

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

UNIVERSITE MOULOU D MAMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE CIVIL

LABORATOIRE : LAMOMS



EN VUE DE L'OBTENSION DU DIPLOME DE MASTER
ACADEMIQUE EN GENIE CIVIL

Option : Structures et Matériaux

THEME

**Caractérisation expérimentale du
comportement des
panneaux composites multicouches**

Promotrice :

M^{me} F.KHELOUI

Réalisé par :

M^{lle} KOULOUGHALI Yamina

Promotion 2016




REMERCIEMENT

Tout d'abord je remercie avant tous, Dieu clément et miséricordieux de m'avoir donné la force, le courage, la patience durant cette étude, et la volonté pour atteindre mon objectif.

*Je tiens à exprimer mes vifs remerciements à ma promotrice **M^{me} KHELOUI FATMA** pour ses encouragements, et son aide durant la période de réalisation de ce modeste travail.*


*Je voudrais aussi remercier le professeur **AIT TAHARKAMAL**, pour, ses orientations, son savoir, et son soutien durant toute la période de réalisation de ce travail.*



*Je tiens à exprimer mes remerciements au **Dr SI SALEM ABDELMADJID**, pour ses conseils, son aide, sa gentillesse et son soutien.*

*Mes remerciements vont également aux responsables et Personnels du Laboratoire Modélisation Expérimentale Matériaux et Structures, Université Mouloud **MAMMERRI**, en Génie Civil de TIZI OUZOU, en particulier à Monsieur **MAMMOU MOHAND** pour sa précieuse aide dans la réalisation de la partie expérimentale.*

*Mes vifs remerciements vont également aux **membres du jury** pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce travail. Et qui nous feront le plaisir d'apprécier et de l'enrichir par leurs propositions.*





DEDICACES

Je tiens à dédier ce travail aux personnes les plus chères à mon cœur, ma mère FATEMA qui a su être à mes côtés dans les moments difficiles sans laquelle je n'aurai pas abouti à ce stade d'étude, ainsi que chaque instant de bonheur qu'elle m'a procurée, à mon père SAÏDE, car c'est grâce à leurs soutiens que j'ai pu arriver à ce stade ; je souhaite que ce travail soit à la hauteur de tout ce qu'ils ont pu faire pour moi. Fasse Dieu que je puisse les honorer.

À ma grande sœur BAHIA qui m'a encouragé et aidé durant la réalisation de ce travail, à toutes mes sœurs : WASSILA, NAWEL, FAHIMA, NASSIMA, et RADIA, à mon frère KARIM.

À mes nièces : MELISSA, IKRAME, IMENE, LINA, WISSAME, LIDIA, et la petite MELINA.

À mes neveux : ABDERAHIM, SEIFEDINE, YANIS et YOUNES.

À mon fiancé MOHAMED AMINE, qui m'a beaucoup encouragé durant la réalisation de ce travail et qui était toujours présent dans mes moments difficiles.

À mes chères beaux parents FATIMA et SAÏDE.

À la mémoire de ma nièce KAOT HAR NOUR EL HODA.

À ma famille.

À mes amis : Imene, Hamid, Wardia, Kadidja, et tous les autres.

À mes collègues : BRAHIM, LAMARA, et ANISSA.

À tous ceux qui me sont chères.

YAMINA



SOMMAIRE

Introduction Générale	1
------------------------------------	---

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

I.1 Introduction	3
I.2 Matériaux composites	3
I.3 Les composants élémentaires des matériaux composites	4
I.3.1 Matrices	4
I.3.1.1 Les matrices organiques	5
I.3.1.2 Les matrices métalliques	6
I.3.1.3 Les matrices céramiques	6
I.3.2 Renforts	7
I.3.2.1 Les fibres de verre	7
I.3.2.2 Les fibres métalliques ou céramiques	8
I.3.2.3 Les fibres de bore	8
I.3.2.4 Les fibres de carbone.....	8
I.3.2.5 Les fibres de polymère	8
I.3.2.6 Fibres naturelles	9
I.3.2.7 Architecture des fibres	9
I.3.2.8 Les microbilles pleines ou creuses	10
I.3.2.9 Les principaux renforts minéraux.....	10
I.4 Mise en forme	10
I.5 Quelques exemples de matériaux composites	11
I.5.1 Les composites naturels	11
I.5.2 Les composites artificiels	12
I.6 Applications des matériaux composites	12
I.7 Les matériaux composites structuraux	12
I.7.1 Les monocouches	12
I.7.2 Structures composites stratifiées	13
I.7.3 Désignation structures sandwiches	15

I.7.3.1 Structures sandwiches symétrique.....	15
I.7.3.2 Structures sandwich dissymétriques.....	16
I.7.4 Constituants des matériaux multicouches	17
I.7.5 Structures composites tissées multidirectionnelles	17
I.7.6 Le composite 2D SiC-SiC	18
I.7.7 Le composite Aerolor 32 C/C	19
I.8 L'adhésif de l'interface	20
I.9 Endommagements des composites	20
1.9.1 Mécanismes d'endommagement	21
I.10 Environnement	21
I.11 Conductivité thermique	22
I.12 Comportement des multicouches	22
I.12.1.Flexion trois-points	22
I.12.2 Comportement des multicouches en flambement	25
I.13 Conclusion	27

CHAPITRE II : MATERIAUX D'AME DES MULTICOUCHES

II.1 Introduction	28
II.2 Une bonne réponse au développement durable	28
II.3 Le liège	29
II.3.1 Définition	29
II.3.2 Le Liège : Description, formation et composition	30
II.3.2.1 Description	30
II.3.2.2 Formation du Liège	31
II.3.2.3 Composition du Liège	33
II.3.2.4 Composition chimique	33
II. 3. 3 Domaine d'utilisation du Liège	36

II.3.4 Du Liège pour l'isolation	37
II.3.5 L'isolation thermique.....	37
II.3.6 L'isolation phonique	37
II.3.7 Composite liège-plâtre	39
II.3.8 Mortier polymère léger avec granulés de liège	39
II.4 Le chanvre	40
II.4.1 Brique de chanvre	42
II.4.2 Le béton de chanvre	42
II.4.3 Le chanvre matériau isolant issu de l'agriculture	44
II.5 Les résines végétales	45
II.6 Scieur de bois	45
II.6.1 Définition	46
II.6.2 Le béton bois	46
II.6.3 Les Farines de bois	47
II.6.4 Les copeaux de bois	47
II.7. Les résines époxydes, historique	48
II.7.1. Processus de polymérisation	48
II.7.2. Les paramètres de formulations d'un système résine époxy / durcisseur pour le bois	49
II.8. Théorie du collage du bois à l'époxy	50
II.8.1. L'adhérence spécifique	51
II.8.2 Comparatif bois / matériaux en flexion statique 3 points	53
II.9. Le bois est utilisé en tant que matériau d'âme	54
II. 10. Les méthodes d'assemblages en bois / époxy	55
II.11. Conclusion	56

CHAPITRE III : PROCEDURE EXPERIMENTALE ET MATERIAUX

III.1. Introduction	57
III.2.Présentation des matériaux étudiés	57
III.2.1 Le mortier	57
III.2.1.1 Ciment	57
III.2.1.2 Sable	58
III.2.1.3 L'eau	58
III.2.2 La sciure de bois	58
III.2.3 Le Liège	59
III.3. Préparation des panneaux multicouches composites	60
III.3.1. Matériaux utilisés	60
III.3.2 Préparation et fabrication des moules	61
III.3.3 Malaxage et mise en œuvre du mortier	62
III.3.4 Moulage au contact	62
III.3.5 Matériaux des renforts	63
III.3.5.1 Le polymère (PVC).....	63
III.3.5.2 Le polypropylène	63
III.3.6 Additif	64
III.3.6.1 Résine époxyde	64
III.3.7 Association des couches composites	64
III.4. Présentation des essais mécanique	67
III.4.1 Machine d'essais	67
III.4.2 Essais de compression et de flexion	67
III.5. Conclusion	68

CHAPITRE IV : INTERPRETATION DES RESULTATS

IV.1. Introduction	69
IV.2. Résultats de la flexion trois point	69
IV. 3. Comportement des multicouches en flexion	69
IV.4. Résultats du flambement	75
IV.5. Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux composites	75
IV.6. Conclusion	81

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE I :

Figure I.1 : Exemples de multi-matériaux : (a) un composite carbone/époxy, (b) un bétonarmé, (c) du bois vu au microscope optique, (d) une lame d'acier de Damas	4
Figure I.2 : Types de matrice	5
Figure I.3 : Les structures géométriques des composites :(a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c)particules	7
Figure 1.4 : Types de renfort	7
Figure I.5 : géométrie des renforts	9
Figure I.6 : Géométrie des tissus multidirectionnels	10
Figure I.7. Constitution d'une structure composite monocouche [65].....	13
Figure I.8 :Stratifié constitué de couches parfaitement liées.....	14
Figure I.9 : désignation d'une structure composite stratifiée	14
Figure I.10 : Désignations du stratifié	15
Figure I.11 : Principaux constituants d'une structure sandwich symétrique.....	15
Figure I.12 : Comparaison des caractéristiques mécaniques en flexion (rigidité et résistance) et des masses de trois structures : une plaque et deux sandwiches	16
Figure I.13: Constituants d'une structure sandwich dissymétrique.....	17
Figure I.14 :Désignations d'une âme nid d'abeilles.....	18
Figure I.15 : 2D Sic-Sic : matériau avec deux directions de renfort	19
Figure I.16 :Géométrie tri-orthogonale de l'Aerolor 32.....	19
Figure I.17 : Schéma des différents types d'endommagement d'un stratifié composite	20
Figure I.18 : flexion trois-points	23
Figure I.19 : Déformation en cisaillement dans l'âme	25
Figure I.20: a) flambement global du sandwich b) flambement local du sandwich	26

CHAPITRE II :

Figure II.1:Le cycle de vie d'un produit	29
Figure II.2 : Écorce d'un chêne-liège	29
Figure II.3 : Les différentes couches	31
Figure II.4 : La bois, La mère, Le liège	32
Figure II.5 : Structure microscopique du liège	32
Figure II.6 : Formation du liège	33
Figure II.7:Schéma de composition du Liège	33
Figure II.8 :La levée du Liège	36
Figure II.10 : Exemple de déperditions thermiques pour une maison individuelle non isolée	40
Figure II.11 : Type de chanvre	41
Figure II.12 : Brique de chanvre utilisée pour l'isolation acoustique et thermique	42
Figure II.13 : Représentation schématique des formulations « Toit » (a), « Mur » (b) et «Enduit» (c) [Evrard (2008)].....	44
Figure II.14 : résines végétales	45
Figure II. 15 : Représentation graphique du processus de polymérisation d'un système époxy	49
Figure II.16 : Remplissage des imperfections de surface du bois par la résine chargée de microfibres Treecell	52
Figure II.17 : Flexion 3 points	53
Figure II.18 : Influence de l'épaisseur des panneaux sandwich sur la rigidité EI en flexion ..	54

CHAPITRE III :

Figure III.1:Sciure de bois utilisé.....	58
Figure III.2:Liège aggloméré	59
Figure III.3:Liège à l'état brut.....	59
Figure III.4 :Liège broyé	60
Figure III. 5 : Coffrage en bois 450 x 23 x 50 mm	61
Figure III.6 : Principe de mise en œuvre des renforts	62

Figure III.7 : Plaque en PVC	63
Figure III.8 : Forme du Tissu en fibres de Polypropylène	63
Figure III.9 : Résine utilisé.....	64
Figure III .10 : Application de la résine sur la semelle inférieure (collage du polymère PVC)	65
Figure III. 11 : Application de la résine sur la semelle supérieure (collage du tissu)	65
Figure III.12 : Panneau multicouches symétrique à semelles identiques en polymère PP	66
Figure III. 13 :Panneau multicouche symétrique à semelles identiques en tissus composite TT	66
Figure III. 14 : Panneau multicouche dissymétrique à semelles différentes TP	66
Figure III.15 : Machine d'essais IBERTEST	67
Figure III.16 : Positionnement des éprouvettes d'essais sur la machine	68

CHAPITRE IV :

Figure IV.1 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs symétriques chargés en flexion 3-points	70
Figure IV.2 : Confrontation des courbes force-déplacement des panneaux dissymétriques en flexion 3-points	70
Figure IV.3 : Confrontation des courbes force-déplacement des panneaux multicouches (PT, TP, PP et TT) lors de la flexion 3-points	71
Figure IV.4 : Comparaison des résistances maximales des panneaux multicouches chargé en flexion trois points	72
Figure IV.5 : Comparaison des déplacements maximaux des panneaux multicouches chargés en flexion trois points	72
Figure IV.6 : Progression des fissures en flexion 3-points pour le panneau (PP) : (a) début du test, (b) apparition et propagation de la fissure, (c) limite de propagation de la fissure à l'extrémité de l'échantillon.....	73
Figure IV.7 : Progression des fissures en flexion 3-points pour le panneau (TP):(a) début de l'essai ; (b) fissuration à la fin du panneau au niveau de l'âme	73
Figure IV.8 : Progression des fissures en flexion 3-points pour le panneau (TT) : (a) installation du panneau sur la machine, (b) début du test, (c) apparition de la fissure, (d) limite de propagation de la fissure	74

Figure IV.9 Essais de flexion 3-points : (a) début de l'essai ; (b) rupture de l'âme et la semelle inférieure après fissuration	74
Figure IV.10 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs symétriques chargés en flambement	75
Figure IV.11 : Courbe forces-déplacements de panneau sandwich dissymétrique chargés en flambement	75
Figure IV.12 : Confrontation des courbes force-déplacement des panneaux multicouches (PP, TT et PT) chargés en flambement	76
Figure IV.13 : Comparaison des résistances maximales des panneaux multicouches chargés en flambement	77
Figure IV.14 : Comparaison des déplacements maximaux des panneaux multicouches chargés en flambement	78
Figure IV.15 : limite de propagation de la fissure pour le panneau sandwich symétrique TT1 soumis à la compression avec flambage ; cisaillement des semelles	78
Figure IV.16 : Défaut du panneau multicouche à semelles symétriques TT2 chargés au flambement	79
Figure IV.17 : Progression des fissures en flambement pour le panneau (PP) : (a) et (b) durant l'essai ; (c) fissuration à la fin du panneau au niveau de l'âme	79
Figure IV.18 : Défaut du panneau multicouche à semelles dissymétriques PT chargés en flambement ; (a) et (b) essais 1 et 2 respectivement	80

LISTE DES TABLEAUX

CHAPITRE II :

Tableau II.1 : Composition chimique du Liège	34
Tableau II.2: Composition minérale du liège	35
Tableau II.3: Fiche technique de granulat de liège	35
Tableau II.4 : Exemples de dosages tirés des « Règles professionnelles d'exécution	44
Tableau II.5: Propriétés mécaniques des bois et des résines époxydes.....	53

CHAPITRE III :

Tableau III. 12 : Composition du mortier	61
Tableau III. 13 : Composition des panneaux mortier / scieur de bois	62

CHAPITRE IV :

Tableau IV.1 : Les résistances maximales des panneaux chargés en flexion	77
Tableau IV.2 : Les déplacements maximaux des panneaux chargés en flambement.....	77

PRINCIPALES NOTATIONS

M_x	moment de flexion
L	Distance entre les appuis (flexion 3 points)
P	Charge appliquée
T_x	Force transversale
D	Rigidité en flexion
E_f	Module d'élasticité du matériau de peau
h	Épaisseur du sandwich
Z	Coordonnées suivant l'épaisseur du sandwich
E_c	Module d'élasticité de l'âme
S	Rigidité en cisaillement
t_{f1}	Épaisseur de la peau supérieure
t_{f2}	Épaisseur de la peau inférieure
P_{cr}	Charge critique de flambement
P_{Eu}	Charge d'Euler
W_1	Déplacement due à la flexion des peaux
W_2	Déplacement due au cisaillement du matériau d'âme
W_t	Déplacement totale
G	Module de cisaillement de l'âme
σ	Contrainte de traction dans les matériaux peaux
τ	Contrainte de cisaillement dans le matériau d'âme
σ_{mc}	Contrainte de rupture en compression
σ_{mt}	Force de rupture en traction
E	Module de Young
b	Largeur de la poutre

RESUME

Devant l'utilisation croissante des matériaux composites, le développement de moyens de caractérisation structurale et mécanique fiables est devenu un enjeu important sur le plan scientifique, technologique et économique. Le choix de matériau adéquat se base sur de nombreux critères : l'économie (de point de vue énergétique et financier), l'esthétique et l'impact environnemental. Tous ces critères sont pris en compte dans le cycle de vie du matériau.

L'objectif principal de ce travail consiste à mettre en évidence, à travers une investigation expérimentale, le comportement mécanique des panneaux composites multicouches à matrice en mortier allégé par la sciure de bois comme âme et des plaques en tissu polypropylène et polymère renforcée comme semelles collées à l'aide d'une résine époxyde sous chargement en flexion trois points et en flambement.

En outre, les résultats obtenus à partir de cette étude expérimentale, confirment la haute performance des panneaux multicouches (symétriques et dissymétriques) en terme de résistance mécanique, les courbes de charge-déplacement et les modes de rupture ont été analysés et discutés. Ces panneaux multicouches peuvent être utilisés comme matériaux de construction non structuraux dans la construction, comme cloisons et panneaux de séparation dans le bâtiment.

Mots clés : Liège, bois, sandwich, propriétés mécaniques, isolant, expérience, composite multicouches, chanvre, matériaux.

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

Une structure sandwich combine généralement deux feuilles de surface avec de très bonnes propriétés mécaniques, collées sur une couche de base, constituée d'un matériau léger. Notre objectif est d'utiliser un matériau naturel avec une empreinte écologique, favorable à la production des panneaux multicouches qui sont légers, de bonnes propriétés mécaniques, isolant, et un faible coût, élaborés pour une utilisation dans la construction, comme cloison ou murs de séparation, permettant ainsi d'améliorer les propriétés thermiques et acoustiques de la structure.

Cette étude porte sur l'élaboration expérimentale, et la caractérisation mécanique des panneaux composites multicouches, constituées d'une âme en mortier allégé par des fractions volumiques en sciure de bois. Les semelles inférieures et supérieures sont confectionnées en tissu polypropylène et polymère renforcées collées à l'aide d'une résine époxyde. Cette nouvelle structure multicouche présente un poids propre réduit grâce à l'ajout de sciure de bois en mortier, ainsi qu'une résistance acceptable produite par les renforts (semelles).

Quatre chapitres sont présentés dans ce mémoire. Dans le premier nous présentons une étude bibliographique sur les matériaux composites dont l'objectif est d'apporter une connaissance de leurs différents constituants, leurs propriétés, et leurs structures.

Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des matériaux utilisés dans l'élaboration de l'âme des panneaux composites ainsi que leurs caractéristiques physiques leurs pouvoirs isolant (thermiques et phoniques).

Le troisième chapitre consiste à l'élaboration des panneaux multicouches, nous avons présenté les étapes menées lors de cette étude expérimentale. Un mortier allégé par (la sciure de bois ; le liège) a été réalisé. Dans le souci d'avoir un matériau dont les caractéristiques permettront à ce dernier de bien répondre aux exigences pour lesquels il est prédestiné, nous avons mené des essais préliminaires sur des éprouvettes de dimension 4x4x16 cm avec plusieurs variantes de : différentes gammes, différents pourcentages des deux matériaux liège et sciure de bois.

Le quatrième chapitre, présente les résultats des essais portés sur les panneaux multicouches composites chargés en flexion trois points et au flambement ; ces résultats sont présentés avec toutes les interprétations.

Une conclusion générale finalise ce travail, elle permet de rappeler les résultats clés et aussi de proposer des perspectives pour de futurs travaux de recherche dans le domaine de fabrication des panneaux multicouches.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES

MATERIAUX COMPOSITES

I.1 Introduction

Le développement de nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs (constructeurs). Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent amenés à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de " nouveaux matériaux ". En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de cette association est l'aboutissement à *un matériau composite*. Ce chapitre a pour objectif de définir les matériaux composites par une description de leurs constituants, propriétés et leurs structures.

I.2 Matériaux composites

Au sens strict du terme, il faut parler de matériau ou de structure composite dès lors qu'une pièce est constituée de plusieurs types de constituants. Le but recherché dans ces associations est de combiner les propriétés de plusieurs classes de matériau en vue d'obtenir des propriétés moyennes améliorées.

Les métaux sont en général *tenaces* (ils présentent une bonne résistance à la propagation brutale de fissures) et *ductiles* (ils présentent des déformations importantes avant de se rompre), mais de *masse volumique élevée*. Les matières plastiques sont *légères* mais présentent de faibles propriétés mécaniques. Les céramiques sont *rigides et résistantes*, mais *fragiles*. L'art de l'ingénieur dans la conception et l'utilisation de matériaux ou de structures composites réside dans le fait de placer le bon matériau sous la bonne forme (morphologie des renforts), et au bon endroit (notion de répartition spatiale).

Les composites sont donc intrinsèquement des matériaux hétérogènes. Pris sous cette acception, le terme "composite" recouvre pratiquement l'ensemble des matériaux. Ainsi les matériaux métalliques eux-mêmes sont des alliages, composés de plusieurs phases, de microstructure et/ou de composition distincte : il suffit de changer d'échelle pour passer de l'image d'un milieu homogène à celle d'un milieu hétérogène.

Le type d'approche à utiliser se décidera d'une part en fonction du rapport entre les dimensions de la structure à modéliser et une dimension caractéristique du milieu à représenter, d'autre part en fonction du but poursuivi (schématisation globale d'un système ou étude locale).

Ceci conduit à utiliser plutôt le terme de *structure composite* lorsqu'il est naturel de modéliser séparément chaque matériau dans la pièce à traiter [1].

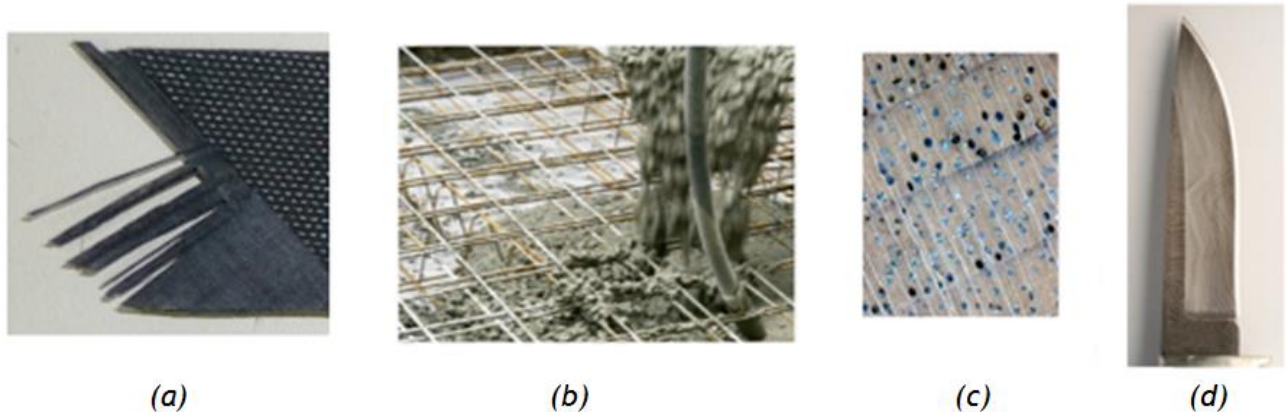


Figure I.1 : Exemples de multi-matériaux : (a) un composite carbone/époxy, (b) un béton armé, (c) du bois vu au microscope optique, (d) une lame d'acier de Damas [2].

Les composites s'adaptent à toutes les formes de supports et ne requièrent aucun placage sous pression, grâce à leur souplesse, leur légèreté et la facilité de mise en forme qui peut s'adapter à tous les ouvrages de formes complexes [3]

Cette partie s'intéresse dans un premier temps aux matériaux eux-mêmes, et aux modèles élémentaires que leurs propriétés suscitent. On trouvera des compléments à cette approche dans [4].

Pour une approche plus axée sur les aspects mécanique, on consultera [5], ou un ouvrage classique [6].

I.3 Les composants élémentaires des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges [7],
- D'un renfort.

I.3.1 Matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2 200°C peuvent être

atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la Figure I.2 [7].

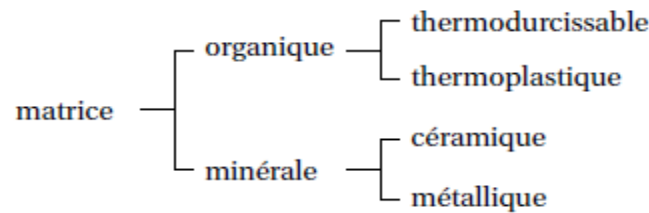


Figure I.2 : Types de matrice [8].

