



Mémoire de fin d'étude

En vue de l'obtention du diplôme de Master recherche

Spécialité : Génie civil
Option : Structure

Thème

**Simulation numérique du comportement d'un
panneau sandwich à matrice légère**

Proposé et dirigé par :
M^{me} KHELOUI Fatma

Réalisé par :
M^{lle} ANNANE Sara

Membres de jury :

Mr. DEHMOUS Hocine	UMMTO	Président
Mme. KHELOUI Fatma	UMMTO	Promotrice
Mme. BOUZEBODJA Fatma	UMMTO	Examinatrice
Mr. SI SALEM Abdelmadjid	UAMB	Invité

Promotion 2018/2019

REMERCIEMENTS

*Eu premier lieu je remercie le Dieu tout puissant de m'avoir donné le courage afin d'accomplir ce travail. Je tiens à exprimer mes sincères remerciements à ma promotrice **Mme KHELOUI Fatma** 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 tiens à remercier aussi **Mr ALMANSBA.M** et **Mr SI SALEM.A** pour leurs modesties, leurs conseils, leurs encouragements, leurs disponibilité, et je les remercie pour m'avoir consacré leurs temps afin de m'aider durant mon travail.*

*Je remercie également les doctorants **DJADOUN.T** et **NEKMOUCHE.A** pour leurs soutiens et encouragement*

*Je remercie tous les enseignants de l'université **MOULOUD MAMMERI** de **TIZIOUZOU** qui ont participé à ma réussite durant mon cursus.*

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.

Enfin, je tiens à exprimer ma sincère gratitude pour tous ceux qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

À Celle qui m'a donné la vie et l'envie de vivre, à celle qui m'a entouré de sa tendresse, à celle qui a attendu avec patience les fruits de sa bonne éducation, à ma très chère mère.

À celui qui a été toujours là pour moi, à celui qui m'indique la bonne voie en me rappelant que la volonté fait toujours les grands hommes, à mon adorable papa.

À mes très chers frères Abdellah et Soheib

À ma sœur bien aimé Manel

A mes grands parents

À tous mes ami (es) son exception et tous ceux qui m'ont aidé de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire.

Résumé

Les matériaux sandwichs connaissent un essor important, tant dans les applications les utilisant, que dans les technologies les mettant en œuvre, ils présentent un intérêt pour les applications qui requièrent à la fois rigidité et légèreté, C'est dans ce contexte que notre travail de recherche est proposé.

Le but de ce travail est de mettre en évidence à travers une simulation numérique par élément fini le comportement mécanique (essais de flexion et de flambement) d'un sandwich à matrice en mortier allégé par des fibres d'agave comme âme et des tissus en jute et polypropylène comme matériaux de semelles, collés à l'aide d'une résine Epoxyde sous chargement en flexion 3 points et flambement .

Les résultats obtenus des essais de flexion et de flambement montrent qu'au plus de leur légèreté, ces nouveaux panneaux multicouches prouvent leur efficacité en terme de rigidité, leur comportement mécanique de haut niveau viennent rivaliser avec celles des autres composites classiques.

Mots clés : *sandwich, simulation, propriétés mécaniques, semelle, âme, fibre végétale, analyse,...*

Abstract

Sandwich materials are booming, both in the applications using them and in the technologies implementing them, they are of interest for applications that require both rigidity and lightness, It is in this context that our work of research is proposed.

The aim of this work is to demonstrate, through a finite element numerical simulation, the mechanical behavior (bending and buckling tests) of a mortar matrix sandwich lightened by agave fibers as the core and tissues jute and polypropylene as sole material, bonded with an epoxy resin under 3-point bending loading and buckling.

The results obtained from the bending and buckling tests show that, in addition to their light weight, these new multilayer panels prove their effectiveness in terms of rigidity, their high-level mechanical behavior comes to rival those of other conventional composites.

Key words: sandwich, simulation, mechanical properties, sole, soul, plant fiber, analysis, ...

