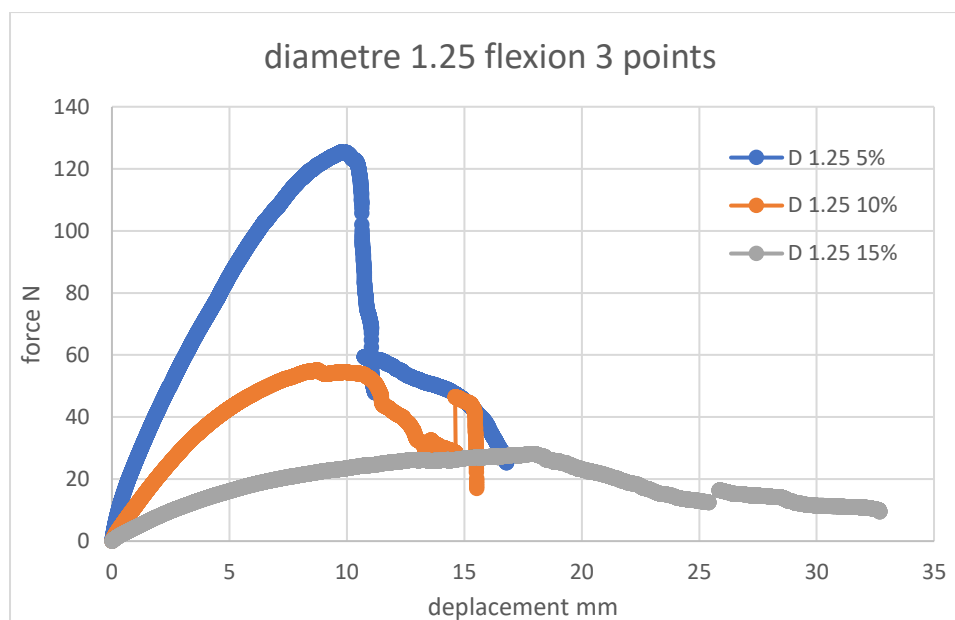


Figure IV-10: résistance à la flexion 3 points des mélanges selon le pourcentage de liège D 1.25

Nous pouvons déduire de ce graphique que le comportement du mélanges D 1.25 est le même que ce soit en compression ou en traction, ce qui peut aussi nous aider à consolider nos résultats en compression, que l'inclusion du granulat du liège a contribué à réduire la résistance des spécimens, cependant, elle a augmenté leur déformabilité.

➤ **Mélange avec granulats diamètre 8 mm**

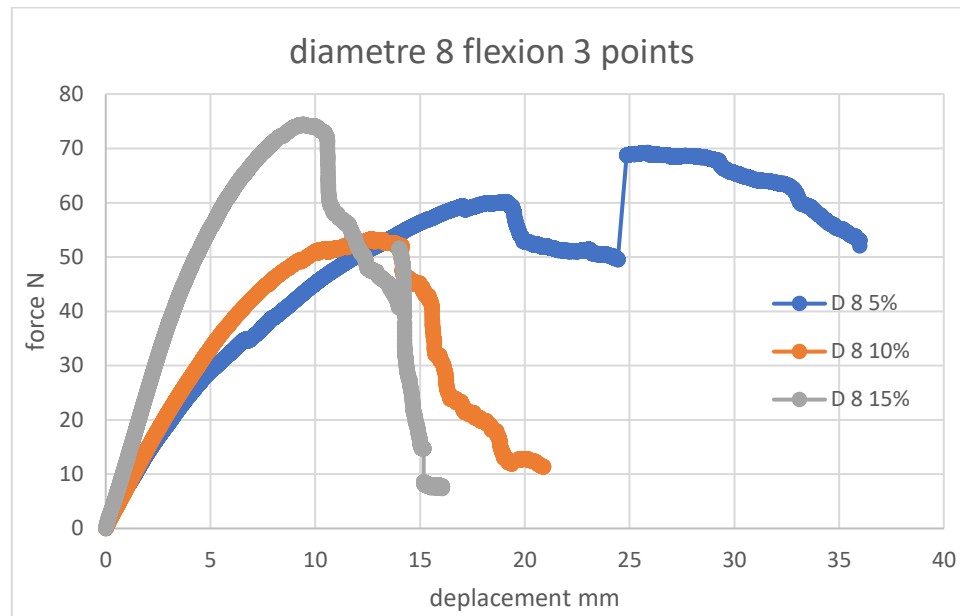


Figure IV-11: résistance à la flexion 3 points des mélanges selon le pourcentage de liège D8

On remarque sur ces courbes que les valeurs de la résistance à la traction du mélanges D8 mm sont très proche les unes des autres, ce qui peut nous laisser déduire que le liège a ce diamètre la n'influe pas sur les caractéristiques en traction du mélange.