I.3.1.1 Les matrices organiques :

Sont faites de matières plastiques. Il convient de distinguer les matrices thermoplastiques, à chaîne linéaire, très répandues, et les polymères thermodurcissables, ou résines, aux propriétés mécaniques plus élevées. Dans cette dernière catégorie se rangent les résines de polyester, les résines époxydes, qui peuvent être utilisées jusque vers 200 C, les résines phénoliques ou les résines polyimides, qui supportent des températures de 400 C.

Dans le cas des CMO (composites à matrice organique) les principales matrices utilisées sont :

Thermodurcissables

- les résines polyesters insaturés (UP) peu onéreuses qui sont généralement utilisées avec les fibres de verre et que l'on retrouve dans de nombreuses applications de la vie courante,
- les résines époxyde (EP) qui possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques. Elles sont généralement utilisées avec les fibres de carbone pour la réalisation de pièces de structure performantes (véhicules et voiliers de compétition, aéronautique),
- les résines vinylester sont surtout utilisées pour des applications où les résines polyester ne sont pas suffisantes. Elles sont issues d'une modification d'une résine époxyde et excellentes pour des applications de résistance chimique,
- les résines phénoliques (PF) utilisées dans les applications nécessitant des propriétés de tenue aux feux et flammes imposées par les normes dans les transports civils,
- les résines polyimides thermodurcissables (PIRP) pour des applications à haute température (~300 °C) et polybismaléimides (BMI) pour des applications à température intermédiaire (~225 °C) [8];

Thermoplastiques

Comme le polypropylène, le polyamide, le polyétherimide (PEI), le poly(sulfure de phénylène) (PPS) et la poly(éther-éther-cétone de phénylène) (PEEK) pour la réalisation de pièces de structure et d'aéronautique[9].

I.3.1.2 Les matrices métalliques

Présentent plusieurs avantages, comme une bonne ductilité, une bonne résistance à certains solvants, une meilleure tenue en température que les résines, une meilleure usinabilité. A l'inverse, elles sont plus difficiles à mettre en œuvre, de densité plus élevée, et des problèmes peuvent apparaître aux interfaces fibres–matrice du fait de la réactivité des matériaux.

Comme pour le cas des matrices carbonées, la fabrication du composite peut s'effectuer par imprégnation en phase liquide, décomposition chimique en phase vapeur, mais encore par co–extrusion ou co–laminage.

Dans le cas des CMM (composites à matrice métallique) le matériau composite est constitué :

- d'une matrice métallique (ex. : aluminium, magnésium, zinc, nickel) ;
- d'un renfort métallique ou céramique (ex. : fils d'acier, particules de SiC, carbone, alumine, poudre de diamant).

I.3.1.3 Les matrices céramiques

Particulièrement intéressantes en raison de leur caractère réfractaire.

Elles sont utilisées dans des pièces qui doivent subir sans dommage de très hautes températures (Tuiles de protection thermique, brûleurs). Le point faible des céramiques, à savoir leur très faible résistance à la rupture en traction, est partiellement masquée par l'insertion de fibres dans la matrice. Les techniques de fabrication les plus courantes sont l'imprégnation en phase liquide (SiC-SiC par exemple) ou le dépôt plasma (par exemple dépôt de silicium puis nitruration à l'aide d'un traitement sous azote à 1450 C, qui produit une augmentation de volume et favorise la densification).

Dans le cas des CMC (composites à matrice céramique), la matrice peut être constituée de carbone ou de carbure de silicium. Ces matrices sont déposées soit par dépôt chimique en phase vapeur (CVD) par densification d'une préforme fibreuse, soit à partir de résines cokéifiables comme les résines phénoliques (dans le cas des matrices de carbone).

Des charges (minérales, organiques ou métalliques) et additifs sont presque toujours incorporés à la matrice [8].

I.3.2 Renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites. Les avantages des fibres sont : Propriétés physico-mécaniques intéressantes, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc.... [10]

En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines et de formes diverses.

Néanmoins, les renforts les plus utilisés se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue. Ils sont caractérisés par la nature de la fibre (minérale ou organique) et de l'architecture du renfort. Ils constituent une fraction volumique du matériau composite généralement comprise entre 30% et 70%. [11],[12]

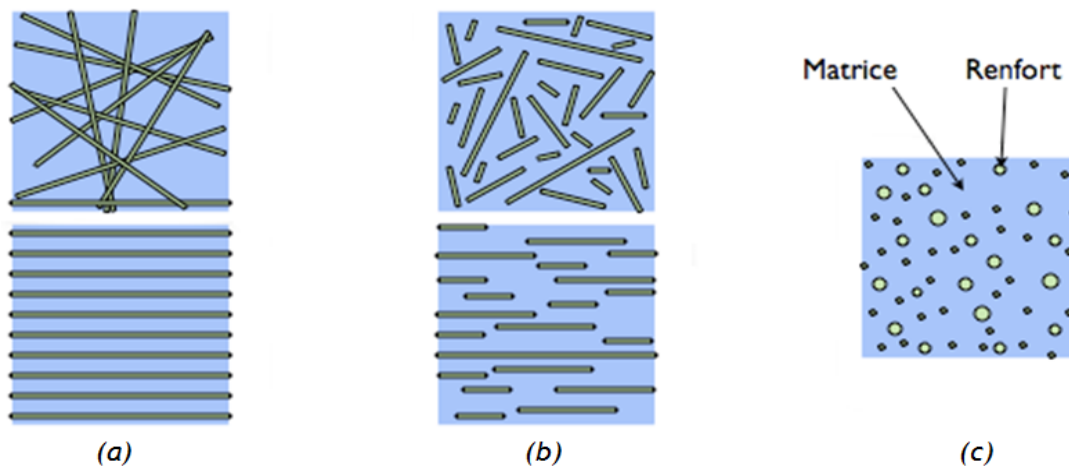


Figure I.3 : Les structures géométriques des composites :(a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c)particules [2].

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure I.4.

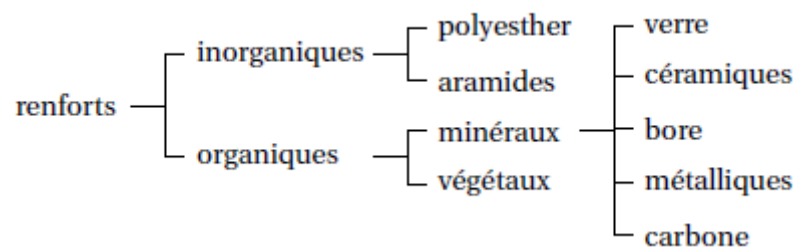


Figure 1.4 : Types de renfort [8]

I.3.2.1 Les fibres de verre :

Sont les plus anciennes (1940) et les moins chères (environ 1 euro/kg) des fibres du marché, et celles dont on réalise le plus fort tonnage. Elles sont fabriquées par extrusion du verre au travers d'une filière percée de trous de 1 à 2mm de diamètre, puis étirées jusqu'à obtenir des diamètres de 5 à 15mm, enduites et bobinées. Il existe différentes variétés (E,R,S)

selon la proportion de chaque composant (SiO_2 , Al_2O_3 , B_2O_3 , CaO , MgO), les meilleures propriétés étant obtenues pour les plus fortes proportions de silice (verre S, 65%).

I.3.2.2 Les fibres métalliques ou céramiques

Sont les plus chères de toutes, en raison de leur difficulté de fabrication (de l'ordre de 1000 euros/kg). Les fibres de bore sont obtenues par réduction à 1100_C de chlorure de bore, qui se dépose sur un fil de tungstène de 10 à 15mm de diamètre.

Le diamètre résultant est de 100 à 200µm pour la fibre. La même procédure expérimentale est utilisée pour produire des fibres de carbure de silicium (SiC). Les derniers développements concernent la production de trichites, ("whiskers") qui sont des monocristaux filamenteux obtenus par décomposition d'un sel métallique en ambiance réductrice. Leur longueur est de quelques millimètres, pour un diamètre d'environ 1µm. Elles approchent les propriétés d'un cristal parfait.

I.3.2.3 Les fibres de bore

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

I.3.2.4 Les fibres de carbone

Doivent leurs propriétés à la très forte anisotropie des cristallites de graphite qui les composent. Leur prix décroît régulièrement, il est de l'ordre de 10 euros/kg. Elles sont fabriquées à partir de fibres de polymère (par exemple polyacrylonitrile) préalablement tissées, et carbonisées sous tension en plusieurs étapes, oxydation (100 à 200_C), puis pyrolyse (1500-2500_C). Selon la température et le temps de cuisson, les fibres présentent une "haute résistance"(HR) ou un "haut module" (HM).

I.3.2.5 Les fibres de polymère

Les plus connues sont des fibres de polyamides aromatiques, connues sous la marque commerciale de "Kevlar". De prix élevé (20 euros/kg), elles servent essentiellement à fabriquer des câbles.

I.3.2.6 Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et lignine. Elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques en faibles proportions.[13],[14],[15]. Les fibres naturelles comme éléments de renfort dans les matériaux composites ont fait l'objet de nombreuses études durant les dernières décennies, en raison de leur plus grande facilité de recyclage. Ces renforts constituent une alternative aux fibres synthétiques. Ces dernières sont dures et rigides, en particulier, les fibres de verre sont abrasives et présentent des dangers potentiels pour la santé, notamment par les particules qu'elles génèrent pendant l'usinage. En contrepartie, les fibres de cellulose sont des renforts, [15], qui permettent :

- de réduire le prix de revient du composite,
- d'obtenir des matériaux avec de bonnes propriétés mécaniques.
- d'éviter les problèmes potentiellement causés par les fibres minérales.

I.3.2.7 Architecture des fibres

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent des performances médiocres en compression et en cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée. Généralement, les renforts sont produits en forme de tissu [7]. Les principaux types de tissus sont :



Figure I.5 : Géométrie des renforts [7].

Tissus multidirectionnels

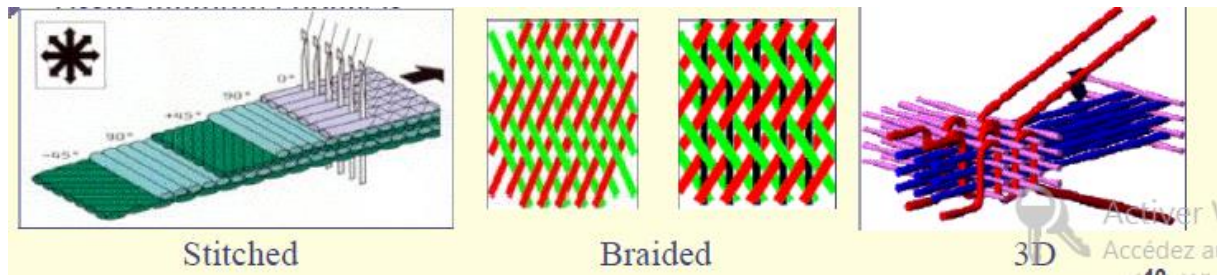


Figure I.6 : Géométrie des tissus multidirectionnels[7].

I.3.2.8 Les microbilles pleines ou creuses

Peuvent être produites en verre, carbone ou polystyrène. Elles ont des diamètres compris entre 10 et 150mm ; le taux volumique de charge peut atteindre 50%.

Le composite résultant a des propriétés mécaniques isotropes.

I.3.2.9 Les principaux renforts minéraux

Sont le mica et l'amiante. L'un et l'autre sont des composés naturels dont les propriétés ne permettent pas d'atteindre les résistances obtenues avec les fibres. Le mica se présente sous forme de paillettes, dont l'intérêt est d'offrir un renforcement bidirectionnel.

L'amiante (mélange d'oxydes de magnésium, de silice et d'eau, comportant également du sodium, du fer,...) se présente sous forme de fibrilles de 20mm, dont il est possible de détacher des fibres de plusieurs centimètres. Son caractère cancérigène a maintenant conduit à un abandon complet.

I.4 Mise en forme

La mise en forme des matériaux composites peut avoir lieu par des procédés manuels ou mécanisés. Dans l'ensemble, les outils nécessaires aux procédés mécanisés s'amortissent en produisant en moyenne et grande série ; c'est pourquoi les procédés manuels sont plus adaptés à la petite série du point de vue économique.

Parmi les procédés manuels, on distingue :

- le moulage par projection simultanée ;
- le drapage de pré-imprégnés (catalyse à haute température, souvent sous vide) ;
- le moulage au contact ;
- le moulage sous vide ;
- l'infusion.

Les procédés mécanisés sont :

- moulage par compression des préimprégnés :

- SMC (*SheetMolding Compound*),
- BMC (*BulkMolding Compound*) ;
- injection :
 - des thermoplastiques renforcés : moulage par injection de résine ou de pré-imprégné,
 - des thermodurcissables renforcés :
 - RTM (*Resintransfer Molding*) (voir aussi RTM light),
 - R.RIM (*ReinforcedReaction Injection Molding*) : l'équivalent de la RIM (*Reaction Injection Molding*) pour les matériaux composites ;
- imprégnation en continu ;
- pultrusion : l'équivalent de l'extrusion pour les matériaux composites ;
- *pull-winding* ;
- formage de plaque, estampage des TRE (Thermoplastiques renforcés estampables) ;
- enroulement filamentaire ;
- moulage par centrifugation. [8].

I.5 Quelques exemples de matériaux composites :

I.5.1 Les composites naturels :

- Le bois et les textiles naturels sont des composites à base d'une matrice en lignine et hémicellulose et de renforts en fibre de cellulose,
- L'os est un composite à base d'une matrice en collagène et de renforts en hydroxyapatite.

I.5.2 Les composites artificiels :

- les matériaux rigides communément appelés « fibre de verre » et « fibre de carbone » sont des composites respectivement de fibres de verre et fibres de carbone et de diverses résines rigides (notamment époxyde) [8],
- le Micarta est un composite de fibres (initialement coton ou papier) imprégnées à haute pression avec des résines phénoliques durcissantes telles que la Bakélite,
- les panneaux de bois agglomérés comme le contreplaqué utilisé en menuiserie et construction.
- les cloisons de plaques de plâtre, très utilisées dans le bâtiment hors intempéries,
- le béton armé en génie civil est un composite de béton et d'acier,
- le GLARE, composé principalement d'aluminium et de fibre de verre, est utilisé en aéronautique,

- l'acier damassé était un composé de plusieurs feuilles d'acier de nuances différentes ;
- le composite dentaire ;
- l'amalgare composite pouvant remplacer une dent

I.6 Application des matériaux composites :

Il existe deux procédés de réalisation d'un renforcement par composite : le système avec une cure in-situ et le système préfabriqué.

a. Le système avec une cure in-situ

Deux processus différents peuvent être utilisés pour mettre en place un composite sur des surfaces de béton :

- le tissu sec peut être appliqué directement sur la résine déjà appliquée sur la surface du béton, suivi de l'application d'une couche de fermeture,
- le tissu peut être pré-imprégné avec la résine dans une machine adaptée, puis déposé avant polymérisation sur la surface de béton à renforcer.

b. Le système préfabriqué

Ce processus consiste à pré-fabriquer des bandes qui sont installées, une fois durcies, sur la surface du béton en utilisant l'adhésif [16].

I.7 Les matériaux composites structuraux :

I.7.1 Les monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement) et fibres tissées ou à fibres courtes (Voir Figure I.7).

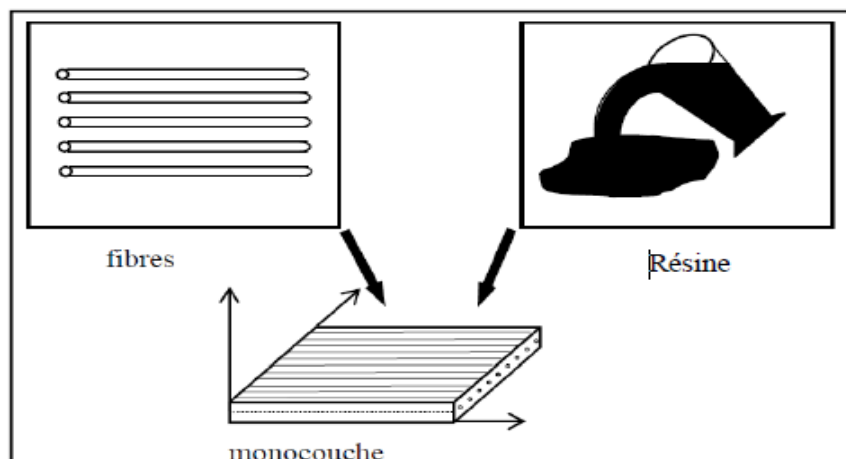
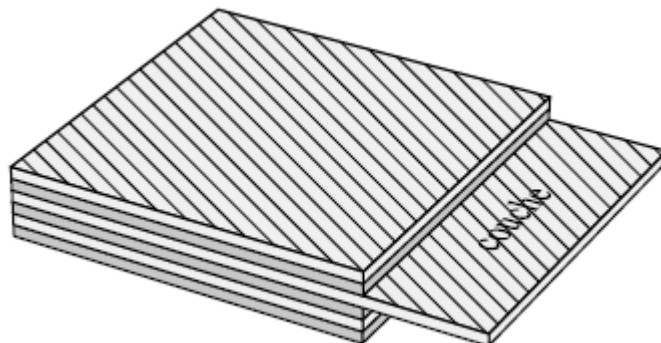


Figure I.7 : Constitution d'une structure composite monocouche [65].

I.7.2 Structures composites stratifiées

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines. Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques. Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir. Les matériaux composites sont modélisés à une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique associée aux constituants de base du composite (le renfort et la matrice) et l'échelle macroscopique liée à la structure. À cette échelle, appelée méso-échelle, une structure stratifiée est schématisée par un empilement de monocouches homogènes dans l'épaisseur et d'interfaces inter-laminaires. La couche et l'interface sont les deux entités appelées méso-constituants, comme illustré sur la figure 1.8, qui forment les bases des modèles dédiés à l'étude des structures stratifiées. L'interface inter laminaire est une entité surfacique assurant le transfert des déplacements et des contraintes normales d'une couche à une autre. En élasticité, les couches sont parfaitement liées et l'interface ne joue aucun rôle particulier. L'étude des composites jusqu'à la phase ultime de la rupture montrera l'utilité d'employer un modèle d'interface pour simuler les phénomènes de délaminage (séparation progressive des couches) [8].

**Figure I.8** : Stratifié constitué de couches parfaitement liées [8].

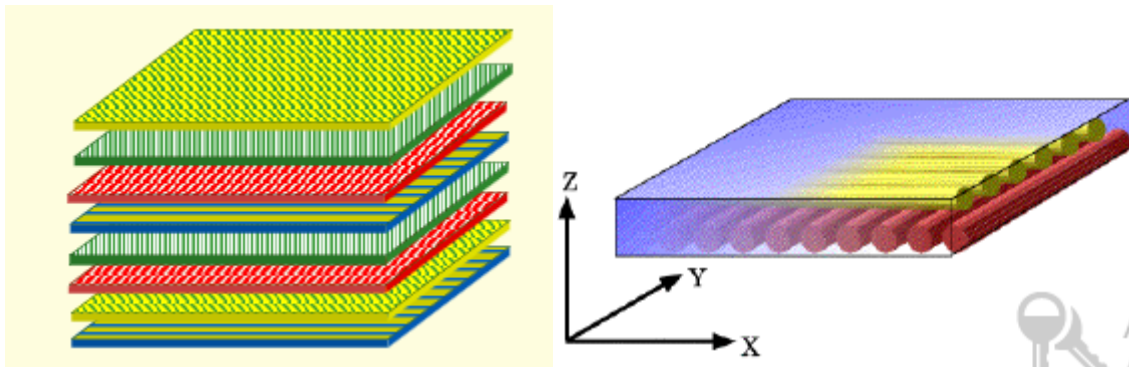


Figure I.9 : désignation d'une structure composite stratifiée [7]

Désignation des structures stratifiées

Les structures stratifiées à base de tissus unidirectionnels sont constituées d'un grand nombre de couches ou plis. L'épaisseur d'une couche dépend de son grammage.

L'épaisseur de chacune des couches est généralement très faible, de l'ordre de 0,125 mm pour un matériau carbone époxy de type Aéronautique et 0,3 mm pour ceux qui sont utilisés dans l'Industrie Nautique. Ces structures stratifiées sont constituées de couches unidirectionnelles avec des fibres orientées de façon différente d'une couche à l'autre afin d'obtenir les propriétés mécaniques souhaitées pour la structure finale.

La désignation des structures stratifiées est délicate car il faut préciser les axes de référence.

Un stratifié est codifié de la façon suivante :

- Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x . Sur les figures I.10(a) et I.10(b), les couches sont représentées décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut ;
- Les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole « / » comme l'exemple de la figure I.2(a): $[-45/45/-45/-45/45/-45]$;
- Les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique, comme l'exemple de la figure I.10(b) : $[0/452/90/-452/0]$;
- En cas de stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il faut préciser par un indice la nature de la couche ;
- En cas de structures symétriques, la moitié est codifiée et le symbole s indique la symétrie : $[-45/45/-45/-45/45/-45]$ devient $[-45/45/-45]_s$ et $[0/45/45/90/-45/-45/0]$ devient $[0/452/90/-452/0]$.

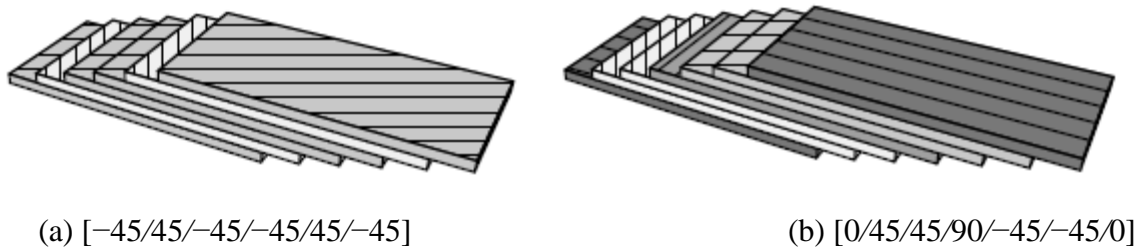


Figure I.10 : Désignations du stratifié [8].

I.7.3 Désignation structures sandwiches

I.7.3.1 structures sandwiches symétrique

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en matériaux sandwiches. Une structure sandwich est composée d'une âme et de deux peaux en matériaux composites voir Figure I.11.

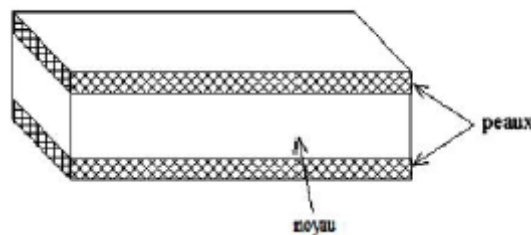


Figure I.11 : Principaux constituants d'une structure sandwich symétrique [17].

L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Les peaux sont généralement constituées de structures stratifiées. Une âme nid d'abeilles est présentée sur la figure I.14. Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan.

L'intérêt de cette disposition est encore une fois de mettre la matière là où elle est nécessaire : lorsqu'un tel « sandwich » est sollicité en torsion ou en flexion, les peaux travaillent essentiellement en membrane, tandis que l'âme travaille essentiellement en cisaillement hors

plan (et à des niveaux de contrainte bien plus faibles). Il est ainsi possible d'obtenir des pièces ultralégères, résistantes et rigides en flexion et en torsion, comme le montre le tableau comparatif de la figure I.12.

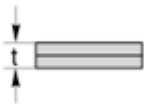

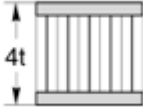
			
Rigidité relative	1.0	7.0	37.0
Résistance relative	1.0	3.5	9.2
Masse relative	1.0	1.03	1.06

Figure I.12 : Comparaison des caractéristiques mécaniques en flexion (rigidité et résistance) et des masses de trois structures : une plaque et deux sandwiches. Image [18].

I.7.3.2 Structures sandwich dissymétriques

A l'instar des structures sandwich classiques constitués d'une âme placée entre deux semelles identiques, les structures sandwich dissymétriques reposent sur une idée différente. Un sandwich dissymétrique est constitué d'une âme et de deux peaux différentes, tel que montrer sur la Figure I.13.

