

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

UNIVERSITE MOULOD MAMMERI DE TIZI-OUZOU

FACULTE DU GENIE DE LA TRUCTION

Département de Génie Civil



Mémoire

De fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master recherche

Spécialité : Génie Civil

Option : Structures et matériaux

Thème

**Simulation numérique d'un
sandwich à matrice légère**

Proposé et dirigé par :

M^{me} KHELOUI Fatma

Réalisé par :

M^{lle} ZEGROUR Anissa

2015/2016



REMERCIEMENTS

Tout d'abord je remercie avant tout, Dieu de m'avoir donné la patience, ainsi que la volonté et le courage de réaliser ce travail.

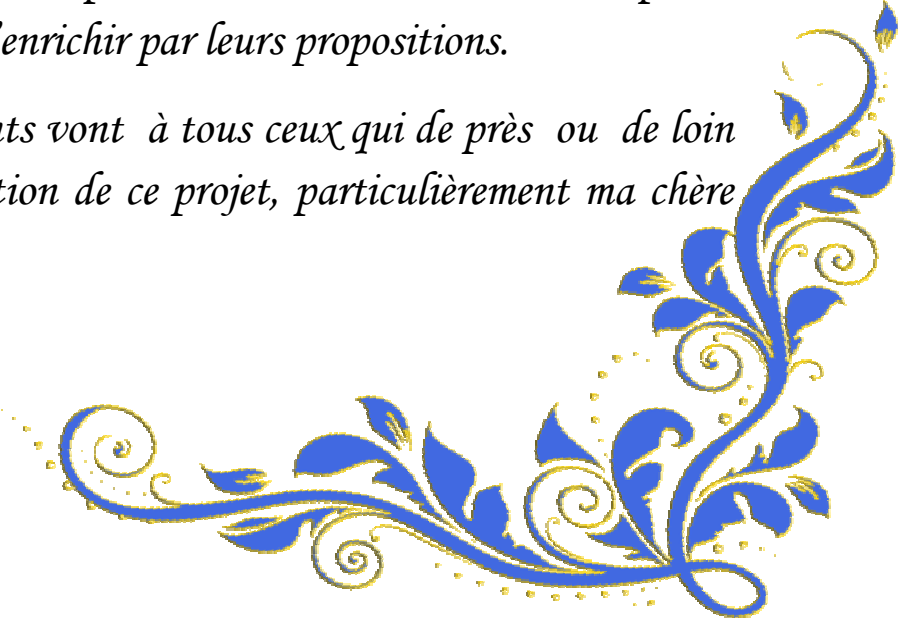
Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à mon promoteur Professeur AIT TAHAR Kamal, pour avoir accepté de m'encadrer et pour sa disponibilité, son soutien et ses conseils qui nous ont permis de mener à bien ce projet.

Je remercie vivement M^{me} KHELOUI Fatma, pour son encouragement, sa gentillesse, son aide durant la période de réalisation de ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements aux Docteurs SI SALEM Abdelmadjid et AIT TALEB Souad, d'avoir consacré énormément de leurs temps à répondre à mes questions sur l'utilisation du code ABAQUS, ainsi que pour leurs conseils, leurs aides et leurs gentillesse.

Que les membres du jury trouvent ici mes remerciements les plus vifs pour l'intérêt qu'ils ont porté à ma recherche en acceptant d'examiner ce travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Mes sincères sentiments vont à tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de ce projet, particulièrement ma chère famille, mes amis (es).





Dédicaces

Je dédie ce travail :

Aux plus chers à mon cœur mes parents, qui ont toujours été là pour moi et qui n'ont jamais cessé de me soutenir et de m'encourager.

A mes sœurs.

A mes ami(e)s.

A la mémoire de ma grand-mère et de ma tante.

Et à tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin.



Résumé

L'industrie des panneaux sandwichs ne cesse d'évoluer et de croître en mettant en place de nouveaux matériaux et de nouvelles technologies. En substitution des matériaux innovants avec une empreinte écologique favorable commencent à voir le jour. C'est dans ce contexte que notre travail de recherche est proposé.

L'objectif principal de ce travail consiste à mettre en évidence, à travers une simulation numérique, le comportement mécanique d'un sandwich 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 3 points et flambement .

L'ensemble des résultats a mis clairement en évidence l'efficacité de ces nouveaux panneaux multicouches (symétrique et dissymétrique) qui sont dotés de propriétés, en particulier mécaniques, de haut niveau, qui viennent rivaliser avec celles des autres composites classiques. Et un très bon accord entre les réponses en fréquence expérimentales et celles obtenues à partir de la modélisation a été obtenu.

Mots clés : bois, sandwich, propriétés mécaniques, simulation, analyse,.

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE.....	1
ChapitreI.....	4
I.1. Introduction.....	5
I.2. Définition des matériaux composites structuraux.....	5
I.3. Architectures matériaux composites structuraux.....	6
I.3.1. Les monocouches.....	6
I.3.2 Les stratifiés.....	7
I.3.3 Les structures sandwiches.....	8
I.3.3.1 Structures sandwiches symétriques.....	8
I.3.3.2 Structures sandwich dissymétriques.....	8
I.4. Les constituants des matériaux multicouches.....	9
I.4.1. Les peaux.....	9
I.4.2. L'âme.....	9
I.4.3. L'adhésif de l'interface.....	10
I.5. Intérêt des structures multicouches.....	10
I.5.1. Légèreté et liberté de forme.....	10
I.5.2. Conductivité thermique.....	11
I.5.3. Cout de fabrication réduit.....	11
I.6 Domaines d'application.....	12
I.7. Comportement mécanique des multicouches en flexion.....	14
I.7.I Flexion trois-points.....	14
I.7.2. Flexion quatre points.....	18
I.8. Comportement des multicouches en flambement.....	19
I.9. Conclusion.....	21
ChapitreII.....	22
II.1. Introduction.....	23

II.2. Matériaux d'âme	23
II.2.1. Le liège	24
II.2.1.1 Anatomie et qualité du liège.....	24
II.2.1.2 Propriétés mécaniques du liège	26
II.2.1.3 Composition chimique	27
II.2.2. Le chanvre	27
II.2.2.1 Morphologie du chanvre	28
II.2.2.2. De la plante à la fibre	28
II.2.3 Le bois	29
II.2.3.1. Généralités sur le matériau bois	29
II.2.3.2 Composition chimique du bois.....	29
II.2.3.3 Propriétés physiques et mécaniques.....	30
II. 3.2. Les sciures de bois.....	31
II.4. Le jute	31
II.5. Le lin	32
II.6. Les mousses	33
II.3. Matériaux de semelles (peaux).....	34
II.3.1 Les tissus composites	34
II.3.1.1 Catégories de tissu et paramètres de définition importants.....	34
II.3.1.1.1 Fibres de verres.....	35
II.3.1.1.2 Fibres de Carbone.....	35
II.3.1.1.3 Fibres d'aramides (kevlar).....	36
II.3.1.3 Avantages et inconvénients des tissus	36
II.3.1.2 Comportement mécanique des renforts tissés	37
II.3.3 Les polymères.....	38
II.3.3.1 Le Polypropylène (PP)	38
II.3.3.2 Les PVC renforcés.....	38
II.4. Les adhésifs	38
II.4.1. Les résines	39

II.4.1.1. Les thermoplastiques	39
II.4.1.2 Les résines thermodurcissables	39
II.4.1.3. Propriétés des résines	40
II.4.1 Les colles	41
II.6 Conclusion	41
Chapitre II	43
III.1 Introduction	44
III.2 Présentation du logiciel ABAQUS	44
III.3 Caractéristiques des matériaux et modélisation	45
III.3.1 Comportement expérimental	46
III.3.1.1 Le tissu Polypropylène PP	46
III.3.1.2 Le polymère renforcé	47
III.3.1.3 Matrice Mortier & Sciure de bois	47
III.3.2 Identification des paramètres et modèles adoptés	48
III.3.2.1 Modèle élastique-fragile pour les composites	48
III.3.2.2 Modèle élastoplastique pour les matériaux d'âme	50
III.4 Présentation des variantes d'étude et étapes de modélisation	51
III.4.1 Modélisation géométriques et assemblage	51
III.4.2 Maillage et modèle élément fini	53
III.4.2.1 Etude de la sensibilité du maillage	53
III.4.3 Gestion du contact et des interfaces	55
III.4.4 Mode de chargement et acquisition	56
III.5 Conclusion	57
Chapitre IV	58
IV.1 Introduction	59
IV.2 Résultats de la flexion 3-points	59
IV.2.1 Comportement global des multicouches	59
IV.2.2 Validation des essais de flexion	61
IV.2.3 Cartographie des contraintes et des déformations	62

IV.2.3.1 Cas des multicouches symétriques.....	62
IV.2.3.2 Cas des multicouches dissymétriques.....	64
IV.2.4 Cartographie des déplacements.....	66
IV.2.4.1 Cas des multicouches symétriques.....	66
IV.2.4.2 Cas des multicouches dissymétriques.....	68
IV.3 Résultats du flambement.....	69
IV.3.1 Confrontation des courbes force –déplacement	69
IV.3.2 Validation du modèle EF en flambement.....	70
IV.3.3 Cartographie des contraintes.....	71
IV.3.4.1 Cas des multicouches symétriques.....	72
IV.3.4.2 Cas des multicouches dissymétriques.....	73
IV.3.5 Cartographie des déplacements.....	73
IV.3.5.1 Cas des multicouches symétriques.....	74
IV.3.5.2 Cas des multicouches dissymétriques.....	75
IV.4Conclusion.....	75

Liste des figures

Chapitre I :

Figure I.1 : Constituants d'une structure composite multicouche	6
Figure I.2. Constitution d'une structure composite monocouche	7
Figure I.3. Constitution d'un stratifié.....	7
Figure I.4. Désignation d'une structure composite stratifiée	8
Figure I.5 : Principaux constituants d'une structure sandwich symétrique	8
Figure I.6: Constituants d'une structure sandwich dissymétrique	9
Figure 1.7 : Avion militaire Britannique en structure multicouche	12
Figure I.8: Structure composite multicouche sous chargement de flexion trois-points	14
Figure 1.9 : Répartition des contraintes de cisaillement	16
Figure I.10 : Déformation en cisaillement dans l'âme.....	17
Figure I.11 : Structure composite multicouches sous chargement de flexion 4 points	18
Figure I.12 : a) flambement global du sandwich b) flambement local du sandwich	20

Chapitre II :

Figure. II.1 : Matériaux utilisés pour la confection des âmes de structures multicouches.....	23
Figure II.2 : Croissance secondaire de la plante	24
Figure II.3. Différentes sections de l'arbre : axiale, radiale et tangentielle	24
Figure II.4 : Courbe contrainte-déformation typique du liège en compression..	26
Figure II.5: Comportement mécanique en traction pour le liège dans toutes les directions ..	26
Figure II.6 : Processus d'extraction des fibres végétales.....	28
Figure II.7 : Schéma à différentes échelles de la plante et de la fibre de chanvre	29

Figure II.8: Directions principales dans une pièce de bois	30
Figure II.9 : Sciures et copeaux de bois Issus des scieries.....	31
Figure. II.10 : a) plante et fibre de jute ; b) plante et finbre de lin.....	32
Figure II.11 : Matériaux utilisés dans la fabrication des peaux des structures multicouches.....	33
Figure II.12 tissus 2D (a) taffetas, (b) sergé de 2, satin de 5 à décochement de 2.....	35
Figure II.13: Tissus 3D: (a) « Layer to Layer Angle Interlock », (b) « Through the thickness Angle Interlock », (c) orthogonal.....	35
Figure II.14 : Les différents tissus : a) fibre de verre ; b) fibre de carbone c) ; fibre de kevlar.....	36
Figure II.15: Les trois échelles caractéristiques de l'étude des renforts tissés. ...	38

Chapitre III :

Figure III.1 : Organigramme de résolution de schéma statique implicite.....	45
Figure III.2 : Organigramme de résolution d'un schéma dynamique explicite..	45
Figure III.3 : Comportement expérimental du tissu composite PP utilisé	46
Figure III.4 : Comportement en traction du polymère renforcé : a) Sen longitudinal ; b) Sens transversal	47
Figure III.5 : Courbe contrainte-déformation des matériaux d'âme : a) Comportement en compression ; a) Réponse en traction.....	48
Figure III.6 : Modélisation géométrique de l'âme de la poutre sandwich.....	52
Figure III.7 : Modélisation géométrique des peaux (polymère et du tissu).....	52
Figure III.8 : Caractéristiques géométriques d'un panneau multicouche assemblé.	53
Figure III.9 : - Configurations pour la validation de la sensibilité au maillage..	54
Figure III.10 : Courbes contrainte-déformation pour les 4 configurations.....	54
Figure III.11 : maillage du a) Polypropylène PP,b) de l'âme c)POLYMERE ...	55
Figure III.12: contacte entre l'âme et les deux semelles.....	56
Figure III.13 : Mode de chargement.....	56

Chapitre IV :

Figure IV.1 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs symétriques chargés en flexion.	60
Figure IV.2 : Courbes force-déplacement des panneaux dissymétriques en flexion.....	60
Figure IV.3 : Courbes force-déplacement du panneau multicouche (MD-TT) en flexion.....	61
figure IV.4: propagation des contraintes dans le sandwich a semelles en tissus (MS-TT).....	62
Figure IV.5 : Propagation des contraintes dans le sandwich a semelles en polymères (MS-PP).....	63
Figure IV.6 : Propagation des contraintes dans le sandwich a semelles en polymère et tissu MD-PT.	64
Figure IV.7 : Propagation des contraintes dans le sandwich a semelles en tissu et polymère (MD-TP).....	65
Figure IV.8 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouches à semelles en tissus (MS-TT).....	66
Figure IV.9 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouches a semelles en polymères (MS-PP).	67
Figure IV.10 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouche (MD-PT).	68
Figure IV.11: Evolution des déplacements globaux dans le multicouche (MD-TP).....	68
Figure IV.12:confrontation des courbes forces - déplacements des panneaux sandwichs symétrique chargés en flambement	69
Figure IV.13 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs dissymétriques chargés en flambement.....	70
Figure IV.14 : Confrontation des courbes forces-déplacements du panneau MS-TT Simulation vs. Essai.	71
Figure IV.15 : Propagation des contraintes de flambage dans le sandwich MS-TT.	72

Figure IV.16 : Propagation des contraintes de flambage dans le sandwich MS-PP	72
Figure IV.17 : Propagation des contraintes de flambage dans le sandwich MD-PT.	73
Figure IV.18 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich MS-TT	74
Figure IV.19 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich MS-PP	74
Figure IV.20: Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich MD-PT	75
Figure IV.1 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs symétriques chargés en flexion.	71
Figure IV.2 : Courbes force-déplacement des panneaux dissymétriques en flexion.....	71
Figure IV.3 : Courbes force-déplacement du panneau multicouche (MD-TT) en flexion.....	72
Figure IV.5 : Propagation des contraintes dans le sandwich a semelles en polymères (MS-PP).....	74
Figure IV.6 : Propagation des contraintes dans le sandwich a semelles en polymère et tissu MD-PT.	75
Figure IV.7 : Propagation des contraintes dans le sandwich a semelles en tissu et polymère (MD-TP).....	76
Figure IV.8 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouches à semelles en tissus (MS-TT).....	77
Figure IV.9 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouches a semelles en polymères (MS-PP).	78
Figure IV.10 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouche (MD-PT).	79
Figure IV.11 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouche (MD-TP)	79
Figure IV.12 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs symétriques chargés en flambement.....	81
.....	81
Figure IV.13 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs dissymétriques chargés en flambement.	81

Figure IV.14 : Confrontation des courbes forces-déplacements du panneau MS-TT Simulation vs. Essai	82
Figure IV.15 : Propagation des contraintes de flambage dans le sandwich MS-TT.	83
Figure IV.16 : Propagation des contraintes de flambage dans le sandwich MS-PP	83
Figure IV.17 : Propagation des contraintes de flambage dans le sandwich MD-PT.	84
Figure IV.18 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich MS-TT	85
Figure IV.19 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich MS-PP	85
Figure IV.20: Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich MD-PT	86

Liste des tableaux

Chapitre II :

Tableau II.1 : Composition chimique du liège..... 27

Tableau II.2 : caractéristiques des résines thermodurcissables 39

Tableau II.3 : caractéristiques des résines thermodurcissable 40

Chapitre III :

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques du tissu composite en PP issues des essais..... 49

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques du polymère renforcé issues des essais.. 49

Tableau III.3 : Paramètres du modèle élastique isotrope pour le tissu PP..... 49

Tableau III.4 : Paramètres du modèle élastique orthotrope pour le polymère.... 50

Tableau III.5 : Paramètres utilisés pour définir le comportement du mortier allégé..... 51

Principales Notations

P	Charge appliquée
h	Épaisseur du sandwich
Peu	Charge d'Euler
Pcr	Charge critique de flambement
L	Distance entre les appuis (flexion 3 points)
L1	Distance entre les appuis intérieurs (flexion 4 points)
L2	Distance entre les appuis extérieurs (flexion 4 points)
Ec	Module d'élasticité de l'âme
Ef	Module d'élasticité du matériau de peau
Ef1, tf1	Module d'élasticité et épaisseur de la peau supérieure
Ef2, tf2	Module d'élasticité et épaisseur de la peau inférieure
Gc	Module de cisaillement de l'âme
D	Rigidité en flexion
S	Rigidité en cisaillement
Mx	Moment de flexion
Tx	Force transversale
σ	Contrainte de traction dans les matériaux peaux
τ	Contrainte de cisaillement dans le matériau d'âme
A et D	Points d'appuis de la structure en flexion 4 points
B et C	Points d'appuis de la charge en flexion 4 points
w1	Déplacement due à la flexion des peaux
w2	Déplacement due au cisaillement du matériau d'âme
w _t	Déplacement totale
PCI pli	Composite intermédiaire
Z	Coordonnées suivant l'épaisseur du sandwich
F _{max}	Force de rupture
U _{max}	Déplacement correspondant à la rupture
U _{elas}	Déplacement correspondant à la limite élastique
F _{I_{max}}	Force de rupture en traction dans la direction longitudinale

F_{2max} Force de rupture en traction dans la direction transversale

U_{1max} Déplacement à la rupture en traction suivant la direction longitudinale

U_{2max} Déplacement à la rupture en traction suivant la direction transversale

σ Contrainte de rupture

ε_{elas} Déformation correspondante à la limite élastique

E Module d'Young

ν Coefficient de poisson

f_{mc} Contrainte correspondante au pic en compression

$f_{mc\,elas}$ Contrainte élastique en compression

ε_{mc} Déformation correspondante au pic en compression

F_{mt} Force maximale en traction

U_{mt} Déplacement correspondant à la contrainte maximale en traction

σ_{mc} Contrainte de rupture en compression

σ_{mt} Force de rupture en traction

Introduction Générale

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Le développement des technologies modernes exige l'utilisation des matériaux présentant des propriétés mécaniques élevées spécifiques à leur emploi, dont les masses volumiques soient faibles et le cout de fabrication et de main-d'œuvre sont moins onéreux. Ce progrès qui a pour objectif d'améliorer le rapport performances/masse a conduit à une nouvelle génération de structures et de matériaux composite. En raison de leur faible densité, grande résistance, rigidité importante et de leur excellente durabilité, les matériaux composites structuraux sont utilisés dans de nombreuses composantes structurales, notamment dans le domaine de l'aéronautique. Leurs coûts de production réduit permettent l'utilisation de ces matériaux dans des applications de plus en plus variées. A cet effet, plusieurs études ont été réalisées et se poursuivent sur ces matériaux dans le but de maîtriser leurs comportements dans des environnements spécifiques.