➤ **Mélange avec poudre de liège (fond de tamis)**

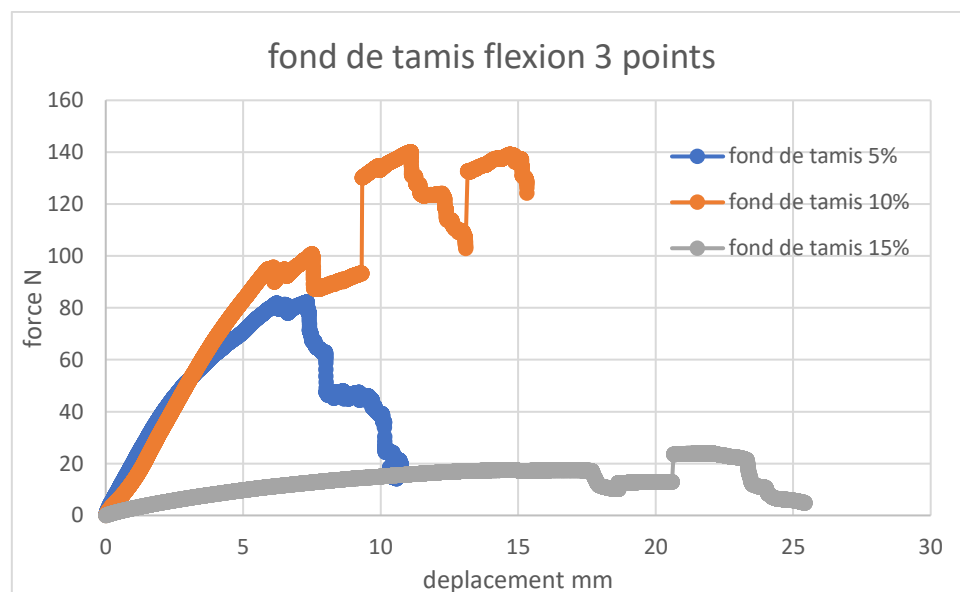


Figure IV-12: résistance à la flexion 3 points des mélanges selon le pourcentage de fond de tamis

Nous remarquons sur le mélange mousse et poudre de liège que la résistance à la traction et la plus importante avec un pourcentage de 10%, en nous remarquons aussi que de tous les mélanges réalisés jusqu'à maintenant c'est celui avec la résistance la plus importante, ce qui pourrait être dû au fait que le fond de tamis étant sous forme de poudre donc il se mélange mieux avec la mousse de ce fait, un mélange homogène donc compact.



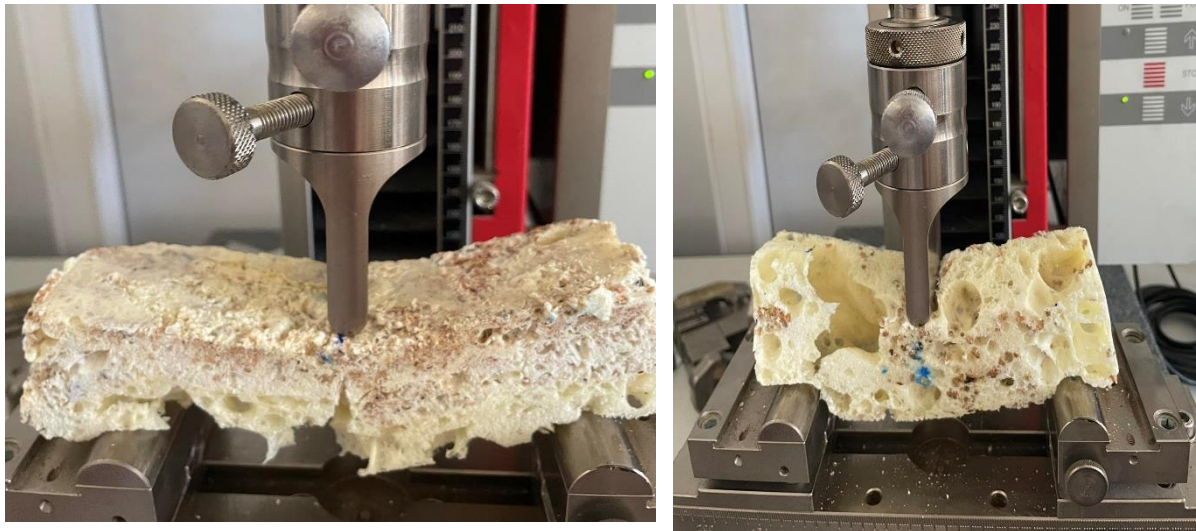


Figure IV-13: quelque exemple d'éprouvettes soumise à la flexion 3 points

Nous avons réalisé ensuite un histogramme récapitulatif des résistances de tous nos mélanges, ainsi qu'un tableau qui retrace les valeurs obtenues pour chaque éprouvette testée avec les écart-types.