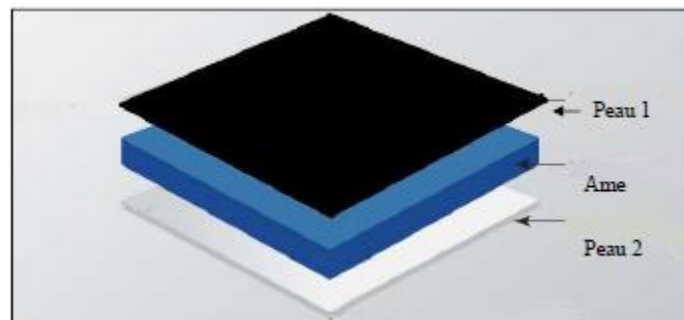


Figure I.13: Constituants d'une structure sandwich dissymétrique [17].

Par rapport aux sandwichs symétriques, les sandwichs dissymétriques ne travaillent que dans leur plan et la peau travaillante reprend la majorité des flux d'efforts de traction/compression et de cisaillement.

Une autre différence fondamentale est que leur comportement non linéaire géométrique dû au décalage de la ligne moyenne par rapport au plan de chargement. Ce décalage induit un

moment de flexion d'autant plus important que la flèche est élevée. On a ainsi un couplage effort/déplacement qui génère une réponse non-linéaire [19].

I.7.4 Constituants des matériaux multicouches

❖ L'âme

Il existe un grand nombre de matériaux qui peuvent être utilisés comme âme. Ces matériaux sont divisés en trois classes :

- Matériaux solide à faible densité : balsa et autres types de bois.
- Matériaux à haute densité augmentés en forme cellulaire : nid d'abeilles.
- Matériaux à haute densité augmentés sous la forme ondulée : feuilles ondulées.

❖ La peau

Une large variété de matériaux est utilisée comme peau, par exemple : les feuilles de métaux comme l'aluminium, le titane, ...etc.

Le choix des matériaux utilisés comme peau, est important du point de vue de l'environnement de travail, car la présente partie entre en contact direct avec ce dernier [20].

I.7.5 Structures composites tissées multidirectionnelles

Il est possible de créer des pièces en matériaux composites de type tridimensionnelles massives ou des formes de révolution. Des tissages volumiques de type 2D (deux directions de renfort), 3D-Evolutif (deux directions de renfort et un piquage dans la troisième direction), 3D (trois directions de renfort), 4D (quatre directions de renfort), ou plus sont élaborés dans l'industrie aérospatiale. Il est également possible de tisser des cylindres ou des cônes afin de réaliser des réservoirs ou des tuyères. Dans ces derniers cas, les fils de renforts s'entrecroisent en hélice. Quelques exemples de matériaux composites multidirectionnels sont maintenant présentés. Les structures massives sont principalement utilisées dans le domaine aéronautique et restent très marginales en raison de leur coût de production très élevé.

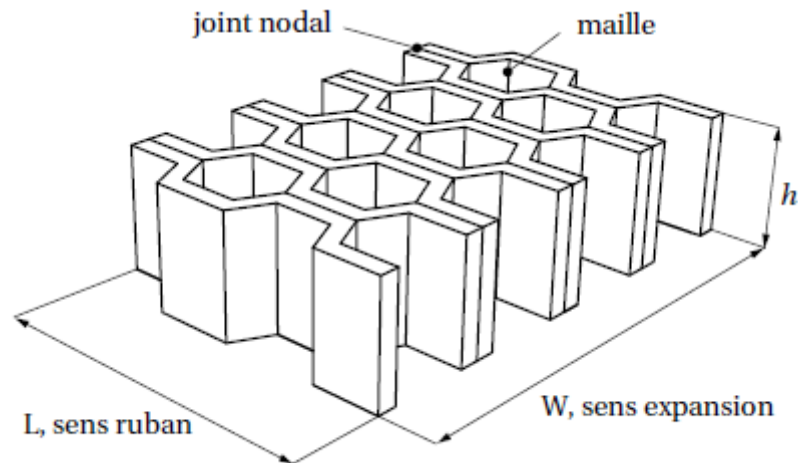


Figure I.14 : Désignations d'une âme nid d'abeilles [8]

I.7.6 Le composite 2D SiC-SiC

Le matériau composite 2D tissé SiC-SiC (fibre-céramique/matrice-céramique) a deux directions de renfort comme illustré sur les figures I.15(a) et I.15(b). Ce type de matériau est destiné à des utilisations thermostructurales (température d'utilisation de 1 000°C à 1 400°C). Ce type de matériau est réalisé par la Société Européenne de Propulsion / Groupe Snecma. Il est étudié pour être utilisé dans les parties chaudes des structures : moteurs d'avions, moteurs fusées et protections thermiques.

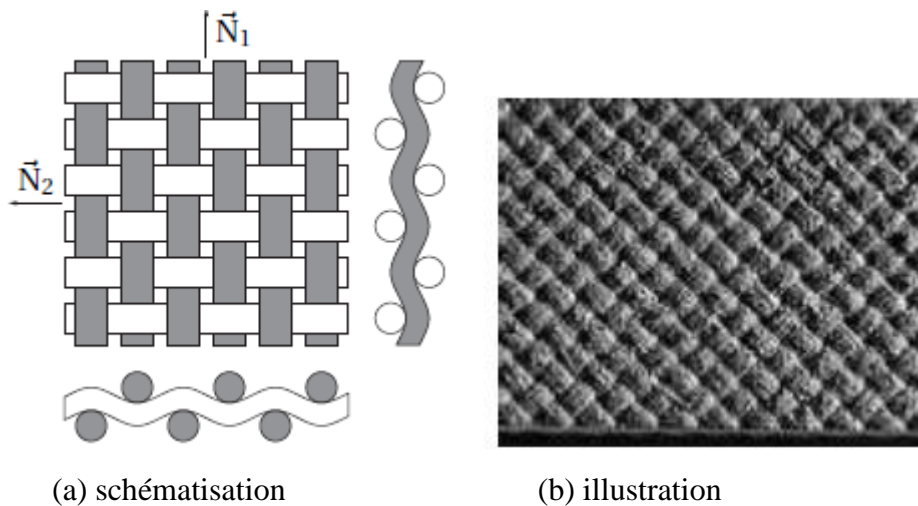


Figure I.15 : 2D Sic-Sic : matériau avec deux directions de renfort [8].

I.7.7 Le composite Aerolor 32 C/C

L'Aerolor 32 est un matériau thermostructural réalisé par l'Aérospatiale. C'est un composite à renfort et matrice de carbone renforcé par trois directions de fibres, comme indiqué

sur la Figure I.16. La matrice est infiltrée dans les blocs préalablement tissés au moyen de mèches de 3 000 filaments.

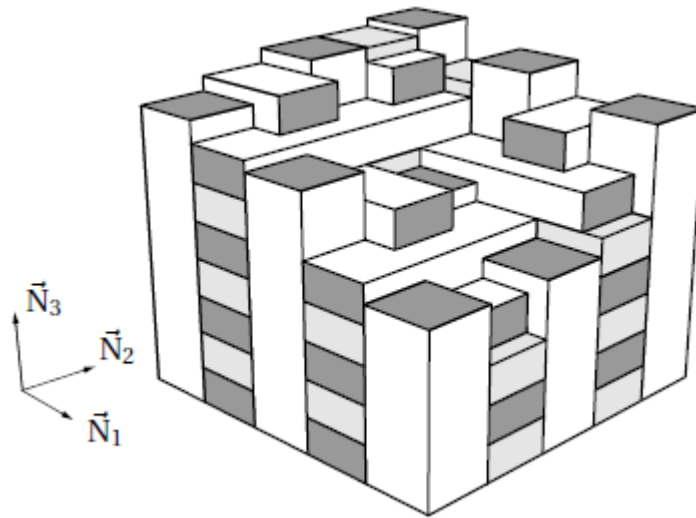


Figure I.16 : Géométrie tri-orthogonale de l'Aerolor 32[8]

I.8 L'adhésif de l'interface

Le film d'adhésif est d'une importance cruciale, d'une part, il solidarise l'âme et les peaux et d'autre part il permet un bon assemblage de la structure en formant une liaison continue, non poreuse et d'épaisseur constante. Par ailleurs, une bonne transmission des contraintes d'un milieu à l'autre est nécessaire, pour cela, la principale caractéristique de l'adhésif doit être une bonne résistance au cisaillement.

Dans le cas de peaux en matériau composite, l'insertion de cette troisième phase peut être évitée par l'utilisation d'une résine auto-adhésive [21]

I.9 Endommagements des composites

Du fait de l'hétérogénéité et de l'anisotropie du composite, une sollicitation de ce matériau va pouvoir conduire à différents mécanismes d'endommagement. Ces endommagements peuvent être des décohésions fibres/matrice, de la fissuration matricielle, des

délaminages et des ruptures de fibres. Un schéma des différents types d'endommagement est présenté sur la figure 1.17.

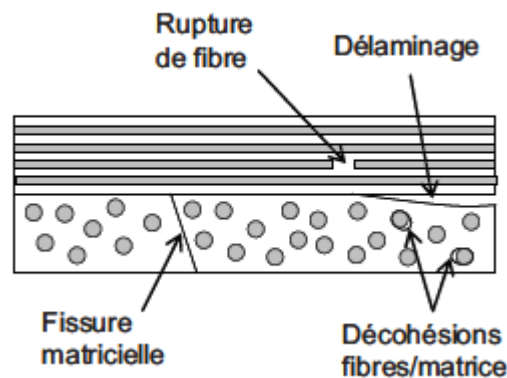


Figure I.17 : Schéma des différents types d'endommagement d'un stratifié composite [22].

Différentes méthodes permettent de caractériser directement l'endommagement comme l'observation au microscope optique ou l'observation par RX. D'autres méthodes indirectes de caractérisation permettent de suivre l'endommagement d'un composite comme le suivi par émission acoustique ou encore la corrélation d'images.

1.9.1 Mécanismes d'endommagement

Fissuration matricielle

La fissuration matricielle transverse va apparaître dans les plis dont les fibres sont fortement désorientées par rapport à l'axe de sollicitation du composite. Les fissures traversent les couches dans leur épaisseur et suivent la direction des fibres car la matrice est beaucoup moins résistante que les fibres. De nombreuses études ont été effectuées sur le développement de la fissuration matricielle. Par exemple, il a été montré que des microfissures peuvent se développer à partir de décohésions fibres/matrice dans un composite carbone/époxy sous sollicitation de cyclage thermique.

L'influence de la séquence d'empilement a également été mise en évidence sur le développement de la fissuration matricielle. Notamment, la présence de couches fortement désorientées par rapport à l'axe de sollicitation (généralement des couches à 90°) favorise le développement de la fissuration matricielle lorsque leur épaisseur augmente.

Délaminage

Le délaminage est un endommagement inter laminaire qui conduit à une décohésion, plus ou moins étendue, de deux couches d'orientations différentes. Le délaminage s'amorce au niveau des bords libres en présence de fortes contraintes intra laminaires ou peut être dû à une saturation des fissures transverses. Le délaminage se développe également aux pointes de fissures transverses à cause de la zone de sur contrainte créée par celles-ci.

Rupture de fibres

La résistance de la fibre étant très élevée, il faut une forte sollicitation dans l'axe de la fibre pour mener celle-ci à la rupture. Les ruptures de fibres n'interviennent en général qu'en fin de vie du stratifié composite juste avant la rupture macroscopique. C'est le mode d'endommagement le plus dangereux pour la structure [22].

I.10 Environnement

La plupart des composites sont à base de polymères thermodurcissables, ce qui les rend difficilement recyclables. Cette contrainte va donc à l'encontre du développement durable. On peut aussi voir de nouvelles recherches axées sur les biocomposites notamment avec des fibres issues de plantes. Les biocomposites sont des matériaux formés par une matrice (résine) et un renfort de fibres naturelles provenant usuellement des plantes ou de la cellulose (fibre de bois, chanvre, etc.). De plus, ils contribuent au respect de l'environnement car ils sont biodégradables, utilisés dans l'ingénierie des tissus, des applications cosmétiques et de l'orthodontie. Ces biocomposites ne sont pas encore prêts à être mis sur le marché pour des secteurs de pointe. L'industrie française s'intéresse grandement à ce type de matériau.

Un composite n'est entièrement biodégradable que si la matrice utilisée, en plus de fibres naturelles, l'est elle-même (ex. : PLA, acide polylactique). Dans le cas où on emploie une résine de type « classique » (polyester, époxyde, etc.), l'intérêt d'utiliser des fibres naturelles comme renfort sera le caractère renouvelable de celles-ci, mais on ne pourra pas parler de composite biodégradable. Les matériaux composites ont un impact sur l'environnement.

I.11 Conductivité thermique

La faible conductivité thermique des matériaux d'âme combinée à une raisonnable compression, font des matériaux composites structuraux des isolateurs thermiques excellents lorsque des charges compressives sont présentes. Aujourd'hui, les matériaux composites structuraux sont utilisés pour réduire les échanges thermiques entre deux corps de températures différentes. Elle peut avoir pour but de garder la chaleur présente à l'intérieur d'une maison, ou garder le froid dans un réfrigérateur. Ils sont aussi utilisés pour l'isolation acoustique des sous-marins et les studios d'enregistrement, tels des joints dans les instruments en bois et les chambres de combustion, et en tant qu'absorbeur d'énergie dans les planchers, les chaussures et l'emballage, et naturellement comme taquets. Leur propriété de frottement (anti-glissement) les rend également bon pour des revêtements de sol ou dans les poignées.

Par conséquent, L'atout majeur des matériaux composites structuraux est leur conductivité thermique faible qui limité les risques de propagation de l'incendie par conduction et ils se déforment moins en fonction de la température et de la pression ce qui est un des gros enjeux des matériaux utilisés en aviation commerciale. Ils sont peu sensibles à l'humidité, la chaleur et la corrosion

I.12 Comportement des multicouches

I.12.1.Flexion trois-points

La Figure I.18 montre une structure composite multicouche sous chargement de flexion trois-points, il consiste en un essai mécanique qu'on effectue on posant une poutre sur deux appuis simples. Les contacts entre ces appuis et la poutre sont considérés ponctuels et sont situés sur les extrémités de la poutre. On applique une charge concentrée au milieu de cette poutre. Le contact entre la charge et la poutre est considéré aussi comme une liaison ponctuelle [14].

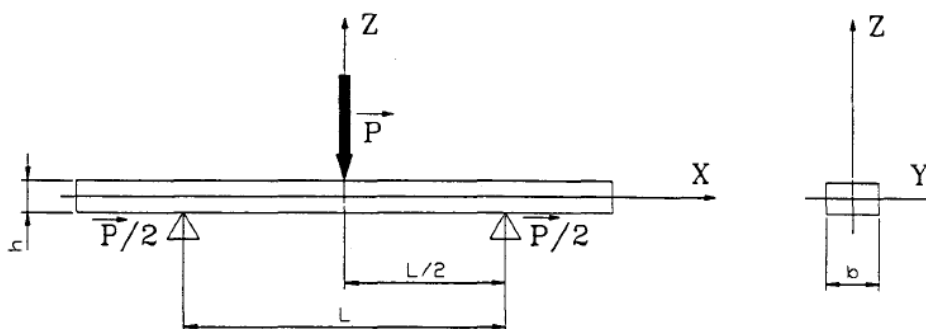


Figure I.18 : flexion trois-points[24].

Le moment fléchissant est donné comme suit :

$$M = \frac{px}{2} \quad \text{Pour } 0 < x < L/2 \quad [1.1]$$

$$M = \frac{P(L-x)}{2} \quad \text{Pour } \frac{L}{2} < X < L [1.2]$$

Avec P étant la charge appliquée, x est la distance par rapport à l'origine et T est l'effort tranchant, il est donné comme suit :

$$T = -\frac{P}{2} \quad \text{Pour } 0 < x < L/2 [1.3]$$

$$T = \frac{p}{2} \quad \text{Pour } L/2 < x < L [1.4]$$

Les contraintes de traction ou de compression dans les peaux sont alors :

$$\sigma_f = \frac{MZ}{D} E_f \quad \text{Pour } \frac{tc}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad -\frac{h}{2} \leq x \leq -\frac{tc}{2} [1.5]$$

La contrainte maximale étant obtenue pour $Z = \pm \frac{h}{2}$ et $X = \frac{L}{2}$, on obtient :

$$\sigma_{fmax} = \pm \frac{PLh}{8D} E_f [1.6]$$

Où : D est une grandeur caractéristique d'un matériau sandwich est sa rigidité en flexion Pour l'âme nous obtenons :

$$\sigma_c = \pm \frac{MZ}{D} E_c \quad \text{Si } \frac{tc}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} [1.7]$$

Les contraintes planes maximales supportées par l'âme s'expriment alors par :

$$\sigma_{cmax} = \pm \frac{PLtc}{8D} E_c [1.8]$$

En ce qui concerne la contrainte de cisaillement τ_c dans l'âme, du fait de l'hétérogénéité de la structure, on tient compte du changement de module d'élasticité dans la section transversale, d'où :

$$\tau_c = \frac{T}{Db} \sum S. E [1.9]$$

Avec : B est largeur au niveau z_1 ; S est le moment statique par rapport à l'axe oy pour lequel $z > z_1$ et la répartition des contraintes de cisaillement D est la rigidité en flexion de la structure.

$\sum S. E$: représente la somme des produits de toutes les parties de la section pour les quelles $z < z_1$. Cette somme s'écrit sous la formule suivante :

$$\sum S.E = E_f \frac{b t_f}{2} + \frac{E_c b}{2} \left(\frac{t_c}{2} - z \right) \left(\frac{t_c}{2} + z \right) [1.10]$$

D'où la contrainte de cisaillement dans l'âme au niveau z :

$$\tau_c = \frac{T}{D} \left(E_f \frac{t_c b}{2} + \frac{E_c}{2} \right) \left(\frac{t_c^2}{4} - z^2 \right) [1.11]$$

Cette contrainte est maximale au centre du sandwich et vaut :

$$\tau_{cmax} = \frac{T}{4D} \left(E_f t_f d + E_c \frac{t_c^2}{4} \right) [1.12]$$

De plus, sachant que $E_f > E_c$,

On négligera le terme tenant compte du module d'Young de l'âme de sandwich. La contrainte de cisaillement maximale s'écrit alors :

$$\tau_{cmax} = \frac{P}{4D} (E_f t_f d) [1.13]$$

Nous pouvons constater que τ_c max est constante dans l'épaisseur de l'âme.

Si maintenant, on observe une portion de la poutre soumise à la flexion (Fig. I.19), nous pouvons constater que les points a, b, c et d qui étaient alignés avant le chargement ne le restent pas. Les sections droites des peaux, par rapport à leur propre axe neutre, restent droites. Ceci n'est pas le cas pour l'âme, qui subit une forte déformation en cisaillement.

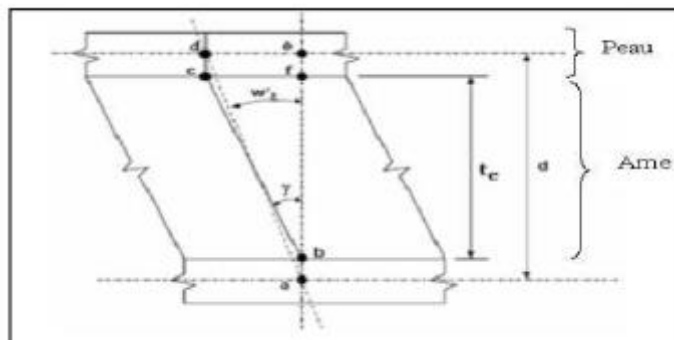


Figure I.19 : Déformation en cisaillement dans l'âme [25]

Si l'on mesure le déplacement, pour un matériau multicouche soumis à la flexion trois points, on remarque que ce dernier se compose de deux parties indépendantes :

- Le déplacement dû à la flexion w_1 ;
- Le déplacement dû au cisaillement w_2 ;

Avec $w = w_1 + w_2$

La flèche due à la flexion peut être calculée par la théorie classique de la flexion :

$$W_1 = \frac{PL^3}{48D} [1.14]$$

Le déplacement dû au cisaillement w_2 est obtenu par l'intégration de l'expression $\frac{\partial W_2}{\partial x} = \gamma \frac{c}{d}$ ce qui donne :

$$W_2 = \frac{PL}{4S} [1.15]$$

Finalement la flèche totale s'exprime par :

$$W = W_1 + W_2 = W_1 = \frac{PL^3}{48D} + \frac{PL}{4S} [1.16]$$

I.12.2 Comportement des multicouches au flambement

Le flambage ou flambement est un phénomène d'instabilité d'une structure, qui soumise à un effort normal de compression, a tendance à fléchir et se déformer dans une direction perpendiculaire à l'axe de compression. Les déformations dues à la compression ne jouent pas toujours un rôle déterminant sur les éléments de structure verticaux. En revanche, un phénomène d'instabilité appelé «flambement » apparaît à partir d'une certaine charge et en fonction du rapport existant entre la section et la hauteur de l'élément considéré. Le flambement est une forme d'instabilité propre aux éléments comprimés élancés tels que les poteaux, colonnes, barres comprimées. Le flambement est possible suivant les deux axes principaux de la section de l'élément. Si les conditions d'appuis, sont les mêmes selon ces deux axes, le flambement se fera suivant l'axe présentant l'inertie la plus faible [26].

La Figure I.20 présente le cas d'une poutre sandwich chargée sur son axe.

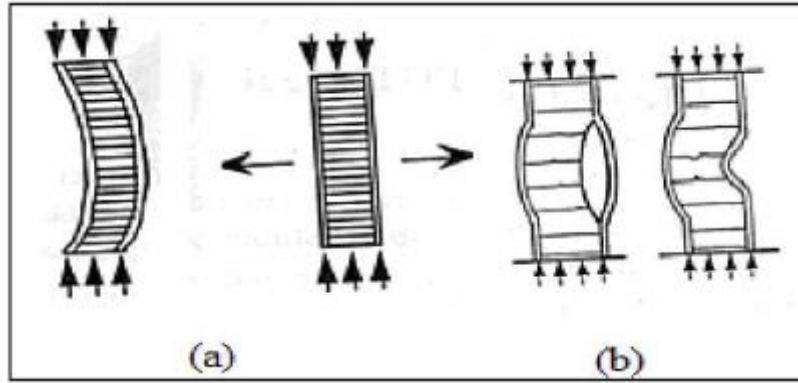


Figure I.20 : a) flambement global du sandwich b) flambement local du sandwich [26].

On appelle charge d'Euler P_{eu} la force maximale applicable sans instabilités. Cette charge dépend de la longueur L de la poutre testée et de sa rigidité en flexion D :

$$P_{eu} = \frac{\pi^2 D}{L^2} [1.17]$$

Dans le cas du sandwich à peaux fines, on doit tenir compte des déformations de cisaillement. Ceci a pour effet de diminuer la charge limite. La charge critique de flambement P_{cr} dépend alors de la rigidité en cisaillement S du sandwich.

$$\frac{1}{P_{cr}} = \frac{1}{P_{eu}} + \frac{1}{S} \quad \text{Avec} \quad S = P_c = \frac{bd^2}{c} G [1.18]$$

Pour des sandwiches à peaux épaisses, on doit tenir compte de la charge d'Euler des peaux (Équation 1.29).

$$P_{eu} = \frac{\pi^2 EI_f}{L^2} [1.19]$$

Ce qui nous donne une charge critique qui exprime par la formule suivante :

$$P_{cr} = P_{EU} \left\{ \frac{1 + \frac{P_{EUf}}{P_c} - \frac{P_{EUf} P_{EUf}}{P_c P_{EU}}}{1 + \frac{P_{EU}}{P_c} - \frac{P_{EUf}}{P_c}} \right\} [1.20]$$

I.13 Conclusion

Nous avons offert une présentation synthétique des différents types de matériaux composites, Utilisés dans la fabrication des produits industriels. L'accent est mis sur la nature des différents constituants, et sur leur influence sur les propriétés du composite.

En conclusion, cette recherche bibliographique nous a permis de lister les différents avantages majeurs des structures composites multicouches. Par conséquent, l'objectif assigné dans le deuxième chapitre est de présenter une revue détaillée, sur les matériaux utilisés dans la conception des structures multicouches, ainsi que leurs propriétés physiques et mécaniques et leurs procédés de fabrication et de mise en œuvre.

CHAPITRE II

MATÉRIAUX D'ÂME DES MULTICOUCHES

II.1 Introduction

Face aux préoccupations environnementales, le choix des matériaux adéquats est une clé afin de limiter l'impact environnemental et d'assurer un milieu intérieur sain et confortable.

Dans ce dixième chapitre nous avons fait une recherche bibliographique qui consiste à mieux reconnaître les matériaux d'âme des panneaux sandwiches multicouches, qui sont en général de base végétale du point environnemental et financier grâce à leur faible cout et disponibilité sur le marché.