Parmi les matériaux composites les plus utilisés, on notera les matériaux multicouches à savoir : les sandwichs symétriques et dissymétriques, les stratifiés...etc.). Les structures multicouches se distinguent des autres matériaux par le fait qu'ils sont constitués : de deux semelles ou peaux de faibles épaisseurs et d'âme épaisse, séparables mécaniquement. Ces peaux sont constituées de matériaux à relativement haute résistance pour assurer la fonction de charge, l'âme est beaucoup plus épaisse et de faible densité. Les structures multicouches ont été les premières structures en matériau composite à combiner légèreté et performance. Du fait que l'on peut modifier les propriétés de ces matériaux en variant les proportions de leurs constituants ou les propriétés des constituants eux-mêmes. Ces ajustements permettent donc d'atteindre les propriétés souhaitées pour répondre à des applications bien identifiées. Les structures composites multicouches offrent donc de grandes potentialités aux concepteurs dans des secteurs d'ingénierie très divers.

Au cours de ces dernières années, plusieurs travaux de recherches ont été menés afin de mieux comprendre le comportement de ces structures multicouches. Par conséquent, leur utilisation s'est répandue dans l'industrie du bâtiment, et cette fois, ce sont leurs excellentes caractéristiques d'isolation thermique et acoustique qui sont prises en compte. Ces structures présentent également d'amples avantages à savoir : coût, stabilité, sûreté, résistance au choc, durée de vie propriétés à la fatigue, dégradation de l'environnement, plus grande capacité de

charge, maintenance réduite et facilité de réparation et capacité d'atténuation des vibrations. D'un point de vue mécanique, cette structure composite est constituée de deux peaux qui supportent l'essentiel du chargement mécanique imposé et d'une âme dont la fonction est de transmettre par cisaillement le chargement mécanique entre les deux peaux. Dans cette optique, ces systèmes mécaniques peuvent être réalisés en éléments très divers.

Notre étude porte sur la simulation numérique du comportement mécanique d'une nouvelle structure composite multicouche, constituée d'une âme à base d'une matrice mortier allégé par des fractions volumiques en sciures du bois. Les semelles inférieures et supérieures sont respectivement confectionnées en tissu polypropylène et polymère renforcées collées à l'aide d'une résine époxyde. La conception proposée qui présente à la fois un poids propre réduit et un seuil de résistance acceptable est destinée à des applications d'isolation entre les parois, permettant ainsi d'améliorer les propriétés thermiques et acoustiques de la structure. En effet, dans la présente contribution, on se propose de développer un modèle élément fini capable de prédire et de modéliser le comportement de notre système mécanique sous chargement de flexion de flambement.

Le travail de thèse entrepris est structuré en quatre chapitres et est terminé par une conclusion générale et des perspectives, il se décompose comme suit :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique concernant les différents types de matériaux structuraux ainsi que le comportement mécanique des matériaux multicouche, leurs avantages, et l'intérêt de leurs utilisations ainsi que les différents domaines d'application. L'analyse critique nous a permis de lister les principaux constituants de ces matériaux, les procédés essentiels de leurs mises en forme, ainsi que l'intérêt de ces matériaux révolutionnaires dans divers domaines. En deuxième lieu, nous avons présenté les principales propriétés physiques et mécaniques de ces structures composites, ainsi que leur mode de rupture le plus fréquent, qui est généralement le délaminage des semelles de l'âme dû à une forte concentration des contraintes au niveau des interfaces.

Le deuxième chapitre comporte une revue détaillée sur les matériaux de l'étude et leurs classifications et caractéristiques physicomécanique. Ainsi que sur les différents matériaux qui peuvent constituer un multicouche et leurs mises en forme.

Le troisième chapitre, est totalement dédié à la simulation numérique basée sur la méthode des éléments finis à l'aide du logiciel Abaqus. Il donne un aperçu sur le modèle du produit ou maillage et les principales étapes de la simulation par éléments finis. Cette analyse est consacrée à la modélisation du comportement des panneaux multicouches sous chargements monotones de flexion et flambement croissants jusqu'à la rupture. Les matériaux utilisés sont modélisés suivant des modèles numériques à savoir : un modèle élastoplastique permettant de tenir compte de la dissymétrie du comportement non linéaire du mortier allégé de sciure de bois en compression et en traction, et un modèle élastique fragile orthotrope pour modéliser le comportement expérimental des matériaux composites des semelles.

Le quatrième chapitre regroupe l'ensemble de tous les résultats de l'analyse des différents éléments modélisés. Les résultats mettent en évidence l'influence des différentes grandeurs (résistances des constituants, déformations, densité de l'âme, séquence d'empilement, épaisseur, ...) sur la résistance des multicouches.

Recherche bibliographique

Chapitre I

Structures composites multicouches

I.1. Introduction

Les matériaux composites sont constitués de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément [1]. Ce phénomène qui permet d'améliorer la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, etc..) explique l'utilisation croissante des matériaux composites dans différents secteurs industriels.

Parmi les matériaux composites les plus utilisés, on peut citer les matériaux multicouches qui occupent un large créneau dans la construction des pièces composites. Ce chapitre présente une étude bibliographique qui fait l'état de l'art des différents éléments nécessaires à ce travail, à travers une synthèse détaillée sur les structures composites multicouches. Ainsi, nous présentons leurs principaux constituants, et leurs comportements physiques et mécaniques sous différents types de chargement.

I.2. Définition des matériaux composites structuraux

Un matériau composite est une combinaison de deux ou plusieurs matériaux distincts à l'échelle macroscopique, dans le but de produire un matériau possédant des propriétés qui excèdent celles de ses constituants [2]. Cet éventail de propriétés est dû aux nombreuses combinaisons possibles entre renforts et matrices, ces dernières liant les renforts entre eux et assurant la cohésion du matériau final. Il en résulte des matériaux destinés à des domaines d'applications particuliers où la géométrie autant que les contraintes mécaniques et de l'environnement jouent un rôle important sur la durée de vie des pièces.

Les matériaux composites sont de faibles épaisseurs et possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques (module élevé, grande résistance et déformation). Un des grands atouts des composites est que les propriétés sont ajustables en fonction des paramètres de conception tels que la nature, le taux, l'orientation et l'architecture des fibres, l'agencement des plis et la nature de la matrice.

Dans un matériau composite, l'adhésif permet un bon assemblage de la structure et aussi une bonne transmission des contraintes d'un milieu à l'autre. Sa principale caractéristique doit être une bonne résistance en 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. D'autre part, dans la constitution des matériaux structuraux, on peut adapter leurs propriétés mécaniques en faisant varier la nature des matériaux (identiques ou non) et de l'âme ainsi que l'épaisseur de chacune des phases [3].

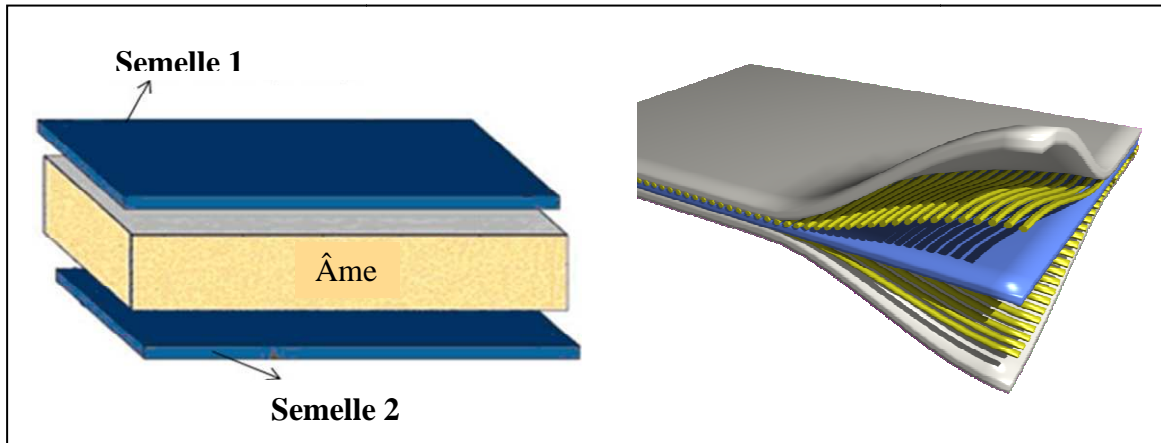


Figure I.1 : Constituants d'une structure composite multicouche

Les structures en matériaux composite représentées sur la Figure I.1 représentent un domaine de recherche très vaste et d'applications immenses tant il est possible de modifier à volonté leur composition et leur architecture pour obtenir de ces matériaux les propriétés recherchées. La conception et l'élaboration de ces matériaux nécessitent le développement d'outils d'analyse adaptés à leurs spécificités géométriques et matérielles. Ce sont en général des outils bâtis à partir de modèles expérimentales.

I.3. Architectures matériaux composites structuraux

I.3.1. 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 à savoir : fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement) et fibres tissées ou à fibres courtes (Voir Figure I.2).

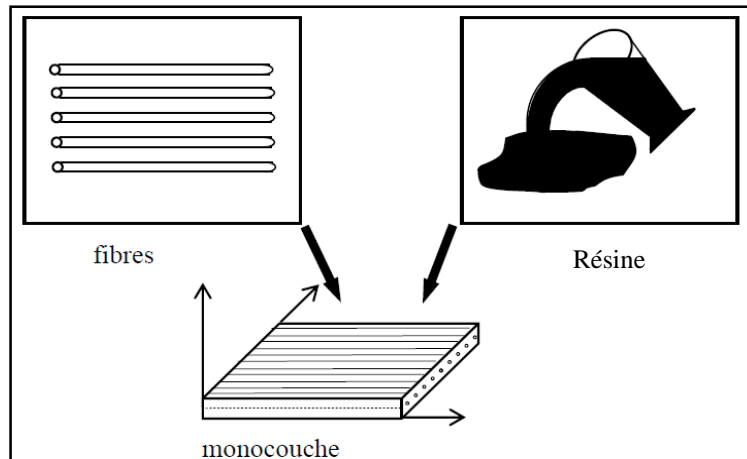


Figure I.2. Constitution d'une structure composite monocouche

I.3.2 Les stratifiés

On appelle stratifié, un matériau qui résulte de la superposition de plusieurs plis (couches); unidirectionnels, tissus ou avec des orientations propres à chaque plis. Cette opération est appelée drapage [4].

Les avantages des stratifiés résident dans la possibilité d'adapter et de contrôler l'orientation des fibres pour que le matériau résiste à des sollicitations déterminées.

Les stratifiés peuvent être de trois types tel que montrer sur les Figures I.3 et I.4 :

- 1) *Equilibrés* : le stratifié contient autant de couches orientées suivant la direction $+ \theta$ que de couches suivant la direction $- \theta$,
- 2) *symétriques* : les couches du stratifié sont disposées symétriquement par rapport à un plan moyen (miroir),
- 3) *orthogonaux* : le stratifié comporte autant de couches à 0° que de couches à 90° .

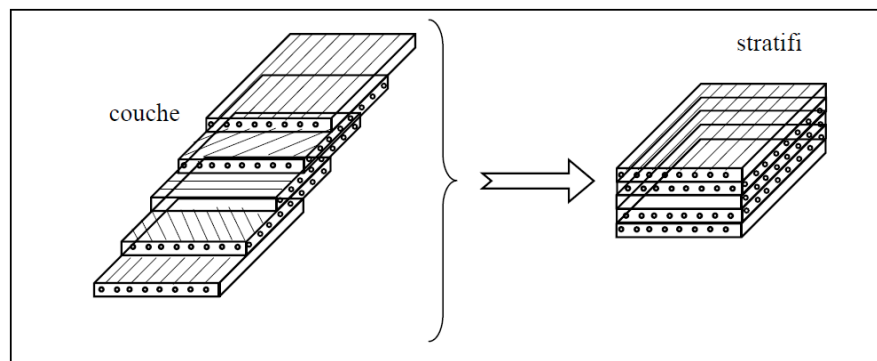


Figure I.3. Constitution d'un stratifié [5].

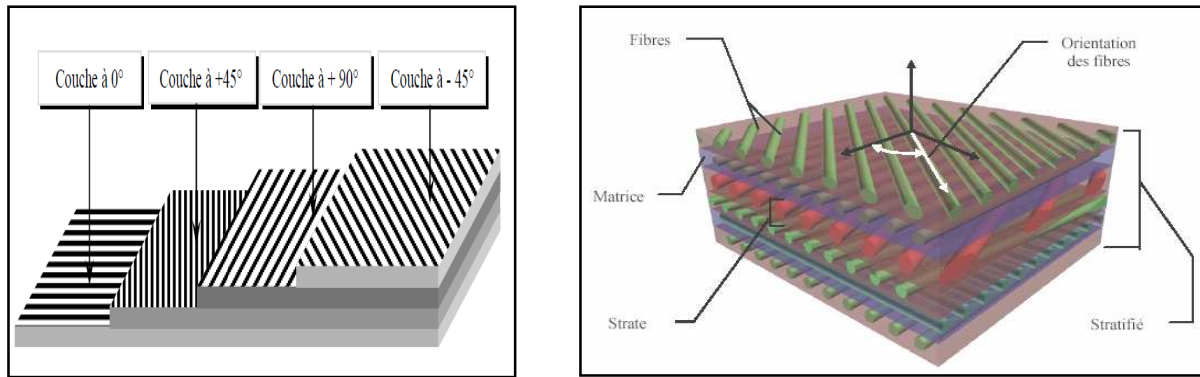


Figure I.4. Désignation d'une structure composite stratifiée [1][6].

I.3.3 Les structures sandwiches

I.3.3.1 Structures sandwiches symétriques

Une structure sandwich symétrique est obtenue à partir de deux peaux ou semelles identiques, réalisées dans un matériau ayant de très bonnes caractéristiques mécaniques, collées sur une âme réalisée avec un matériau très léger et ayant de faibles caractéristiques mécaniques (Voir Figure I.5). Une telle structure présente des rapports résistance/masse et rigidité/masse très importants sous chargement de flexion.

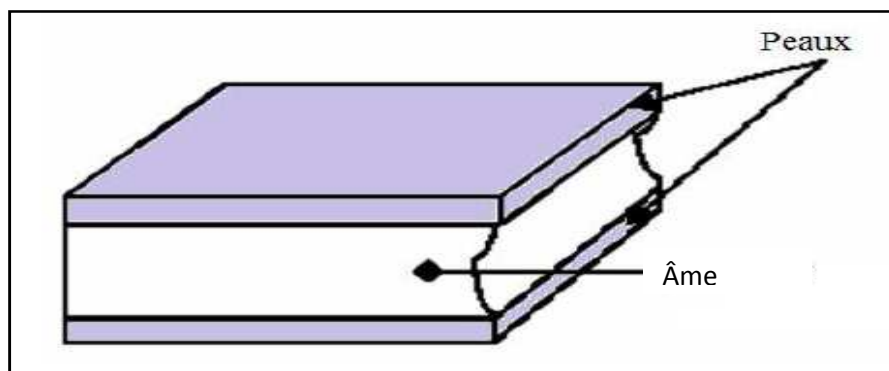


Figure I.5 : Principaux constituants d'une structure sandwich symétrique

I.3.3.2 Structures sandwich dissymétriques

A l'instar des structures sandwiches classiques constitués d'une âme placée entre deux semelles identiques, les structures sandwiches 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.6.

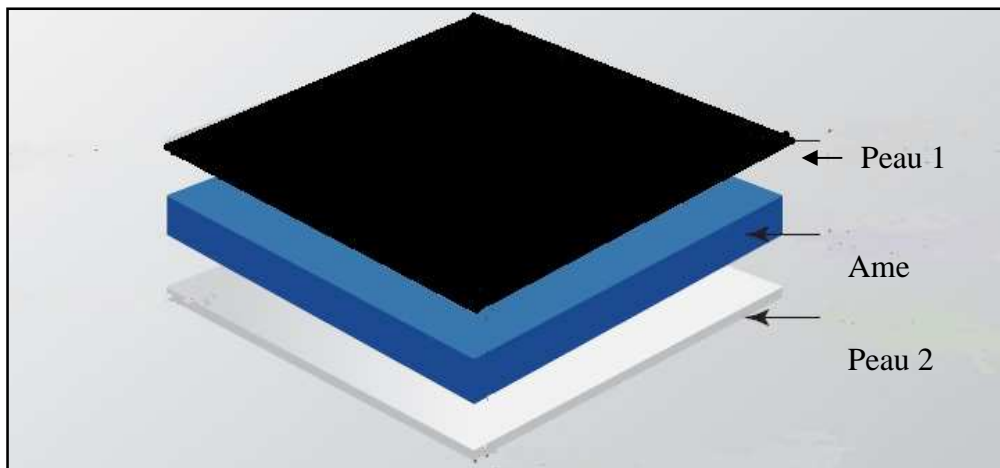


Figure I.6: Constituants d'une structure sandwich dissymétrique

Par rapport aux sandwiches symétriques, les sandwiches 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 [7].

I.4. Les constituants des matériaux multicouches

I.4.1. Les peaux

Généralement de faibles épaisseurs, les peaux sont constituées de tout matériau pouvant être obtenu sous forme de couche. Elles peuvent être en bois, métal ou matériau composite. Le choix de la nature de la peau s'effectue principalement en fonction des performances mécaniques exigées. Les peaux ont pour but de reprendre les efforts de flexion traduit par des contraintes normales (traction ou compression).

I.4.2. L'âme

L'âme qui est en général légère, présente une très faible résistance à la flexion. Cependant elle reprend les efforts de compression et de cisaillement. L'âme est souvent épaisse et de faible masse volumique. L'épaisseur élevée de l'âme a pour but d'accroître le

moment d'inertie du panneau sans augmenter la masse volumique. Les matériaux d'âme les plus utilisés se présentent principalement sous deux formes :

- **âmes pleines** : parmi lesquelles on trouve le balsa (ou bois cellulaire), diverses mousses cellulaires et des résines chargées de microsphères creuses de verres (mousses syntactiques) ;
- **âme creuses** : essentiellement de type nid d'abeilles et profilé (réseaux métalliques légers, réseaux en papier enduit ou non, réseaux en polycarbonate et en polypropylène).

I.4.3. 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 [8].

I.5. Intérêt des structures multicouches

L'intérêt principal des structures multicouches, par opposition aux composites traditionnels dits monolithique, réside dans leur rigidité spécifique très élevée. La densité de l'âme est couramment de l'ordre de 100 kg/m^3 . En modifiant la nature et l'épaisseur de la peau et/ou de l'âme, on parvient à donner à la structure le matériau qui convient le mieux. Ainsi, l'amélioration de la rigidité qui traduit le comportement en flexion du matériau, s'obtient en augmentant soit l'épaisseur de l'âme qui conduit à l'augmentation de son moment d'inertie, soit le module d'élasticité des peaux [3]. En effet, les principaux avantages des structures multicouches sont :

I.5.1. Légèreté et liberté de forme

Les matériaux composites multicouches disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté qui engendre un gain énorme au niveau du poids, résistance mécanique et chimique, maintenance

réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes de toutes les épaisseurs, en fonction de la demande. Ils offrent de grandes possibilités de maniement, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

Les composites multicouches sont beaucoup plus légères, ce comme dans le cas des avions qui est nettement réduit. L'avion consomme donc moins de carburant.

I.5.2. 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 limitent 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.5.3. Coût de fabrication réduit

L'un des principaux avantages de ces structures est que la production et l'assemblage des composites structuraux est réalisée en peu de temps et à faible coût, ce qui entraîne dans le temps de la construction peut être réduit à quelques jours. Le coût de la construction des objets est réduite Cela est dû au faible prix de la matière première, ainsi que la simplicité de

son installation, réduisant ainsi les frais de fabrication et de mise en œuvre. En effet, l'utilisation des composite multicouche représente toujours un saut technologique. Les multicouches offrent la possibilité de réaliser un produit spécifiquement adapté aux performances demandées et d'optimiser le couple prix-performance.

De plus grâce à l'isolation thermique qui en réduisant les pertes de chaleur minimise les besoins en énergie (demande de chauffage) et réduit donc de fait, à la fois : la facture, la consommation et la pollution jusqu'à 80%.