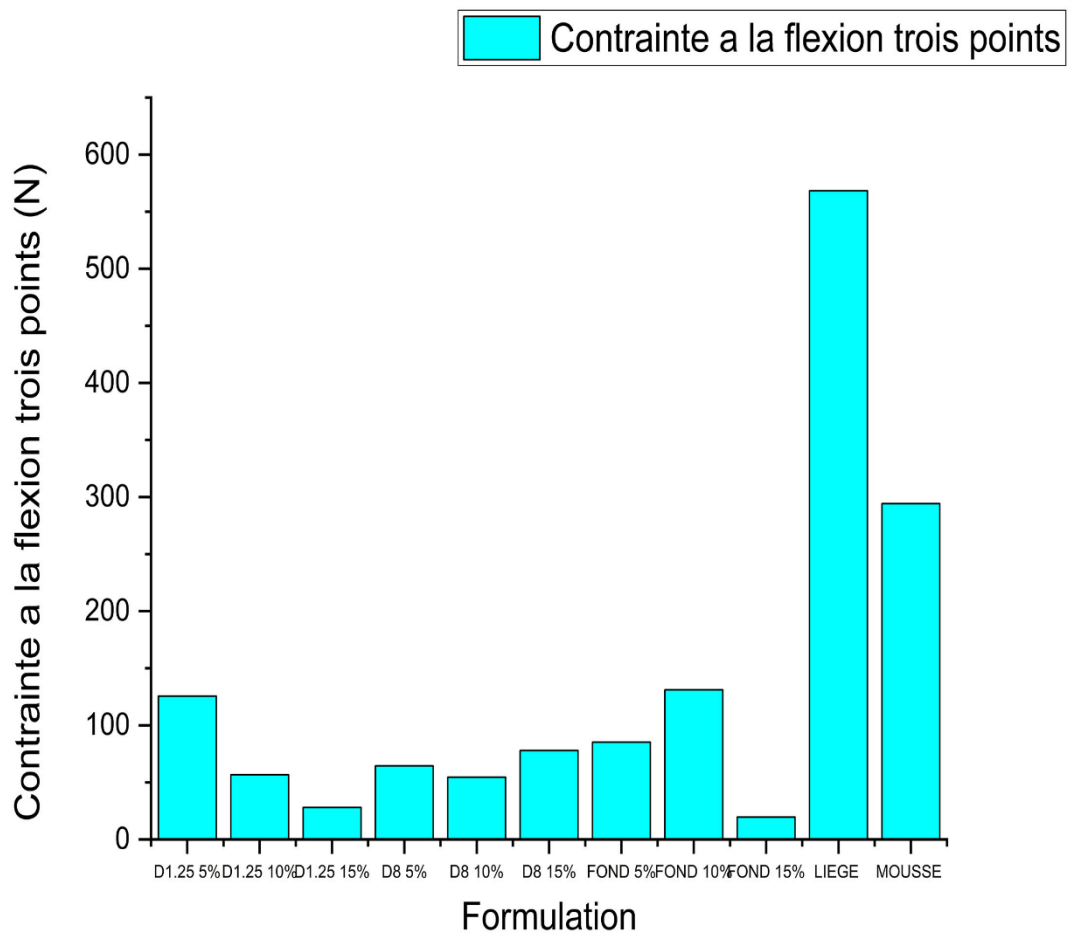


Figure IV-14: histogramme récapitulatif des résistances a la flexion 3 points

Tableau IV-3: tableaux récapitulatifs des résistances a la flexion 3 points

Diamètre du granulat du liège	Résistance à la flexion maximale (N)	Résistance à la flexion moyenne (N)	Ecart type (N)
D 1.25 5%-1	110.207	125.594	-0.0216
D 1.25 5%-2	142.972		-0.0280
D 1.25 5%-3	123.604		-0.1471
D 1.25 10%-1	63.878	56.691	-0.0070
D 1.25 10%-2	53.660		-0.0140
D 1.25 10%-3	52.535		-0.0070
D 1.25 15%-1	22.756	28.145	5.3137
D 1.25 15%-2	29.372		-0.0105
D 1.25 15%-3	32.309		-0.0115
D 8 5%-1	55.268	64.596	9.5765
D 8 5%-2	65.963		-0.0455
D 8 5%-3	72.559		-0.0501
D 8 10%-1	54.164	54.653	-0.0070
D 8 10%-2	50.215		0.0035
D 8 10%-3	59.581		-0.0077
D 8 15%-1	36.952	77.898	-0.0105
D 8 15%-2	104.177		-0.0035
D 8 15%-3	92.567		-0.0210
FOND 5%-1	70.872	85.264	-0.0245
FOND 5%-2	88.057		-0.0280
FOND 5%-3	96.863		-0.0308
FOND 10%-1	157.774	131.035	-0.0210
FOND 10%-2	139.093		-0.0420
FOND 10%-3	96.240		-0.0070
FOND 15%-1	9.450	19.648	-0.0035
FOND 15%-2	25.538		-0.0070
FOND 15%-3	23.958		3.4917
LIEGE -1	449.444	568.355	-0.0140
LIEGE -2	597.915		0.0070
LIEGE -3	657.706		0.0077
MOUSSE -1	262.455	294.387	-0.0070
MOUSSE -2	288.701		-0.0077
MOUSSE -3	332.006		-0.0088

Nous pouvons voir cet histogramme récapitulatif que nous avons un segment de D8 mm 10% jusqu'à fond 10% ou la résistance augmente avec l'augmentation du pourcentage de granulats et l'utilisation de fond de tamis jusqu'à 10%, et comme dit précédemment le mélanges fond de tamis a 10% et la meilleure configuration en niveau de résistances à la traction.

IV.4 Résultats des essais sur les panneaux sandwichs

Après la caractérisation mécanique des âme et semelles, des essais de flexion sont menés sur des panneaux sandwichs conçus à base d'âme en mousse avec ajout de liège et de semelle de PVC. Les panneaux sont dimensionnés selon la norme NF T54-606, avec les dimensions suivantes : Longueur totale : 370 mm, Largeur : 60 mm, Hauteur totale : 17 mm, Hauteur de l'âme : 15 mm, Epaisseur de la semelle : 1 mm.

Les panneaux testés ainsi que leur mode de rupture en flexion sont illustrés sur les figures suivantes :





Figure IV-15: illustration des panneaux soumis à la flexion 3 points :

En termes de comportement flexionnel globale, la confrontation des courbes force – déplacement de tous les panneaux testés ainsi qu'un récapitulatif de tous les résultats obtenus sont donnés sur les figures IV-15, IV-14, IV-13 et tableau VI-4 .

Tableau IV-4: résistances a la flexion 3 points des panneaux

Diamètre du liège en (mm)	Résistance à la flexion maximale (KN)	Résistance à la flexion moyenne (KN)	Ecart-type (KN)
D 1.25 -1	0.1498875	0.112471501	0.00551804
D 1.25 -2	0.09244143		-0.016145
D 1.25 -3	0.101685573		-0.0177595
D 8 -1	0.1140341	0.16085786	0.00285218
D 8 -2	0.175495		0.005559179
D 8 -3	0.1930445		0.006115097
FOND -1	0.149838	0.13549601	0.00609142
FOND -2	0.1222143		-0.000347418
FOND -3	0.13443573		-0.00038216
MOUSSE -1	0.1747628	0.2011518093	0.008553807
MOUSSE -2	0.19223908		0.009409188
MOUSSE -3	0.236454068		0.011573301