La deuxième partie s'intéresse sur les résines époxydes utilisé dans notre étude comme adhésif entre âmes et semelles de notre panneau multicouche.

II.2 Une bonne réponse au développement durable

Le choix de matériau adéquat se base sur de nombreux critères : l'économie (de point de vue énergétique et financier), l'esthétique et l'impact environnemental. Tous ces critères sont pris en compte dans le cycle de vie du matériau qui prend en compte toute la chaîne depuis l'extraction des matières premières jusqu'à sa démolition (Voir la figure II.1). Il s'agit d'avoir une vision globale et le choix de matériaux utilisés se fait en respectant l'environnement et privilégiant les ressources locales. Pour cela, l'utilisation des matériaux à fibres végétales (le liège, le chanvre, la paille, le lin, le bois, etc.) qui sont renouvelables, recyclables et durables est une bonne réponse dans le souci de préserver la santé de l'homme, de répondre à ses besoins de bien-être et de confort et de réduire les impacts environnementaux [27]. L'utilisation des matériaux à base de produits végétaux a les avantages suivants :

- Les ressources abondantes et renouvelables : Les végétaux se renouvellent selon la saison et par conséquent assurent une ressource abondante sachant que les autres ressources (charbon, pétrole, gaz) seront épuisées d'ici quelques décennies. Par conséquent, l'utilisation des végétaux évite les soucis d'épuisement de ressources à l'avenir.
- Faible énergie grise : L'énergie grise est la somme de toutes les énergies nécessaires à la production, au transport, à la fabrication, à l'utilisation et enfin à la démolition du matériau ou à son élimination enfin de sa vie.
- Réduction des émissions de gaz à effet de serre.

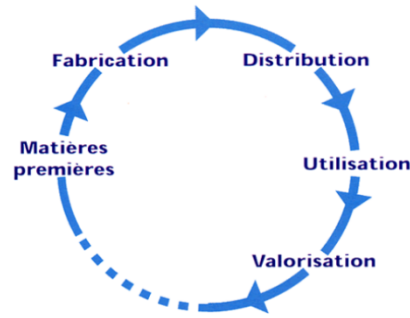


Figure II.1: Le cycle de vie d'un produit[27].

II.3 Le liège

II.3.1 Définition

Le liège est un matériau présent dans l'écorce de quelques arbres, et notamment celle du chêne-liège. Il protège l'arbre des insectes, du froid et des intempéries tout en lui permettant de respirer, par de minces canaux appelés lenticelles (les trous du liège). Le jeune chêne est taillé afin d'obtenir un arbre haut et droit. Vers 30 ans il atteint un diamètre de 60 cm. On va lui enlever sa première écorce (le démasclage), qui va se reconstituer en 9 ans. On pratique alors la même opération (qui s'appelle maintenant l'écorage) tous les 9 ans. La qualité et la régularité du liège s'améliorent au fil des écorçages. Cette récolte dure pendant 120 ans, une récolte très écologique, puisqu'elle participe au maintien des forêts (Espagne, France, Grande-Bretagne, Italie, Portugal) *via* les fédérations de ces pays [28].



Figure II.2 : Écorce d'un chêne-liège [28].

L'arbre chêne-liège est un puits de carbone d'autant plus efficace que l'arbre est exploité à produire du liège. Le liège produit directement par l'arbre est le « liège mâle » : crevassé et de moindre valeur, ce liège ne peut pas servir pour la fabrication de bouchon. Il est de couleur noire, d'une structure très irrégulière et d'une dureté qui le rend difficile à travailler. Une fois écorcé, il sert de matériau d'isolation ou pour les sols. Après le démasclage, il faut environ 2 à 3 écorçages avant que le liège soit doté de propriétés et caractéristiques meilleurs. En effet, après le démasclage, le liège devient régulier, moins dur.

II.3.2 Le Liège : Description, formation et composition

II.3.2.1 Description

- *Hauteur* : un arbre adulte atteint dans la plupart des cas 10 à 15 mètres de hauteur (voire 25 m. exceptionnellement).
- *Âge* : l'âge limite naturel d'un Chêne-liège est compris entre 300 et 500 ans. Cependant, pour un arbre régulièrement écorcé, cette limite n'est plus que de 150 à 200 ans.
- *Houppier* : en peuplement, il est arrondi, étroit et haut. En situation isolée, l'arbre développe un port large et étalé.
- *Ecorce* : Sur un arbre jamais écorcé, elle est de couleur grisâtre, très épaisse, peu dense et fortement crevassée ; en terme de production, on l'appelle "liège mâle". Elle représente une bonne protection contre le feu et permet au chêne de reprendre rapidement sa croissance après le passage d'un incendie. Dans le cas des arbres écorcés, le liège mâle est remplacé par le "liège de reproduction" ou « liège-femelle », de couleur jaune, rouge puis noire. Cette nouvelle écorce est beaucoup plus régulière que la précédente, présentant des crevasses moins profondes et des caractéristiques dans l'ensemble plus homogènes.
- *Système racinaire* : Il est pivotant, car constitué d'une grosse racine principale qui sert de support à l'arbre, et de racines secondaires plus superficielles. Il permet l'approvisionnement en eau et en éléments minéraux, peut s'emmêler avec les racines des arbres voisins (échanges de substances nutritives) et s'associer avec le mycélium de certains champignons qui favoriseront la capture des minéraux.
- *Feuille* : Elles sont persistantes, coriaces et de couleur vert foncé. Glabres sur leur partie supérieure et quelque peu pubescentes dessous, de forme ovale, légèrement dentées, elles ressemblent fortement à celles du chêne.

- *Vert* : Leur taille varie de 3 à 6 cm en longueur et de 2 à 4 cm en largeur. Le pétiole peut atteindre 2cm. L' "automne" du chêne-liège correspond à peu près notre printemps. En effet, à cette période, les feuilles prennent une coloration jaunâtre, phénomène dû à l'apparition des nouvelles ébauches foliaires.
- *Fleur* : Les fleurs mâles, en grappes de 4 à 8 cm apparaissent sur les rameaux de l'année précédente. Les fleurs femelles poussent isolées ou en groupes de trois maximum sur les rameaux de l'année en cours. Leur cupule protectrice se retrouvera sur les futurs glands.
- *Fruit* : Le gland est de couleur brune à maturité (automne), avec un pédoncule jusqu'à 4 cm de long. Sa taille varie de 2 à 5 cm en longueur et de 1 à 2 cm en largeur. La cupule est composée d'écaillés légèrement arquées ou emmêlées sur la partie supérieure.

II.3.2.2 Formation du Liège

La croissance en diamètre de la tige de chêne-liège résulte de deux assises génératrices de cellules, dont une que l'on nomme "phellogène", "mère du liège" ou plus scientifiquement "assise subéro-phellodermique", situé entre le liège et le liber. L'assise subéro-phellodermique produit vers l'extérieur le liège et vers l'intérieur le phelloderme ; l'assise libéro-ligneuse (aussi appelée cambium) produit quant à elle vers l'extérieur le liber (chargé de transporter la sève élaborée) et vers l'intérieur le xylème ou bois (chargé du transport de la sève brute) [29].

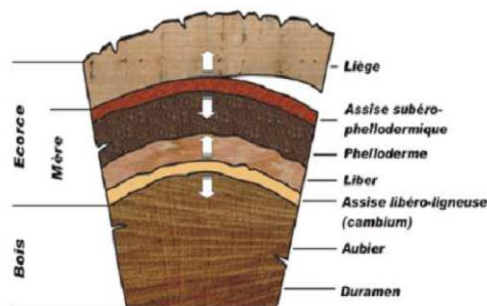


Figure II.3 : Les différentes couches.[29].

Après un écorçage, la mère ainsi découverte se dessèche en partie pour former une croûte et se reforme plus en profondeur par différenciation des cellules du liber.



Figure II.4 : La bois, La mère, Le liège [28].

Le liège est un tissu végétal composé de micro cellules, ayant en général une forme polyhydrique. Si on l'examine au microscope, nous avons l'impression de regarder un gâteau de miel (figure II.4).

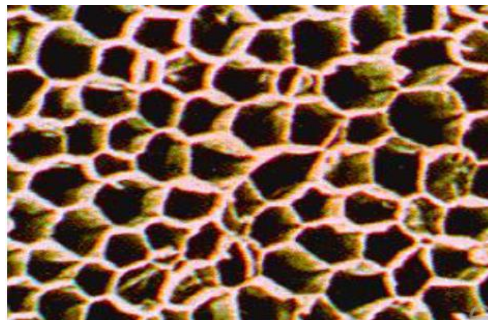


Figure II.5 : Structure microscopique du liège [30].

On estime que 1 cm³ de liège comporte entre 15 et 40 millions de cellules qui sont disposées en rangées régulières. En coupe transversale elles présentent un contour polygonal. Les parois séparant les cellules sont minces (figure II-5), légèrement aplaties dont les dimensions sont de l'ordre de 20 à 30 mm, elles semblent composées de cinq feuillets, deux internes de nature cellulosique, une intermédiaire lignifiée, et deux externes subérifiées. Le tissu subéreux est traversé radialement par des lenticelles qui sont des pores remplis de cellules riches en tannins et à forte lignification. Les lenticelles sont perméables aux gaz et aux liquides et elles sont souvent envahies de micro-organismes saprophytes. Ces parois ayant une épaisseur de 1 à 2 millièmes de mm, sont remplies de gaz d'une composition proche de l'air mais plus faible en CO₂. Ce gaz comprimé hermétiquement par des parois souples explique les qualités mécaniques et physiques du liège.

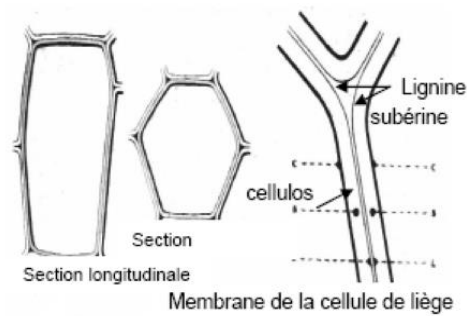


Figure II.6 : Formation du liège [30].

II.3.2.3 Composition du Liège

De plus, de nombreuses références bibliographiques montrent que la composition organique du liège joue un rôle important sur ses qualités. En effet, la subérine est le constituant principal du liège, elle lui procure une grande compressibilité et élasticité.

Quant à la lignine (substance qui imprègne les parois des cellules du bois et confère à celui-ci sa dureté), elle joue un rôle considérable dans la structure rigide des parois cellulaires.

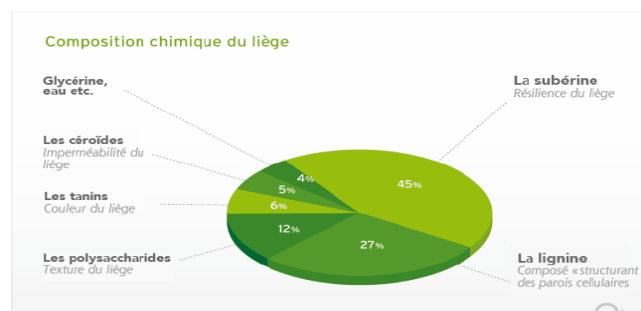


Figure II.7: Schéma de composition du Liège [28].

II.3.2.4 Composition chimique

Le liège du chêne *Quercus suber* est une substance très complexe. L'étude de sa composition chimique a été menée au cours de nombreux travaux qui ont conduit à des résultats parfois contradictoires. La plupart des constituants du liège ne sont accessibles qu'après dépolymérisation et les résultats sont fortement liés aux procédés utilisés. Les constituants du liège sont présents à des proportions qui varient selon l'âge et l'habitat du chêne liège. Il est cependant admis que le liège est généralement constitué d'environ 40 % de subérine, 22 % de lignine, 20 % de polysaccharides et de 18 % de composés divers parmi lesquels les cires, la matière minérale et l'eau [31, 32].

La subérine

La subérine est le constituant principal des parois des cellules du liège, elle lui permet son élasticité. C'est une substance originale très complexe, sorte de polymère lipidique. La structure macromoléculaire de la subérine n'est pas encore établie de façon définitive puisque son extraction ne peut se faire qu'après dépolymérisation, par des méthodes d'hydrolyses alcalines [33, 34].

La lignine

La lignine est un produit de masse moléculaire élevée, résultat du couplage de polymères poly phénoliques distribués de façon aléatoire. Les trois unités monomères de la lignine sont l'alcool coniférylique, l'alcool para-hydrox cinnamique et l'alcool sinapylique [35]. C'est elle qui permet la liaison entre les divers composants.

La cellulose et les polysaccharides

La cellulose résulte de la condensation exclusivement linéaire d'unités glucose unies entre elles [35] et les polysaccharides composent les parois des cellules, et contribuent à la définition de sa texture.

Les tannins

Ils déterminent la couleur

Les céroïdes

Ce sont des Composés hydrophobes assurant l'imperméabilité.

Tableau II.1 : *Composition chimique du Liège.* [31, 32].

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

La composition minérale du liège est représentée dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.2: *Composition minérale du liège*[31, 32].

Eléments	Proportions
P	0.03-0.04 % m.s
K	0.14-0.27 % m.s
Ca	0.11-0.20 % m.s
Mg	0.01-0.02 mg/kg m.s
N	0.47-0.61 % m.s
Mn	25-52 mg/kg m.s
Cu	10.6-16.4 mg/kg m.s
Zn	7.2-11 mg/kg m.s
Fe	132-191 mg/kg m.s

Sans liant à une température de l'ordre de 300°C la résine naturelle contenue dans le liège tient lieu de liant

Tableau II.3 : *Fiche technique de granulats de liège*[31, 32]..

Caractéristiques	Tolérance
Densités	0.24g/cm ³
Granulométries	4 / 8 mm
Coefficient de conductibilité thermique 20°C	$\lambda = 0,040 \text{ W/m}^\circ\text{K}$
Stabilité dans le temps	Illimitée. Produit imputrescible.
Réaction au feu	Très difficilement inflammable.
Attaque des insectes, rongeurs et autres	Peu propice.
Temps de déphasage chaud/froids	+/- 12 heures
Résistance à la conductibilité de la chaleur	$R = 0,5 / 0,75 / 1 / 1,25 \text{ m}^2\text{K/W}$
Chaleur spécifique	1,67 KJ/Kg°C
Résistance à la flexion	1,8 Kg/cm ²
Résistance à la compression	0,20 Kg/cm ²



Figure II.8 : La levée du Liège.

Extraire La planche est soigneusement retirée de l'arbre pour éviter des cassures. Une fois extraite la première planche, les opérations précédentes se répètent pour libérer tout le tronc de son écorce.

II.3.3 Domaine d'utilisation du Liège

Au-delà du traditionnel bouchon, il faut aussi souligner que le liège est employé en quantité très faible, mais parfois irremplaçable dans de nombreux domaines. Les produits, après transformation, sont principalement destinés aux activités industrielles suivantes :

- la construction en général (isolement thermique et acoustique, revêtement, décorations, cloisons,...)
- l'industrie du froid (chambres froides et transports frigorifiques)
- la construction navale (isolation, revêtement, décoration)
- l'industrie des transports (isolation thermique, acoustique et vibratoire)
- l'industrie mécanique en général
- l'industrie textile et la fabrication de chapeaux
- l'industrie chimique, pharmaceutique et la parfumerie (bouchage et conditionnement des produits)
- l'industrie de la pêche (bouées, flotteurs,...)
- l'industrie de la chaussure (semelles, talons,...)
- l'industrie des emballages (granulés et laine de liège)
- la fabrication d'articles de sport (articles de pêche, raquettes, panneaux, balles,...)
- la chasse (bourre de cartouches)
- la fabrication d'articles de maison (nappes, boîtes de rangement, cadres, divers matériels de bureau,...)
- la musique

- la pyrotechnique (feux d'artifice)
- l'industrie spatiale (comme isolant thermique dans les navettes spatiales ; il fut d'ailleurs classé dans la catégorie des " matériaux stratégiques " par les U.S.A. pendant la 2ème Guerre Mondiale).

II.3.4 Du Liège pour l'isolation

La question que l'on se pose tous aujourd'hui : comment allier une isolation thermiques, phonique, résistante aux agressions (humidité, poussière, parasites), une tenue dans le temps, le tout dans le plus grand respect de l'environnement ?

Certes le choix est vaste, celui-ci est un bon isolant thermique mais craint la poussière, celui-là est naturel mais ne supporte pas l'humidité, cet autre n'est pas écologique ...

Seul un produit répond à toutes vos exigences, qu'il soit posé au sol, au plafond, sur les murs, dans le salon, la cuisine ou la salle de bain, il ne gratte pas, ne se tasse pas, il est insensible à la poussière, il peut isoler de l'intérieur comme de l'extérieur : c'est

« Le liège ». En effet, ses qualités mécaniques et physiques en font un champion toute catégorie de l'isolation.

II.3.5 L'isolation thermique

En thermique, un isolant thermique est un matériau ayant une faible conductivité thermique, c'est-à-dire un matériau capable d'opposer au flux thermique qui le traverse, une grande résistance thermique de conduction. De par sa constitution et sa légèreté, le liège en moyenne est un bon isolant thermique.

Il a sa place parmi les matériaux connus pour leurs qualités d'isolation (en valeur moyenne, un centimètre de liège offre la même résistance au passage des calories que 12 cm de briques creuses, 38 cm de béton ou 25 cm de pierre de taille tendre).

II.3.6 L'isolation phonique

L'isolation phonique, ou isolation acoustique, vise à éviter la propagation du bruit. Dans un milieu compressible, le plus souvent dans l'air, le son se propage sous forme d'une variation de pression créée par la source sonore. Seule la compression se déplace et non les molécules d'air, si ce n'est de quelques micromètres. Le son se propage également dans les solides sous forme de vibrations des atomes. De nombreux facteurs interviennent dans la diffusion du son et des bruits (type de bruit, incidence, nature des matériaux et isolation, etc.). En général, plus un matériau est dense, plus il est isolant acoustique (loi de masse). Des effets de peau et de

résonance sont toutefois à prendre en compte si le matériau n'est pas rigide (tôle, plaque fine...). Le liège allie l'effet « amortisseur » en faisant un très bon absorbant du bruit à un effet « masse » qui est la base de l'isolation acoustique.

Peut-on combiner les performances thermiques et acoustiques du liège ?

Si nous considérons un local qui nous sert d'exemple de traitement acoustique, et si nous supposons que le mur de façade est en briques creuses de 20 cm, un revêtement en liège de 12 mm d'épaisseur permettrait de diminuer des déperditions par ce mur de 30 %. Ainsi, la correction acoustique du local à l'aide du liège s'accompagne d'une amélioration de l'isolation thermique.

Propriétés du liège

La composition et la structure du liège lui confèrent de nombreuses propriétés:

- **Elasticité- Compressibilité- Souplesse.** Il est comprimé rapidement dans sa limite élastique, et prend presque instantanément 85 % de son volume initial,
- **Légèreté,** sa faible densité est variable avec la qualité du liège. Elle est due à l'air contenu dans ses cellules,
- **Adhérence,** elle est permise par la force d'expansion d'une matière élastique et par la présence de micro ventouses (cellules coupées lors du cycle de fabrication) au contact des parois.
- **Imperméabilité** qui est due non seulement à la contre- pression exercée par le gaz des cellules, mais aussi à la présence dans les membranes du liège d'une forte proportion de substances grasses (subérine, cérine, ...). Le liège absorbe moins de 18 à 20 % d'eau si son volume augmente (au bouillage), résultant essentiellement de la dilatation des gaz contenus dans ces cellules.
- **Durabilité.** Du fait de sa faible perméabilité il résiste aux agents extérieurs.
- **Faible conductivité phonique et thermique,** du au fait que l'air reste enfermer dans ses cellules (minuscules compartiment étanches) est isolé par une matière non hygroscopique et de faible poids spécifique. La conductibilité thermique interne du liège en planche est de 0.2963 W/m. K, c'est la raison pour laquelle le tissu subéreux du chêne liège est parmi les substances douées de la plus haute capacité isolante. De plus, en réduisant par compression sa taille de moitié, la pression de l'air emprisonné à l'intérieur des cellules ferme les capillarités.

- Mauvaise combustibilité car il lui faut beaucoup d'oxygène pour brûler. De plus il carbonise en surface et cette couche empêche la propagation du feu.

II.3.7 Composite liège-plâtre

Les travaux d'Hernandez-Olivares [36] ont été basés sur une analyse expérimentale sur un nouveau matériau composite liège/gypse, ils ont montré que le liège et le plâtre sont compatibles entre eux, et que beaucoup de nouveaux matériaux de construction peuvent être élaborés en mélangeant les matériaux dans différentes fractions volumiques. Il existe une bonne interaction entre la matrice de gypse et de granulés de liège. Néanmoins, il apparaît que les propriétés mécaniques de ce nouveau matériau composite sont pauvres, en règle générale, et d'autres agents de renforcement (par exemple fibres de verre) sont nécessaires pour augmenter les résistances à la flexion et à la compression de ces composites ; les propriétés d'isolation sont très bonnes, suite à des essais de conductivité thermique. Ce nouveau matériau composite est suggéré pour l'utilisation dans la création d'application, comme cloisons.

En ce qui concerne les caractéristiques d'isolation acoustique, ce composite est un matériau non absorbant le bruit, mais c'est un réfléchissant. Il est semblable à des plaques de plâtre pour plafonds et murs des cloisons, et il faut un certain type de perforation pour se comporter comme un matériau de construction absorbant du son et du bruit.

II.3.8 Mortier polymère léger avec granulés de liège

Les travaux de [37] ont été étudiés deux types de formulations de mortier, avec différents rapports de poids, résine / sable (c. liant / agrégat fin). Dans chaque série, le liège varie de 0% à 45% du volume total cumulé. Les essais de flexion et de compression ont été effectués. À la fois, l'influence de la fraction volumique de liège et le rapport pondéral résine / sable ont été considérés par rapport à la tenue mécanique des mortiers de polymère modifié de liège. Une diminution linéaire a été observée dans les propriétés en fonction de la teneur en volume de liège. La faible densité de liège modifie les mortiers et conduit à une perte lisse des propriétés spécifiques. Les résultats conduisent à des bétons légers de polymères modifiés, avec une ductilité améliorée de compression.

Matériaux isolant d'origine végétale :*Les isolants issus de l'agriculture*

- Le lin
- La chènevotte
- Le chanvre
- Les briques et béton de chanvre

Les isolants à base de bois

- Les fibragglos
- Liège expansé noir
- Fibre de bois

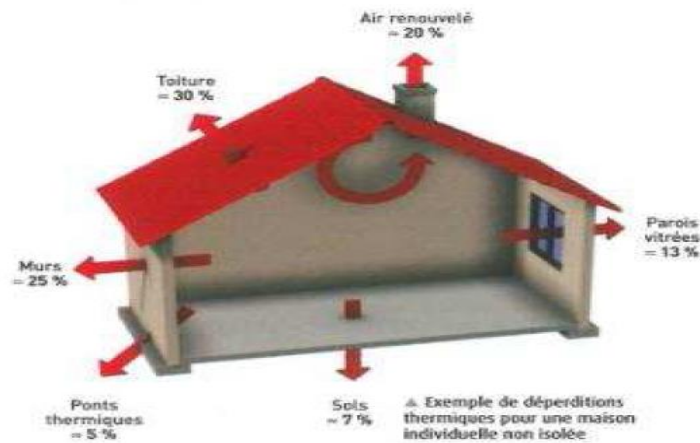


Figure II.10 : Exemple de déperditions thermiques pour une maison individuelle non isolée[38]

II.4 Le chanvre

Le chanvre est une plante cultivée depuis l'arrivée des celtes en Europe. Mais concernant le bâtiment, les traces de son utilisation ancienne restent rares, car grâce à ses qualités de durabilité et de résistance, le chanvre était essentiellement destiné à des usages à forte valeur ajoutée.

Cependant le chanvre est devenu un matériau d'isolation et de construction à la fin des années 80. Ce sont notamment les particules issues de la partie centrale de la tige (la chènevotte) entourées par les fibres longues (la filasse) qui ne sont plus aujourd'hui considérées comme des sous-produit mais qui sont mises en avant. Ainsi depuis une dizaine d'années, le chanvre a pris une place de premier plan dans le domaine de l'éco construction. La chènevotte (cellulose fibrée) est extraite mécaniquement du chanvre, puis dépoussiérée et calibrée. Celle-ci, une fois malaxée avec des liants adaptés, permet la confection de mortiers légers de qualité.



Tige de chanvre fraîche



Au cours du rouissage, les fibres se détachent de l'intérieur de la tige (partie ligneuse) qu'on nomme alors "chènevotte"



Fibres après défibrage dans un moulin à marteaux ou broyeur

Figure II.11 : Type de chanvre[39].