I.6 Domaines d'application

La construction en multicouches est un concept qui a été inventé dans les années 1820. Cependant, il a fallu un siècle pour que l'utilisation en masse commence, précisément dans le domaine militaire. En effet, l'une des premières applications de la construction en multicouches est la fabrication d'un avion militaire britannique de la Seconde Guerre Mondiale, le Mosquito (voir figure I.7) Contrairement aux structures métalliques, sa structure en panneaux multicouches avec des peaux de placage en bois et une âme en balsa, lui confère une grande légèreté et par conséquent une vitesse plus élevée [8].



Figure 1.7 : Avion militaire Britannique en structure multicouche [9].

Dans les années 1940, il y'a eu l'apparition de nouveaux matériaux d'âme qui a encouragé les principaux constructeurs d'avions militaires à utiliser davantage les composites multicouches. En effet, en 1943, la base aérienne américaine Wright-Patterson (WPAFB) a commencé à utiliser des structures multicouches avec des peaux stratifiées en résine polyester

renforcée de fibres de verre liées entre elles par une âme de faible densité (balsa ou nid d'abeille en fibres de verre) pour fabriquer le fuselage de leur VULTEE BT-15.

Ces dernières années, la plupart des avions civils ont également adopté cette construction pour de nombreux composants. Par exemple, les planchers de l'avion Boeing 747 sont fabriqués à partir d'un panneau multicouche de balsa et de feuille d'aluminium.

Dans le domaine de la construction navale, les caractéristiques de légèreté et surtout d'absence de corrosion des structures multicouches, lorsque les divers constituants ne sont pas métalliques, commencent à susciter de l'intérêt. Kujala et Tuhkuri [10] ont mené une étude expérimentale et analytique sur l'utilisation des panneaux multicouches possédant une âme en acier ondulé dans la construction des superstructures de navires. Ils ont démontré que le remplacement d'une construction en acier conventionnelle par une construction en multicouches peut apporter des gains de masse jusqu'à 40 à 50%. Selon Kimpara[11], l'utilisation de construction sandwich à âme en nid d'abeille pour la fabrication des voiliers a pour conséquence de diminuer la masse de la structure de 70% comparativement à la construction traditionnelle en composite à base de fibres de graphite (carbone). De nos jours, pratiquement tous les bateaux de plaisance américains de moins de 43 mètres sont construits en multicouches composites en fibres de verre [12].

Dans le secteur ferroviaire, la technique de construction en multicouches a été sélectionnée pour la fabrication des cabines de trains à grande vitesse (TGV). Les propriétés exceptionnelles de ces structures en font le matériau idéal pour palier aux problèmes de la propagation des ondes de pression lors de croisement de deux trains dans un tunnel. De plus, la bonne résistance au feu et la grande résistance à des températures très élevées de certaines mousses thermoplastiques, ont permis par exemple la conception du train allemand «*Transrapid*» ;. Grâce à une structure en matériaux multicouches, ce dernier peut atteindre des vitesses supérieures à 550 Km/h.[13]

Plus récemment, la construction multicouche est de plus en plus utilisée dans les projets de réhabilitation des infrastructures routières (Génie civil) telles que la fabrication des tabliers de ponts où la légèreté, la durabilité et la résistance à la corrosion sont indispensables.

Les structures multicouches sont également utilisées dans la construction des articles de sports et de loisirs, tels que les skis acrobatiques, les kayaks, les planches de surf, les tables de billard, et les raquettes de tennis.

I.7. Comportement mécanique des multicouches en flexion

Dans les structures multicouches, 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 la compression dans la peau supérieure. Celles-ci ont tendance à se rapprocher de la fibre neutre (compression de l'âme) et 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. Les structures sandwiches sont généralement chargées en flexion (traction-compression) ou en flambement. Les essais de flexion trois points ou quatre points sont largement utilisés pour la caractérisation du comportement mécanique et de l'endommagement. Il est donc convenable de maîtriser le comportement mécanique de l'âme et des peaux pour ces types de sollicitations.

I.7.1 Flexion trois-points

La Figure I.8 montre une structure composite multicouche sous chargement de flexion trois-points, il consiste en un essai mécanique qu'on effectue en 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].

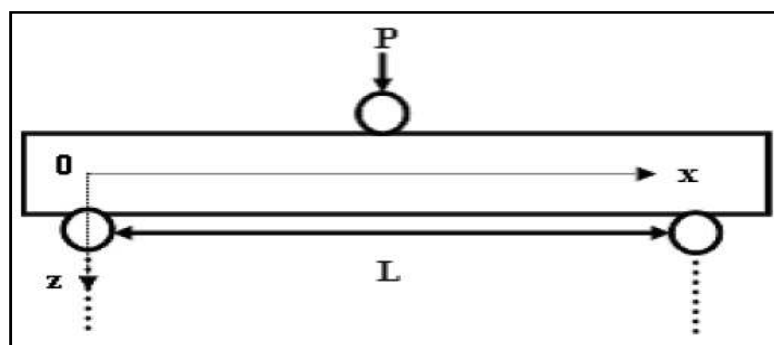


Figure I.8: Structure composite multicouche sous chargement de flexion trois-points

Le moment fléchissant est donné comme suit :

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

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

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 :

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

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

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

$$\sigma_f = \frac{Mz}{D} E_f \quad \text{pour} \quad \frac{tc}{2} \leq z \leq \frac{h}{2} \quad \text{et} \quad -\frac{h}{2} \leq X \leq -\frac{tc}{2} \quad [1.5]$$

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

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

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

$$\sigma_c = \frac{Mz}{D} E_c \quad \text{si} \quad \frac{tc}{2} \leq z \leq \frac{tc}{2} \quad [1.7]$$

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

$$\sigma_{c,max} = \frac{PLtc}{8D} E_c \quad [1.8]$$

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 :

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

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.

La distribution des contraintes de cisaillement est montrée sur la figure I.9.

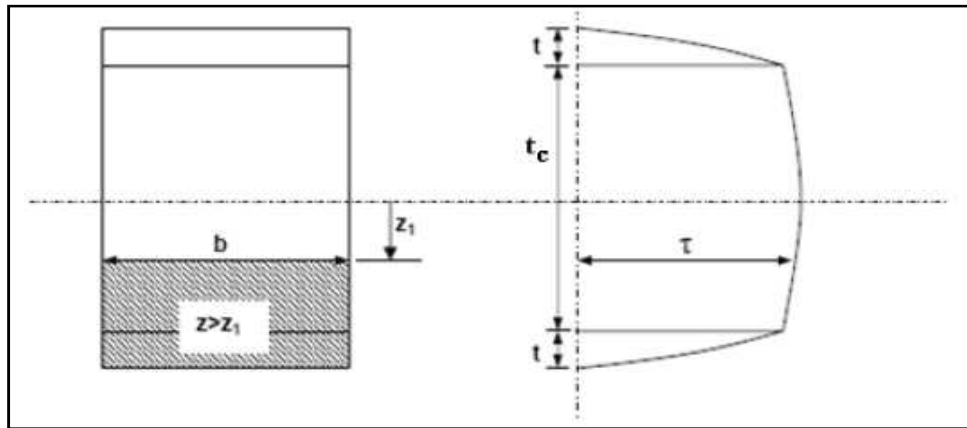


Figure 1.9 : Répartition des contraintes de cisaillement [15]

$\Sigma(SE)$: 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 :

$$\Sigma SE = E_f \frac{bt_f}{2} + \frac{E_c b}{2} \left(\frac{t_c}{2} - z \right) \left(\frac{t_c}{2} + z \right) \quad [1.10]$$

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

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

Cette contrainte est maximale au centre du sandwich et vaut :

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

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 :

$$\tau_{cmax} = \frac{p}{4D} [E_f t_f d] \quad [1.13]$$

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.10), 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.

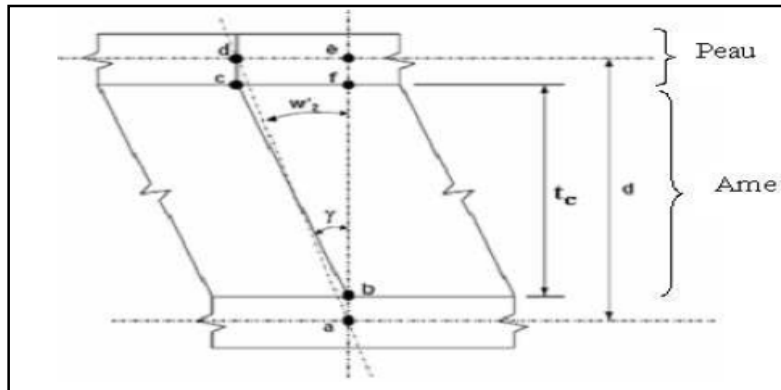


Figure I.10 : Déformation en cisaillement dans l'âme [15]

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 :

$$W_1 = \frac{pL^3}{48D} \tag{1.14}$$

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 :

$$W_2 = \frac{pL}{4S} \tag{1.15}$$

Finalement la flèche totale s'exprime par :

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

I.7.2. Flexion quatre points

La Figure I.11 montre une structure composite multicouche sous chargement de flexion Quatre-points. Dans ce cas on utilise les mêmes appuis simples, mais on applique deux charges au lieu d'une seule charge concentrée.

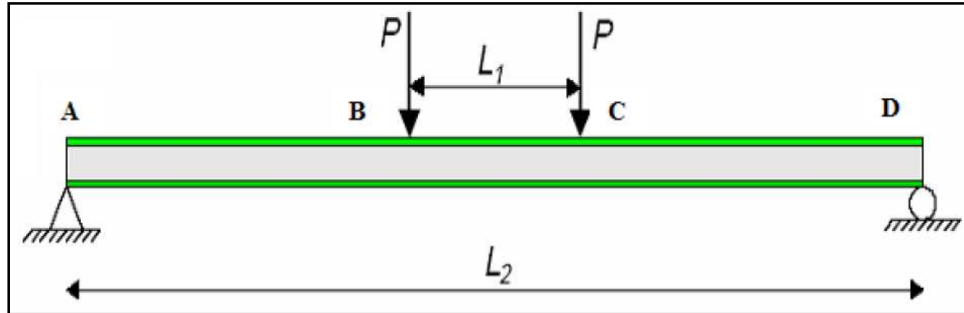


Figure I.11 : Structure composite multicouches sous chargement de flexion 4 points

Le moment fléchissant est donné comme suit par l'équation I.17. Où : L_1 est la distance entre les appuis intérieurs (BC), L_2 est la distance entre les appuis extérieurs (AD) et T l'effort tranchant.

$$M = \frac{P(L_2 - L_1)}{2} \quad [1.17]$$

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

$$\sigma_f = \pm \frac{M}{t_f d} \quad [1.18]$$

La contrainte maximale entre les appuis intérieurs s'écrit :

$$\sigma_{fmax} = \pm \frac{P(L_2 - L_1)}{2t_f b d} \quad [1.19]$$

La contrainte de cisaillement maximale dans l'âme est donnée par la formule suivante :

$$\sigma_{cmax} = \frac{p}{2bd} \quad [1.20]$$

Le déplacement mesuré pour une poutre sandwich aux points de chargement $L_2/2$ et $(L_2 - L_1)/2$ est donc la somme d'une contribution classique due à la flexion w_1 et d'une contribution due au cisaillement de l'âme w_2 de sorte que $w_t = w_1 + w_2$ avec :

- Au point $L_2/2$ (en raisonnant comme dans le cas de la flexion 3 points) :

$$W_1 = \frac{11PL_2^3}{t_f d} \quad [1.21]$$

$$W_2 = \frac{PL_2}{8S} \quad [1.22]$$

$$W_t = P \left(\frac{11PL_2^3}{768D} + \frac{L_2}{8S} \right) \quad [1.23]$$

- Au point de chargement $(L_2 - L_1)/2$:

$$W_t = \frac{P(L_2 - L_1)^2(L_2 + 2L_1)}{48D} \quad [1.24]$$

$$W_2 = \frac{P(L_2 - L_1)}{4S} \quad [1.25]$$

$$W_t = W_1 + W_2 = \frac{P(L_2 - L_1)^2(L_2 + 2L_1)}{48D} + \frac{P(L_2 - L_1)}{4S} \quad [1.26]$$

I.8. Comportement des multicouches en 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 [16].

La Figure I.12 présente le cas d'une poutre sandwich chargée sur son axe. Ce cas de chargement peut entraîner des instabilités globales (flambement de la poutre) ou locales (voilement des peaux) si la charge appliquée est trop importante [3].

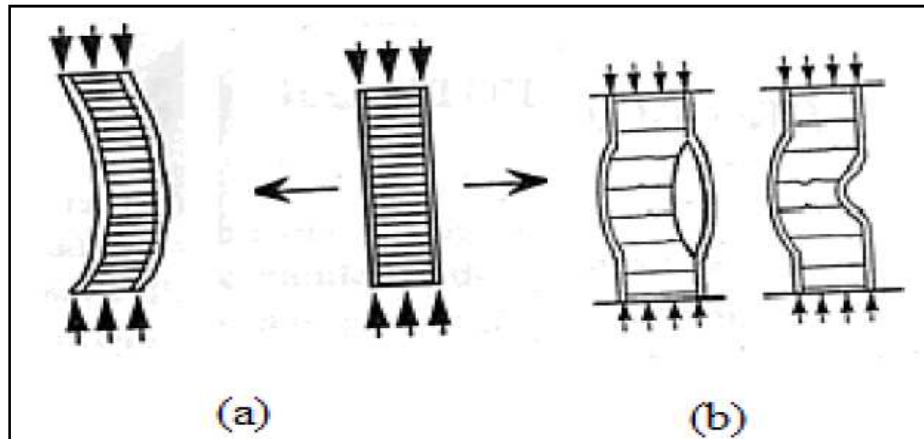


Figure I.12 : a) flambement global du sandwich b) flambement local du sandwich

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 :

$$P_{eu} = \frac{\pi^2 D}{L^2} \quad [1.27]$$

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.

$$\frac{1}{P_{cr}} = \frac{1}{P_{eu}} + \frac{1}{S} \quad \text{Avec} \quad S = P_c = \frac{bd^2}{c} G \quad [1.28]$$

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

$$P_{euf} = \frac{\pi^2 EI_f}{L^2} \quad [1.29]$$

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

$$P_{cr} = P_{EU} \left\{ \frac{1 + \frac{P_{Euf}}{P_c} - \frac{P_{Euf} P_{Euf}}{P_c P_{EU}}}{1 + \frac{P_{EU}}{P_c} - \frac{P_{Euf}}{P_c}} \right\} \quad [1.30]$$

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à présenter et à définir les notions liées aux matériaux composites structuraux. Dans un premier temps, nous avons présenté les principaux constituants de ces matériaux, les procédés essentiels de leurs mises en forme, ainsi que l'intérêt de ces matériaux révolutionnaires dans divers domaines. En deuxième lieu, nous avons présenté les principales propriétés physiques et mécaniques des structures composites multicouches.

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.

Recherche bibliographique

Chapitre II

Matériaux des Multicouches

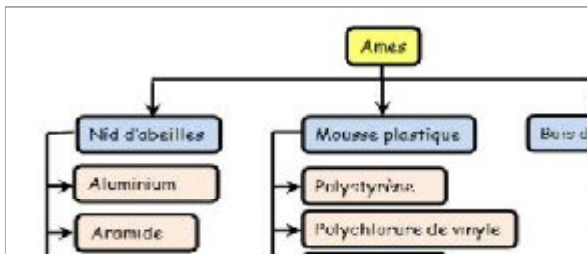
II.1. Introduction

Les travaux de recherche disponibles dans la littérature scientifique sur l'utilisation de matériaux traditionnels homogènes reste limitée à un domaine restreint tributaire des caractéristiques intrinsèques de ces matériaux. Avec les perspectives sont apparues avec l'apport des matériaux composites qui répondent aux exigences des contraintes mécaniques imposées, à travers le choix judicieux des matrices.

Les structures multicouches sont constituées par de peaux de matériaux d'âme de faible densité. Pour obtenir des propriétés mécaniques on se focalise pas seulement sur la rigidité des peaux mais on fait aussi attention à d'âmes présentant à la fois des qualités de performances mécaniques et légèreté. Par conséquent, dans ce chapitre, nous présentons les matériaux utilisés en forme ainsi que leurs caractéristiques physiques et mécaniques.

II.2. Matériaux d'âme

Les principaux matériaux utilisés dans la fabrication des structures multicouches sont récapitulés sur l'organigramme de la figure II.1 :



II.2.1. Le liège

Le liège est un matériau vivant et naturel, provenant d'une variété qui reconstitue son écorce dès qu'elle est prélevée chaque année. L'arbre produit un liège variant de 1 à 10 mm selon l'âge déjà acquis par l'écorce elle-même. Pour des raisons thermiques et acoustiques le liège est un très mauvais conducteur. Sa première utilisation connue remonte très tôt dans l'Antiquité dans la fabrication de récipients. Concernant sa place dans la construction, on retrouve quelques traces de son utilisation comme isolant thermique, parmi les populations primitives d'Afrique du Nord où il est utilisé en plaque et mélangé avec de l'argile pour la construction des murs de la

II.2.1.1 Anatomie et qualité du liège

D'un point de vue botanique, ce que nous appelons écorce représente l'épaisseur ou la croissance secondaire de la tige de la plante. Cette croissance est due à l'activité de méristèmes situés à la périphérie de la tige : le cambium et le phellogène. La structure secondaire va se recouvrir d'un tissu de revêtement appelé le pé

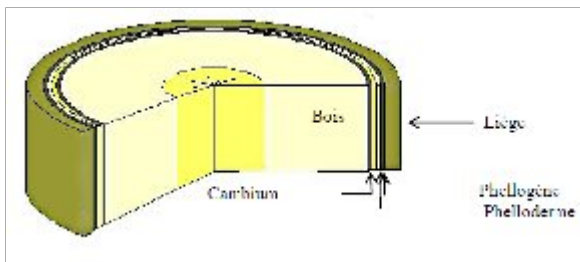


Figure II.2 : Croissance secondaire de la plante.[17

Dans la section radiale, les cellules sont disposées en «nid d'abeilles» et ont une forme principalement hexagonale (Voir Figure II.3). Certaines peuvent avoir cinq, sept ou huit côtés. Cette disposition des cellules permet de considérer que le liège est un matériau isotrope dans le sens radial, impliquant que les directions axiale et tangentielle sont équivalentes [19].

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

- **Résilient et Souple** : Le liège ne présente aucune déformation permanente sous les charges de compression. Il ne se tasse pas sous l'effet des chocs. Les cellules du liège, semblables à des coussins, détiennent une véritable mémoire élastique. Grâce à cette élasticité, le liège résiste à la compression sans dilatation, ce qui permet le retour à sa forme d'origine. De plus, le liège offre une grande stabilité dimensionnelle et une dilatation minimale aux changements d'humidité et de température. [20]
- **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 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. Le liège absorbe moins de 18 à 20 % d'eau si son volume augmente, résultant essentiellement de la dilatation des gaz contenus dans ces cellules.
- **Naturel, recyclable et biodégradable** : il contribue parfaitement au développement durable.
- **Faible conductivité phonique et thermique** : 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.
- **Résistant à la Friction** : Le liège offre une excellente résistance à la friction ainsi qu'à l'usure occasionnée par de nombreux passages. En effet , il ne s'effrite pas.

II.2.1.2 Propriétés mécaniques du liège

Le liège présente plutôt des propriétés mécaniques particulières. La courbe de déformation en compression présente trois régions liées aux trois mécanismes pour les propriétés des matériaux alvéolaires flexibles. D'après la figure II.4, la première région (déformation d'environ 7%) correspond à une flexion élastique des parois cellulaires ; le second plateau est presque horizontal, qui s'étend à une déformation de 10% provoquée par le flambage progressif des parois cellulaires ; Enfin, l'effondrement des parois cellulaires et l'effondrement complet des cellules provoque la courbe à la troisième région.

Les courbes moyennes contrainte-déformation en traction sont présentées en figure II.5. un comportement mécanique différent selon les deux directions de traction est observé. Le comportement intermédiaire avec des dentelures est expliquée en termes d'apparition successive de microfissures qui se propagent à travers quelques cellules environnantes.