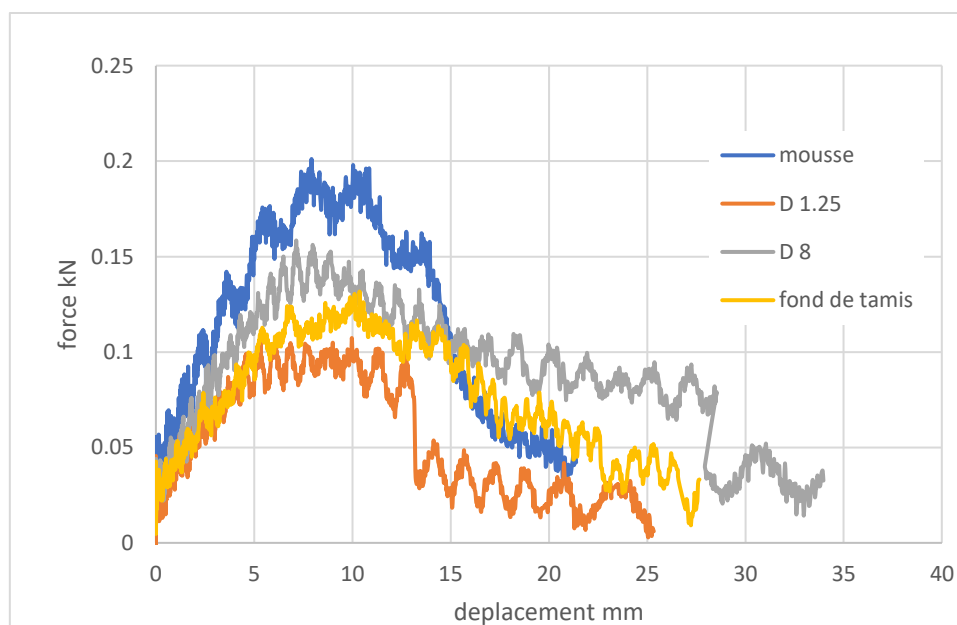


Figure IV-16 : graphique des résistances a la flexion 3 points des panneaux

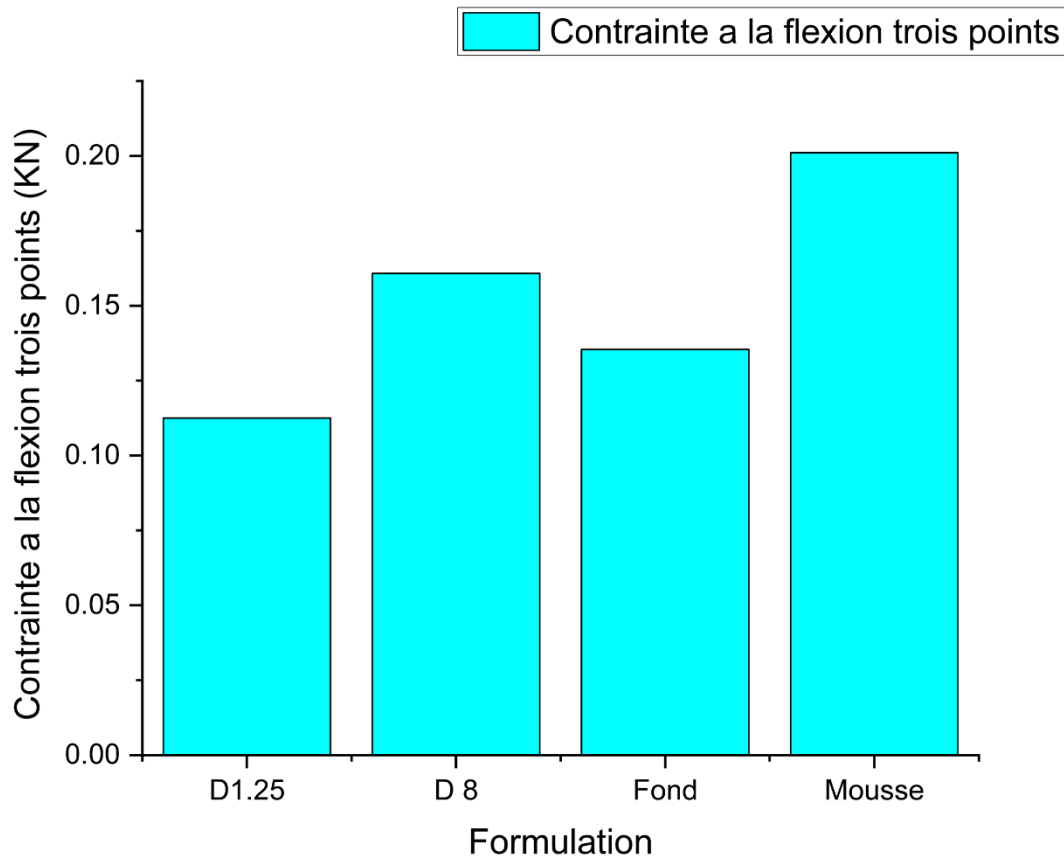


Figure IV-17:histogramme des résistances

Nous remarquons de ces graphiques que le comportement des panneaux multicouche en flexion 3 points est similaire à ceux étudiés dans la littérature scientifique avec des seuils de résistance très acceptables. Le panneau composé d'une âme en mousse sans granulats de liège présente une meilleure capacité portante. Si l'on s'intéresse aux panneaux contenant du liège, celui composé de poudre de liège (fond de tamis) est caractérisé par une bonne capacité de charge. Physiquement ceci est expliqué par la qualité de l'interaction entre le granulat de liège et la matrice en mousse, notamment dans la zone tendue, où les efforts de flexion se sont concentrés.