Depuis des milliers d'années, le chanvre est utilisé comme matière première par l'homme : jusqu'à aujourd'hui elle était très prisée dans la conception de vêtements, la fabrication de papier, d'huile, et également en médecine. En tant que matière première renouvelable, le chanvre endigue la pollution et améliore l'état des sols. Durant sa culture l'utilisation de pesticide et d'insecticide n'est pas nécessaire. De plus il assainit l'air, car lors de sa croissance il assimile le CO₂. Après sa moisson, le chanvre laisse un champ propre et riche en éléments minéraux. A présent il conquiert un nouveau marché : celui de l'isolation.

L'isolation en chanvre, est un produit écologique qui ne contient aucun additif susceptible de nuire à l'environnement. Lors de sa transformation et de sa pose, le chanvre ne constitue pas un danger pour la santé. Le remplacement du Chanvre ne pose plus un problème car c'est un matériau recyclable. Le chanvre est conditionné en panneaux et s'utilise pour l'isolation du toit, des murs, et du sol dans d'anciennes ou nouvelles constructions. Sa pose (même pour le bricoleur) est simple et rationnelle : un travail propre, très peu poussiéreux (une très bonne tolérance de la peau sans sensations de démangeaisons), et une isolation optimale, en font un excellent produit d'isolation.

La bonne qualité de diffusion de l'air du chanvre assure une régularisation automatique de l'humidité sans déperdition de chaleur et rend l'habitation saine et confortable. Comme le chanvre ne contient pas d'albumine, les insectes ne s'y attaquent pas. De plus le chanvre est imputrescible et ne contient aucun élément susceptible de nuire à l'environnement [39].

La chènevotte est la partie moelleuse de la tige dont elle représente environ 60% du poids sec. Véritable éponge végétale, elle absorbe 12 fois plus d'humidité que la paille, soit cinq fois son poids. Elle est, de ce fait, utilisée couramment comme litière pour les animaux de compagnie. Elle est désormais utilisée dans la construction pour ses qualités de faible densité et son pouvoir isolant élevé, notamment pour la réalisation de mortier, de blocs constructifs, de béton léger ou extra-léger, pour des mises en œuvre en sol, mur et toit. La chènevotte est aussi utilisée comme

isolant (déversement en vrac), sous-couches nivelantes, ou encore dans la fabrication de panneaux de particules.

II.4.1 Brique de chanvre

On peut fabriquer des murs isolants ou des dalles isolantes en béton de chanvre (mélange de chaux et de chènevotte). Le béton de chanvre est aussi utilisé en isolation soit extérieure soit intérieure de bâtiments existants. Ce matériau permet une bonne "respiration" des murs existants grâce à sa très bonne perspirante, capacité à réguler la vapeur d'eau. La laine de chanvre est aussi un très bon [isolant thermique](#), concurrentiel des laines minérales (laine de verre) parce qu'elle ne pose pas de problème sanitaire ([amiante](#) et [laine de verre](#) sont cancérigènes parce que constituées de fibres extrêmement petites, capables de pénétrer très loin dans les bronches). Des productions de [blocs de chanvre](#) se développent en [Isère](#) et en [Champagne-Ardenne](#) (première région productrice européenne[40]).



Figure II.12 : Brique de chanvre utilisée pour l'isolation acoustique et thermique [40].

II.4.2 Le béton de chanvre

Le béton de chanvre est un nouveau matériau de construction développé en France depuis le début des années 90. Il est obtenu par mélange de particules de chanvre (la chènevotte), d'un liant, d'eau et d'éventuels adjuvants et permet de réaliser des écoconstructions de bâtiments, comme matériau de remplissage d'une structure porteuse. Le béton de chanvre possède une porosité très élevée et essentiellement « ouverte » (plus de 70% en volume pour une formulation de type « Mur » avec plusieurs tailles caractéristiques de pores :

- Des macros pores (d'environ 1 cm de diamètre) dus à l'agencement imparfait des diverses particules de chanvre dans le mélange ;
- Des méso pores (de 0,1 mm à 1 mm) au sein des particules et du liant ;

- Les micropores inter hydrates (inférieurs à 0,01 μm) dans la matrice du liant.

Du fait de sa forte porosité, le béton de chanvre présente un comportement mécanique « atypique » et ses performances thermiques et acoustiques sont particulièrement intéressantes : il constitue donc un matériau multifonctionnel relativement attrayant.

Le béton de chanvre fait partie de la famille des bétons de bois et, à ce titre, sa principale caractéristique est sa légèreté. En effet, il présente une masse volumique apparente sèche faible (de l'ordre de 400 kg/m^3 pour un mélange de type « Mur »), très nettement inférieure à celle d'un béton classique (généralement comprise entre 2000 et 2600 kg/m^3). Toutefois, plus le béton de chanvre est léger, plus son niveau d'isolation thermique et acoustique est élevé, et plus ses propriétés mécaniques sont faibles. C'est la raison pour laquelle il est primordial d'optimiser la formulation du matériau mis en œuvre afin d'obtenir le meilleur compromis possible entre performances mécaniques, thermiques et acoustiques selon l'utilisation que l'on désire en faire.

La première piste d'optimisation envisagée a consisté à faire varier la quantité de liant introduite lors du mélange. Les exigences des chantiers de construction ont ainsi permis de faire émerger quatre formulations types de béton de chanvre, aujourd'hui parfaitement identifiées et validées: les formulations « Toit », « Mur », « Dalle » (ou « Sol ») et « Enduit » (Figure II.13). Le nom de chaque formulation fait référence à l'usage qui est fait du matériau dans le cadre d'une habitation. La formulation « Toit », par exemple, contient une forte proportion de chènevotte et peu de liant (Figure II.13.a) : elle sert à isoler thermiquement les toitures. Les formulations « Mur » et « Dalle », quant à elles, contiennent une quantité de liant plus importante (Figure II.13.b) et possèdent donc de meilleures caractéristiques mécaniques tout en conservant un bon pouvoir isolant. Enfin, dans la formulation « Enduit », la chènevotte est noyée dans la matrice de liant (Figure II.13.c).

Des dosages correspondant aux quatre formulations répertoriées sont proposés à titre d'exemple dans le cadre des « Règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre » [RP2C (2007)] pour un liant (Tradical PF 70) et une chènevotte (Chanvribat) donnés (Tableau 1)[41].

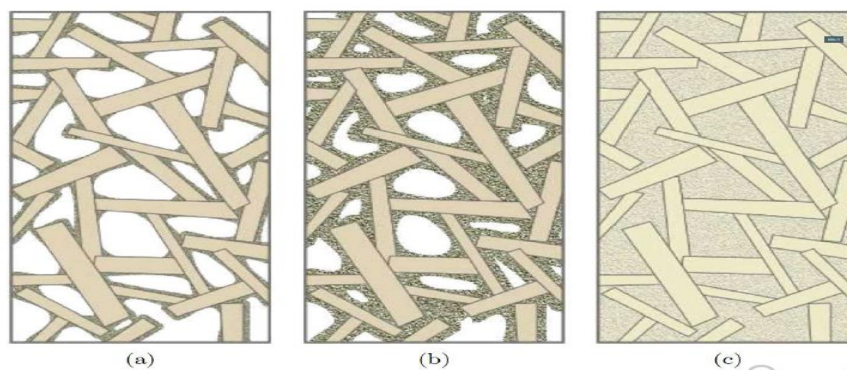


Figure II.13 : Représentation schématique des formulations « Toit » (a), « Mur » (b) et « Enduit » (c) [41].

Tableau II.4 : Exemples de dosages tirés des « Règles professionnelles d'exécution d'ouvrages en béton de chanvre » [41].

Pour 1 m ³	Chènevotte (kg)	Liant (kg)	Sable (kg)	Eau (kg)
« Toit »	130	110	-	225
« Mur »	130	220	-	350
« Sol »	130	275	-	500
« Enduit »	130	485	160	650

II.4.3 Le chanvre matériau isolant issu de l'agriculture

Le chanvre « *cannabis sativa* », plante annuelle cultivée depuis les celtes donne deux types de fibres : longue pour les tissus, cordage, papeterie et les isolants en panneaux et rouleaux et courte pour la chènevotte. Les panneaux ou rouleaux d'isolant texturés sont destinés à l'isolation rapportée entre ossatures et sont éventuellement en composition avec d'autres matières : chanvre/lin ou chanvre/coton...

Il existe également des panneaux de feutre pour sous couche phonique.

Avantages

- Matériau renouvelable et recyclable ;
- Non consommable par les rongeurs et un peu dégradable ;
- Bonne durabilité et stabilité et si mise en œuvre et densité suffisante ;
- Sans effet négatif sur la santé ;
- Pas de dégagement de gaz toxique en cas d'incendie ;
- Bon isolant acoustique pour les bruits aériens ;
- Bon qualité hygroscopique.

Inconvénients

- Sensible au feu;
- Matériau putrescible en cas d'humidité prolongée [42].

II.5 Les résines végétales

Les résines végétales sont des substances naturelles secrétées par certains végétaux. Elles ont l'aspect d'un liquide poisseux qui sèche plus ou moins rapidement au contact de l'air. Elles sont souvent fortement odorantes.

Le terme de « résineux » est souvent utilisé pour désigner les conifères car la plupart de ces arbres, comme les sapins, les pins ou les cyprès produisent en abondance des résines. Certaines, notamment celle du pin maritime, font l'objet d'une exploitation économique.

Mais tous les conifères ne produisent pas de résines : c'est par exemple le cas du Thuya Géant et du Tsuga de Californie. Et il existe en dehors des conifères, de nombreux autres végétaux sécrétant des résines : certains dragonniers et d'autres genres fournissent des résines rouges appelées sang-dragon, autrefois utilisées comme colorants, les Burséracées donnent des résines d'encens ou de myrrhe, le cannabis exsude une résine utilisée comme drogue psychotrope, etc.

Les résines sont excrétées hors des cellules végétales dans des canaux résinifères ou à l'extérieur de la plante. Elles se différencient des latex qui se maintiennent à l'intérieur des parois cellulaires et qui ne s'échappent qu'en cas de blessure.

Les résines peuvent fossiliser et donner des matières comme l'ambre.

Les résines sont comptabilisées pour la FAO et les éco-certifications forestières comme « produits forestiers autres que le bois ».

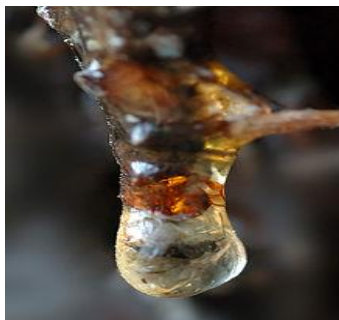


Figure II.14 : résines végétales [64].

II.6 Scieur de bois

II.6.1 Définition

Le bois est un matériau composite naturel composé de fibres de structure complexe. Ces fibres sont constituées de micro-fibrilles de cellulose de structure cristalline et fibreuse, enrobées de deux types de polymères amorphes : la lignine et les hémicelluloses[43]. Le bois contient également une petite quantité (de 2 à 5% en masse, dans le cas particulier des résineux) de composés organiques de plus faible masse moléculaire et de structures très variées. Ces composés, principalement des sels minéraux et les résines, sont désignés en tant qu'extractibles du bois.

Généralement, le bois est un matériau de construction dont la transformation industrielle génèrent des sous-produits et des sciures qui peuvent être valorisés pour d'autres usages, tel que la valorisation énergétique comme combustible et comme adsorbant propre, naturel et à faible coût. Les propriétés structurales du bois et la présence de cavité longitudinale. Les sciures de bois, naturelles ou traitées chimiquement, provenant de différentes espèces d'arbres ont fait l'objet de plusieurs travaux. Dans ce contexte, nous citons quelques espèces de bois dont la sciure ou copeaux ont fait l'objet de telles recherches : *Fagascrenata*[44], *Teca*[45], *Bassialatifolia*[46], *Abies magnifica*[47], *Tilia americana* et *Piceaengelmannii*[48], *Mangiferaindica*[49,50], *Pinusroxburghii* et *Cedrusdeodara*[51], *Juglans*[52], *Pinussylvestris*[55-56], *Eucalyptus* sp[57], (*Juniperusphoenicea* L, *Cedrusatlantica* et *Arundo donax* L)[58]. Cependant, la valorisation de la sciure de bois, nécessite une connaissance de structure et de texture du matériau [59].

Les matériaux suivants d'origine végétale ont été mis en évidence pour le moment : la sciure de bois [60], les coques d'arachides, les résidus de céréales (riz, mil, sorgho...), la fibre de noix de coco, la sciure de bois, liège, la laine de kapok, etc...

Mais l'économie des travaux que nous présentons ici concerne la sciure de bois et la laine de kapok.

II.6.2 Le béton bois

La sciure de bois issue des produits de récupération constitue un élément d'importance croissante dans l'exécution des projets de construction car le bois est une source renouvelable et inépuisable. Le béton bois est un matériau composite, généralement composé d'une matrice cimentaire et des charges végétales de formes granulaires, et qui peut être adjuvanté [61]. Ces différents chercheurs ont étudié les caractéristiques physiques mécaniques et thermiques des

bétons légers à base de sciures de bois. Dans le même contexte, d'autres auteurs ont travaillé sur l'influence du pourcentage de la sciure de bois sur les performances du béton composite à base de bois [62].

La sciure de bois contient des matières qui nuisent à la prise du béton ; différents traitements sont alors appliqués pour éliminer les risques d'agressions biologiques du bois dus aux champignons lignivores et aux insectes xylophages et neutraliser les effets négatifs de la cellulose sur la prise du ciment, car la proportion de la cellulose dans les divers bois feuillus et résineux est de 40 à 45% [63]. Avant de pouvoir servir à la fabrication du béton léger à base de sciure de bois, cette dernière doit être pré-trempée pour éliminer toute matière soluble comme les sèves végétales.

Cependant, les bétons légers à base de granulats de bois, présentent des inconvénients tels que le risque de ségrégation, la sensibilité à l'eau, la faible résistance au feu et la mauvaise durabilité.

Plusieurs solutions ont été proposées, comme l'utilisation d'une matrice argileuse [64], ou bien envelopper la sciure de bois par un matériau qui ne brûle pas mais qui goûte « le polypropylène »[65].

II.5.3 Les Farines de bois

Il s'agit d'une forme particulière de bois obtenue par séchage et broyage de sciure. Toute une gamme de tailles de particules est disponible et les facteurs de forme varient de 2:1 à 4:1. Les farines de bois disponibles sur le marché sont classées par gammes de grain, i.e. 50-150 μ , 100-200 μ , 250-450 μ , 450-700 μ . La teneur en humidité n'excède pas 8 %.

Depuis la fin des années 90, de nombreuses équipes de recherche se sont intéressées aux composites farines de bois/ plastique. Ainsi [Grubbström et Oksman 2009] ont étudié l'effet de la farine de bois humide sur les WPC. Ils ont trouvé que les propriétés physiques décroissent en présence d'humidité. [Takatani et al, 2000] ont montré par ailleurs que l'ajout de la farine de bois (SteamExploded 'SE') augmente la force à la rupture et la résistance à l'eau. D'autre part, [Danyadi et al 2007] ont observé que les propriétés mécaniques dépendent de l'orientation et de l'anisotropie de la farine de bois.

II.6.4 Les copeaux de bois

Issus des scieries et des menuiseries, ce type de matériau possède des formes et facteurs de formes très divers. Les copeaux et les particules consistent en des fragments de fibres et des fibres de bois liés ensemble par la lignine. D'une manière générale, les copeaux ont entre 25 et

40 mm de longueur, 10 à 100 mm de largeur et 5 à 15 mm d'épaisseur. Il s'agit donc d'un matériau très hétérogène mélangé avec de la poussière ; ce matériau nécessite une préparation par des broyages successifs à sec et un tamisage. Cette préparation au moyen d'un raffineur est une condition requise pour l'obtention d'un matériau homogène qui puisse être utilisé.

II.7 Les résines époxydes, historique

C'est en 1909 que le chimiste Russe Prileschajew découvrit que les oléfines réagissaient avec l'acideperbenzoïque pour donner une fonction époxy. Dans les années 40, le Suisse Pierre CASTAN et l'Américain Sylvan GREENLEE, revendiquent simultanément la paternité d'une matière plastique thermodurcissable composée d'une résine et d'un durcisseur. La production industrielle débutera dans les années 50 pour répondre à une demande croissante de revêtements performants.

Depuis 1960, plus d'une cinquantaine de structures chimiques distinctes ont été mises au point avec des nuances quant à la masse moléculaire, l'isomérisation, la pureté...

Avec une centaine d'agents de réticulation, des agents modificateurs, des diluants, des charges organiques ou inorganiques, il peut être préparé une variété infinie de formules. Les époxydes sont considérés comme une avance technologique sans précédent sur les résines phénoliques et les polyesters.

II.7.1 Processus de polymérisation

Ces résines sont des bi-composants composés d'une partie résine époxy et d'une partie durcisseur. Les durcisseurs contiennent des terminaisons capables de s'ajouter sur les cycles époxydes de la résine lors de la mise- en œuvre, ou des fonctions catalytiques qui déclenchent la copolymérisation du système époxy.

Cette réaction s'effectue sans élimination, le polymère obtenu n'a donc qu'un retrait minime. La résine époxy parfaitement polymérisée, fait partie de la famille des plastiques thermodurcissables qui, par définition, sont infusibles et insolubles sous l'action de la chaleur, des solvants, des radiations.

On peut se représenter la réaction d'une résine époxy bi-fonctionnelle et d'un durcisseur tétra fonctionnel classique voir figure II.15.

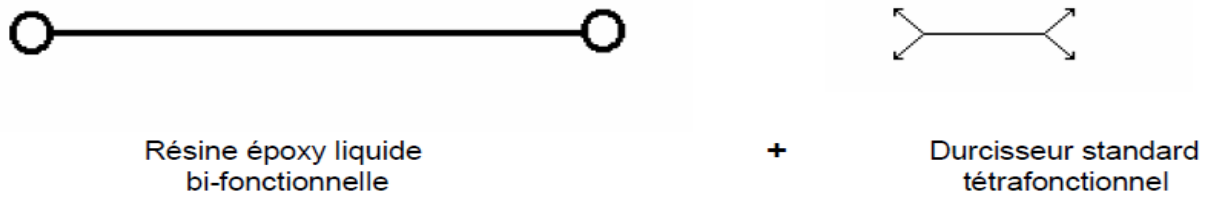


Figure II. 15 : Représentation graphique du processus de polymérisation d'un système époxy [63]

Résine époxy après quelques heures à température ambiante. Le polymère possède déjà des propriétés mécaniques. Des fonctions époxydes et amines n'ayant pas réagi sont encore présentes dans le réseau.

Lors du mélange des deux composants, il est primordial de respecter les dosages préconisés. Les schémas ci-dessus illustrent l'influence d'un excès ou d'un défaut de durcisseur. Le polymère obtenu n'est pas dans sa configuration optimale de performance mécanique et contient encore des groupes époxy ou amines qui se font facilement attaquer par des agents chimiques tels que l'eau.

II.7.2 Les paramètres de formulations d'un système résine époxy / durcisseur pour le bois

Le choix des matières premières utilisables est dicté par la spécificité d'application pour la construction bois. La définition de produits époxydes pour le bois demande une sérieuse expérience dans la chimie et une connaissance approfondie de la construction navale. Par la connaissance des produits époxydes et sa longue expérience de formateur.

Une formulation de système époxy pour le bois doit répondre à un cahier des charges:

- Utilisations et sollicitations de la pièce finie, échantillonnage des renforts envisagés, résistances souhaitées coefficient de sécurité, poids final, production à l'unité ou en série, prix ;
- Paramètres de mise en œuvre : température, hygrométrie, quantité, technologie de transformation, nature du support, préparation de surface ;
- Evolution de la viscosité du mélange et de la chaleur de réaction en fonction de la température, de la masse, de la géométrie de la pièce à réaliser (revêtement, épaisseur du stratifié, volume de coulée) ;
- Sélection des composants de base, des facteurs qui favorisent l'adhésion sur le bois
- Propriétés mécaniques : modules, résistances traction, flexion, compression, chocs, cisaillement ;

- Vérification par des tests mécaniques et de vieillissement accéléré ;
- Thermiques : Evolution du taux de réticulation par l'analyse de la température de transition vitreuse, optimisation du cycle de post-cuisson ;
- Réactivité : temps de gel, température maximum d'exo-thermie, temps de séchage en film ;
- Résistance chimique, au feu, à l'abrasion, aux ultraviolets ;
- Thixotropie : amélioration de la tenue en parois verticales d'un revêtement liquide ;
- Aptitude au débullage ;
- Qualité de surface du film durci : tendu, brillance, pollution en fonction de la température ambiante et de l'hygrométrie.

II.8 Théorie du collage du bois à l'époxy

Il n'y a pas très longtemps encore, la seule théorie du collage que l'on admettait, reposait sur la pénétration de la colle dans les pores des matières à assembler. La réaction chimique du liant engendre son durcissement sous forme de tentacules qui, à la manière des doubles crampons, maintenaient les deux pièces en un contact intime et dont la résistance à l'arrachement pouvait être d'autant plus grande que la pénétration de la colle était Profonde. Tout ceci impliquait donc la porosité des matières et une colle suffisamment liquide et mouillante pour lui permettre, soit par simple capillarité, soit par pression, une pénétration dans toutes les anfractuosités ouvrant sur la surface des plans de collage. Cette action adhésive était désignée sous le nom *d'adhérence mécanique*, et si elle est encore valable aujourd'hui pour certaines matières dont le bois, il n'est pas possible d'appliquer cette théorie aux collages de corps métalliques dont les surfaces sont lisses et imperméables à toute pénétration d'une colle. On favorise donc l'adhérence mécanique par saturation des canaux du bois par la pression exercée sur la surface (lamellé-collé), en employant la technique du vide et de l'autoclave. Dans la construction bois époxy, les pressions appliquées sont faibles : les pièces sont maintenues en contact pendant le durcissement. La pénétration de la résine est fortement liée à la texture du bois, sa densité, en bois de bout ou de fil. Les canaux et les parois des cellules du bois accepteront un volume d'autant plus grand d'adhésif, que l'humidité du bois sera faible. On considère que ce taux doit être inférieur à 12 %.

II.1.8.1. L'adhérence spécifique.

Valable pour les métaux, cette nouvelle théorie complète heureusement celle de l'adhérence mécanique permettant de réaliser avec succès des assemblages mixtes : bois / métaux, bois /matières plastiques. La matière est constituée par des atomes qui, par agglomération, donnent naissance aux molécules. Atomes et molécules sont rendus solidaires par des forces électriques interatomiques ou intermoléculaires, qui donnent à la matière son état physique.

L'adhérence spécifique qui étudie ces forces, implique donc une certaine action de ces forces entre les molécules de la colle et celles de la substance à coller. Celles-ci suivant la nature de la matière, sont polaires ou apolaires et correspondent à la distinction que l'on fait entre les liquides hydrophiles et les liquides hydrophobes.

Les molécules d'un corps polaire sont caractérisées par la présence de fonctions organiques du type alcool ou hydroxyle (OH), amine (NH₂), époxy, acide carboxylique (COOH), aldéhyde (COH) ... Ces fonctions organiques sont présentent dans le polymère durcit et dans les constituants végétaux (lignite et cellulose). La résine époxy et les cellules lignifiées du bois sont de même «nature» chimique, donc compatibles du point de vue polarité.

Les fonctions organiques peuvent aussi réagir entre elles et créer des liaisons chimiques. Quant aux produits apolaires, ils ont pour prototypes les hydrocarbures extraits de la houille ou du pétrole et certains dérivés du type polyéthylène, polypropylène. L'exemple le plus connu est le cas de l'eau et de l'huile :

Ces deux liquides n'ayant pas la même polarité, n'ont aucune affinité l'un pour l'autre et ne peuvent constituer un mélange homogène. On admet alors facilement que des actions similaires existent entre un liquide adhésif et une matière solide : bois, métal, plastiques, etc. D'un point de vue pratique : les surfaces à coller se font propres et exemptes de traces de gras.

La majeure partie de la résistance d'un joint étant due à l'adhésivité spécifique, il paraît évident que le collage de deux morceaux de bois, fortement polaires par nature, sera plus facile que le collage du bois sur une plaque de métal qui lui est apolaire, c'est-à-dire hydrophobe, et qui devra être rendu hydrophile ou polaire par des traitements spéciaux (acides) afin d'adhérer au bois.

Cette attraction intermoléculaire étant ainsi définie et constituant une certaine affinité entre les différents corps, de nombreux facteurs peuvent modifier cette force attractive.