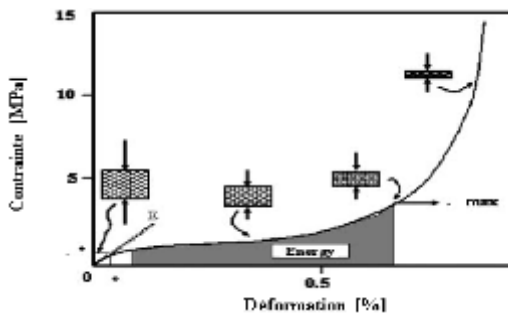


Figure II.4 : Courbe contrainte-déformation typique du liège en compression



II.2.1.3 Composition chimique

Le liège du chêne 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 récapitulés dans le tableau II.1 sont présents à des proportions qui varient selon l'âge et l'habitat du chêne liège. Ils sont donnés comme suit :

- **La subérine** : composant principal des cloisons des cellules, et il est la source de son élasticité
- **La lignine** : élément qui contribue à la liaison entre les différents composants. C'est le composé « agglomérant ».
- **La cellulose et polysaccharides** : composants des cloisons des cellules qui donnent au liège sa texture
- **Les tanins** : composants qui déterminent la couleur du liège
- **Les céroïdes** : composants hydrophobes qui garantissent l'imperméabilité.
- On retrouve aussi de l'eau, de la glycérine et divers ingrédients à hauteur de 4% [23].

Tableau II.1 : Composition chimique du liège.

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

II.2.2. Le chanvre

Le chanvre est une des premières plantes domestiquées par l'homme, sa culture remonte à l'ère Néolithique, probablement en Asie. Il a ensuite accompagné migrations et conquêtes pour se répandre sur tous les continents. Angiosperme dicotylédone de la famille des Cannabinaceae, le chanvre est divisé en 4 sous-espèces : Sativa, Indica, Afghánica, Ruderalis. Parmi ces dernière se trouve le chanvre cultivé Cannabis Sativa,

II.2.2.1 Morphologie du chanvre

Le chanvre (*Cannabis sativa L*) est une plante annuelle herbacée contenant des vaisseaux dans le cœur ligneux comme le bois dur. Il est composé de fibres longues (la filasse) sur les parties externes et qui est en proportion de fibres intérieures plus courtes fortement lignifiées. Cette teneur de ces fibres longues récupérées par traitement mécanique donne la filasse (chanvre). La filasse qui représente environ 30% de la masse sèche de la tige est utilisée pour le textile, les textiles techniques, le papier et les matériaux de construction.

Le bois de chanvre quant à lui, représente environ 70 % de la masse sèche et est également utilisé dans les matériaux de construction à savoir les bétons composites et les matériaux animaux ainsi que pour le paillage des sols.

II.2.2.2. De la plante à la fibre

Les fibres libériennes (cas du chanvre et du lin) sont extraites de la tige appelée faisceau, situé dans la paroi secondaire de la tige de la plante. La paroi végétale est constituée de quatre polymères principaux : la cellulose, les hémicelluloses, les pectines et la lignine. Lorsque la plante a atteint son état de maturité, la tige (tronc) est séparée des feuilles et des graines. Les tiges de chanvre sont laissées aux champs pour initier le processus de rouissage. Il existe différents modes de rouissage, à terre, à l'eau, chimique ou enzymatique [24]. Après que le chanvre a roui, il est descendu à un taux équivalent à 11%. Les tiges subissent différentes opérations (décorticage, séparation et affinage) qui permettent d'obtenir : des ardes, des faisceaux, des granulats (chênevottes) qui sont des fractions de la tige et des poudres (Figure I.6).

dans les parois cellulaires. La cellulose est concentrée à l'intérieur de lignine et les hémicelluloses constituent les parois extérieures. La jonction est assurée principalement par la lignine. A ces trois principaux constituants des substances de faible poids moléculaire, les extractibles et les composés généralement plus spécifiques de certaines espèces du bois.

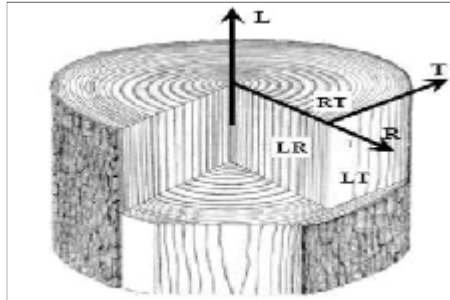


Figure II.8: Directions principales dans une pièce de bois

II.2.3.3 Propriétés physiques et mécaniques

- **L'humidité** : L'humidité est définie comme la masse d'eau présente en pourcentage de sa masse anhydre. Cette dernière est obtenue séchage à l'étuve à 100°C ou plus jusqu'à poids constant. Cette propriété en premier lieu car presque toutes les autres propriétés en dépendent.
- **Conductivité thermique**: Le bois, matériau cellulosique est un isolant thermique étant donné qu'il dispose de très peu d'éléments libres et d'air. Il est donc souvent utilisé comme matériau d'isolation ou coupe d'air.

- **Gonflement** : Le gonflement est en principe le phénomène inverse du retrait, le bois absorbe de l'eau, sa teneur en humidité augmente et le bois a une augmentation de volume. Tout comme le retrait, le gonflement est proportionnel à l'humidité jusqu'au point de saturation des fibres.
- **Les caractéristiques mécaniques** du bois sont difficiles à déterminer à cause de la dispersion importante des résultats, provenant des variations de densité, de l'essence, pour le même type d'arbre, dans la même pièce.

II. 3.2. Les sciures de bois

Issus des scieries et des menuiseries, ce type de matériau présente de nombreux facteurs de formes très divers. Les copeaux et les particules consistent en des fibres et des fibres de bois liés ensemble par la lignine. Il s'agit d'un matériau hétérogène mélangé avec de la poussière ; ce matériau nécessite une préparation par broyages successifs à sec et un tamisage. Cette préparation au moyen de tamis est la condition requise pour l'obtention d'un matériau homogène qui puisse être utilisé.



Figure II.9 : Sciures et copeaux de bois Issus des scieries

utilisées pour séparer l'écorce filamenteuse d'avec la tige peuvent chimiques, mais les premières sont plus répandues compte tenu d chimiques. Totalement biodégradable et recyclable, la fibre de jute l'environnement. Il présente d'autres avantages. Bon isolant, il es antistatiques intéressantes et affiche une faible conductivité thermi rétention de l'humidité est moyenne. [28]

II.5. Le lin

Le lin cultivé (*Linum usitatissimum*) est une plante annuel Linaceae cultivée principalement pour ses fibres, mais aussi pour ses gra C'est l'une des fibres naturelles les plus coûteuses. Il nécessite beau pour sa production, donc production faible. Cependant la toile de lin fraîcheur exceptionnelle par temps chaud. Il est composé de 70% de cellul cendres, tissus ligneux et d'humidité.

Le lin a été largement utilisé pour la fabrication du linge de maison, nouvel essor se profile avec l'avènement des non tissé et des matériel dans l'industrie et la construction. Fibre végétale forte Peu élastique, Relativement lisse très bonne absorption, bon conducteur de chaleur, insectes de tapis. Mais elles sont Sensible à la moisissure, la transpira blanchiment [29].

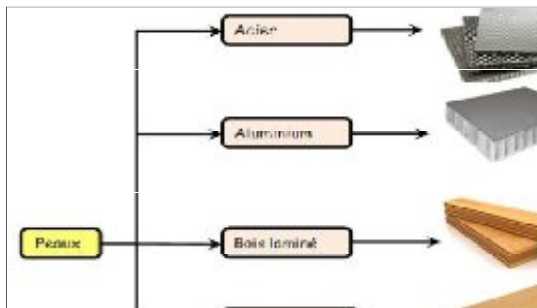


II.6. Les mousses

Les mousses sont des matériaux cellulaires rigides. Elles sont utilisées dans de nombreux domaines de l'industrie. Elles peuvent être de nature organique ou inorganique, voire céramique. Leurs propriétés les plus intéressantes sont les suivantes :

- **L'allègement** : Les mousses organiques ont de très faibles densités, ce qui entraîne donc une diminution du poids d'une structure, tout en assurant les mêmes propriétés mécaniques que celle-ci.
- **L'isolation thermique** : Celle-ci est améliorée par la présence de pores fermés, nombreux, et de taille réduite. Ils assurent une discontinuité de la structure, ainsi, la conductivité thermique baisse considérablement.
- **L'isolation phonique** : Elle est augmentée à l'aide des tortuosités introduites par les pores, de préférence ouverts.

Pratiquement tous les matériaux peuvent être moussés. Les exemples les plus fréquents. La méthode générale pour obtenir une mousse rigide est de provoquer la croissance de porosités internes par l'effet de gaz dans un matériau, sinon liquéfié au moins à l'état pâteux.



II.3. Matériaux de semelles (peaux)

Les principaux matériaux utilisés dans la fabrication des peaux des structures multicouches sont récapitulés sur l'organigramme de la figure II.11.

II.3.1 Les tissus composites

II.3.1.1 Catégories de tissu et paramètres de définition importants

La particularité des tissus est d'être composés, dans le cas 2D, d'un réseau de torons de chaîne et d'un réseau de torons de trame orientés à 90° l'un par rapport à l'autre, s'entrelaçant de façon périodique. Dans le cas des tissus 3D, un troisième réseau de torons vient renforcer la préforme sèche dans la direction de l'épaisseur (torons de renfort). Différents paramètres permettent de définir l'armure du tissu, dont le nombre dépend de sa complexité. Toutefois, certains restent incontournables quel que soit le tissu :

- **Le plan de tissage** : il donne à l'armure sa définition (taffetas, sergé, interlock, etc., voir ci-dessous) en définissant le parcours dans le tissu de chacun des torons les uns par rapport aux autres. Le chemin moyen d'un toron est défini à partir du plan de tissage par la ligne centrale du toron, aussi appelé « ligne moyenne ».
- **Les distances entre torons** : Les distances entre torons définissent la densité de torons dans le plan. Ainsi, dans le cas d'un tissu 2D, la distance entre trames et la distance entre chaînes permet de rendre compte de l'équilibrage du tissu : si leur rapport est différent de 1, le tissu est dit « non équilibré ».
- **Le nombre de fibres dans les torons** : associé aux propriétés de la fibre (diamètre et masse volumique), il définit le volume de fibres présent dans le tissu, indispensable pour déterminer le taux de fibres dans le composite.

En jouant sur les paramètres de définition du tissu, un nombre illimité de configurations est possible. Toutefois, différentes catégories de tissus se dégagent. Pour les renforts tissés bidimensionnels, les différentes préformes sont les taffetas, les sergés et les satins, voir Figure II.12. Pour les tissés tridimensionnels, les différentes catégories de préforme sont réunies sous le terme générique de tissus multicouches : « Layer to Layer Angle Interlock », « Through the thickness Angle Interlock » et « Orthogonal », chacune caractérisées par les chemins des torons de chaîne et de renforts à travers l'épaisseur du tissu.

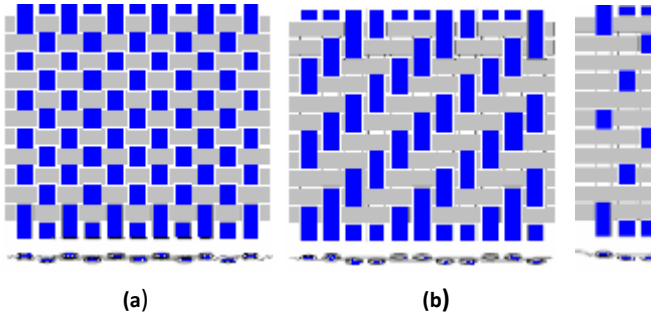


Figure II.12 : tissus 2D (a) taffetas, (b) sergé de 2, (c) satin de 5 à d

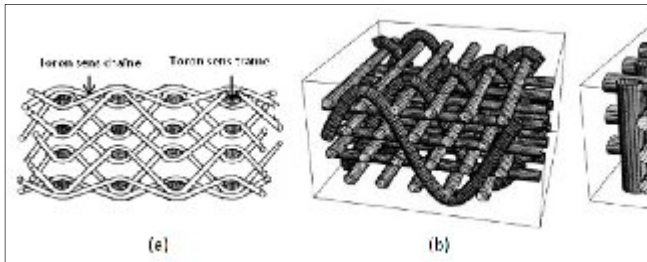


Figure II.13: Tissus 3D: (a) « Layer to Layer Angle Interlock », (b) « T Angle Interlock », (c) orthogonal [30].

II.3.1.1.1 Fibres de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance – prix, qui est au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures. Ces dernières présentent un module de traction faible, mais une résistance à la rupture intéressante. Elles sont constituées de silicate de diamètre de 10 µm et de

préparation des fibres HM et THM différencie les deux voies. Ce matériau a une faible densité, sa résistance élevée à la traction et à la compression, sa conductivité électrique et thermique, sa tenue en température et son inertie chimique.

II.3.1.1.3 fibre d'aramide (kevlar)

Les fibres aramidiques les plus connues sont le Kevlar mais elles ont d'autres noms commerciaux comme le *Technora* et le *Twaron*. Le comportement est semblable à celui des métaux car sous faible charge elles sont élastiques et deviennent plastiques quand elles sont soumises à de fortes contraintes. Elles sont un compromis entre les fibres de carbone et celles à base de verre. Elles ont une bonne tenue au feu. Par contre dans leurs composites on observe une délamination à la compression et à la flexion, sans doute du fait d'une mauvaise adhérence. C'est pourquoi de nouvelles fibres hybrides, en l'occurrence des fibres de carbone-kevlar, sont élaborées pour améliorer leur adhérence. Elles sont utilisées industriellement en vertu de leur résistance au choc et de leur légèreté.

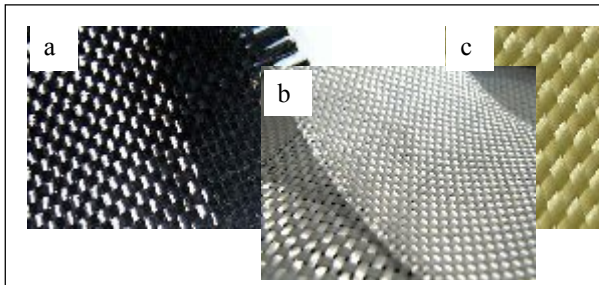


Figure II.14 : Les différents tissus : a) fibre de verre ; b) fibre de carbone ; c) fibre d'aramide (kevlar).

b) Inconvénients

- rigidité et résistance mécanique diminuées dans le plan du tissu ;
- Fraction volumique de fibres réduite dans le composite ;
- Gauchissement des structures minces dans certains cas ;
- Coût plus élevé (opération de tissage)

II.3.1.2 Comportement mécanique des renforts tissés

La description des renforts tissés (voir Figure 1.15) met en évidence trois échelles caractéristiques de ce type de renfort que nous qualifierons de la manière suivante:

- L'échelle macroscopique qui est celle du renfort dans son ensemble, l'échelle de la pièce finale (de l'ordre du cm au m). Le renfort peut être assimilé à un milieu continu bidimensionnel.
- L'échelle mésoscopique qui est celle des mèches constituant le renfort (de l'ordre du mm). Cette échelle met en évidence les motifs de tissage, les formes et caractéristiques des mèches que l'on considère comme continues. Compte tenu de la périodicité des renforts tissés, on considère généralement à cette échelle un volume élémentaire représentatif, appelé parfois cellule ou maille élémentaire.
- L'échelle microscopique qui est celle des fibres constituant les mèches (de l'ordre de 10 μ m). Cette échelle est la plus petite que nous considérons car c'est celle du constituant de base des renforts.

Cette distinction est fondamentale car le comportement macroscopique d'un renfort est directement hérité des phénomènes aux échelles inférieures. Le comportement des fibres, le mode d'assemblage sous forme de renfort va en déterminer les caractéristiques principales.

Les fibres ont une rigidité en traction longitudinale très élevée devant toutes les autres rigidités compte tenu de leur géométrie ; en particulier la rigidité de flexion est très faible. Par conséquent, les mèches formées par assemblage de fibres plus ou moins parallèles héritent de ces propriétés. Toutefois, les interactions et glissements possibles entre fibres au sein de la mèche procurent à cette dernière un comportement particulier qui lui est propre. Enfin l'assemblage des mèches par tissage donne au renfort des rigidités importantes dans les directions des mèches mais implique également un comportement fortement non linéaire et des modes de déformation privilégiés. [32]

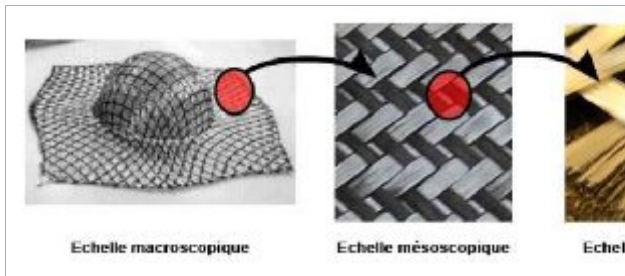


Figure II.15: Les trois échelles caractéristiques de l'étude des matériaux.

II.3.3 Les polymères

Sous le nom générique de polymère ou de matière plastique, on trouve une large gamme de matériaux extraits artificiellement de substances organiques, possédant la propriété de pouvoir être formé par chauffage. Caractéristiques communes à ces matériaux plastiques. Les propriétés de ces matériaux reposent sur le choix parmi les innombrables architectures moléculaires possibles et des les procédés de synthèse.

II.3.3.1 Le Polypropylène (PP)

Le polypropylène est l'un des polymères les plus polyvalents. Il est un thermoplastique et comme fibre. Comme thermoplastique il sert à fabriquer des contenants alimentaires qui résistent au lave-vaisselle. C'est possible parce qu'il ne fond pas à 160°C. Comme fibre, le polypropylène est utilisé pour faire des revêtements extérieurs, du type de ceux que l'on trouve autour des piscines et des terrasses. Le polypropylène est bon pour les revêtements extérieurs parce qu'il est très résistant parce qu'il n'absorbe pas l'eau.

II.4. Les adhésifs

II.4.1. Les résines

Le principal rôle de la résine est d'unir les fibres. Elle permet aussi de transférer la charge et de protéger les fibres de l'environnement extérieur et de la corrosion. Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les résines doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Il existe plusieurs types de résines classées en deux grandes familles : les thermoplastiques et les thermodurcissables.

II.4.1.1. Les thermoplastiques

Les résines thermoplastiques sont des chaînes polymères reliées entre elles par de faibles liaisons. Ils sont recyclables et possèdent au moins un solvant. Les thermoplastiques représentent le plus grand tonnage en termes de production à cause de leur facilité de mise en œuvre et des faibles coûts. Ce sont principalement les plastiques traditionnels (le polychlorure de vinyle PVC, le polyéthylène PE, le polypropylène PP, le polyamide PA, les polycarbonates PC, etc.). Leur recyclabilité et leur thermo - réversibilité constituent des avantages très importants. Il existe aussi des thermoplastiques à usage spécifique qui peuvent résister à des températures de l'ordre de 200°C voire plus [33].

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible, ces caractéristiques sont présentées dans le tableau II.2

Tableau II.2 : caractéristiques des résines thermodurcissables [34]

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

II.4.1.2 Les résines thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des polymères qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport

aux thermoplastiques. On retrouve dans cette famille les polyesters insaturés (vinyl ester, les dérivés allyliques, les polyesters condensés, etc.), les résines époxydes, les résines de condensation (les phénoliques, les aminoplastes, les furaniques, etc.[33]).