IV.5 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons exposé les résultats de l'étude expérimentale portant sur les caractéristiques des panneaux multicouches composites et des mélanges utilisés en situation de flexion et de compression. L'objectif de cette partie expérimentale était de déterminer la résistance des panneaux composites renforcés.

Les résultats de l'étude expérimentale ont démontré que les panneaux constitués uniquement de mousse ont affiché une meilleure résistance lorsqu'ils ont été soumis à des tests de flexion et de compression par rapport aux panneaux qui incluaient du liège

dans leur composition. Cette diminution de résistance des panneaux en mousse seule peut être attribuée à plusieurs facteurs :

- Propriétés mécaniques : La mousse utilisée peut avoir des propriétés mécaniques intrinsèques qui lui confèrent une plus grande résistance aux forces appliquées lors des essais de flexion et de compression.
- Densité : La densité de la mousse seule peut être optimisée pour offrir une meilleure résistance sans ajouter d'autres matériaux, tandis que l'ajout de liège peut entraîner une augmentation de la densité globale du panneau, ce qui peut réduire sa résistance.
- Liaison des couches : La mousse seule peut avoir une meilleure adhérence avec le PVC, favorisant une meilleure transmission des forces appliquées, tandis que l'ajout de liège peut entraîner des interférences dans la liaison entre les couches et affaiblir la structure globale.
- Compatibilité des matériaux : La mousse peut être plus compatible avec les autres matériaux utilisés dans le panneau composite, ce qui améliore la cohésion globale du matériau et, par conséquent, sa résistance.

Cependant, il est important de noter que ces résultats peuvent dépendre des spécificités des matériaux utilisés, des configurations de renforcement et des méthodes d'essai employées dans l'étude expérimentale. Il est également essentiel de prendre en considération que lors des tests sans la plaque de PVC c'est le mélange avec du fond de tamis qui possède la meilleure résistance, ce qui peut montrer que les dimensions et la quantité du composant influe sur la résistance.

Conclusion générale

Conclusion générale

Dans cette étude expérimentale menée au laboratoire de Génie Civil de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou et de l'unité de recherche de l'université de Boumerdes, notre objectif principal était de mettre en évidence le comportement mécanique et physique des panneaux sandwichs multicouches fabriqués à partir de matériaux naturels. Pour cela, nous avons développé des structures composites qui se distinguent à la fois par un coût de production abordable et une empreinte écologique favorable. Ces panneaux ont été élaborés en utilisant une matrice en mousse combinée à des granulats de liège en tant qu'âme, tandis que les plaques en PVC ont été utilisées comme semelles.

En effet, ces panneaux ont été soumis à des charges en flexion à trois points et en compression, et les processus d'amorçage et de propagation des fissures ont été étudiés. Tous les résultats obtenus ont été présentés, notamment une comparaison des courbes force-déplacements et des histogrammes pour évaluer la résistance et le déplacement maximal des panneaux chargés. L'objectif était de mettre en évidence les performances mécaniques des structures composites développées.

Au cours de cette étude, nous avons examiné attentivement l'influence du pourcentage et du diamètre des granulats de liège sur les caractéristiques mécaniques des panneaux multicouches. Nous avons cherché à déterminer comment ces paramètres affectent les performances des panneaux composites et leur résistance face aux charges appliquées. En analysant différentes combinaisons de pourcentages et de diamètres de granulats de liège, nous avons pu mieux comprendre comment ces facteurs influent sur les propriétés mécaniques globales des panneaux multicouches. Les résultats de cette analyse ont permis de mettre en évidence l'importance de ces paramètres dans la conception et la fabrication de panneaux composites renforcés. Enfin, les constatations suivantes sont mises en évidence :

- L'effet global de ces panneaux composites multicouches, a montré une bonne performance en tant que composants non structurels, destiné pour une utilisation potentielle comme cloisons de séparation et des panneaux de séparation dans le bâtiment ;
- La confrontation qualitative et quantitative montre que les panneaux élaborés s'accordent bien avec ceux disponibles dans la littérature scientifique ;
- L'inclusion du granulat du liège a contribué à réduire les caractéristiques mécaniques de la mousse, cependant, elle a augmenté ses caractéristiques physiques, notamment la densité, la compacité et la dureté des spécimens ;
- L'inclusion du granulat du liège avec des diamètres modérés permet d'améliorer la cohésion et la qualité de l'interface entre la mousse et le liège ;

- Les résultats suggèrent ainsi la possibilité d'utiliser ce type de panneaux dans diverses applications telles que des séparations, des isolations, et d'autres utilisations liées aux maçonneries.
- Vue que le liège possède une bonne transmission d'onde son ajoutés dans nos éprouvette donne aussi une augmentation de la transmission avec l'augmentation du pourcentage.
- Même en ajoutant du liège au niveau de l'âme nous n'avons pas eu de bonne résistance comparativement a celle du sandwich fait en mousse mais cela permet d'améliorer le comportement physique des éprouvettes.
- Ces panneaux pourraient offrir des alternatives intéressantes et respectueuses de l'environnement pour des applications pratiques.

À l'avenir, il serait pertinent de continuer ces recherches en explorant différentes variations du type de mousse ou des matériaux de semelle, afin de comprendre leur impact sur le comportement des panneaux fabriqués. Ces panneaux obtenus pourraient également faire l'objet d'une étude thermique et acoustique approfondie. L'analyse thermique des divers échantillons permettrait d'évaluer leur comportement face à des variations de température, tandis que l'étude acoustique pourrait aider à comprendre leur performance en matière d'isolation sonore. Ces approfondissements contribueraient à enrichir notre compréhension des propriétés et des applications potentielles des panneaux composites étudiés.