Le collage ne peut réussir que si les molécules superficielles du plan de collage n'ont subi aucune modification physique ou chimique et n'ont pas été souillées par des corps étrangers modifiant leur polarité (graisses, gasoil, silicones, peintures, vernis...)

De plus pour rendre le plus intime possible le contact du bois et de la colle, condition essentielle pour obtenir un joint solide, la pression est nécessaire. Elle complète le phénomène d'adhérence spécifique, mais doit être exercée avec précaution pour permettre une pénétration suffisante de l'époxy et éviter de réduire l'interface à une épaisseur trop faible, pouvant aller jusqu'à l'élimination presque totale de l'adhésif. Pour cette raison lors de toutes les opérations de collage bois / bois, on incorporera au mélange résine / durcisseur, de la microfibre de bois **Treecellou** du **Wood Fill 250**. On obtient alors une colle auto-remplisseuse (gap-filling).

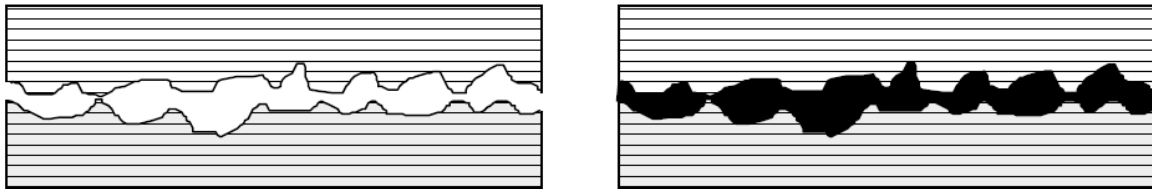


Figure II.16 : Remplissage des imperfections de surface du bois par la résine chargée de microfibres **Treecell**[63]

Un adhésif est par définition un matériau non métallique pouvant assembler des éléments par adhérence.

Par ce processus, la structure des éléments à assembler est inchangée.

Dans l'assemblage de deux matériaux, la résistance finale dépend:

- Du substrat
- De l'adhésif
- Des interfaces

La résistance globale du système est alors déterminée par la plus faible des trois. La résistance maximale d'un assemblage est atteinte avec la rupture du substrat, de la couche adhésive ou aux interfaces. L'adhésion totale dépend des forces d'assemblage. Elles sont déterminées par l'adhésion: ancrage mécanique, forces électriques entre les fonctions organiques, liaisons chimique entre la colle et le support et la cohésion des constituants.

Par leur haut pouvoir adhésif et leur cohésion, les joints de colle à base de résines époxydes spécifiques, sont plus résistantes en traction et cisaillement que le bois dans le sens axial (Tableau 2 et 3). D'autre part une résine est isotrope alors que le bois a une résistance "quasi unidirectionnelle"

Tableau II.5 : Propriétés mécaniques des bois et des résines époxydes [63]

Matériaux	Densité moyenne Kg / m ³	Contrainte maximum de traction perpendiculaire au fil du bois MPa	Contrainte maximum de cisaillement parallèle au fil du bois MPa
Frêne	750	6.5	14
Pin d'orégon	500	2.5	8
Red cédar	350	1.5	7
SR 5550 / SD 550x	1110	60 - 70	20-30

II.8.2 Comparatif bois / matériaux en flexion statique 3 points

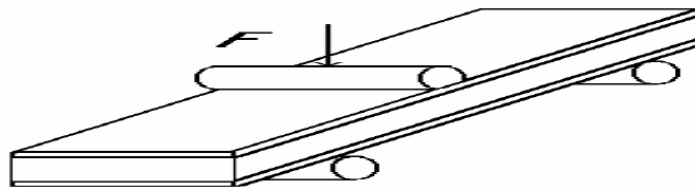


Figure II.17 : Flexion 3 points[63]

Tableau II.5 : Propriétés mécaniques des bois et des résines époxydes [63]

MATERIAUX	Densité moyenne (Kg/m ³)	Module (MPa) (1)	Contrainte maximum (MPa) (2)	Module spécifique (3)	Contrainte spécifique (4)
Acacia	750	13 800	175	18.5	0.23
Frêne	750	12 300	140	16.4	0.19
Red cédar	350	5 400	70	15.3	0.20
Sipo	625	12 300	118	19.7	0.19
UD Verre / polyester (5)	1530	19 000	500	12.4	0.32
UD Verre / époxy (5)	1540	24 000	600	15.6	0.39
UD Verre / époxy (6)	2080	46 000	1000	22.1	0.48
UD Carbone / époxy (6)	1530	78 000	1570	51.0	1.02

Le tableau II.6 illustre parfaitement l'intérêt du bois en tant que matériau performant [63]. Le bois est tout d'abord de 2 à 6 fois plus léger que les matériaux composites renforcés de fibres. En traction et flexion, le module ou rigidité et la contrainte maximum permettent de comparer les matériaux pour une épaisseur équivalente : par exemple, 10 mm de stratifié

d'unidirectionnels verre / époxy au contact sont 2fois plus rigide que 10 mm d'Iroko et 10 fois plus résistants en traction.

L'utilisation des bois légers est évidente dans le sens du fil en tant que matériaux d'âme, dans des structures composites bois / fibres-époxy.

II.9 Le bois est utilisé en tant que matériau d'âme

La structure d'un bateau présente un problème mécanique unique. Elle requiert un bordé qui supporte des charges importantes en flexion et une structure qui doit résister à de fortes contraintes ponctuelles. Mais compte-tenu de sa grande surface il doit allier légèreté, résistance et rigidité, pour augmenter ses performances et sa longévité. Le problème de base dans la conception et la construction d'un bateau est que le poids du bordé est proportionnellement le plus important dans le poids total de l'unité. La rigidité de la coque peut être améliorée par l'accroissement de l'épaisseur de cette structure: c'est le concept de construction composite du type «sandwich».

L'influence de l'épaisseur et de la nature de l'âme en bois est démontrée par le modèle mathématique ci-dessous :

$EI = E \times bh^3$ EI : Raideur de la poutre en flexion

E : Module de YOUNG

b : Largeur de la poutre

h : Hauteur ou épaisseur de la poutre

Cette relation montre que pour rigidifier un bordé, deux solutions sont possibles :

- Augmenter E par l'emploi de stratifiés hautes performances (Verre, carbone, aramide)
- Augmenter l'épaisseur h , qui est au cube dans la formule. Les impératifs de poids impliquent l'utilisation de matériaux d'âme à faibles densités : bois légers, mousses PVC, nids d'abeilles.



Figure II.18 : Influence de l'épaisseur des panneaux sandwich sur la rigidité EI en flexion[63].

Dans les structures sandwichs, les contraintes normales dans les peaux diminuent en fonction du carré de l'épaisseur de l'âme. Cela augmente très rapidement la rigidité en flexion de la structure. Les contraintes normales dues à la flexion se concentrent dans les peaux. L'âme a un rôle primordial dans la cohésion de l'ensemble : elle empêche en particulier le flambage des peaux.

La flexion induit des contraintes de traction dans la peau inférieure, de compression dans la peau supérieure, et respectivement celles-ci ont tendance à se rapprocher de la fibre neutre (compression de l'âme) et à s'éloigner (traction de l'âme).

Le rôle du «cœur» d'une structure sandwich est donc de résister aux contraintes importantes d'arrachement, de compression et de cisaillement.

Autre paramètre important, les propriétés mécaniques du bois sont moins sensibles aux variations de température que les matériaux d'âme du type mousse de PVC.

II.10. Les méthodes d'assemblages en bois / époxy

Les surfaces à coller doivent être propres et sèches et être maintenues dans cet état jusqu'à l'application de l'adhésif. L'humidité diminue le mouillage de la surface par l'époxy (sauf formulation spécifique). En principe, un collage doit être différé en extérieur par mauvais temps : pluie, froid, forte humidité de l'air. [66]

La qualité d'un collage dépend des conditions de travail suivantes :

- Température ;
- Humidité de l'air ;
- Propreté du poste de travail ;
- Conditionnements maintenus fermés, surtout pour le durcisseur qui réagit avec le CO₂ atmosphérique ;
- Qualité du dosage et du mélange des composants ;
- Adhésif adapté au support, charges adaptées à l'utilisation finale ;
- Bonne adsorption et mouillage ;
- Pas de contrainte pendant le processus de prise ;
- Durée de prise, pression ;
- Durée de vie en pot ;

II.11 Conclusion

Ce chapitre nous a permis de mieux reconnaître les matériaux d'âme d'un matériau composite, spécialement les matériaux végétaux.

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés pour la confection d'âme (peau) des structures multicouches.

Ces structures sont généralement constitués de :

- deux semelles ou peaux, de faibles épaisseurs et de haute résistance.
- une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité.

Cette recherche nous a permis de canaliser notre travail de recherche expérimentale à la recherche des nouveaux matériaux pour constituer une âme à base d'une matrice en mortier allégé par des fractions volumique de sciure de bois, dont les semelles sont collés par une résine époxyde. Le panneau confectionné est applicables comme isolant entre les parois, nous ferrant donc des essais préliminaires pour choisir le matériau et sa fraction de volume qui nous donne les meilleures propriétés mécaniques. Cette caractérisation est présentée dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE III

PROCÉDURE EXPÉRIMENTALE ET MATÉRIAUX

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons présenter les étapes menés lors de cette étude expérimentales investie au laboratoire de Génie Civile de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.

Les constituants de base d'un mortier (normal) sont le ciment, l'eau et le sable. Les autres mortiers sont obtenus par ajouts d'adjuvants et additions minérales. Notre travail consiste à la réalisation d'un mortier allégé par, (la sciure de bois ; le liège) qui est utilisé pour la réalisation des panneaux multicouches renforcés par le tissu polypropylène ainsi que le polymère (PVC).

Après la présentation des matériaux utilisés, la première étape consiste en la définition des gammes du liège et la sciure de bois par une analyse granulométrique, la seconde, concerne la réalisation des éprouvettes et les panneaux composites. Enfin, une présentation des essais mécanique.

III.2. Présentation des matériaux étudiés :**III.2.1 Le mortier :**

Le mortier se distingue du béton par l'absence de gravillons. Le mortier est un mélange de sable, ciment, eau et éventuellement d'adjuvants. De multiples compositions de mortier peuvent être obtenues en jouant sur les différents paramètres : liants (type et dosage), adjuvants et ajouts, dosage en eau. En ce qui concerne le liant, tous les ciments et les chaux sont utilisables ; le choix de leur nature et de leur dosage est en fonction de l'utilisation envisagée du mortier. Habituellement le mortier est utilisé comme un matériau de construction notamment pour tous les éléments en maçonnerie, les enduits, les chapes, les scellements et les calages etc.

III.2.1.1 Ciment

Le ciment est un liant hydraulique, c'est-à-dire une manière inorganique finement moulue, gâchée avec de l'eau, forme une pâte qui fait prise et durcit par la suite de réactions et processus d'hydratation et qui, après durcissement, conserve sa résistance et sa stabilité même sous l'eau. On a utilisé un ciment de marque CIMAT CEM II /A-L 42.5 R.

III.2.1.2 Sable

Les grains de sable sont composés de fragments de roche, de minéraux et peuvent également contenir des débris d'origine organique ou synthétique. En général, les gros granulats sont constitués de fragments de roches tandis que les sables fins sont principalement constitués de minéraux détachés de leur roche d'origine. Dans notre cas nous avons utilisé un sable provenant d'une sablière, stocké à l'université, lavé, séché et conservé à l'intérieur du laboratoire (sable sec et propre).

III.2.1.3 L'eau

L'eau joue un rôle déterminant dans la fabrication des mortiers et des bétons à base de liants hydrauliques. Elle agit non seulement pour conduire à la prise de ces matériaux, par réaction entre les constituants anhydres des ciments, mais aussi pour leur conférer certaines de leurs caractéristiques à l'état frais et à l'état durci.

L'eau utilisée dans cette étude est l'eau de robinet, qui est une eau potable (propre).

III.2.2 La sciure de bois

La sciure est constituée des fines particules désignant l'ensemble des résidus produits par le sciage de bois. La sciure est produite au cours d'opérations d'usinage effectuées sur la matière première (bois). La sciure de bois résultante d'une manufacture peut être ainsi récupérée et valorisée pour le domaine de la construction.

Les résultats de l'analyse physique montrent que la sciure de bois renferme 2,1 % d'humidité, 1,5 % de matière minérale alors que son pH et sa densité apparente sont respectivement de 5,2 et $0,1041 \text{g.cm}^{-3}$. La sciure de bois utilisée provient des menuiseries de proximité.



Figure III.1: Sciure de bois utilisé.

III.2.3 Le Liège

Le liège est un matériau renouvelable, recyclable, et réutilisable. Sans additifs, aggloméré par la propre résine du liège sous l'action de la vapeur et de la pression on obtient un matériau de très bonne isolation phonique et une absorption acoustique, ainsi qu'une grande stabilité dimensionnelle et résistant à l'écrasement.



Figure III.2: Liège aggloméré

Concernant notre étude nous avons utilisé un matériau 100% naturel, extrait de forêts gérées durablement dans la région de YAKOURAN de TIZI-OUZOU
Le liège est récupéré à l'état brut.



Figure III.3 : Liège à l'état brut

Le liège est ensuite broyé avec un broyeur spécial, le matériau est obtenu sous forme de granulats de diamètres allant jusqu'à 25mm.



Figure III.4 : Liège broyé.

Remarque

La Caractérisation expérimentale de ces matériaux est largement présentée dans les mémoires de Mr Lamara et Mougari. Pour rappel, cette partie a été réalisée en étroite collaboration étant donné qu'on a travaillé en groupe sous la direction de notre promoteur. Donc, dans la suite de ce travail, on s'intéressera juste au comportement des éprouvettes prismatiques et les panneaux réalisés à partir de la formulation optimale déterminée à partir de l'étude des différentes variantes présentés dans les autres travaux.

III.3.Préparation des panneaux multicouches composites :

Pour le besoin de notre étude nous réalisons des éprouvettes prismatiques de dimensions 450 x 23 x 50 mm pour les essais de traction par flexion et flambement.

III.3.1.Matériaux utilisés

Ciment : Le ciment utilisé est un ciment portland de marque CIMATCEM II /A-L 42.5 R;

Sciure de bois : La sciure de bois utilisé est rabotée. Récupérée d'une menuiserie locale;

Sable : Le sable utilisé provient d'une sablière, stocké à l'université, lavé, séché et conservé à l'intérieur du laboratoire (sable sec et propre).

L'eau de gâchage : L'eau utilisée dans cette étude est l'eau du robinet, qui est une eau potable, donc propre.

La composition du mortier

Une même composition a été utilisée que pour les essais préliminaires. Le tableau ci-dessous répertorie les constituants avec leur rapport pour la formulation d'un m³ de mortier.

Composants	Masse pour 1m ³ de mortier
Ciment (kg/m ³)	400
Sable (kg/m ³)	1 400
Eau (Litres)	202

Tableau III. 1 : Composition du mortier

III.3.2 Préparation et fabrication des moules

Nous avons fabriqué plusieurs coffrages en bois permettant le coulage de douze panneaux à la fois de dimensions 450 x 23 x 50 mm, Toutes les éprouvettes ont été réalisées à partir de la même gâchée.



Figure III. 5 : Coffrage en bois 450 x 23 x 50 mm.

- **Composition des panneaux:**

Les différents constituants des panneaux et les fractions volumiques et massiques des composants sont donnés dans le tableau III.2 suivant:

Tableau III. 2 : Composition des panneaux mortier / sciure de bois.

Matériaux	Pourcentage %	Densité (g/cm ³)	Quantité (g) utilisé pour une éprouvette 450x23x50 mm.
Sciure de bois Gamme 3	40%	0.5	90
Ciment	60%	/	118.8
sable	60%	/	415.8
eau	60%	/	60

L'eau était ajoutée selon le besoin, car la sciure de bois présente un grand pouvoir absorbant.

III.3.3 Malaxage et mise en œuvre du mortier

Après avoir pesé les quantités des matériaux utiles, nous avons bien mélangé jusqu'à l'obtention d'une consistance homogène du mélange.

Les moules étant rincés avec de l'huile de vidange. La mise en place du mortier dans les moules a été effectuée dans les différents moules destinés aux éprouvettes programmées aux essais.

Le démoulage a été effectué à après 7 jours à cause de la fragilité des éprouvettes, pour éviter la déformation des panneaux.

III.3.4 Moulage au contact

Le moulage au contact est un procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables. Les renforts sont déposés sur la pièce et imprégnés de résine liquide.

**Figure III.6** : Principe de mise en œuvre des renforts.

III.3.5 Matériaux des renforts :

III.3.5.1 Le polymère (PVC) :

Composé à 57% de chlore et à 43% d'éthylène, le PVC est la seule matière plastique d'usage courant constituée par plus de 50% de matière première d'origine minérale existant à profusion dans la nature.

La résine PVC ainsi obtenue est alors mélangée à des additifs (stabilisants, colorants, antichocs, et...), choisis pour permettre son utilisation industrielle et pour conférer au produit final des propriétés adaptées à son application. Le mélange utilisé par la fabrication de tubes est désigné par le sigle PVC.

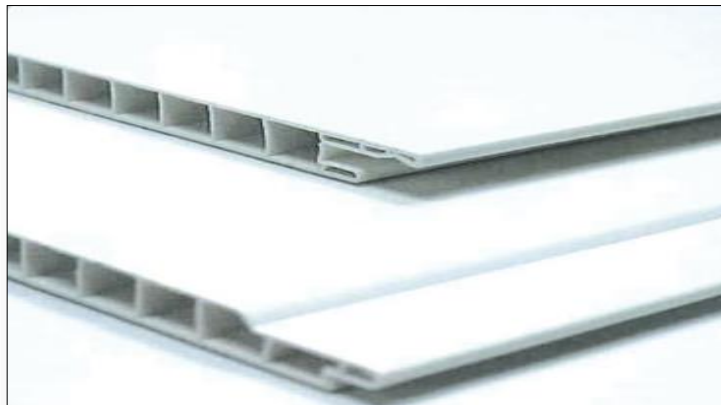
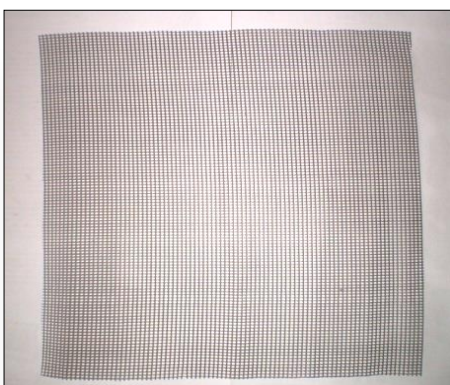


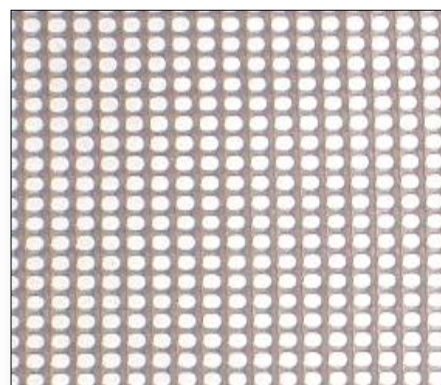
Figure III.7 : Plaque en PVC.

III.3.5.2 Le polypropylène:

Le tissu de polypropylène étudié est une grille constituée de fibre de polypropylène à maille ellipsoïde.



Tissu de polypropylène



Forme des mailles du Tissu PP

Figure III.8 : Forme du Tissu en fibres de Polypropylène.

III.3.6 Additif :

III.3.6.1 Résine époxyde :

Les adhésifs époxydiques destinés au génie civil sont des systèmes bi-composants, constitués d'une base époxy (prépolymère comportant des fonctions réactives oxyranes) et d'un durcisseur qui est le plus souvent constitué d'un mélange d'amines aliphatiques ou cycliques ou de polyimides. Les groupements fonctionnels de la résine et du durcisseur sont capables de réagir par polycondensation à température ambiante pour former un réseau polymère réticulé avec une réaction entre le diglycidyl éther de bisphénol A ou DGEBA (qui est une des bases époxydes les plus couramment utilisées) et une diamine aliphatique.

La résine qui constitue notre matrice est une résine époxy destinée à la stratification sur différents supports, elle se présente sous forme de kit pré dosé de 2 composants :

- Élément A : résine STR.
- Élément B : résine durcisseur STR.

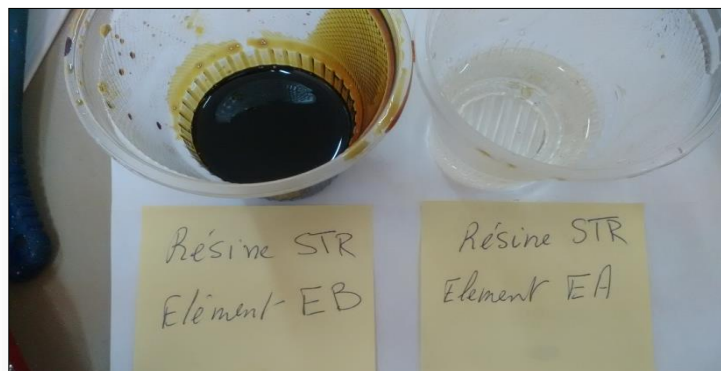


Figure III.9 : Résine utilisé.

III.3.7 Association des couches composites

Dans cette partie, on procède à la réalisation des différents panneaux composites en tissus de polypropylène et des plaques de polymère PVC, pour le renforcement des éprouvettes de mortier allégé par la sciure de bois.

Nous allons coller le tissu polypropylène et le PVC sur les panneaux en mortier, pour ce faire nous devons suivre les étapes suivantes :

Préparation du support selon la norme (NF P 74-203/DTU 59-3)

- Les supports doivent être secs et propres.
- Nettoyer les surfaces des éprouvettes en mortier à l'aide du papier verre pour se débarrasser des particules non adhérentes.

- Passer les éprouvettes sous l'air comprimé afin d'enlever la poussière et les petites particules sur les supports.
- Couper le tissu de polypropylène et le PVC selon les dimensions du panneau.
- Préparer une quantité de résine et de durcisseur ($2/3$ d'élément A + $1/3$ d'élément B).
- Appliquer une couche du mélange sur l'éprouvette en béton et une autre couche sur le PVC ou le tissu composite.
- Poser le composite sur l'éprouvette en béton et appliquer une petite pression pour avoir un bon contact entre les deux éléments.
- Après 24 heures les renforts sont durcis et bien en place.



Figure III .10: Application de la résine sur la semelle inférieure (collage du polymère PVC) du panneau TP.

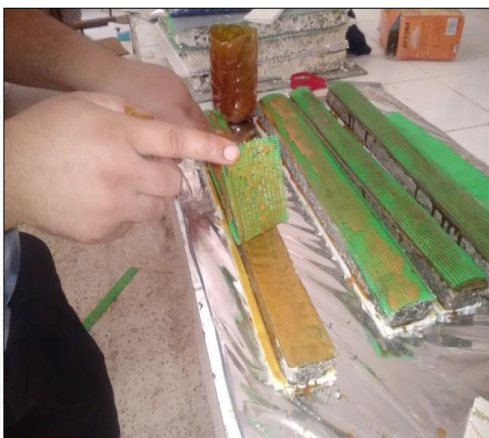


Figure III. 11: Application de la résine sur la semelle supérieure (collage du tissu).

Les même étapes ont été suivies pour la préparation de toutes les éprouvettes renforcées (PP, TT, PT), voir les figures ci-dessous :



Figure III.12 : Panneau multicouche symétrique à semelles identiques en polymère **PP**.



Figure III. 13 : Panneau multicouche symétrique à semelles identiques en tissus composite **TT**.



Figure III. 14: panneau multicouche dissymétrique à semelles différentes **TP**.

Remarque

Pour les panneaux multicouches dissymétriques :

TP : la semelle supérieure est en tissu composite T; la semelle inférieure est en polymère P

PT : la semelle supérieure est en polymère P; la semelle inférieure est en tissu polypropylène T.

III.4. Présentation des essais mécanique:

III.4.1 Machine d'essais:

Les essais mécaniques sont effectués sur une presse hydraulique de marque **IBERTEST** pilotée par un ordinateur voir (figure III.15). 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 en béton ou de mortier. L'éprouvette est soumise à une charge croissante jusqu'à sa rupture.



Figure III.15: Machine d'essais IBERTEST

III.4.2 Essais de compression et de flexion:

Cette partie du travail a pour but d'étudier le comportement des éprouvettes en flexion et leur résistance à la compression.