De même que les résines thermoplastique les matériaux les plus performant ont des caractéristique mécaniques élevées et une masse volumique faible ces dernières sont présent dans le tableau II .3

Tableau II.3 : caractéristiques des résines thermodurcissable [34]

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

II.4.1.3. Propriétés des résines

Les propriétés les plus importantes d'une résine sont sa viscosité et sa cinétique de Polymérisation .La viscosité caractérise l'aptitude de la résine à transférer de la quantité de mouvement. Plus la viscosité d'une résine est élevée, plus le frottement interne entre les particules est important, et plus il est difficile de déplacer la résine. La viscosité a une grande influence sur l'écoulement de la résine et donc sur les temps de remplissage dans le procédé RTM. La viscosité d'une résine est habituellement représentée par sa viscosité dynamique μ dont l'unité est le Pascal .seconde (Pa.s) ou le Poiseuille (Pois=Pa.s). Dans le cas du procédé RTM, la résine est considérée comme un fluide Newtonien, c'est-à-dire que sa viscosité ne dépend pas du taux de cisaillement. La viscosité d'une résine thermodurcissable varie seulement avec la température et le degré de cuisson α . Le degré d'avancement de la polymérisation est compris entre 0 et 1: 1 correspond à une résine complètement polymérisée et 0 au début de la réaction chimique de polymérisation. L'avancement de la réaction dépend de la température et du degré de polymérisation. Plus la température est importante, plus la réaction sera rapide et dégagera de la chaleur (réaction exothermique).[35]

Les modèles peuvent être de deux types, soit fondés sur les réactions chimiques elles-mêmes (modèles «mécanistiques»)[36]ou déterminés en fonction des données expérimentales recueillies (modèles «phénoménologiques»)

II.4.2 Les colles

Une colle, ou glu, est un produit de consistance liquide, gélatineuse ou pâteuse servant à lier des pièces entre elles par contact. Ces pièces peuvent être de même nature ou de natures différentes. Les colles synthétiques sont essentiellement fabriquées à base d'hydrocarbure. Les colles étant principalement composées d'un liant et d'une phase de dissolution, c'est essentiellement la nature de ces deux composants qui déterminera si une colle est « écologique » ou « naturelles »[37]. Il existe deux catégories principales de colles :

- Colles en phase solvant dites « en solution » : contiennent, entre autre, des solvants organiques qui composent plus de la moitié du produit et s'évaporent complètement au séchage. Ce sont des composés organiques volatils nocifs pour l'organisme. Des éthers de glycol rentrent également dans leur composition dans des proportions parfois plus importante que les produits dits « à eau »
- Colles en phase aqueuse dite en « dispersion aqueuse » ou « en émulsion : solvant principale a l'eau mais contiennent néanmoins des solvants organiques en présence inférieur à 5 % qui peuvent être nocifs pour la santé. L'eau a pour rôle de disperser les petites particules de résine tandis que le solvant organique permet la formation du film adhésif au cours du séchage. Ces colles sont aussi efficaces que les colles contenant des solvants organiques mais leur usage est généralement limité au papier, carton, verre.pvc et bois

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé, les différents constituants utilisés pour la confection des structures multicouches, nous remarquons une avancée étonnante de l'emploi de ces matériaux nouveaux : il ne s'agit pas d'un hasard mais d'un développement étudié judicieusement, vu les besoin dans divers domaines techniques, économiques et chimique que ces matériaux révolutionnaires ont apportés par rapport aux matériaux traditionnels.

Cette recherche bibliographique nous a permis d'orienter notre travail de recherche vers une proposition d'une nouvelle structure composite multicouche, constituée d'une âme à base d'une matrice plâtre et mortier alléger par des fractions volumiques en sciures du bois. Les semelles inférieures et supérieures sont respectivement confectionnées en tissu polypropylène et polymère renforcées collées à l'aide d'une résine époxyde. La conception proposée qui

présente à la fois un poids propre réduit et un seuil de résistance acceptable est destinée a des applications d'isolation entre les parois, permettant ainsi d'améliorer les propriétés thermiques et acoustiques de la structure. On se propose de développer un modèle élément finis capable de prédire et de modéliser le comportement de notre système mécanique sous chargement de flexion et de flambement.

Chapitre III

Simulation Numérique par éléments finis

III.1 Introduction

La simulation numérique par éléments finis des problèmes de mécanique est aujourd'hui une réalité scientifique, qui permet de mettre au point des études en réduisant le recourt à la méthodologie expérimentale et empirique d'erreur-correction qui est beaucoup plus coûteuse. Ainsi les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur ont pris un grand essor le marché, leur apport est très considérable en termes de performances et de productivité. Ces logiciels permettent de générer des structures, ses caractéristiques et celles du problème étudié, ensuite ils prédisent le comportement de cette structure (déformations, ruptures, plastification...) et enfin ils permettent de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables.

Dans ce chapitre on présentera les différentes étapes menées pour la modélisation de la structure composite multicouche chargées en flexion et en flambement jusqu'à la rupture. En s'inspirant des travaux de recherche antérieurs [39-45], le modèle géométrique et le choix des modèles éléments finis pour le maillage sont générés dans un espace tridimensionnel (3D) à l'aide du code de calcul Abaqus [38]. Les différents matériaux constitutifs sont modélisés suivant des modèles numériques après identification de leurs paramètres mécaniques à partir des essais au laboratoire. A cet effet, un modèle élastique fragile est adopté pour les matériaux composites de semelles, les matériaux d'âme sont modélisés suivant un modèle élastoplastique. L'interaction entre les différents éléments ainsi que les étapes de construction du multicouche sont également présentées.

III.2 Présentation du logiciel ABAQUS

ABAQUS est un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) [38]. C'est un logiciel très complet permettant de faire des analyses linéaires ou non linéaires, statiques ou dynamiques. Le module ABAQUS/CAE est une interface dans laquelle l'utilisateur peut définir toutes les propriétés de son analyse (géométrie des différentes pièces, propriétés mécaniques, choix des éléments, choix de l'intégration de la matrice de rigidité, choix du mode de résolution). Pour la résolution des analyses, il existe deux modules ABAQUS/Standard et ABAQUS/Explicit. Le premier est un module utilisant des schémas de résolution implicite dits classiques pour des analyses statiques comme la méthode Newton-Raphson ou la méthode de Risks (Voir Figure III.1).

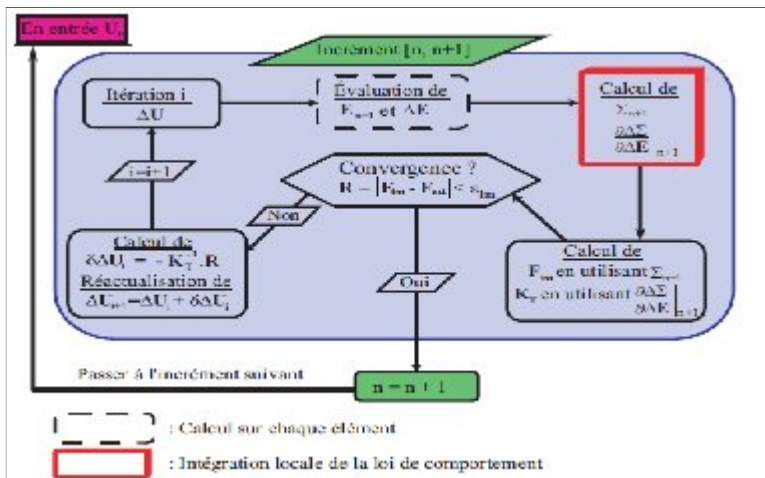


Figure III.1 : Organigramme de résolution de schéma statique implicite

Le second utilise une méthode de résolution explicite pour l'intégration temporelle des problèmes dynamiques. Cette méthode est encore assez nouvelle dans le domaine du génie civil. Elle permet notamment une meilleure prise en compte des problèmes à force non-linéarité matérielle et est donc particulièrement adaptée pour les matériaux adoucissants.

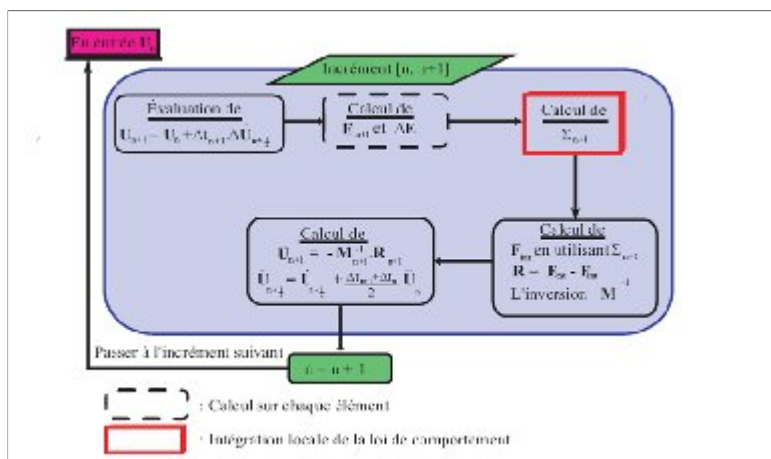


Figure III.2 : Organigramme de résolution d'un schéma dynamique explicite.

III.4 Caractéristiques des matériaux et modélisation

Cette partie est consacrée à la présentation des caractéristiques des matériaux utilisés ainsi que la modélisation de leur comportement mécanique à savoir : les matériaux de semelles en tissu polypropylène et en plaque polymères renforcés et les matériaux d'âme confectionnés à base d'une matrice mortier et plâtre allégé par de la sciure de bois. Les résultats des essais de caractérisation menés sur ces matériaux qui constituent les corps d'épreuve sont présentés. Cette caractérisation classique du comportement mécanique (traction axiale, compression axiale et flexion) a conduit à étudier les propriétés élastiques ainsi que la rupture de chaque matériau.

III.3.1 Comportement expérimental

Les résultats obtenus, sur chaque constituant, ont permis de fournir des informations indispensables à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique et des mécanismes de rupture de chacun des éléments de l'étude.

III.4.1 Le tissu Polypropylène PP

Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de résistance, rigidité et de déformation du tissu PP utilisés, des essais de traction directe ont été réalisés sur des éprouvettes normalisés suivant la norme NF EN ISO 527-1. La figure III.3 illustre le comportement expérimental du tissu PP utilisé. Les caractéristiques mécaniques intrinsèques intervenant dans le modèle numérique permettant la modélisation du comportement du tissu PP sont identifiées à partir de ces courbes force-déplacement.

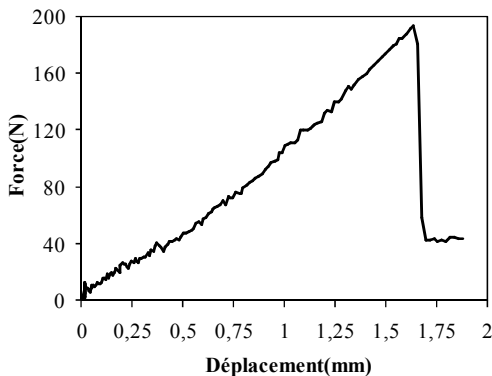


Figure III.3 : Comportement expérimental du tissu composite PP utilisé

III.4.2 Le polymère renforcé

Le polymère utilisé est de type PVC renforcés, destiné à des applications industrielles d'isolation pour la confection des cloisons et des plafonds. Pour déterminer les caractéristiques mécaniques de résistance, un dispositif d'essai est mis au point afin de solliciter le polymère renforcé sous chargement de traction directe.

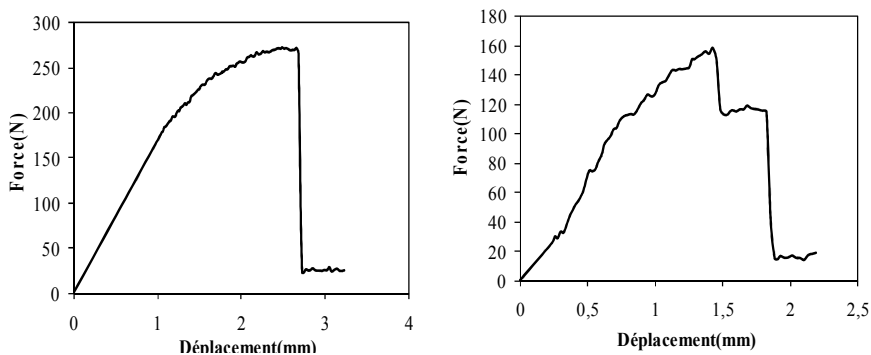


Figure III.4 : Comportement en traction du polymère renforcé : a) Sen longitudinal ; b) Sens transversal

Le polymère renforcé présente un comportement élastiques dans les deux directions principales (longitudinale et transversale), il comporte d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope, son comportement sera décrit dans l'hypothèse des contraintes planes, vue que son épaisseur est négligeable devant ses directions principales. Le polymère est caractérisé par une contrainte de rupture longitudinale en traction de l'ordre de 271 Mpa, et une contrainte de rupture transversale de l'ordre de 155 Mpa avec une déformation correspondante modérée.

III.4.3 Matrice Mortier & Sciure de bois

Les matériaux qui constituent l'âme de la structure composite étudiée sont confectionnés à base d'une matrice plâtre et mortier alléger par des fractions volumiques en sciurs du bois. Le comportement expérimental de ces deux variantes d'étude sous chargement de compression axiale est montré sur la figure III .5.

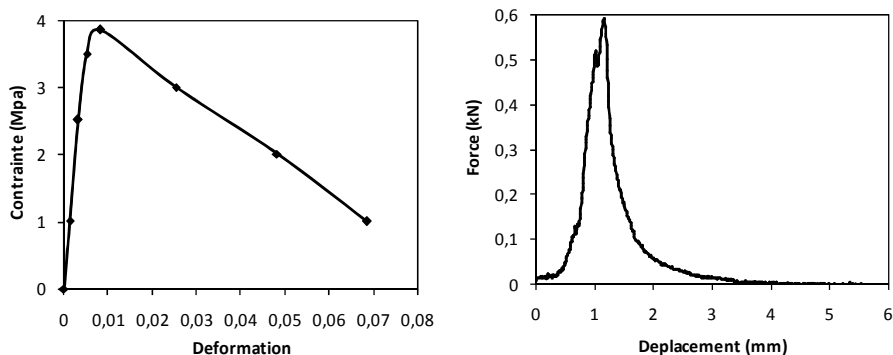


Figure III.5 : Courbe contrainte-déformation des matériaux d'âme : a) Comportement en compression ; a) Réponse en traction.

Le comportement du mortier allégé par la sciure de bois est caractérisé par des déformations qui croissent de façon linéaire jusqu'à environ 30% de la contrainte ultime. Puis la courbe s'incurve et le comportement devient non linéaire, ceci correspond à l'apparition puis le développement des fissures. L'atteinte du pic définit la contrainte ultime, la rupture se produit au-delà du pic avec une déformation correspondante de l'ordre de 5 %. La matrice mortier allégé par la sciure de bois est plutôt caractérisée par un comportement fragile en traction avec une faible rigidité flexionnelle.

III.3.2 Identification des paramètres et modèles adoptés

Cette partie consiste à modéliser le comportement des différents matériaux utilisés à travers des modèles numériques : à savoir un modèle élastique fragile pour les matériaux composite des semelles (tissu PP et Polymère renforcé), et un modèle élastoplastique pour les matériaux d'âme à savoir : le mortier et le plâtre allégés par des fractions de sciure de bois.

III.3.2.1 Modèle élastique-fragile pour les composites

Les paramètres mécaniques intrinsèques des composites utilisés sont identifiés à partir des courbes force déplacement rapportés ci-dessus tel que rapporté sur les tableaux III.1 et III.2. Par la suite, les paramètres principaux des modèles utilisés et intégrés dans le code de calcul sont soigneusement définis pour éviter des problèmes d'intégration numérique, qui offrent à l'algorithme du modèle une bonne capacité de convergence.

Tableau III.1 : Propriétés mécaniques du tissu composite en PP issues des essais.

Dénotation	Symbole & unité	Valeur
Force de rupture en traction du tissu PP	$F_{max} (N)$	190
Déplacement correspondant à la rupture en traction	$U_{max} (mm)$	3,56
Déplacement correspondant à la limite élastique	$U_{elas} (mm)$	1.71

Tableau III.2 : Propriétés mécaniques du polymère renforcé issues des essais.

Dénotation	Symbole & unité	Valeur
Force de rupture en traction dans la direction longitudinale	$F_{1max} (N)$	270
Force de rupture en traction dans la direction transversale	$F_{2max} (N)$	160
Déplacement à la rupture en traction suivant la direction longitudinale	$U_{1max} (mm)$	4.48
Déplacement à la rupture en traction suivant la direction transversale	$U_{2max} (mm)$	2,51
Déplacement correspondant à la limite élastique dans la direction longitudinale	$U_{1elas} (mm)$	2,92
Déplacement correspondant à la limite élastique dans la direction transversale	$U_{2elas} (mm)$	1,15

Le comportement mécaniques des composites utilisées dans l'hypothèse des contraintes planes (épaisseur faible) est décrit par les constantes de rigidité dans les directions principales (longitudinale et transversale) résumées sur les tableaux III.3 et III.4.

Tableau III.3 : Paramètres du modèle élastique isotrope pour le tissu PP.

Dénotation	Symbole & unité	Valeur
Contrainte de rupture en traction du tissu PP	$\sigma (Mpa)$	19,3
Déformation correspondante à la limite élastique en traction du tissu PP	ε_{elas}	0,017
Module d'Young instantané du tissu PP	$E (Mpa)$	1930
Déformation correspondante à la rupture en traction	ε_{max}	0,0356
Coefficient de poisson du tissu PP	ν	0,31

A noter que le polymère renforcés se comporte d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope, vu son comportement anisotrope il est modélisé suivant le critère de

rupture de Hill Tsai. Ce critère présage la ruine du matériau lorsque les contraintes normales atteignent la résistance ultime dans la direction transversale.

Tableau III.4 : Paramètres du modèle élastique orthotrope pour le polymère

Dénomination	Symbole & unité	Valeur
Contrainte de rupture en traction dans la direction longitudinale	$\sigma_{1\text{elas}}$ (Mpa)	15,8
Contrainte de rupture en traction dans la direction transversale	$\sigma_{2\text{elas}}$ (Mpa)	27,2
Déformation longitudinale correspondante à la limite élastique en traction	$\epsilon_{1\text{elas}}$	0,0115
Déformation transversale correspondante à la limite élastique en traction	$\epsilon_{2\text{elas}}$	0,0292
Module d'Young longitudinal	E_1 (Mpa)	1373
Module d'Young transversal	E_2 (Mpa)	932
Déformation correspondante à la limite élastique en traction dans la direction longitudinale	$\epsilon_{1\text{max}}$	0,0251
Déformation correspondante à la limite élastique en traction dans la direction transversale	$\epsilon_{2\text{max}}$	0,0148
Coefficient de poisson longitudinal	ν_1	0,47
Coefficient de poisson transversal	ν_2	0,41

III.3.1.2 Modèle élastoplastique pour les matériaux d'âme

Un modèle numérique élastoplastique intégré dans le code élément finis Abaqus utilisé pour modéliser le comportement expérimental des matériaux d'âme, il permet de gérer les problèmes de plasticité et il inclut les déformations irréversibles pour allier les avantages de la modélisation des effets de la microfissuration sur la rigidité du matériau au niveau macroscopique et de la théorie de la plasticité pour modéliser des déformations irréversibles.

Ce modèle fournit une capacité générale pour la modélisation des matériaux quasi-fragiles dans tous les types de structures. Il utilise le concept d'élasticité isotrope en combinaison avec la traction et la plasticité isotrope de compression pour représenter le comportement leur comportement inélastique.

Les paramètres du modèle numérique du mortier allégé par de la sciure du bois utilisé dans cette étude numérique sont représentés dans le tableau III.5

Tableau III.5 : Paramètres utilisés pour définir le comportement du mortier allégé.

Dénomination	Symbole & unité	Valeur
Contrainte correspondante au pic en compression	f_{mc} (Mpa)	3,86
Contrainte élastique en compression	$f_{mc\ elas}$ (Mpa)	2,51
Déformation correspondante au pic en compression	ε_{mc}	0,0082
Force maximale en traction	F_{mt} (N)	582
Déplacement correspondant à la contrainte maximale en traction	U_{mt} (mm)	1,1
Module de Young instantané	E_m (Mpa)	429
Coefficient de poisson	ν_m	0,29
Contrainte de rupture en compression	$\sigma_{mc\ rup}$	0,86
Force de rupture en traction	$\sigma_{mc\ rup}$	0,01

III.4 Présentation des variantes d'étude et étapes de modélisation

Dans le cadre de la présente étude numérique, la modélisation des panneaux multicouches est menée dans un espace tridimensionnel (3D). Les analyses numériques sont de type non linéaire, et permettent de déterminer le mode de ruine et le niveau de charge correspondant. Les panneaux multicouches symétriques et dissymétriques composés d'une âme en mortier allégé par de la sciure de bois et des semelles en tissu polypropylène et polymère renforcé. Des panneaux sont de dimensions normalisées possédant une section transversale de $23*50\text{ mm}$ avec une longueur de 450 mm sont modélisés pour mettre en évidence tout l'intérêt de la technique proposée.