Sommaire

INTRODUCTION GÉNÉRALE	1
Chapitre I	
I.1 Introduction	4
I.2 Définition des matériaux composites	4
I.3 Constituants des matériaux composites	5
I.3.1 La matrice.....	5
I.3.2 les renforts	6
I.3.2.1 Principaux matériaux de renforts.....	6
I.3.2.2 Architecture des fibres.....	7
I.4 Classification des matériaux composites.....	8
I.5 les structures composites	9
I.5.1 Les monocouches.....	9
I.5.2 Les stratifiés.....	9
I.5.3 Les structures sandwiches	
I.5.3.1 Structures sandwiches symétriques.....	10
I.5.3.2 Structures sandwich dissymétriques.....	10
I.6. Les constituants des matériaux multicouches	10
I.6.1 L'âme.....	11
I.6.2 Les peaux.....	11
I.6.3 L'adhésif.....	12
I.7 Avantages et inconvénients des matériaux composites.....	12
I.8 Réparation du béton par des matériaux composites.....	13
I.8.1 principales méthodes de réparation de surfaces.....	13
I.8.1.1 réparation des fissures	13
I.8.1.2 Réparation par le collage de feuilles ou de plaque en composite.....	13
I.9 Domaines d'application des matériaux composites.....	14
I.9.1 Domaine du génie civil.....	14
I.9.2 Construction aéronautique.....	18
I.9.3 Construction automobile	18
I.9.4 Loisirs et sports	19

I.10 Comportement mécanique des multicouches.....	19
I.10.1 Comportement mécanique des multicouches en flexion	20
I.10.1.1 Flexion en trois points.....	20
I.10.1.2 Flexion en quatre points.....	20
I.10.2 Comportement mécanique des multicouches en flambement.....	21
I.11 Conclusion	21

Chapitre II

II-1- Introduction.....	23
II-2- Définition de la fibre végétale.....	23
II.3. Différents types de fibres	23
II.4. Fibres végétales.....	24
II.5. Composition chimique des fibres végétales	27
II.5.1. Cellulose.....	27
II.5.2. Hémicelluloses	29
II.5.3 Pectines.....	30
II.5.4 Lignine	30
I.6. Propriétés mécaniques de la fibre végétale.....	31
II.6.1. Paramètres influençant les propriétés des fibres végétales.....	32
II.7. Exemples de fibres végétales.....	32
II.7.1. Lin.....	32
II.7.2. Ramie.....	33
II.7.3. Chanvre.....	33
II.7.4. Coir de la noix de coco.....	33
II.7.5. Jute	33
II.7.6.Sisal	35
II-8 Utilisation des fibres végétales: avantages et inconvénients.....	37
1-9 Conclusion	38

Chapitre III

III.1 Introduction	39
III.2 présentation du logiciel ABAQUS.....	39

III.2.1 Les Logiciels sur le marché.....	39
III.2.2 Les caractéristiques du logiciel ABAQUS.....	39
III.2.3 Bases de l'interface d'ABAQUS.....	40
III.2.4 Les Modules.....	41
III.3 Le modèle Concrete Damaged Plasticity.....	42
III.3.1 Comportement en compression.....	43
III.3.2 Comportement en traction.....	43
III.3.3 Couplage plasticité-endommagement.....	45
III.4 Interface béton -matériau composite.....	45
III.5 Identification des paramètres et modèles adoptés.....	45
III.5.1 Modèle élastique-fragile pour les composites.....	45
III.5.2 Modèle élastoplastique pour les matériaux d'âme.....	46
III.6 Etapes de la modélisation.....	47
III.7 Etude de la sensibilité du maillage.....	52
III.8 Conclusion.....	54

Chapitre IV

IV.1 Introduction.....	56
IV.2 Résultats de la flexion 3-points	56
IV.2.1 Cartographie des contraintes	56
IV.2.1.1 cas des sandwichs symétriques.....	57
IV.2.1.2 Cas des sandwichs dissymétriques	58
IV.2.1.3 cas du panneau renforcé dans sa face inférieure	60
IV.2.2 Cartographie des déplacements globaux.....	60
IV.2.2.1 cas des sandwichs symétriques.....	61
IV.2.2.2 Cas des sandwichs dissymétriques.....	62
IV.2.2.3 cas du panneau renforcé dans sa face inférieure.....	64
IV.2.3 Cartographie des dommages.....	64
I.2.3.1 cas des sandwichs symétriques	65