Les tests de compression et de flexion 3 point sont effectués sur la machine IBERTEST, la machine est réglée à une vitesse de chargement de 0,1 KN/S.

Pour l'essai de compression, les éprouvettes de 16x4x4cm sont posés verticalement et au milieu du dispositif de compression de la machine.

Pour l'essai de flexion 3 points, les éprouvettes de 45x5x2cm sont posés horizontalement sur un dispositif de flexion avec deux appuis. Notons que la distance entre le point de chargement et les appuis est de 7cm.

Les informations issues de ces essais sont récupérées sur l'ordinateur de pilotage de la machine.



(a) Essais de flambement



(b) Essais de flexion 3 points

Figure III.16: Positionnement des éprouvettes d'essais sur la machine.

III.5. Conclusion du chapitre

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents matériaux utilisés dans cette étude avec leurs caractéristiques, la formulation des différents mélanges. Plusieurs paramètres ont été variés : Les matériaux liège et sciure de bois utilisés comme allégeant du mortier avec la variation des gammes pour chaque matériau, leurs pourcentage, ainsi que la nature des renforts (tissu, polymère) et leurs disposition.

On a mentionné aussi l'identification et la caractérisation des différents matériaux utilisés dans notre recherche. Nous avons représenté le programme expérimental retenu dans cette recherche et présenté les modes de préparation des éprouvettes prismatiques et les panneaux. Dans le chapitre suivant, on présente tous les résultats obtenus inhérents aux comportements en flexion 3-points et en flambement avec une analyse qui permet de mieux comprendre le comportement de telles structures.

CHAPITRE IV

INTERPRÉTATIONS DES

RESULTATS

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les démarches suivies lors des essais sur les différents panneaux et l'interprétation des résultats. Tous les essais mécaniques ont été réalisés au Laboratoire de Modélisation des Matériaux et de Structures LAMOMS de Génie-Civil à l'université de Tizi Ouzou. Ils permettent de mettre en valeur les nombreux intérêts des structures composites multicouches à savoir : légèreté, excellent rapport rigidité/masse, pouvoirs isolants importants (thermiques et phoniques).

Une fois le mûrissement du collage de chaque couche par une résine STR est assuré, tous les réglages concernant les essais de flambement et flexion trois points (machine, paramètres et configuration) sont présentés. Les résultats obtenus, sur chaque série de panneaux sandwichs, nous permettra de fournir des informations indispensables à la compréhension de leur comportement mécanique et des mécanismes de rupture, puisque ils sont les caractéristiques les plus importantes dans le choix d'un matériau de construction.

Deux variantes d'étude sont prise en considération à savoir : des panneaux multicouches symétriques à semelles identiques en tissus composites et en polymère renforcés dénommés respectivement TT et PP, le second est dissymétrique à semelles différentes, alternés (TP) et (PT), dénommés respectivement TP et PT. Notre intérêt s'est porté particulièrement sur l'influence de la symétrie des semelles sur le comportement en flexion trois points et en flambement de la structure multicouche.

IV.2. Résultats de la flexion trois point

Des essais de flexion 3-points sont effectués sur des panneaux multicouches de sections normalisées de 450x23x50 mm. Le chargement est appliqué à mi-travée du panneau composite et la distance entre appuis est de 400 mm. Les essais sont réalisés suivant la norme française NF T 54-606 [66].

IV. 3. Comportement des multicouches en flexion

Les figuresIV.1 et IV.2 montrent les courbes force-déplacement de flexion 3-points pour : les panneaux sandwichs symétriques (PP) et (TT) ainsi que les panneaux dissymétrique (TP) et (PT).

Une confrontation de ces courbes des différentes variantes de panneaux considérés, qui présente l'évolution du chargement appliqué en fonction de la flèche maximale mesurée par la machine utilisé à mi-travée du panneau composite est réalisée. Cette confrontation met en évidence les caractéristiques mécaniques des panneaux multicouches étudiés en termes de rigidité en flexion et ça ductilité.

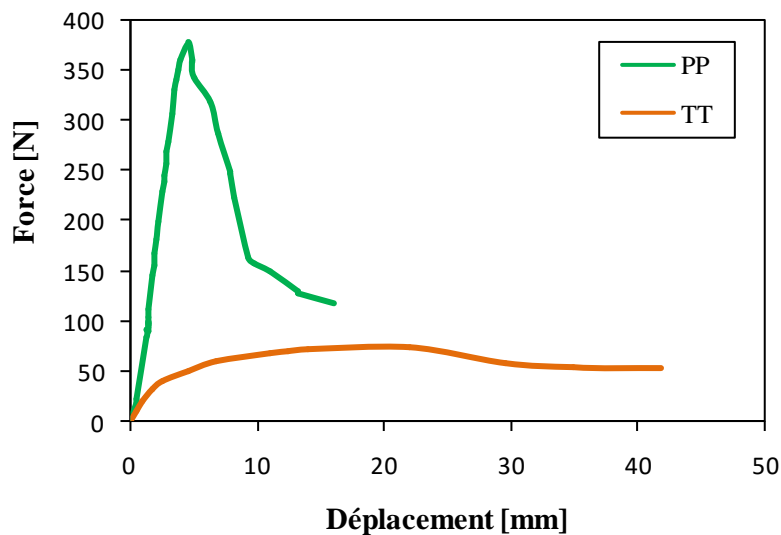


Figure IV.1 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs symétriques chargés en flexion 3-points.

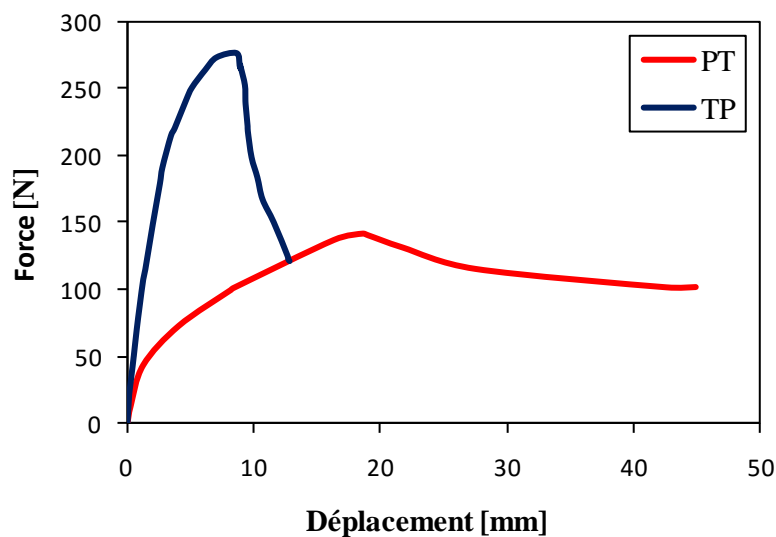


Figure IV.2 : Confrontation des courbes force-déplacement des panneaux dissymétriques en flexion 3-points.

Le comportement des panneaux étudiés en flexion est similaire, montrant trois phases ; d'abord, une augmentation linéaire de la charge appliquée, suivit d'un comportement non linéaire, ceci correspond à l'apparition puis le développement des fissures verticales dans les panneaux ; jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte ce qui caractérise la résistance ultime des panneaux, et finalement une diminution de la charge est observée suivit de la rupture finale de l'éprouvette. Une chute brusque de la charge est visualisée après une charge trop élevé avec une rigidité importante pour le panneau TP (comportement fragile), contrairement au modèle TP, ou une capacité très faible est enregistrée montrant un déplacement très important (grande capacité de déformation).

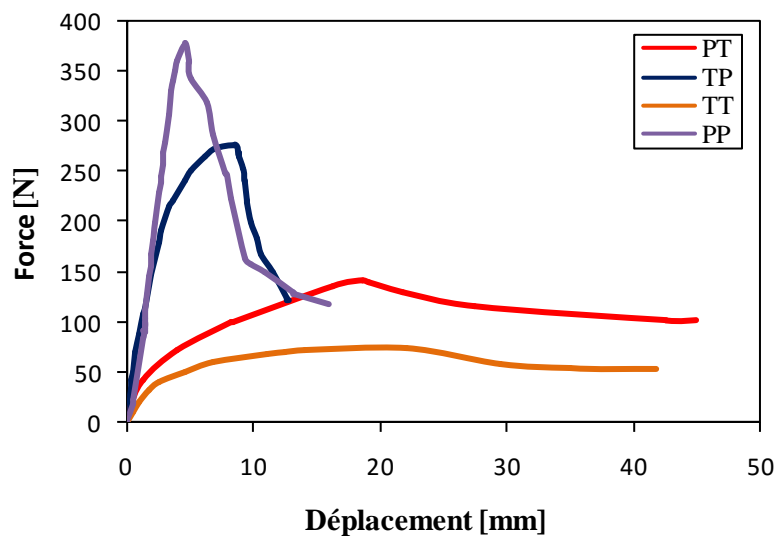


Figure IV.3 : Confrontation des courbes force-déplacement des panneaux multicouches (PT, TP, PP et TT) lors de la flexion 3-points.

Une synthèse des différents résultats de flexion en terme de chargement maximal en terme de déplacement des panneaux est présentée sur les histogrammes des figures IV.4 et IV.5 ci-dessous :

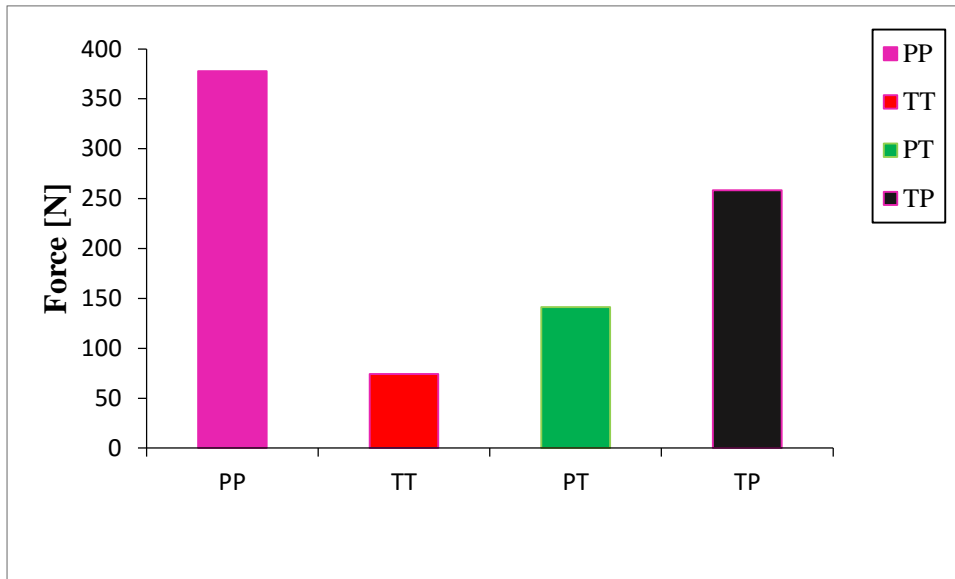


Figure IV.4 : Comparaison des résistances maximales des panneaux multicouches chargé en flexion trois points.

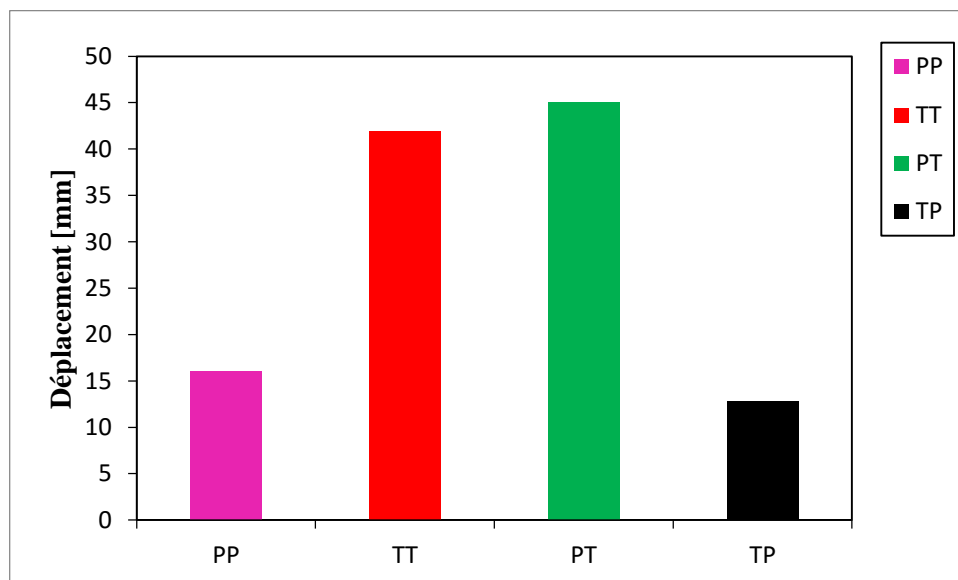


Figure IV.5 : Comparaison des déplacements maximaux des panneaux multicouches chargés en flexion trois points.

Les panneaux multicouches symétriques PP ainsi que le panneau multicouche dissymétrique TP présentent des capacités portantes améliorées comparativement aux panneaux TT et PT. Les charges ultimes des multicouches PP et TP sont respectivement de l'ordre de 377 N et 277 N avec un déplacement vertical correspondant de 4.5 mm et 18.5 mm. Les panneaux PT et TT sont caractérisés par des résistances ultimes moins importantes de l'ordre de 141 N et 74 N respectivement, avec une rupture plus ductile, le tissu a la capacité de se déformé en

traction (partie inférieure tendue). La disposition des peaux joue un rôle très importance sur la résistance et la ductilité du panneau multicouche.

Les différentes figures ci-dessous montrent la propagation des fissures dans les panneaux multicouches composites, ainsi que leurs différents mécanismes de rupture.

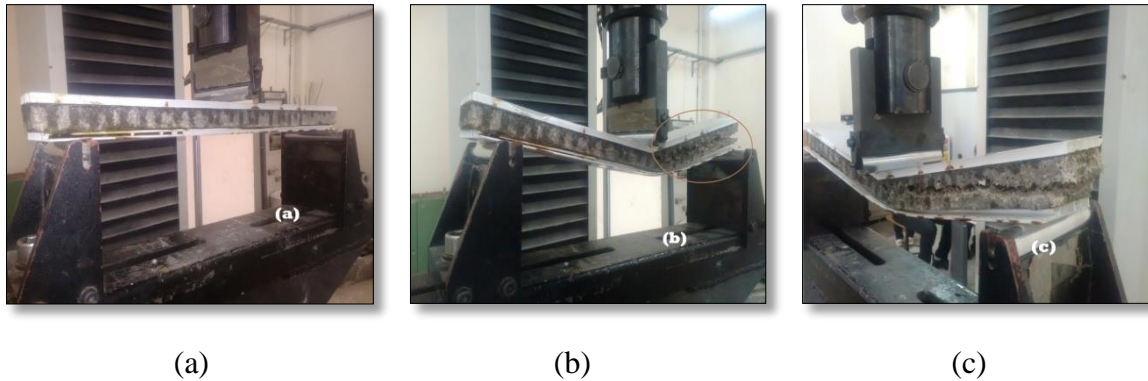


Figure IV.6 : Progression des fissures en flexion 3-points pour le panneau (PP) : (a) début du test, (b) apparition et propagation de la fissure, (c) limite de propagation de la fissure à l'extrémité de l'échantillon.



Figure IV.7 : Progression des fissures en flexion 3-points pour le panneau (TP) : (a) début de l'essai ; (b) fissuration à la fin du panneau au niveau de l'âme.

La rupture se situe dans l'âme du panneau multicouches composite, hors qu'elle ne s'est jamais produite dans les interfaces : semelles-âme. La première fissure apparaît dans la peau, lorsque la charge maximale est atteinte est propagée horizontalement vers les bords de l'éprouvette.

La rupture finale s'est produite par écrasement en compression de la peau à la partie supérieure (zone comprimé) et par rupture de la peau à la partie inférieure (zone tendue).

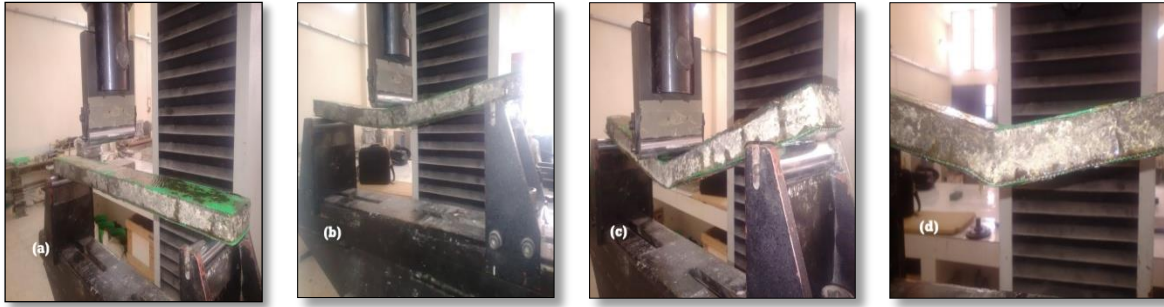


Figure IV.8 : Progression des fissures en flexion 3-points pour le panneau (TT) : (a) installation du panneau sur la machine, (b) début du test, (c) apparition de la fissure, (d) limite de propagation de la fissure.

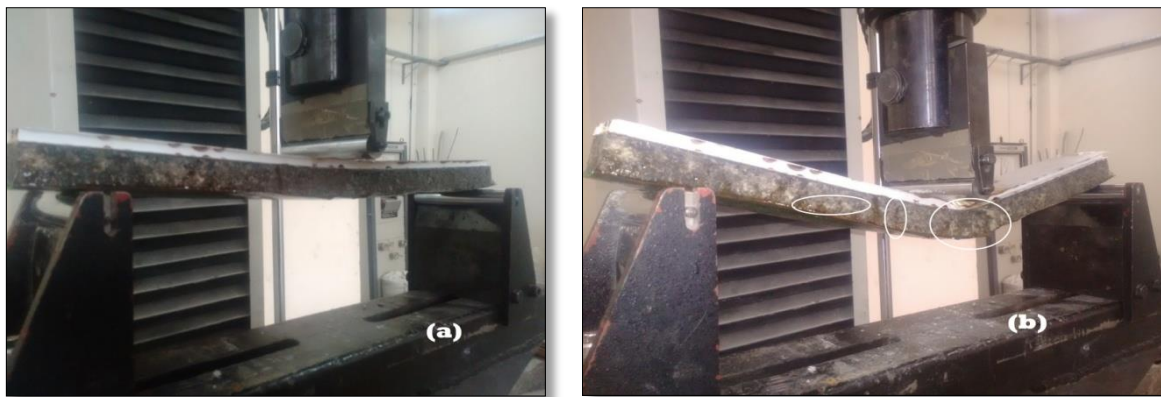


Figure IV.9 : Essais de flexion 3-points : (a) début de l'essai ; (b) rupture de l'âme et la semelle inférieure après fissuration.

Aucun mécanisme de rupture due à la décohésion de l'interface âme- semelle n'est observé, ceci est expliqué par la très bonne adhérence entre les différents matériaux compatibles qui constituent le corps des panneaux étudiés. Les essais ont montré une combinaison de traction et formation de cloque figure IV.8 (c) ; la rupture se produit par apparition des fissures au niveau de l'âme en mortier lorsque la charge maximale est atteinte et propagée verticalement vers la semelle inférieure de l'éprouvette figure IV.9 (b).

Les observations notées au cours des essais de flexion 3 points, ont montré que, dans la plupart des cas, les ruptures sont produites au niveau de l'âme. La première fissure macroscopique est apparue dans le mortier, et lorsque la force maximale est atteinte ; elle se propage jusqu'aux bords de l'éprouvette voir figure IV.9. Par exemple, la rupture est provoquée dans la région localisée par concentration des contraintes élevées (figure IV.6). La déformation n'est pas réversible, après suppression de l'effort d'extension, l'éprouvette ne revient pas à son état initial.

IV.4. Résultats du flambement

Dans la deuxième partie de notre investigation expérimentale, une étude du comportement mécanique des panneaux multicouches de dimension normalisée $450 \times 22 \times 50$ mm chargés en flambement suivant la norme NF T 54-604 [67] est réalisée. Le chargement est appliqué en compression dans la direction longitudinale des panneaux sandwichs avec une incrémentation de charge très modérée.

IV.5. Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux composites

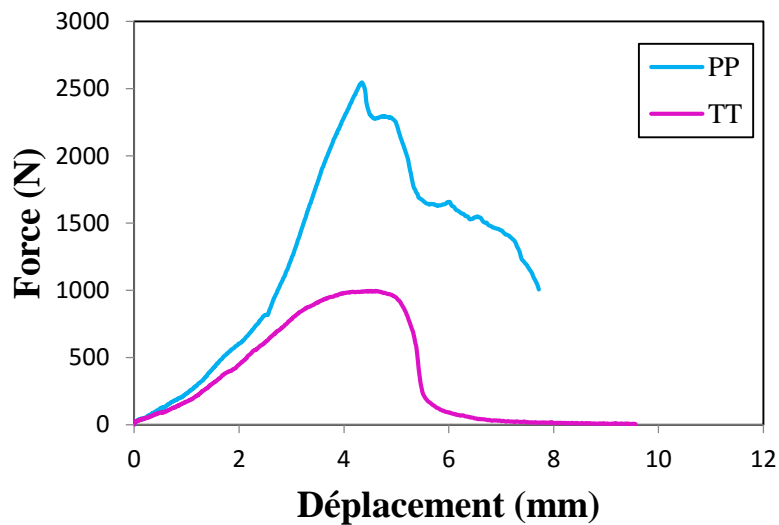


Figure IV.10 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs symétriques chargés en flambement.

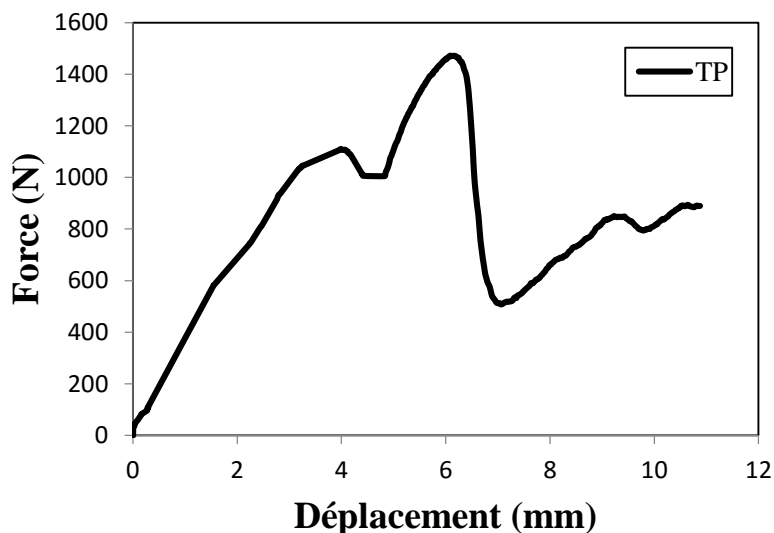


Figure IV.11 : Courbe forces-déplacements de panneau sandwich dissymétrique chargé en flambement.

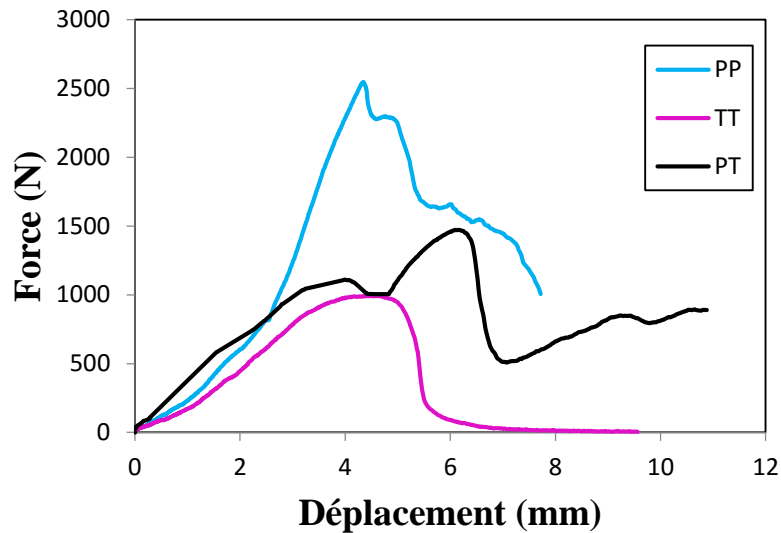


Figure IV.12 : Confrontation des courbes force-déplacement des panneaux multicouches (PP, TT et PT) chargés en flambement.