III.4.1 Modélisation géométriques et assemblage

Les caractéristiques géométriques des panneaux multicouches modélisés sont illustrées sur la figure (III.8). Toutes les dimensions ainsi que toutes les propriétés mécaniques des différents matériaux constitutifs sont soigneusement et séparément introduites pour chaque élément du multicouche, afin de prendre en compte tous les paramètres d'étude et de valider le modèle élément finis proposé

La géométrie des différents éléments que l'on souhaite simuler se définit toujours selon la démarche suivante :

- Dessiner le profil 2D (l'esquisse) de la forme voulu
- Le développer en 3D.
- Rajouter les détails manquants (chanfreins...).

On va créer des poutres sandwichs avec deux peaux différen séparément dont les étapes suivantes :

- ❖ Création des parties du panneau multicouche séparément à savoir : mm (Voir figure III.6), les semelles en PP et en Polymère illustrées des épaisseurs respectives de 1 mm et 2 mm.

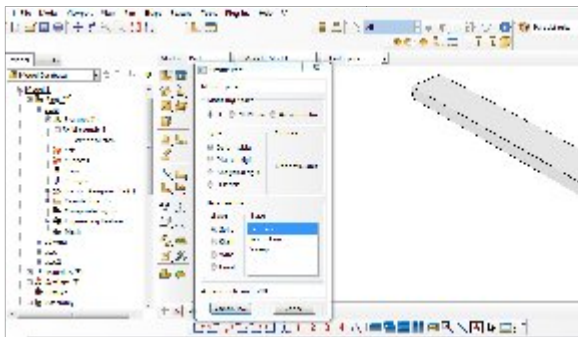


Figure III.6 : Modélisation géométrique de l'âme de la po



multicouches symétrique : « *Semelle PP–Ame mortier–Semelles PP* » et « *Semelle Polymère – Ame mortier – Semelle Polymère* ».

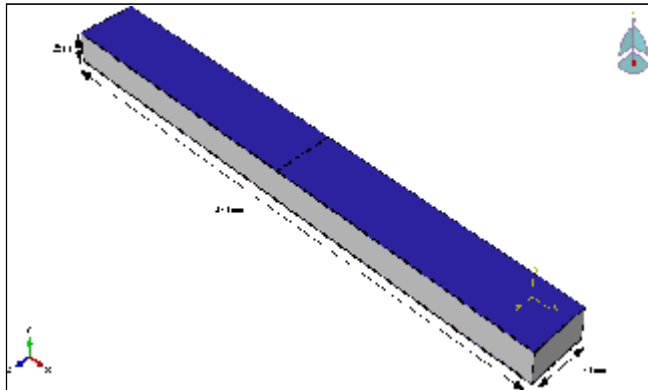


Figure III.8 : Caractéristiques géométriques d'un panneau multicouche assemblé.

III.4.2 Maillage et modèle élément fini

Afin de générer le maillage de notre modèle. Il est possible de choisir la technique de maillage, le type d'éléments et leur forme (exemple : hexaédriques, cubiques, tétraédrique...). La création du modèle implique automatiquement la définition de géométrie ainsi que la définition et l'assignation de toutes les propriétés de chaque matériau.

Notre choix s'est porté sur l'élément hexaédrique du premier ordre (fonctions de forme linéaires) à 8 nœuds, car il est très performant pour les problèmes à géométrie simple et parce qu'il offre la possibilité d'une intégration réduite (on le note alors C3D8R). En comparaison avec un élément tétraédrique, cet élément est aussi plus adapté à notre modèle. Les matrices de transformation pour passer d'un système de coordonnées locales à un système global sont très simples. Il en résulte donc un léger gain de temps de calcul.

III.4.2.1 Etude de la sensibilité du maillage

Une étude de sensibilité du maillage est réalisée, l'objectif est de définir la dimension optimale des éléments finis choisis qui permet de mieux converger vers la solution exacte. A cet effet une étude comparative est réalisée, lors de la simulation d'un panneau multicouche

symétrique composé de semelles en PP soumis à un chargement de flexion jusqu'à la rupture, l'étude est réalisée avec des éléments finis hexa variés à savoir : 7mm, 5mm, 3mm et 2 mm (Voir Figure III.9)

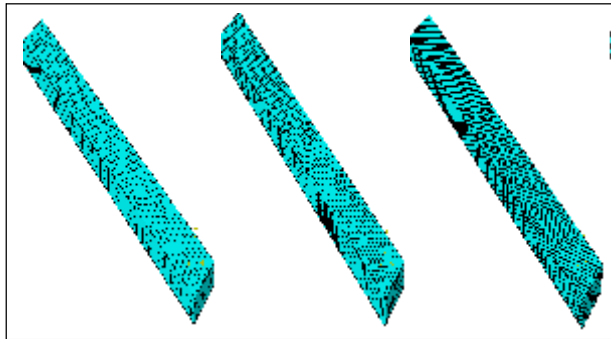
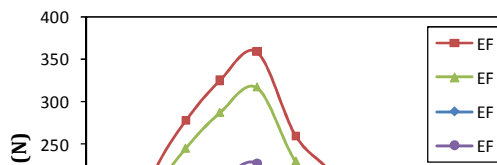


Figure III.9 : - Configurations pour la validation de la sensibilité

La figure (III.10) montre la réponse des panneaux multicouche à l'évolution du chargement extérieur appliqué en (N) en fonction du déplacement de travée (flèche en (mm)) jusqu'à la rupture pour les variantes de dimension d'élément finis considérées. On constate que la réponse commence à converger d'élément fini 3 mm.



D'après cette étude de convergence de maillage, les panneaux sont modélisés par des éléments finis hexaédriques composés de huit nœuds, ayant chacun sa propre formulation lagrangienne (C3D8) avec une dimension de 3 mm de l'espace, ce qui assure un maillage très raffiné.

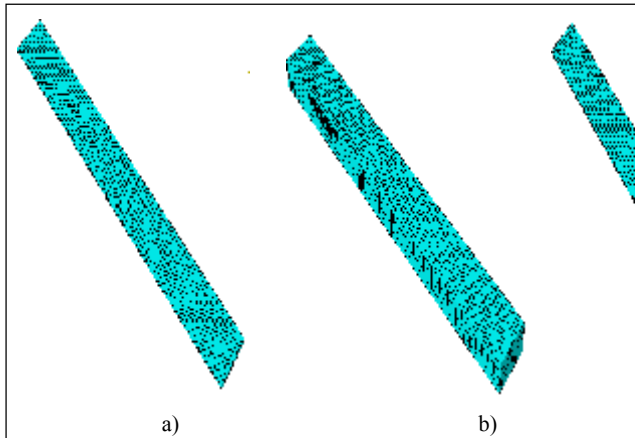


Figure III.11 : maillage du a) Polypropylène PP, b) de l'âme

III.4.3 Gestion du contact et des interfaces

Le contact entre les composants du panneau multicouche est traité par une technique classique avec une représentation de type « maître-esclave ». L'impénétrabilité des nœuds esclaves dans la surface maîtresse se traduit par une pénalisation normale le long de la surface de contact. Le comportement est modélisé comme élastique isotrope jusqu'à rupture. La couche adhésive entre les plis forme le joint adhésif.

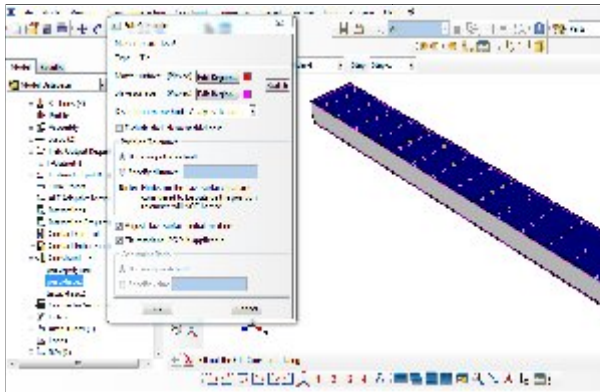
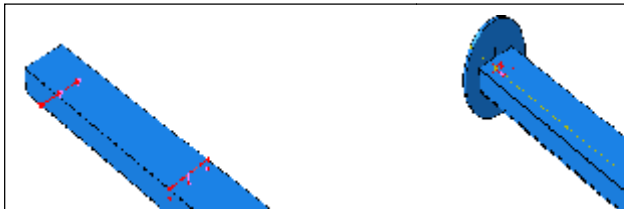


Figure III.12: contact entre l'âme et les deux sen

III.4.1 Mode de chargement et acquisition

Comme les essais réalisés au laboratoire et avec des cc similaires, les panneaux multicouches modélisées sont soumises à un de flexion trois points et de flambement croissant jusqu'à la rupture, de charge de 10^{-3} . Les points d'application du chargement, ainsi que les charges et entre appuis, sont illustrés par la figure (III.13).



III.5 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté le code de calcul ABAQUS, en résumant les actions principales à effectuer pour créer nos modèles. Il nous a permis de simuler le comportement mécanique des panneaux et sandwichs sous chargement de flexion et de flambement. Le code Abaqus est un calcul basé sur la méthode des éléments finis. Une fois le système d'équations à résoudre formulé, nous avons explicité les schémas de résolution disponible dans Abaqus, nous avons par la suite présenté les modèles étudiés du côté géométrique et caractéristique des matériaux.

- ✓ le modèle choisi pour le calcul mécanique est élastique fragile pour les peaux constituées de tissu plus la résine et le polymère.
- ✓ Nous avons adopté un comportement élastoplastique pour les âmes constituées de mortiers sciures de bois.

Chapitre IV

Présentation des résultats et Discussions

IV.1 Introduction

A travers ce chapitre nous allons présenter et interpréter les résultats obtenus à l'issue des simulations numériques menée sur le comportement mécanique des panneaux multicouches chargés en flexion 3-point et en flambement. Deux variantes d'étude sont prise en considération à savoir : des panneaux multicouches symétrique à semelles identiques en tissus composites (TT) et en polymère renforcés (PP) dénommés respectivement MS-TT et MS-PP, le second est dissymétrique à semelles différentes, alternés (TP) et (PT), dénommés respectivement MD-TP et MD-PT.

Le modèle élément fini proposé est validé à travers des confrontations avec les résultats expérimentaux, elles ont pour objectif de renfoncer et de valider les apports observés dans les simulations, notamment dans l'analyse des phénomènes observés tels que les paramètres mécaniques intrinsèques et les modes de rupture. A cet effet, tous les résultats obtenus, en termes d'évolution des contraintes, déformations et de rigidité sont discutés et présentés sous forme de graphiques force déplacement et de cartographies, ceci nous a permis de mettre en valeur l'apport de la conception proposée.

IV.2 Résultats de la flexion 3-points

Dans le cadre de la présente étude numérique, les panneaux multicouches modélisés dans espace tridimensionnel et de dimension $450 \times 23 \times 50 \text{ mm}$ sont chargés en flexion 3 point suivant la norme NF T 54-606 [46]. Le chargement est appliqué à mi-travée du panneau composite et la distance entre appuis est de 400 mm . Les résultats de la simulation des panneaux chargés en flexion sont présentés dans les sections ci-dessous, permettant ainsi de déduire les paramètres influençant la résistance et la ductilité structurelle du système mécanique considéré.

IV.2.1 Comportement global des multicouches

La confrontation des courbes forces-déplacement des différentes variantes de poutres considérées, qui présente l'évolution du chargement extérieur appliqué en fonction de la flèche maximale mesurée à mi-travée du panneau est illustrée sur les figures IV.1 et IV.2. Cette confrontation met en évidence les caractéristiques mécaniques des panneaux multicouches étudiés en termes de rigidité flexionnelle, capacité portante et ductilité.

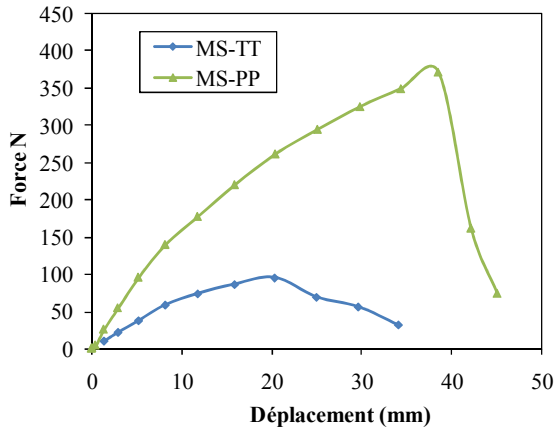


Figure IV.1 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs symétriques chargés en flexion.

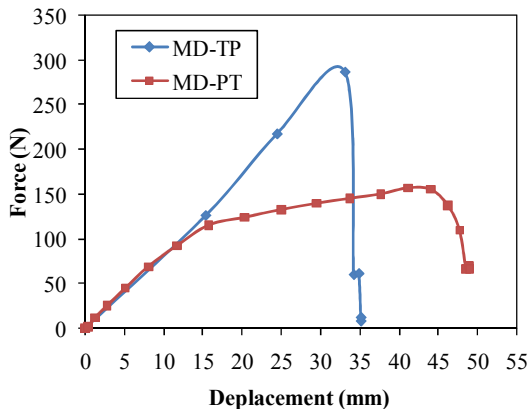


Figure IV.2 : Courbes force-déplacement des panneaux dissymétriques en flexion.

Les figures montrent que la réponse globale des panneaux multicouches étudiés peut être décomposée en trois phases. La première partie est linéaire, le déplacement vertical augmente linéairement et proportionnellement au chargement appliquée. Dans la deuxième partie, le déplacement augmente très rapidement avec l'augmentation de la charge, les courbes s'incurvent et le comportement devient non linéaire. Ceci correspond à l'apparition puis le développement des fissures verticales dans les panneaux. L'atteinte du pic définit la

force maximale qui caractérise la résistance ultime des panneaux à la flexion. Dans la troisième phase du comportement, le déplacement augmente avec une vitesse élevée et au-delà du pic, les fissurations se propagent très rapidement et la résistance chute considérablement jusqu'à s'annuler pour un déplacement légèrement supérieur à celui correspondant à la résistance maximale.

Les panneaux multicouches dissymétriques présentent des capacités portantes améliorées comparativement aux panneaux symétriques. Les charges ultimes des multicouches MD-TP et MD-PT sont respectivement de l'ordre de 387 N et 157 N avec un déplacement vertical correspondant de 33 mm et 37 mm respectivement. Les panneaux symétriques à savoir : MS-TT et MS-PP sont caractérisées par des résistances ultimes moins importantes de l'ordre de 95 N et 349 N respectivement, avec une rupture fragile.

IV.2.2. Validation du modèle EF de flexion

Afin de vérifier la fiabilité de la procédure numérique, une confrontation des résultats obtenus avec ceux des essais est réalisée, nous confrontons nos prévisions qualitatives en termes de courbes forces-déplacement avec les observations expérimentales. La figure IV.3 montre la comparaison des deux approches pour le panneau symétrique MS-TT.

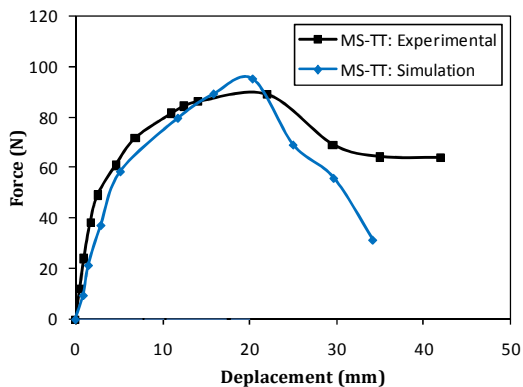


Figure IV.3 : Courbes force-déplacement du panneau multicouche (MD-TT) en flexion

Une bonne corrélation en termes du comportement global des panneaux étudiés est observée entre le modèle numérique et l'analyse expérimentale. On constate que les valeurs de la capacité portante et des déplacements sont sensiblement différentes pour les deux

approches considérée. La charge maximale du panneau donnée par la simulation est de 94 N avec un déplacement correspondant de 21 mm, cependant la capacité portante moyenne obtenue par les essais et de l'ordre de 89 N, avec un déplacement correspondant de 23 mm.

IV.2.3 Cartographie des contraintes et déformations

Les différentes cartographies des figures ci-dessous montrent l'évolution de la distribution des contraintes de Von Mises respectivement dans les sandwichs sous chargement en flexion 3 points, pour divers valeurs de l'incrément de charge.

IV.2.3.1 Cas des multicouches symétriques

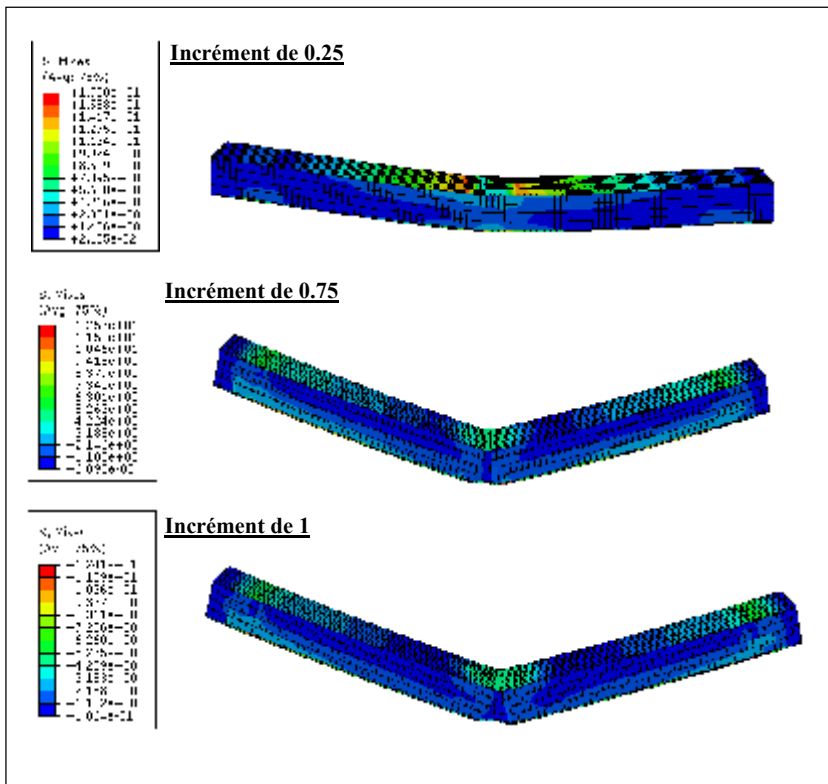
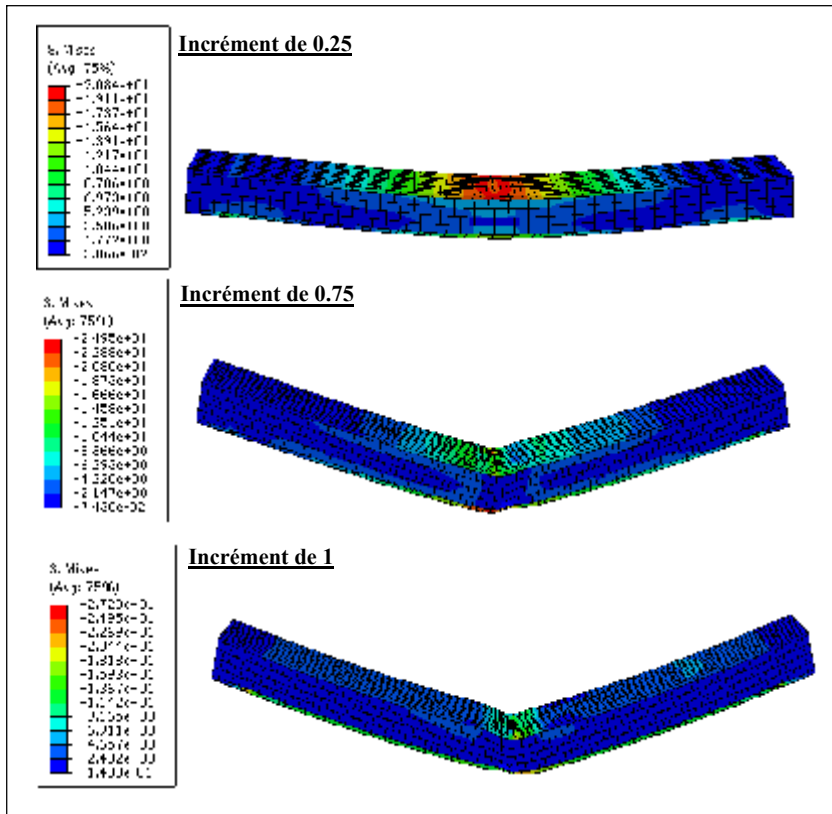