Références Bibliographique

Références bibliographique

- [1] Lakreb. N « Élaboration, caractérisation thermomécanique et hygrothermique d'un composite sandwich multicouches à base de liège et bois de déroulage » Thèse de Doctorat, Université M'Hamed Bougara – Boumerdes 2015
- [2] Marouene .A. « Comportement sous choc des composites sandwichs et influence des paramètres des matériaux et du test » : Mémoire pour Maîtrise. -Montréal : Ecole Polytechnique de Montréal, 2010
- [3] B. castanié « contribution à l'étude des structures sandwichs dissymétriques » Ecole national supérieur de l'aéronautique et de l'espace, 2006
- [4] forum <http://worldwartwozone.com/forums/index.php?/topic/6307-dehavilland-dh-98-mosquito/>
- [5] Gibson L. J., Easterling K. E., Ashby M. F., « The structure and mechanics of cork». Proceeding of the Royal Society of London A, 377 : 99-117, (1981).
- [6] Sotehi. N « Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L'isolation », Thèse de doctorat Université Mentouri - Constantine 2010
- [7] Gibson L. J., Ashby M. F. « Cellular solids: structure and properties», 2nd edn, 453–467, Cambridge, Cambridge University Press, (1997).
- [8] LACHGUER Abdelkarim AKYOUN Mohamed « les matériaux sandwich et les risques d'instabilités géométriques locales » étude bibliographique, Ecole Des Mines De Douai, 2014
- [9] KIMPALA I., et al., "Design and evaluation of advanced composite honeycomb sandwich structures for marine uses," ed: EMAS, 1989, pp. 37-46.
- [10] WEISSMAN-BERMAN D., "Marine sandwich structures, Part 1," SAMPE journal, vol. 28, juillet/août 1992.
- [11] KIMPALA I., et al., "Design and evaluation of advanced composite honeycomb sandwich structures for marine uses," ed: EMAS, 1989, pp. 37-46.
- [12] ROUAM Kamila, « Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles », Université M'hamed Bougara-Boumerdes, 2014.
- [13] Berthelot J. M, « Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures », 4 éme édition, 1996.
- [14] ZABIA Mohamed Said « Etude du comportement mécanique des structures multicouches en flexion par éléments finis » mémoire de fin d'étude Université M'hamed Bougara Boumerdes le 07/06/2015.

- [15] Reid Evrard Ngouama Ngolo 2014, « Mise en Œuvre et Caractérisation du Comportement Mécanique d'un Eco-Matériau Sandwichs », Mémoire de Master, Université de Technologie de TROYES.
- [16] KESKES Boualem « comportement en fatigue des composites types sandwich en Nid d'abeille » thèse doctorat, Université Ferhat ABBAS – Sétif Décembre 2007.
- [17] ASTM Standard, C393-62. “Standard Test Methods for the Flexural Properties of Flat Sandwich Constructions”. Annual Book of Standards, Section 15, ASTM, 1999.
- [18] ASTM Standard, C273-94. “Standard Test Methods for the shear Properties of core Sandwich Constructions”. Annual Book of Standards, Section 15, ASTM, 1999.
- [19] Military standardization “Handbook manufacture and inspection of adhesive bonded aluminium honeycomb sandwich assemblies for aircraft”, 30 September 1994 MIL –HDBK-349.
- [20] NF T 54-602, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de la compression perpendiculaire ». Afnor 83647 ; Novembre (1983).
- [21] Lakreb N, Bezzazi B, Pereira H. Mechanical behavior of multilayered sandwich panels of wood veneer and a core of cork agglomerates. Materials and Design 2015; 65:627–636
- [22] NF T 54-603, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de traction perpendiculaire », Afnor 83648 ; Novembre (1983).
- [23] NF T 54-604, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de la compression longitudinale sans ou avec flambage », Afnor 86618 ; Décembre (1986).
- [24] NF T 54-605, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de cisaillement », Afnor 83650 ; Novembre (1983).
- [25] NF T 54-606, Norme Française, « Structures sandwich à base de plastique, essai de flexion. Afnor 87461 ; Octobre (1987).
- [26] Wikipedia. Définition de flambage <http://fr.wikipedia.org/wiki/Flambage>.2019.
- [27] BENFADEL Karima « Élaboration et caractérisation de panneaux sandwichs à matrice cimentaire destinés à la construction », Mémoire de Magister Université M'HAMED BOUGARA-BOUMERDES 2014/2015.
- [28] REYNE M. « Technologies des composites ». (3ème édition revue et augmentée). -Paris : HERMES, 1998. - 222 p.
- [29] Jamal Eddine ARBAOUI « Étude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches » thèse doctorat, Université Paul Verlaine – METZ 2009.