Les figures ci-dessus représentent les résultats obtenus en compression dans la direction longitudinale des panneaux sandwichs PP, TT et PT. Les courbes montrent une première phase présentant une augmentation linéaire de la charge appliquée, correspondant à de petites déformations, suivie d'une phase non linéaire jusqu'à ce que la charge maximale soit atteinte, puis une diminution de la charge appliquée est observée. Ceci correspond à l'apparition des fissures et leur propagation verticales dans les panneaux. L'atteinte du pic définit la force maximale qui caractérise la résistance ultime des panneaux en flambement. Les fissures se propagent jusqu'à l'atteinte de la rupture totale du panneau composite.

Les panneaux multicouches présentent des résistances mécaniques de flambement très améliorées comparativement à celle de flexion. Un récapitulatif des différents résultats de flexion et de flambement en terme de charge maximale et déplacement de rupture de toutes les variantes d'étude est présenté sur les tableaux IV.1 et IV.2.

Tableau IV.1 : Les résistances maximales des panneaux chargés en flexion.

Panneaux multicouches	Force max [N]	
	En flexion trois points	En flambement
PP	377,71	1894,39
TT	74,11	995,01
PT	141,43	1472,35
TP	258,28	1472,35

Tableau IV.2 : Les déplacements maximaux des panneaux chargés en flambement.

Panneaux multicouches	Déplacement max [mm]	
	En flexion trois points	En flambement
PP	16,02	7,71
TT	41,89	9,56
PT	45,00	10,87
TP	12,78	10,87

De la même façon que les essais de flexion, une synthèse des différents résultats de flambement en terme de résistance maximale en terme de déplacement des panneaux est présentée sur les histogrammes des figures IV.13 et IV.14 ci-dessous :

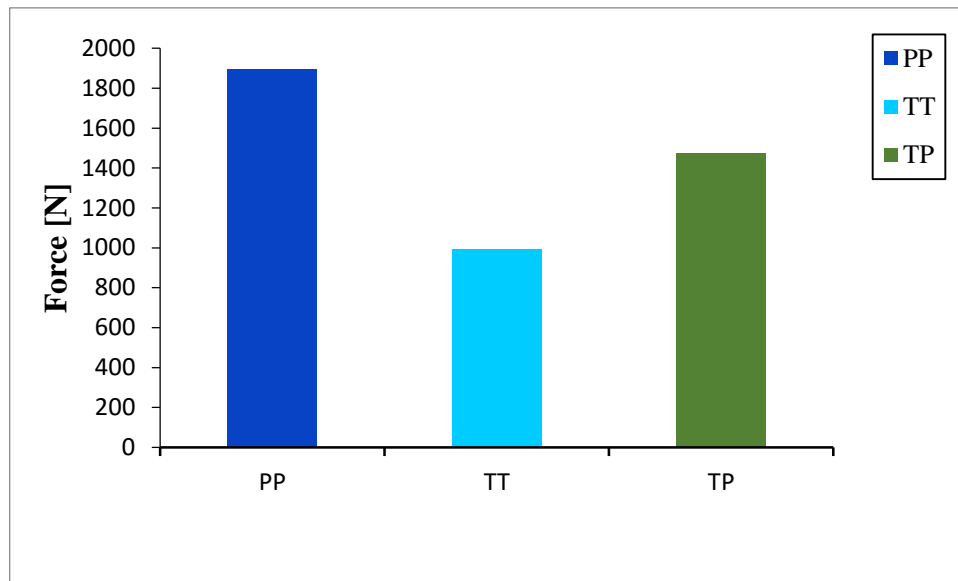


Figure IV.13 : Comparaison des résistances maximales des panneaux multicouches chargés en flambement.

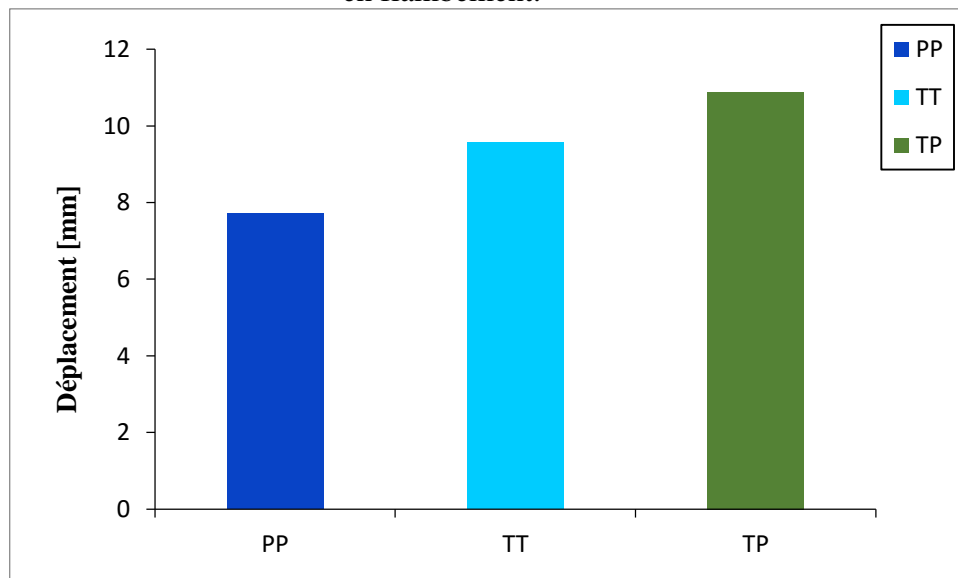


Figure IV.14 : Comparaison des déplacements maximaux des panneaux multicouches chargés en flambement.

Les capacités portantes des multicouches symétriques TT et PP chargés en flambement sont respectivement de l'ordre de 993 N et 2516 N avec un déplacement axial correspondant de 4 mm. Les panneaux multicouches dissymétriques TP présentent une charge ultime de flambage de l'ordre de 1472 N et un déplacement à la rupture de l'ordre 6mm.



Figure IV.15 : limite de propagation de la fissure pour le panneau sandwich symétrique TT1 soumis à la compression avec flambage ; cisaillement des semelles.



Figure IV.16 : Défaut du panneau multicouche à semelles symétriques TT2 chargés en flambement.

Dans le cas de panneaux multicouches symétriques à semelles identique en tissus composites TT, la rupture s'est produite, par cisaillement de semelle, la rupture est localisée aux niveaux des extrémités.



Figure IV.17 : Progression des fissures en flambement pour le panneau (PP) : (a) et (b) durant l'essai ; (c) fissuration à la fin du panneau au niveau de l'âme.

Dans le cas de panneaux multicouches symétriques à semelles identique en polymère PP, La rupture se situe au niveau de l'âme en mortier du composite dont la première fissure apparaît dans la peau lorsque le chargement maximal est atteint et il se propage parallèlement aux deux semelles en polymère renforcé jusqu'à l'extrémité de l'éprouvette.

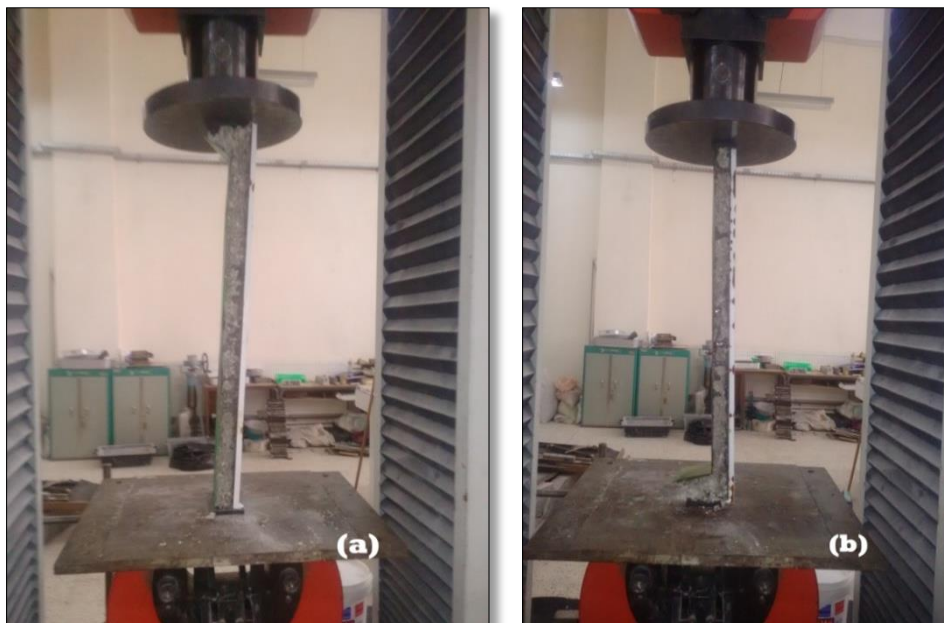


Figure IV.18 : Défaut du panneau multicouche à semelles dissymétriques PT chargés en flambement ; (a) et (b) essais 1 et 2 respectivement.

Le comportement à la rupture des panneaux multicouches dissymétrique PT (figure IV.8) est similaire à celui des panneaux multicouches à symétriques, caractérisé par l'amorce des fissures aux extrémités du composite PT, une densification des fissures est observée aux bords des panneaux, engendrant par la suite la rupture de l'élément.

IV.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté une étude expérimentale des propriétés des panneaux multicouches composites chargés en flexion et en flambement. Cette partie expérimentale a pour objectif de caractériser la résistance des panneaux composites renforcés, pour cela, plusieurs dispositions du renforcement ont été proposées :

- Panneaux multicouches symétriques à semelles identiques en tissus composites en polypropylène(TT) et en polymère renforcés (pp).
- Panneaux multicouches dissymétrique à semelles différentes alternés (TP) et (PT).

D'après les résultats obtenus, les panneaux composites symétriques(PP) et les panneaux dissymétriques ont de meilleures caractéristiques mécaniques comparativement aux les panneaux symétriques à semelles identiques en tissus composites. Les résultats des essais nous on permit de tirer les conclusions suivantes :

- Des structures composites qui présentent à la fois un coût de production non onéreux et une empreinte écologique favorable ont été élaborées ;
- Avec les mêmes matériaux utilisés pour la confection des panneaux composites, les performances sont améliorées en changeant la disposition des semelles ;
- Des panneaux composites multicouches légers et résistants sont confectionnés par l'ajout de la sciure de bois, qui a prouvé son efficacité sur l'allègement de notre mortier utilisé comme âme des panneaux étudiés.

Au final, les résistances obtenues à la flexion trois points et au flambement sur les panneaux multicouches composites sont satisfaisantes, l'objectif était de fabriquer des panneaux composites avec un seuil de résistance à la flexion et au flambement acceptable, ce qui signifie la possibilité d'utiliser ce genre de panneaux applicable sur les maçonneries, comme séparation, isolations,...etc.

CONCLUSION GENERALE

CONCLUSION GENERALE

Dans cette étude expérimentale investie au laboratoire de Génie Civile de l'Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou. Nous avons essayé de répondre à l'objectif principal de ce travail qui consiste à mettre en évidence, le comportement mécanique des panneaux sandwichs multicouches confectionnés à base de produits naturels. Les structures composites développées qui présentent à la fois un coût de production non onéreux et une empreinte écologique favorable ont été élaborées avec une matrice mortier allégé par la sciure de bois comme âme et des plaques en tissu polypropylène et polymère renforcée comme semelles collées à l'aide d'une résine époxyde.

En effet, cette étude consiste à élaborer des panneaux multicouches d'âme allégée par la sciure de bois renforcée par la suite par des semelles en tissus polypropylène et un polymère PVC. Ces panneaux ont été chargés en flexion trois points et au flambement, l'amorce et la propagation des fissures ont été présentés ainsi que tous les résultats obtenus, une confrontation des courbes force déplacements présentés, ainsi qu'une comparaison des résultats avec des histogrammes, cette comparaison concerne la résistance, et le déplacement maximale des panneaux chargés. Pour mettre en valeur les performances mécaniques des structures composites développées.

L'étude a pris en considération l'influence de la disposition des renforts de tissu polypropylène et du polymère renforcé sur les caractéristiques mécaniques, des panneaux multicouches

Des panneaux composites multicouches légers et résistants confectionnés par l'ajout de la sciure de bois, ont prouvé leur efficacité sur l'allègement de notre mortier utilisé comme âme des panneaux étudiés.

La rupture des panneaux composites lors des essais mécaniques est produite par la rupture entre les granulés du mortier allégé dans le noyau ; cela signifie qu'il est possible d'améliorer le comportement mécanique du noyau à base de sciure de bois, par exemple, en améliorant la conception du produit, à savoir, en ce qui concerne le type d'adhésif, l'épaisseur de l'âme, et la fraction volumique du sciure de bois.

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.

En perspective, il serait intéressant de poursuivre ces travaux en variant l'épaisseur et l'essence de la sciure de bois, afin de déterminer leur influence sur le comportement des panneaux fabriqués.

Les panneaux obtenus peuvent aussi de faire l'objet d'une étude thermique et acoustique.

L'analyse thermique des différents échantillons de sciure de bois et des renforts en tissus et polymère, peuvent être effectués par deux méthodes distinctes : à l'aide d'un CT mètre et par la méthode de maquette thermique.

REFERENCES

BIBLIOGRAPHIQUES

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] **BARBERO.E. J**, «*Introduction to composite materials design*». Taylor & Francis 1998.
- [2] **GENDRE.L** «*Matériaux composites et structures composites* » université Paris-SACLAY 2011.
- [3] **RAGOUBLIM** «*Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne*» ; Nancy université, thèse de doctorat 2010 – 220p.
- [4] **Gay.D** «*Matériau composites*». Hermès, 1991.
- [5] **J.-M. Berthelot**. «*Matériaux composites – Comportement mécanique et analyse des structures*». Masson, 1993
- [6] **TIMOSHENKO.S and WOINOWSKY-KREIGER.S**. «*Theor of Plates and Shells*». McGraw–Hill, 1964.
- [7] **GORNET.L** «*Généralités sur les matériaux composites*», version 1 ; Centrale Nantes, Ecole d'ingénieur 2008, 47p.
- [8] **GORNET.L** «*Généralités sur les matériaux composites*», Submitted on 6 Apr 2010 (v1), last revised 19 Jan 2011 (v2).
- [9] **B E H LY**, «*Nouveaux matériaux composites thermo-formables à base de cellulose* », institut national polytechnique de Grenoble, 2008.
- [10] **BERTHELOT.J** «*Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures*», 4^o édition, Lavoisier 2005, 645p.

[11] **KECHAOU.B** «*Corrélation entre propriétés diélectriques et mécaniques de composites à matrice époxyde renforcée par des fibres de verres E*» ; école centrale de Lyon et faculté des sciences Sfax, thèse de doctorat 2003 – 138p.

[12] **GIROUD.T** «*Mesure et calcul des contraintes résiduelles dans les pièces injectées en thermoplastiques avec et sans fibres de renfort*» ; écoles des mines de Paris, thèse de doctorat 2001 – 222p.

[13] **RAGOUBLM** «*Contribution à l'amélioration de la compatibilité inter-faciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne*»; Nancy université, thèse de doctorat 2010 – 220p.

[14] **BELKACEMI.Ch** «*Etude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort en matière végétale*» ; université Boumerdes, thèse de magister 2006 – 142p.

[15] **MOKHTARIA** «*Influence des ajouts de fines minérales sur les Performances Mécaniques des Bétons Renforcés de Fibres Végétales de Palmier Dattier*» ; université Ouargla, thèse de magister 2006 – 98p.

[16] **ZE YI WU** «*Etude expérimentale du comportement des poutres courtes en béton arme pré fissurées et renforcées par matériaux composite sous chargement statique et de fatigue*» ; école nationale des ponts et chaussée, thèse de doctorat 2004 – 244p.

[17] **F. BERBAIN** and **A. CHEVALIER**, «*Mise en œuvre des composites*», Techniques de l'Ingénieur, vol. A3727.

[18] http://www.hexcel.com/Resources/DataSheets/Brochure-DataSheets/Prepreg_Technology.pdf

[19] **CASTANIE.B** «*contribution à l'étude des structures sandwichs dissymétriques* » Ecole national supérieur de l'aéronautique et de l'espace.

[20] **GUPTA.N.**, «*Characterization of Syntactic Foams and Their Sandwich Composites: Modeling and Experimental Approaches*», the graduate faculty of the Louisiana State University and Agricultural and Mechanical College, 2005.

[21] **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.

[22] **BERTIN. M** «*fatigue thermomécanique de multicouches polymère/composite* » thèse de doctorat ; Université de poitiers. France 2011.

[23] **REYNE M.** - *Technologies des composites* (3ème édition revue et augmentée). - Paris : HERMES, 1998. - 222 p.

[24] **FRANCINE.R** thèse de doctorat. «*Comportement en flexion trios points avec cisaillement prépondérant de composites verre/époxyde unidirectionnels : sous chargements monotone et cyclique*» 1998.

[25] **ENGIN M. R.**, «*Characteristics of Innovative 3-D FRP Sandwich Panels*». Ph.D thesis, North Carolina State University, Raleigh, 2005.

[26] **LACHGUER.A ; AKYOUD.M** « *les matériaux sandwich et les risques d'instabilités géométriques locales* » étude bibliographique, Ecole Des Mines De Douai, 2014.

[27] **COLLET.F** « *Caractérisation hydrique et thermique de matériaux de génie civil à faibles impacts environnementaux* », Thèse de Doctorat, INSA de Rennes, 220 p (2004).

[28] **KERNOUG.S** « *contribution des granulats de liège dans l'amélioration des performances mécaniques du béton* », Thèse de Master, université Mouloud Maameri de Tizi-Ouzou-2014.

[29] **CANTAT.R., PIAZZETTAR.R.** «*La levée du liège*» ; Guide technique et de vulgarisation, Institut Méditerranéen du Liège (2005).

[30] SOTEHI.N « *caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation* », Thèse de Doctorat, université Mentouri de Constantine 2010.

[31] LOPES, M.H., BARROS, A.S, PASCOAL NETO, C., RUTLEDGE, D., DELGADILLO, I. et Gil, A.M. «Variability of corkfromportugese *Quercus suber* studied by solid-state»; 13 C-NMR and FTIR spectroscopies. *Biopolymers (biospectroscopy)*, Vol. 62, pp. 268- 277, (2001).

[32] BOUDAUD.N. «*Potentialités d'utilisation du nez électronique à spectromètre de masse pour la caractérisation de la fraction volatile du liège œnologique*» ; thèse de doctorat, l'Institut National Agronomique, Paris-Grignon (2006).

[33] CORDEIRO.N, BELGACEM.M.N, Silvestre, A.J.D., PASCOAL NETO, C. et GANDINIA, «*Cork sobering as a new source of chemicals: 1. Isolation and chemical characterization of its composition*»; *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 22(2), pp. 71- 801 (998).

[34] ROCHA.S, GOODFELLOW.B.J, NETO, C.P., GILL.A. «*Enzymatic isolation and structural characterization of polymericsuberin of cork from *Quercus suber**»; *International Journal of Biological Macromolecules*, Vol. 28, pp. 107- 119, (2001).

[35] RIBOULET.J.M., ALEGOET.C, «*Aspects pratiques du bouchage des vins*» ; Collection avenir œnologie, (1986).

[36] HERNANDEZ-OLIVARESA.F, BOLLATIB U.M.R, DELRIO C M., PARGA-LANDAD B., «*Development of cork/gypsum composites for building Applications* ». *Construction and Building Materials*, 13: 179/186, (1999).

[37] NÓVOA P.J.R.O, RIBEIROA M.C.S, FERREIRA A.J.M, MARQUES A.T, «*Mechanical characterization of lightweight polymer mortar modified with cork granules*». *Composites Science and Technology.*, 64, 2197-2205, (2004).

[38] ISOLATION DES MURS ET CLOISONS Mises en œuvre et applications 2013.

- [39] «*Tela Botanica, page sur Cannabis Sativa L.*» [[archive](#)] (consulté le 6 novembre 2011).
- [40] «*Le chanvre, isolant très propre* », *intéresse de près le bâtiment* [[archive](#)] sur Champagne-ardenne-tech.fr
- [41] **GOURLAY.E** «*Propriétés hygrosopiques et comportement hygrothermique du béton de chanvre*», Rapport bibliographique, Juillet 2013 **9/15** page 05.
- [42] **OLIVA.JP, COURGEY.S** «*l'Isolation Thermique Ecologique aux éditions Terre vivante*».
- [43] **PANSHIN A. J., DE ZEEUW C.**, 4th ed. McGraw-Hill. New York. (1980).
- [44] **SHUKU S. R., SAKHARDANDE V. D.**, *J. Appl. Polymer Sci.* 41 (1990) 2655-2663.
- [45] **VAISHYA R. C., PRASAD S. C.**, «*Journal of Environmental Protection*». 11, No.4 (1991) 284-289.
- [46] **BRYANT P. S., PETERSEN J. N., LEE J. M., BROUNS T. M.**, «*Applied Biochemistry and Biotechnology*», 34/35 (1992) 777–788.
- [47] **HOLAN Z. R., VOLESKY B.**, «*Applied Biochemistry and Biotechnology*». 53 (1995) 133–146.
- [48] **AJMAL M., RAO R. A. K., SIDDIQUI B. A.**, «*Water Research.*» 30 (1996) 1478-1482.
- [49] **AJMAL M., KHAN A. H., AHMAD S.**,« *Water Research*». 32(10) (1998) 3085–3091.
- [50] **CHATTERJEE S., ASTHANA R. K., TRIPATHI A. K., Singh S.P.**, *Proc. Biochem.* 31(5) (1996) 457- 462p.
- [51] **BULUT Y., TEZ Z.**, *Journal of Environmental Sciences*, 19 (2007) 160–166p.
- [52] **SIDIRAS.D.K., POLITI.D. V.** *Proc. 19th Europ. BiomassConf. Berlin. Germany.* (2011) 1802-1809.

[53] SIDIRAS.D., BATZIAS.F, SCHROEDER.E, RANJAN.R, TSAPATSI.S.M, *Chemical Engineering Journal* 171 (2011) 883– 896.

[54] MARTUCCICOUTO.G, De ABREU DESSIMONI A. L., BIANCHI.M. L., PERIGOLO D. M., TRUGILHO P. F., *Ciênc. Agrotec. Lavras.* 36(1) (2012) 69-77.

[55] ZALAGHI A., LAMCHOURI F., TOUFIK H., MERZOUKI M., *J. MATER. Environ. Sci.* 5 (5) (2014) 1643-1652.

[56] CASES J. M, VILLIERAS F., MICHOT L., *Académie des Sciences. Paris. Sciences de la Terre et des Planètes/Earth and Planetary Sciences.* 331 (2000) 763 - 773.

[57] S. TAMBA, L. M VOUMBO, A. WEREME, S. GAYE, G. SISSOKO.

[58] BENMALEK .MI, BOUGUERRA.A, LEDHEM .A, DHEILLY .R ET QUENEUEDEC .M; «*Caractéristiques de bétons légers à base de résidus d'exploitation de carrières et de bois* » Article: Canadian journal of civil engineering, pp374 -377; 1999.

[59] AL RIM.K, LEDHEM.A, DOUZANE.O, DHEILLY.R Et QUENEUEDEC .M; «*Influence of the proportion of wood on the thermal and mechanical performances of clay-cement-wood composites*»; Cement and Concrete Composites ; volume 21, Issue 4, Pages 269–276 , August 1999.

[60] BEDERINA .M, LAIDOUDI .B, GOULLIEUX .A, KHENFER .Mm, BALI .A Et QUENEUEDEC .M ; «*Effect of the treatment of wood shavings on the physico-mechanical characteristics of wood sand concretes*» ; Construction and Building Materials ;Volume 23, Issue 3, Pages 1311–1315 , March 2009.

[61] HOUSSAIS.L, BENMALEK. MI, LEDHEM.A Et QUENEUEDEC.M ; Matériaux à faible impact environnemental « *Le comportement à hautes températures du béton de bois à matrice argileuse* » revue matériels &composites ; 2000.

[62] **BOUAZIZ .S, AIT TAHAR. K** ; «*Béton léger à base de granulats composites artificiels*» ; Annales du BTP ; N°4 : pages 16-22 ; Août 2010.

[63] SC manuel bois.

[64] **CLAUDE.C**, « *Le Gemmage en forêt de Gascogne*», Princi Negre Éditions, Bordeaux, 1995

[65] **ARBAOUL.JD** « *Étude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches* » thèse doctorat, Université Paul Verlaine – METZ2009

[66] **NF T 54-606**. *Plastics based sandwich structures*. Bending test. Afnor 87461; October 1987

[67] **NF T 54-604**. *Plastics based sandwich structures*. Longitudinal compression test without or with buckling. Afnor 86618; December 1986