Figure IV.4 : Propagation des contraintes dans le sandwich a semelles en tissus (MS-TT)



IV.2.3.2 Cas des multicouches dissymétriques

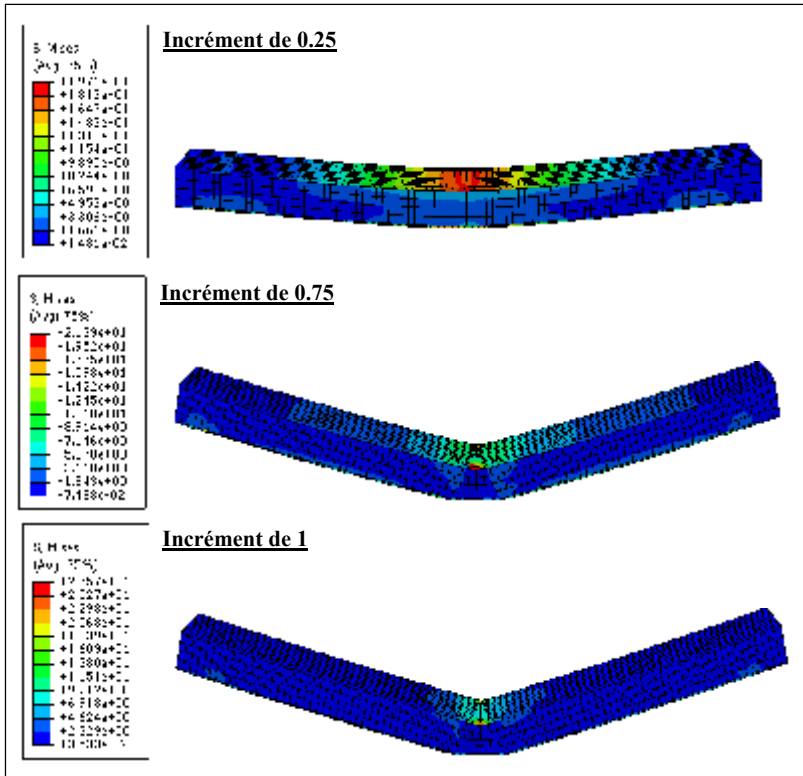


Figure IV.6 : Propagation des contraintes dans le sandwich à semelles en polymère et tissu MD-PT.

Pour le cas des multicouches dissymétriques, le champ des contraintes est concentré au niveau des interfaces entre les semelles et la peau. Une évolution des contraintes de cisaillement dues aux faibles déformations des peaux. Grâce à la mobilisation et à la conjugaison des performances mécaniques des semelles qui procurent aux éléments un seuil de résistance, les multicouches dissymétriques présentent des résistances ultimes et des rigidités flexionnelles très élevées. Afin de satisfaire et de vérifier ces conclusions, la distribution des contraintes dans la zone comprimée (semelles supérieures) et tendue (semelles inférieures) du panneau est représentée sur les figures IV.6 et IV.7.

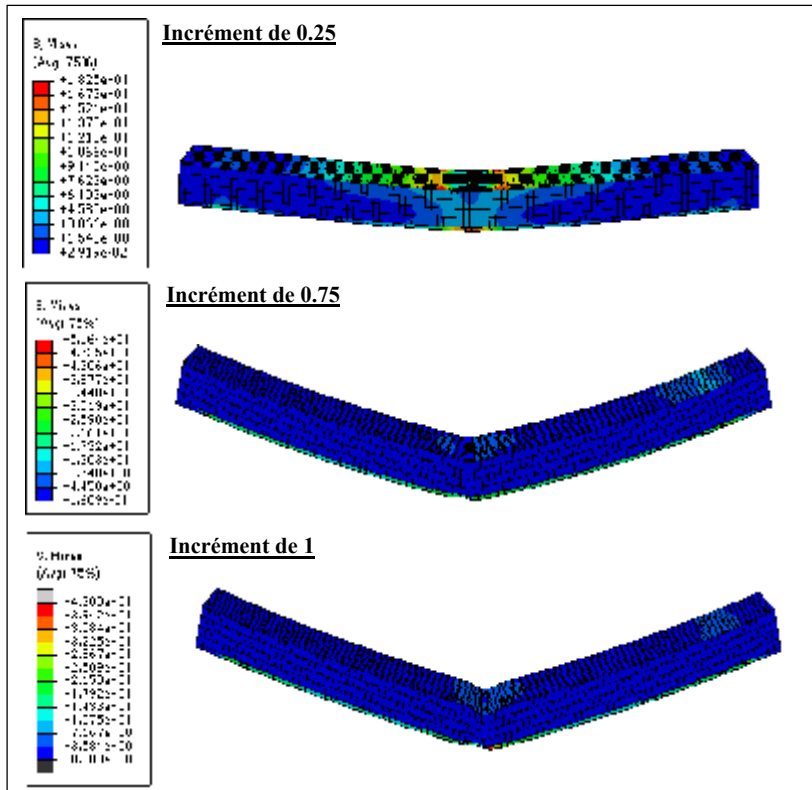


Figure IV.7 : Propagation des contraintes dans le sandwich a semelles en tissu et polymère (MD-TP)

Ces résultats numériques nous renseignent sur le rôle capital des matériaux de semelles à savoir : le tissu en polypropylène et la plaque en polymère renforcé dans la reprise des sollicitations et son influence sur les modes de rupture. Ils mettent en évidence la conjugaison des performances mécaniques des matériaux composites, pour empêcher la propagation du champ de contrainte dans la direction de la portée et de la hauteur des panneaux multicouches. Les cartographies montrent également que les matériaux de l'âme sont plutôt sollicités en cisaillement.

IV.2.4 Cartographie des déplacements

Les cartographies des figures (IV.8), (IV.9), (IV.10 et (IV.11) montrent l'évolution des déplacements respectivement dans les sandwichs symétriques et dissymétriques, pour divers valeurs de l'incrément de charge. Nous reproduisons ainsi dans ce qui suit l'évolution de la distribution des déformations et de la dégradation de la rigidité, lors des simulations des panneaux composites multicouches en fonction du chargement de flexion appliqué.

IV.2.4.1 Cas des multicouches symétriques

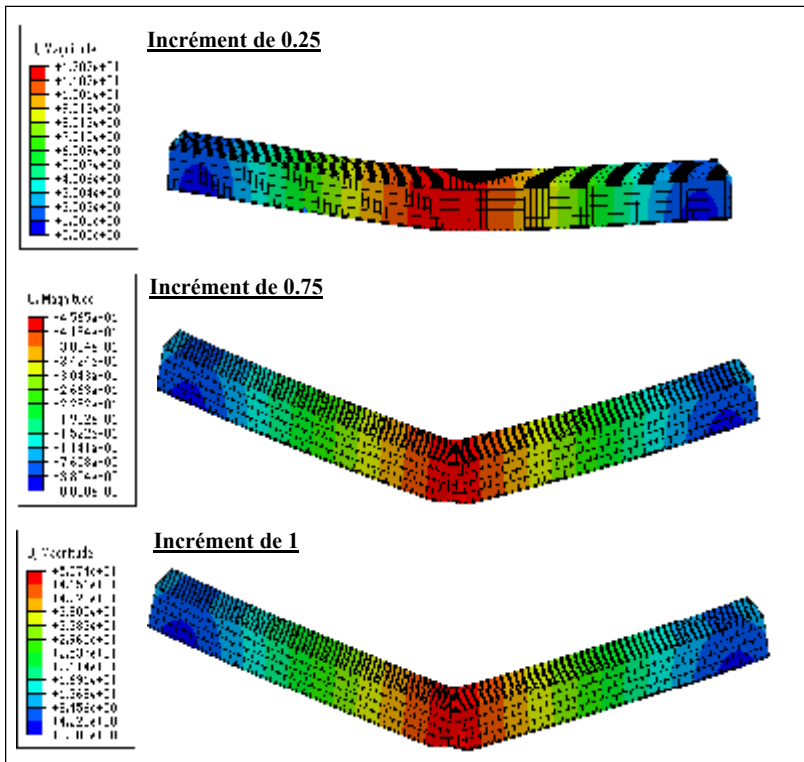


Figure IV.8 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouches à semelles en tissu (MS-TT).

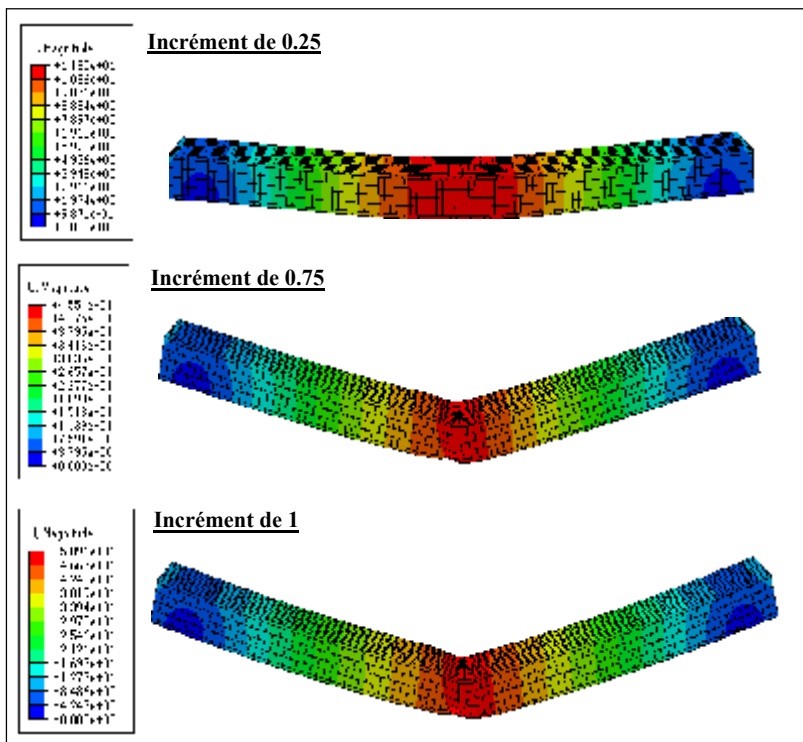


Figure IV.9 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouches a semelles en polymères (MS-PP).

Les panneaux symétriques présentent des déformabilités très importantes, les déplacements maximums qui correspondent à la rupture des multicouches à semelles en polymère renforcé (MS-PP) et à semelles en tissu polypropylène (MS-TT) sont respectivement de l'ordre de 33 mm et 46 mm. Grâce à la conjugaison des performances mécaniques du polymère renforcé une réduction du déplacement maximal de 32 % pour les différents incréments de charge considérés. Ceci, a induit une amélioration très considérable en termes de ductilité, et par conséquent une augmentation de l'énergie de dissipation à la rupture des éléments considérés.

IV.2.4.2 Cas des sandwichs dissymétriques

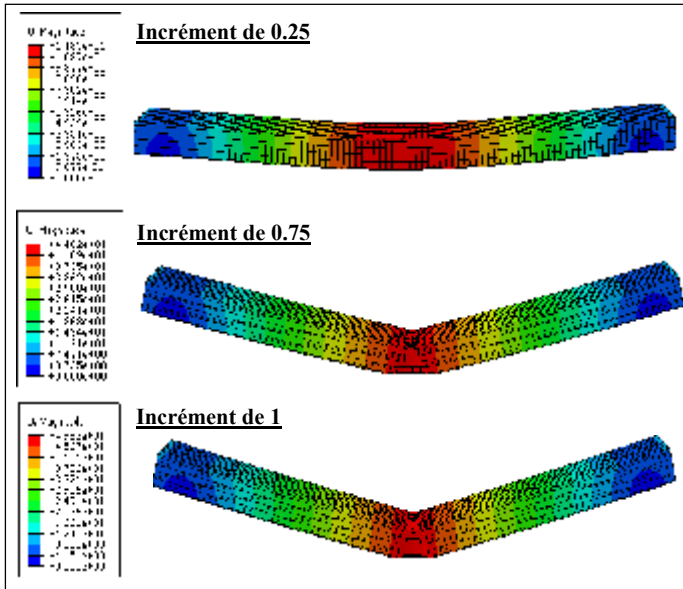


Figure IV.10 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouche (MD-PT).

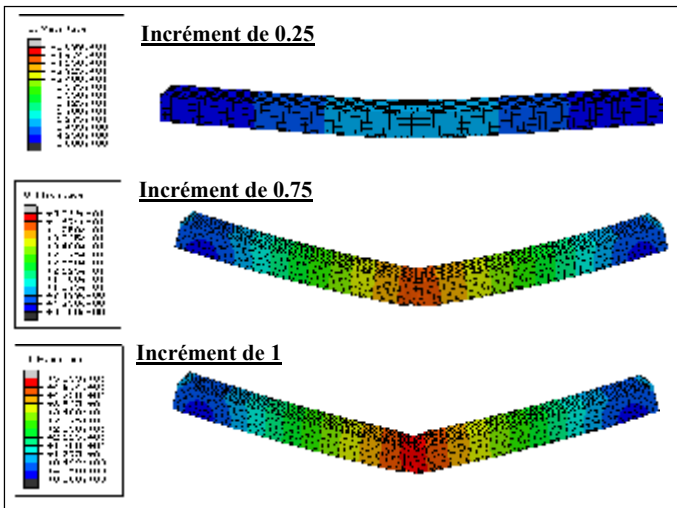


Figure IV.11 : Evolution des déplacements globaux dans le multicouche (MD-TP)

Les panneaux sandwichs dissymétriques présentent également un meilleur comportement en termes de déplacement globaux. Les multicouches à semelles en polymère renforcé et tissu (MD-PT) et (MD-TP) présentent des déplacements de rupture ultimes sont de l'ordre de 36 mm et 48 mm respectivement.

IV.3 Résultats du flambement

Dans la deuxième partie de notre investigation numérique, une étude du comportement mécanique des panneaux multicouches de dimension $450 \times 22 \times 50\text{ mm}$ chargés en flambement suivant la norme NF T 54-604 [47] est réalisée. Le chargement est appliqué l'un des bords du panneau composite avec une incrémentation de charge très modérée. Les résultats de la simulation en termes de contraintes, déformation et dégradation de la rigidité sont recueillis et ils mettent en exergue la performance mécanique des multicouches proposés.

IV.3.1 Confrontation des courbes force –déplacement

Les résultats de la simulation en termes du comportement global des multicouches étudiés sous chargement de compression avec flambage sont respectivement recueillis dans les courbes force-déplacement des figures IV.12 et IV.13.

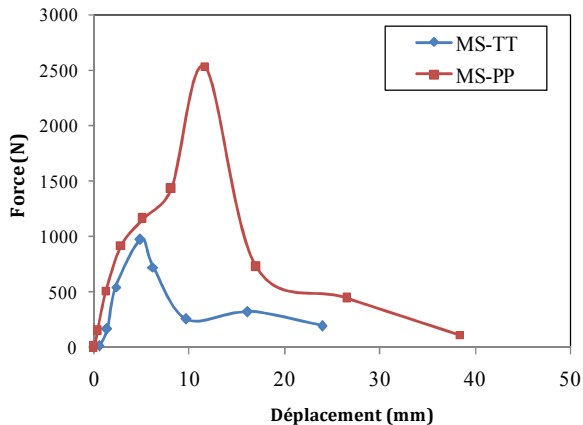


Figure IV.12 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs symétriques chargés en flambement.

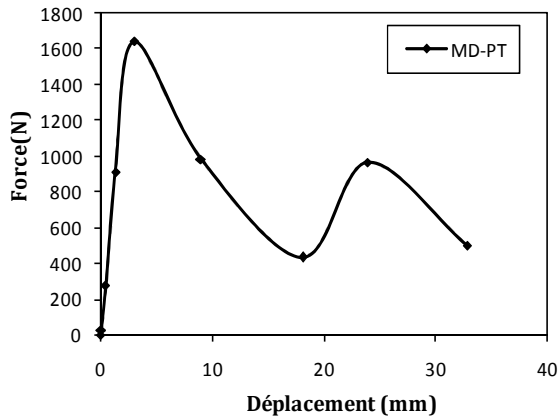


Figure IV.13 : Courbe forces-déplacements des panneaux sandwichs dissymétriques chargés en flambement.

Les panneaux multicouches simulés présentent des résistances mécaniques de flambement très améliorées comparativement à celle de flexion, leurs comportement est caractérisé par une partie élastique linéaire, jusqu'à à l'atteinte du pic qui définit la force maximale qui caractérise la résistance ultime des panneaux en flambement. Une chute considérable de la charge ultime est observée au-delà du pic.

Les capacités portantes de flambage des multicouches symétriques MS-TT et MS-PP sont respectivement de l'ordre de 1020 N et 2 550 N avec un déplacement axial correspondant de 5 mm et 13 mm respectivement. Les panneaux multicouches dissymétriques (MD-TP) présentent une charge ultime de flambage de l'ordre de 1620 N.

IV.3.2 Validation du modèle EF en flambement

Le modèle élément fini proposé pour prédire la réponse globale et locale des panneaux sandwichs multicouches sous chargement de flambement sont validé par les résultats des essais. A cet effet, une étude comparative est réalisée entre les résultats de la simulation numérique et ceux de la campagne expérimentale. Pour se faire, la confrontation des courbes force-déplacement entres ces deux approches est illustrée sur la figure IV.14.

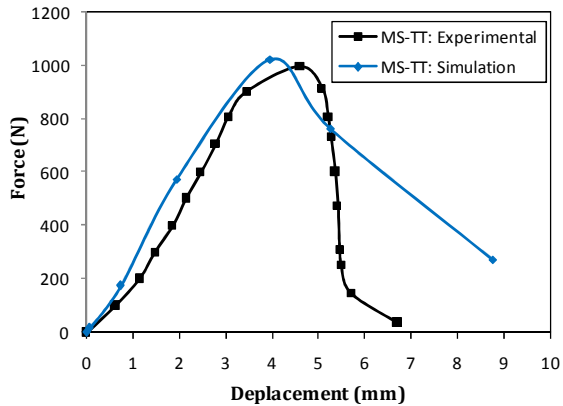


Figure IV.14 : Confrontation des courbes forces-déplacements du panneau MS-TT Simulation vs. Essai.

Une bonne concordance est observée entre les résultats numériques et expérimentaux. Les charges maximales données par la simulation numérique sont légèrement plus élevées comparativement à celles données par les essais; cette différence est due aux déformations initiales dans les panneaux, qui ne sont pas prises en considération dans les modèles éléments finis choisis.

La charge ultime de flambage du panneau donnée par la simulation est de 1020 N avec un déplacement correspondant de 3,91 mm, cependant la capacité portante moyenne obtenue par les essais et de l'ordre de 995 N, avec un déplacement correspondant de 23 mm. La différence entre le modèle numérique et l'analyse expérimentale est inférieure à (< 5%), ce qui est beaucoup moins que la dispersion expérimentale normale.