- [30] Lakreb N., Bezzazi B., Pereira H., « Mechanical strength properties of innovative sandwich panels with expanded cork agglomerates». European Journal of wood and Wood Products. Springer Berlin Heidelberg. 10 Apr 2015. DIO 10. 1007/s00107-0150908-y.1=31
- [32] Jin Dai, Hahn H., Flexural behavior of sandwich beams fabricated by vacuum-assisted resin transfer molding composite structure, 61: 247-253, 2003.
- [33] Petras, M.P.F. Sutcliffe, "Indentation failure analysis of sandwich beams", Composite Structures, v. 50, (2000), pp. 311-318.
- [34] Triantafillou T.C. and Gibson L.J. "Failure mode maps for foam core sandwich beams" Materials Science and Engineering, Vol. 95, (1987), pp 37-53.
- [35]. Steeves, C.A. and Fleck, N.A. (2004). Collapse Mechanisms of Sandwich Beams with Composite Faces and a Foam Core, Loaded in Three-point Bending. Part I: Analytical Models and Minimum Weight Design, International Journal of Mechanical Sciences, 46(4): 561–583.
- [36]. Steeves, C.A. and Fleck, N.A. (2004). Collapse Mechanisms of Sandwich Beams with Composite Faces and a Foam Core, Loaded in Three-point Bending., International Journal of Mechanical Sciences, 46(4): 585–608.
- [37] A. Petras and M. P. F. Sutcliffe, (1999)."Failure mode maps for honeycomb sandwich panels" Composite, v.44, (1999), pp 237-252.
- [38] Petra, M.P.F. Sutcliffe, "Indentation failure analysis of sandwich beams", Composite Structures, v. 50, (2000), pp. 311-318
- [39] Lee, S.M. and Tsotsis, T.K. (2000). Indentation Failure Behavior of Honeycomb Sandwich Panels, Composites Science and Technology, 60(8): 1147–1159.
- [40] Hexcel Composite. HexWeb tm honeycomb sandwich design technology.<http://www.hexcelcomposite.com>, 2004.
- [41] Mathilde Jean-St-Laurent « Effets des cycles extrêmes de température sur le comportement des matériaux composites », université Laval Québec, Canada 2014.
- [42] Ge Qi, Li Ma, Experimental investigation of composite pyramidal truss core sandwich panels with lightweight inserts, Center for Composite Materials, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, PR China, 2019.
- [43] K. Mak, A. Fam, Performance of flax-FRP sandwich panels exposed to different ambient temperatures Construction and Building Materials 219 (2019) 121–130
- [44] Limam A., « Essai d'amélioration de la qualité des panneaux de particules produit à l'unité de Khenchela ». Mémoire d'Ingénieur. Forest. Université de Tlemcen. 112p, (1990).

- [45] Mr. HAMI Brahim « Elaboration et caractérisation physico-mécanique d'une structure sandwich multicouches » thèse doctorat, Université M'hamed Bougara Boumerdes 2017/2018.
- [46] X. Zhai et al. Thermal performance of precast concrete sandwich walls with a novel hybrid connector / Energy & Buildings 166 (2018) 109–121
- [47] CHERIF MOUAKI Abdesalem « comportement mécanique d'un matériau composite sandwich » mémoire de fin d'étude Université Mohamed Kheider-Biskra soutenue le 31/05/2017.
- [48] https://www.podcastscience.fm/wp-content/uploads/2020/09/ps422_coupe1.jpg
- [49]- Viet Anh Nguyen Trung Multi renforcement du bois lamellé collé - étude théorique et expérimentale septembre 2010 https://www.researchgate.net/figure/De-larbre-au-comportement-anisotropie_fig4_277111789
- [50]-S.P.Silva^{1,2},M.A.Sabino^{1,2},E.M.Fernandes²,V.M.Correlo²,L.F.Boesel² and R.L.Reis Cork:properties,capabilitiesandapplications
- [51] Rapport_filiere-chanvre-Nouvelle-Aquitaine.pdf
- [52] Benjamin Niez, Acclimatation de l'arbre aux flexions répétées et conséquences sur le comportement mécanique et les propriétés hydrauliques du bois vert : Biologie végétale, Décembre 2018https://www.researchgate.net/figure/Les-trois-plans-de-reference-formant-le-plan-ligneux-Moutee-2006-R-T-L_fig1_331627249
- [53] L. SERVAI S L'INDUSTRI E DES HUILE S E T DU GUAN O D E POISSON <https://www.istockphoto.com/fr/photo/sciure-de-bois-gm163267447-23312977> Janvier 1902
- [54] memoire zegrou 2019 tableau caractéristique mousse UMMTO
- [55] - Mamadou Abdoul MBACKE. Caractérisation et modélisation du comportement mécanique des composites tressés 3D : Application à la conception de réservoirs GNV. T H È S E de doctorat de l'École nationale supérieure des mines de Paris, 2013
- [56] Master 2 DSME Responsable du cours: P. Vannucci Introduction aux Cours Matériaux Composites Partie: Anisotropie et mécanique des stratifiés.2010
- [57] Study of Composite Sandwich Structure and Bending Characteristics– A Review G.R. Rayjade†* and G.V.R. Seshagiri Rao†
- [58] Fahmi Alila Analyse de la tenue en fatigue de structures composites sandwich decembre 2017
- [59] Abdelmadjid SI SALEM (2016) ; Développement d'une poutre en béton-composite : analyse expérimentale et modélisation ; Thèse de doctorat de l'université de Tizi Ouzou.