IV.3.3 Cartographie des contraintes

Les différentes cartographies des figures ci-dessous IV.15, IV.16 et IV.17 montrent l'évolution de la distribution des contraintes de flambage et de Von Mises respectivement dans les sandwichs à semelles symétriques (MS-TT) et (MS-PP) et à semelles dissymétriques sous chargement de flambement, pour divers valeurs de l'incrément de charge.

IV.3.3.1 Cas des sandwichs symétriques

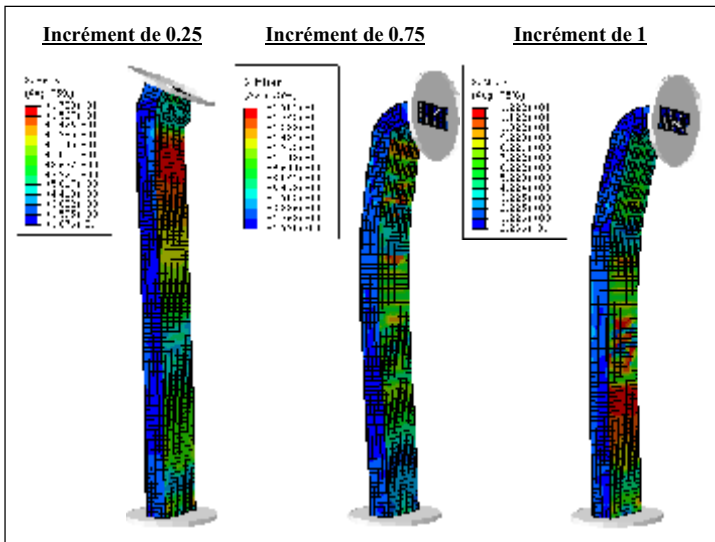


Figure IV.15 : Propagation des contraintes de flambage dans le sandwich MS-TT.

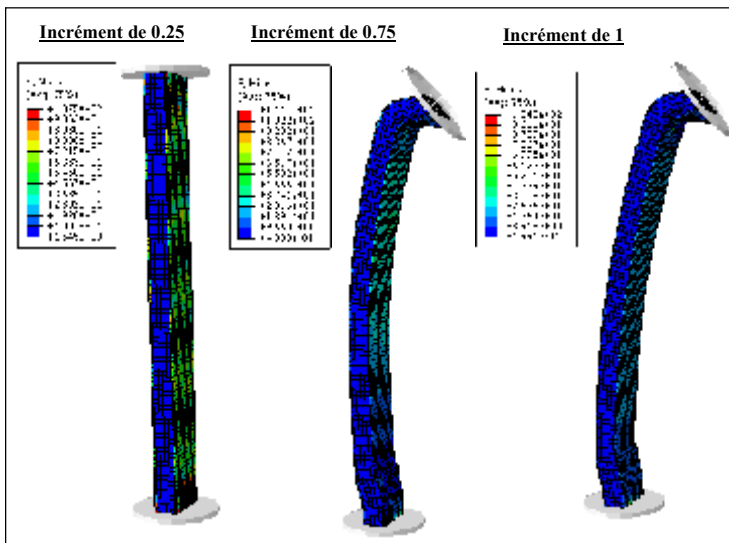


Figure IV.16 : Propagation des contraintes de flambage dans le sandwich MS-PP

IV.3.3.2 Cas des sandwichs dissymétriques

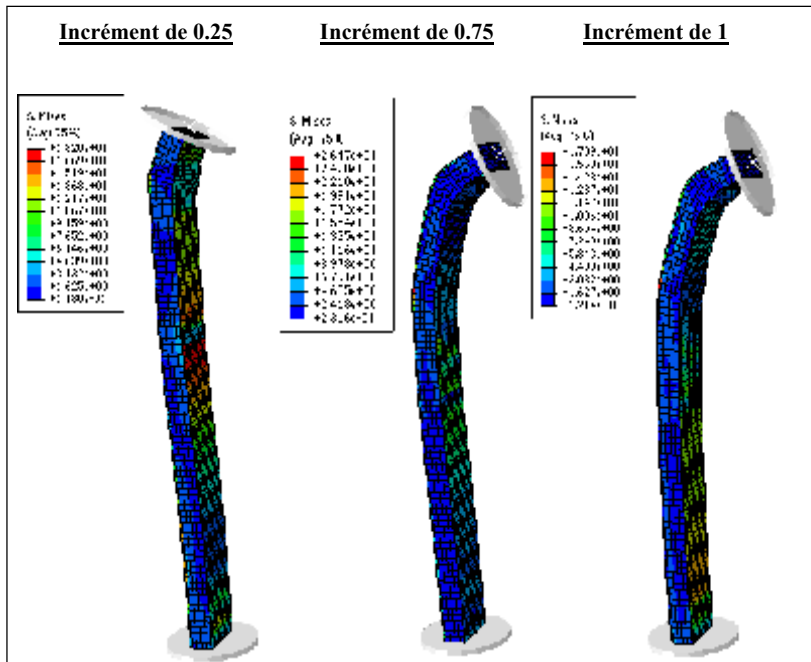


Figure IV.17 : Propagation des contraintes de flambage dans le sandwich MD-PT.

On observe que l'évolution du champs de contrainte dans les multicouches symétriques est rapide, les éléments atteignent la phase de densification des contraintes après un temps de chargement très court, les éléments analysés soumis au flambement connaît des concentration de champs de contraintes dans la région d'extrémités engendrant par la suite l'ouverture des fissures , qui donnera par la suite la rupture de l'élément. L'évolution des contraintes dans les multicouches dissymétriques est lente, suite à la différence de rigidité entre la matrice mortier allégé par sciure de bois et les matériaux composite des semelles.

IV.3.4 Cartographies des déplacements

Les figures ci-dessous illustres l'évolution des déplacements axiaux dans les sandwichs sous chargement au flambement, pour divers valeurs de l'incrément de charge.

IV.3.4.1 Cas des sandwichs symétriques

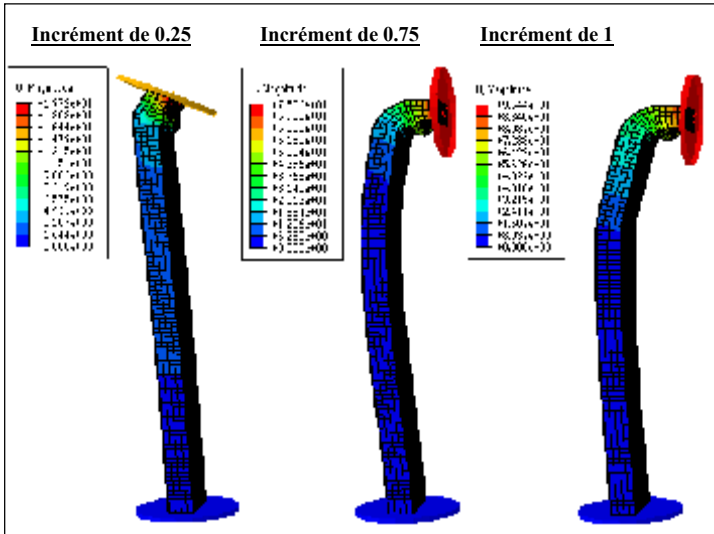


Figure IV.18 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich MS-TT

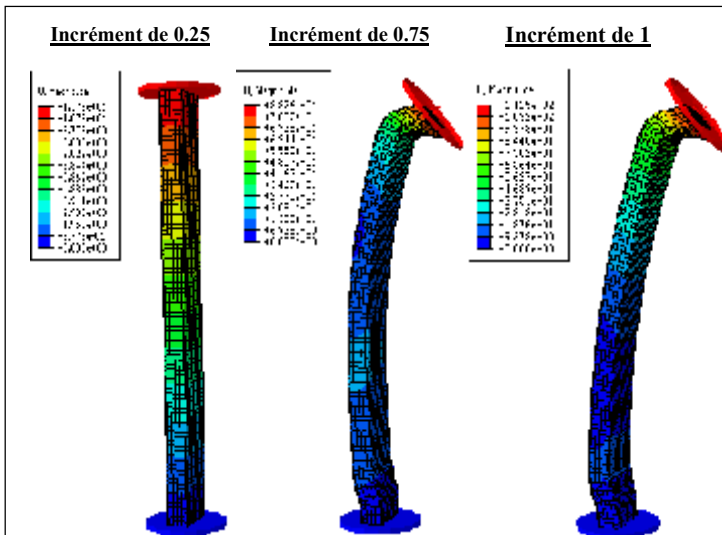


Figure IV.19 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich MS-PP

IV.3.4.2 Cas des sandwichs dissymétriques

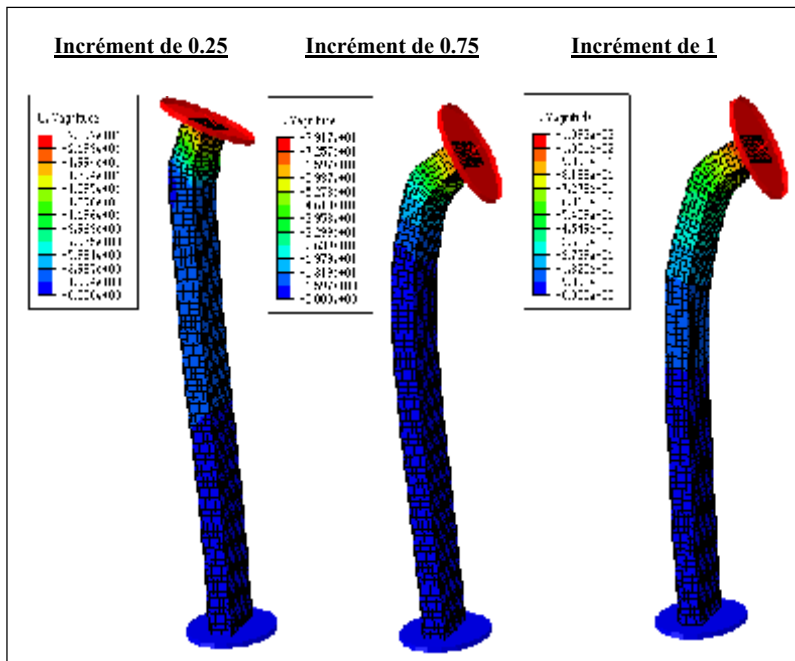


Figure IV.20: Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich MD-PT

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre, un modèle élément fini qui permet de prédire la réponse locale et la réponse globale des panneaux sandwichs multicouches chargés en flexion et en flambement est proposé et validé par les résultats des essais. Hormis les hypothèses de bases de l'analyse numérique, les résultats ont montré que les structures étudiées présentent des caractéristiques mécaniques améliorées et ceci grâce à la conjugaison des performances des matériaux composites. En conclusion, une bonne concordance est obtenue entre les résultats des modèles numériques et les résultats obtenus expérimentalement. La visualisation des cartographies de propagation des déplacements, des déformations et des contraintes en fonction de l'évolution de la charge appliquée avec une adéquation satisfaisante, eu égard aux résultats obtenus dans la partie expérimentale.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE

L'objectif principal de ce travail consiste à mettre en évidence, à travers une simulation numérique le comportement mécanique des panneaux sandwichs multicouches innovants 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, la simulation à base des éléments finis est menée dans un espace tridimensionnel, elle permet de déterminer le mode de ruine et le niveau de charge correspondant. Les matériaux d'âme sont modélisés suivant un modèle élastoplastique permettant ainsi de tenir compte de la dissymétrie de leur comportement en compression et en traction, ainsi qu'une représentation l'amorce et la propagation des fissures, et un modèle élastique fragile isotrope et orthotrope respectivement pour les matériaux composite des semelles à savoir la tissu en polypropylène et le polymère renforcé. Par conséquent, les résultats numériques en termes de contrainte, déformation et de dégradation de rigidité ainsi que la confrontation des courbes : force-déplacement sont présentés, pour mettre en valeur les performances mécaniques des structures composites développées.

Les différents résultats obtenus de la simulation qui présentent une bonne concordance avec les résultats expérimentaux montrent l'efficacité des multicouches proposés en termes de résistance et ductilité. La conjugaison des performances mécaniques des tissus composites permet de déminer la propagation rapide des fissures, celui-ci procure aux panneaux un comportement relativement ductile, ceci laisse entrevoir tout l'intérêt de l'utilisation des matériaux composites pour améliorer les performances mécaniques, notamment les capacités portantes et les déformabilités sous chargement de flexion et de flambement.

Perspectives

En dépit des résultats satisfaisants et encourageants obtenus, néanmoins il est nécessaire de compléter la présente étude par d'autres analyses, en effet, il convient de préciser les perspectives futures qui concernent aussi bien les aspects modélisation qu'expérimentaux. Nous citons dans ce qui suit les points principaux :

- Prendre en compte les glissements relatifs entre les différents composante des multicouches ;
- Intégrer dans les simulations des modèles d'endommagement des matériaux utilisés à fin de lister les mécanismes de rupture ;
- Considérer d'autres fractions de substitution (optimisation des matériaux d'âmes et de semelles) ;
- Développer un modèle analytique afin de transcrire le comportement réel et d'évaluer la réponse exacte et complète des panneaux sandwiches multicouches.

Références Bibliographiques

Références Bibliographiques

- [1] **Berthelot J. M.**, “*Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures*”, 4^{ème} édition, 1996
- [2] **Techniques de l'ingénieur.** /base-documentaire/ matériaux- /metaux-et-alliages-materiaux-magnetiques-et-multimateriaux-/structures-sandwich ; 2004
- [3] **Jamal Eddine ARBAOUI** « *Étude comparative et caractérisations mécaniques des structures sandwichs multicouches* » thèse doctorat, Université Paul Verlaine – METZ2009
- [4] **Gay Danielle**, *Matériaux composites*, 5^{ème} édition révisée, 2005
- [5] **J. Molimard**, *Mécanique des Matériaux composites*, Version 2, EMSE 2004
- [6] **Samir Bensaid** « *Contribution a la caractérisation et a la modélisation électromagnétique et thermique des matériaux composites anisotropes* » Université de Nantes, 2006.
- [7] **B. castanié** « *contribution a l'étude des structures sandwichs dissymétriques* » Ecole national supérieur de l'aéronautique et de l'espace.
- [8] **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
- [9] <http://worldwartwozone.com/forums/index.php?/topic/6307-dehavilland-dh-98-mosquito/>
- [10] **KUJALA K. and TUHKARI J.**, "All-steel corrugated-core sandwich panels for ship structures," Solihull ed: EMAS, 1989, pp. 411-422.
- [11] **KIMPARA I., et al.**, "Design and evaluation of advanced composite honeycomb sandwich structures for marine uses," ed: EMAS, 1989, pp. 37-46.
- [12] **WEISSMAN-BERMAN D.**, "Marine sandwich structures, Part 1," SAMPE journal, vol. 28, juillet/août 1992.
- [13] **MORGAN K.**, "Optimization of thin skinned and core properties of high performance sandwich structures," *Composite structures*, vol. 30, 1990.
- [14] **REYNE M.** - *Technologies des composites* (3ème édition revue et augmentée). - Paris : HERMES, 1998. - 222 p

- [15] **Engin M. R.**, “*Characteristics of Innovative 3-D FRP Sandwich Panels*”. Ph.D thesis, North Carolina State University, Raleigh, 2005.
- [16] **LACHGUER Abdelkarim AKYOUN Mohamed** « *les matériaux sandwich et les risques d’instabilités géométriques locales* » étude bibliographique, Ecole Des Mines De Douai, 2014
- [17] **Lequin. S** « *Etude de l’adsorption et de la diffusion, en phase gazeuse, de petites molécules actives du vin dans le liège.* » thèse de doctorat ; Université de Bourgogne 2010
- [18] **Gibson L. J., Easterling K. E., Ashby M. F.**, «*The structure and mechanics of cork*». Proceeding of the Royal Society of London A, 377: 99-117, (1981).
- [19] **Lakreb. N** « *Élaboration, caractérisation thermomécanique et hygrothermique d’un composite sandwich multicouches à base de liège et bois de déroulage* » Thèse de Doctorat, Université M’Hamed Bougara – Boumerdes 2015
- [20] **Sotehi. N** « *Caractéristiques Thermiques des Parois des Bâtiments et Amélioration de L’isolation* », Thèse de doctorat Université Mentouri - Constantine 2010
- [21] **Gibson L. J., Ashby M. F.** «*Cellular solids: structure and properties*», 2nd edn, 453–467, Cambridge, Cambridge University Press, (1997).
- [22] **Rosa ME., Fortes MA.**, «*Deformation and fracture of cork in tension* ». Journal of Materials Science; 26(2):341–8, (1991).
- [23] <http://www.amorimfrance.fr/le-liege/article/qualites-du-liege>
- [24] **Meirhaeghe C.**, *Evaluation de la disponibilité et de l’accessibilité de fibres végétales à usages matériaux* en France, Etude de l’ADEME 2011
- [25] **Florent Ilcyszyn** « *Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre* » thèse de doctorat ; Université de Technologie de Troyes 2013
- [26] **Cloutier A.** « *Anatomie et structure du bois* ». Notes de cours, chapitre 1. Département des sciences du bois et de la forêt, Université Laval, 2005.
- [27] **J. M. Franssen**, « *construire en bois* », cours, année académique 2007-2008. Université de Liège.
- [28] <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/jute/fr/>
- [29] **COATS** « *Tout sur les fibres textiles* » ; 2010.

- [30] **Gaël Grail** « *Approche multimodèle pour la conception de structures composite à renfort tissé* » thèse de doctorat, Université d'Orléans 2013
- [31] **F. DAL MASO et J. MÉZIÈRE** « *calcul des propriétés élastiques des tissus utilisés dans les matériaux composites* » institut français du pétrole 1.1998
- [32] **Pierre Badel** « *Analyse mésoscopique du comportement mécanique des renforts tissés de composites utilisant la tomographie aux rayons X* » thèse de doctorat, Institut national des sciences appliquées de Lyon 2008
- [33] **El Hadji Babacar Ly** « *Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose. Matériaux* » Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG, 2008.
- [34] **Saidani . K** « *Analyse des composites sandwichs et qualification de leur intégrité vis-à-vis de la ruine* » thèse de doctorat ; Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzou 2014
- [35] **Florent Cloutier** « *Analyse des conditions de fabrication en pression et température dans les procédés d'injection par transfert de résine* » Université De Montréal
- [36] **K. Horie, I. Mita, H. Kambe**, "Calorimetric Investigation of Polymerization Reactions", *Journal of Polymer Science. Polymer chemistry Part A*. 6(9): 2663-2676, 1968
- [37] **Dr Suzanne et Pierre DEOUX** « *Le guide de l'habitat sain* », – Medieco Editions, 2002
- [38] **H. Karlsson** « *ABAQUS documentation version 6.10 et 6.12 : Theory Manual* » Inc, Abaqus Simulia, HKS Inc Providence, RI USA; 2010.
- [39] **Steeves CA, Fleck NA**. «Material selection in sandwich beam construction». *Scr Mater* 2004;50:1335–9.
- [40] **Allen HG**. «*Analysis and design of structural sandwich panels*». Oxford: Pergamon Press; 1969.
- [41] **Zenkert D**. «*The handbook of sandwich construction*». North European engineering and science conference series. Cradley Heath: EMAS Publishing; 1997. p. 442.
- [42] **Vinson JR**. *The behaviour of sandwich structures of isotropic and composite materials*. Lancaster: Technomic Publishing Co., Inc.; 1999.
- [43] **Shahdin, L. Mezeix, C. Bouvet, J. Morlier and Y. Gourinat**, "Fabrication and Mechanical Testing of Glass Fiber Entangled Sandwich Beams: A Comparison with Honeycomb and Foam Sandwich Beams," *Composite Structures*, Vol. 90, No. 4, 2009, pp. 404-412.

[44] Asad Mirzapour , Mohammad Hussein Beheshty and Mehdi Vafayan, “*The response of sandwich panels with rigid polyurethane foam cores under flexural loading*”, Iranian polymer journal, 14(12), 2005, pp1082-1088.

[45] Lee C.S., Lee D.G., *Co-cure method for foam core sandwich composite manufacture*, Comp. Struc., 66, 231-238 (2004)

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

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