- [60] S. Djenad, S. Ait Taleb, A. Si Salem and M. A. Bouzidi “NLFEA based design optimization of GFRP strips in partially confined concrete” *Procedia Structural Integrity* (2022) 37 321-329
- [61] S. Medjmadj, A. Si Salem and S. Ait Taleb. Experimental behavior of plaster/cork functionally graded core sandwich panels with polymer skins. *Construction and Building Materials* 344 (2022) 128257
- [62] C. Ali Ahmed, A. Si Salem, S. Ait Taleb and K. Ait tahar. Experimental behavior and reliability of pre-damaged concrete columns externally repaired with FRP spiral strips under axial compression/ *World journal of engineering* 2022 <https://www.emerald.com/insight/content/doi/10.1108/WJE-06-2022-0248/full/html>
- [63] A. Si Salem, S. Djenad and S. Ait Taleb. Experimental Axial Compressive Behavior of Partially Confined Concrete Columns with Combined External and Internal FRP Strips. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 2022 Volume 21, Pages 356-362
- [64] S. Ait Taleb, S. Medjmadj and A. Si Salem. Modeling the Nonlinear Behavior of Predamaged Reinforced Concrete Beams Retrofitted with Bonded and Jacketed FRP Sheets. *The Eurasia Proceedings of Science, Technology, Engineering & Mathematics (EPSTEM)*, 2022 Volume 21, Pages 288-294
- [65] Si Salem A, Ait Taleb Souad & Ait tahar K « Static and dynamic behavior of composite concrete-based beams with embedded Polymer/FRP Components » *Procedia Engineering*, 114C, 2015, 173-180.
- [66] S. Ait Taleb, Abdelmadjid Si Salem & Kamal Ait tahar “Behaviour of a new graded beam reinforced with externally bonded composite sheets”, *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 21(9), 2016 1171-1185.
- [67] S. Ait Taleb, A. Si Salem and K. Ait tahar. “Bending and shear behavior of a composite beam strengthened and double-confined with FRP-jacket”, *Procedia Engineering*, 114(C), 2015, Pages 165-172.
- [68] S. Ait Taleb, A. Si Salem and K. Ait tahar. “Experimental and theoretical modeling coupled to a reliability approach for flexural failure prediction in hybrid composite beams” *Asian Journal of Civil Engineering* (2020) 21:495–504
- [69] S. Djenad et al. Finite element modeling of partially-confined concrete and RC columns with embedded hexagonal-FRP strips under axial and horizontal loading. *Structures* 54 (2023) 369–385
- [70] Si Salem, A., et al: Experimental and statistical investigation of a new concrete-composite beam with encased polymer tube wrapped by FRP, *Frontiers of Structural and Civil Engineering*. 9(2), 154–162 (2015).
- [71] Si Salem. A, Ait Taleb. S and Ait tahar. K. « A finite element approach for predicting the flexural response of light weight FRP-Concrete beams under cyclic

loading » Applied Mechanics, Behavior of Materials, and Engineering Systems, Lecture Notes in Mechanical Engineering, (2017), 355-363

[72] Abdelmadjid SI SALEM, Fatma TAOUCHE-KHELOUI, Kamal AIT TAHAR, “Experimental investigation on the bending and buckling behavior of bio-based core innovative sandwich panels” International journal of structural integrity” 2020, Vol. 12 No. 2, pp. 226-240.

[73] Sharan Sivakumar, B. Navin Kumar, Enhancement of bending strength of polyurethane foam reinforced with basalt fiber with silica nanoparticles in comparison with plain polyurethane foam, Materials Today: Proceedings, Volume 79, Part 1, 2023, Pages 69-74, ISSN 2214-7853,

[74] Yuezhaopang, Xiaojun Yan, Jia Qu, Linzhi Wu, Dynamic response of polyurethane foam and fiber orthogonal corrugated sandwich structure subjected to low-velocity impact, Composite Structures, Volume 282, 2022, 114994, ISSN 0263-8223,

[75] Hesham Tuwair, Matthew Hopkins, Jeffery Volz, Mohamed A. ElGawady, Mohaned Mohamed, K. Chandrashekhara, Victor Birman, Evaluation of sandwich panels with various polyurethane foam-cores and ribs, Composites Part B: Engineering, Volume 79, 2015, Pages 262-276, ISSN 1359-8368,

[76] Megavannan Mani, M. Thiyagu, Pradeep Kumar Krishnan, Experimental investigation of Kevlar/carbon/glass/polyurethane foam epoxy hybrid sandwich composites with nano silicon particles in low-velocity impact events, Materials Today: Proceedings, 2023,, ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.03.209>.

[77] N. Gama, A. Ferreira, A. Barros-Timmons, 3D printed cork/polyurethane composite foams, Materials & Design, Volume 179, 2019, 107905, ISSN 0264-1275,

Résumé

Les recherches dans le domaine de nouveaux matériaux de construction connaissent actuellement un essor très important. En effet, amples procédés et techniques sont développés dans la littérature scientifique pour réduire la consommation ou la déperdition énergétique. Pour cela, les structures sandwiches multicouches reçoivent une attention considérable et deviennent de plus en plus incontournables, grâce à leurs rapports : rigidité-poids, résistance élevée, capacité d'absorption d'énergie, ainsi que leur excellente durabilité. Ces structures sont destinées à des applications d'isolation de toiture et de parois de cloison, permettant ainsi d'améliorer les propriétés thermiques et acoustiques de la structure. Par conséquent, dans le présent travail, nous allons nous intéresser à élaborer et analyser expérimentalement une nouvelle structure sandwich constituée : d'une âme à base d'une mousse polyuréthane avec des ajouts granulaires issus de la récupération des déchets de liège et des semelles en PVC.

L'objectif principal de cette étude se résume sur la valorisation et recyclage des déchets de liège pour développer un nouveau matériau de construction durable et thermiquement isolant avec un seuil de résistance et de rigidité acceptable. En effet, ces panneaux ont été soumis à des charges en flexion à trois points et en compression, et les processus d'amorçage et de propagation des fissures ont été étudiés. Au cours de cette étude, nous avons examiné attentivement l'influence du pourcentage et du diamètre des granulats de liège sur les caractéristiques mécaniques des panneaux multicouches. Nous avons cherché à déterminer comment ces paramètres affectent les performances des panneaux composites et leur résistance face aux charges appliquées. En analysant différentes combinaisons de pourcentages et de diamètres de granulats de liège, nous avons pu mieux comprendre comment ces facteurs influent sur les propriétés mécaniques globales des panneaux multicouches.

Tous les résultats obtenus ont été présentés, notamment une comparaison des courbes force-déplacements et des histogrammes pour évaluer la résistance et le déplacement maximal des panneaux chargés. L'objectif était de mettre en évidence les performances mécaniques des structures composites développées.

Mots clés : Panneaux sandwichs, Valorisation des déchets, Mousse polyuréthane, Granulats de liège, Semelles PVC, Caractérisation expérimentale, Isolation thermique.