IV.2.3.2 Cas des sandwichs dissymétrique.....	66
IV.2.3.1 cas du panneau renforcé dans sa face inférieur	68
IV.2.4 confrontations des courbes force-déplacement	68
IV.2.5 étude de la variation d'épaisseur des semelles	70
IV.3 résultats du flambement	71
IV.3.1 Cartographie des contraintes.....	71
IV.3.1.1 Cas des sandwichs symétriques.....	72
IV.3.1.2 Cas des sandwichs dissymétriques.....	73
IV.3.2 Cartographies des déplacements.....	73
IV.3.2.1 Cas des sandwichs symétriques.....	74
IV.3.2.2 Cas des sandwichs dissymétriques.....	75
IV.3.3 Cartographies des dommages	75
IV.3.3.1 cas des sandwichs symétriques	76
IV.3.3.2 cas des sandwichs dissymétriques.....	77
IV.3.4 Confrontation des courbes force –déplacement.....	77
IV.4 Conclusion.....	78
Conclusion générale	80

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I-1:Matériau composite.....	4
Figure I.2.Composition générale d'un matériau composite.....	5
Figure I.3: Différents familles de matrice.....	5
Figure I.4: Géométries des renforts.....	8
Figure I.5 : Constitution d'une structure composite monocouche.....	9
Figure I.6: Constitution d'un stratifié.....	10
Figure I.7 : Désignation d'une structure composite stratifiée.....	10
Figure I.8.Composite sandwichs.....	11
Figure I.9: Confinement de colonnes de ponts par matériaux composite.....	15
Figure I.10 : Réhabilitation d'un mur en maçonnerie(Suisse).....	16
Figure I.11 : Renforcement d'une dalle de pont.....	16
Figure I.12 : Réhabilitation du Banc d'El Harrach, Alger (photo CTC\Est) a) Renforcement en flexion, b) Renforcement en cisaillement.....	17
Figure I.13: Renforcement ou réparation de structures en béton armé par collage de matériaux composites.....	17
Figure I.14: Avion militaire Britannique en structure multicouche.....	18
Figure I.15: Sollicitations mécaniques.....	19
Figure I.16: Flexion 3 points.....	20
Figure I.17: Flexion 4 points.....	20
Figure I.18:Flambement d'une poutre.....	21
Figure I.19:Flambement généralisé des peaux et flambement localisé des peaux.....	21

CHAPITRE II

Figure II.1 : Organigramme des différents types de fibres naturelles.....	24
Figure II.2 : Structure des fibres de bois (observations multi échelles: d'après Harrington, 1998).....	25
Figure II.3: Variation du diamètre le long de la fibre de lin.....	26
Figure II.4: Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton.....	27
Figure II.5 : Représentation schématique d'une fibre de bois.....	27
Figure II.6 : Représentation de la chaîne de cellulose.....	28
Figure II.7 : Liaisons hydrogène O - H-3' intramoléculaires.....	28
Figure II.8 : Représentation schématique de la hiérarchie de structure dans une fibre cellulosique.....	29
Figure II.9 : Représentation schématique de l'alternance des zones cristallines et désorganisées le long d'une microfibrille.....	29

Figure II.10 : Motifs élémentaires de la lignine.....	30
Figure II.11 : Exemple de défaut structural sur une fibre de lin.....	31
Figure II.12: a) Plante de jute Typique, b) et c) fibres extraite de la tige de jute.....	34
Figure II.13 : plante de sisal.....	35

CHAPITRE III

Figure III.1 :L'interface d'ABAQUS.....	40
Figure III.2 : Comportement du béton soumis à une compression uni axiale.....	43
Figure III.3 : Comportement du béton soumis à une traction uni axiale.....	42
Figure III.4 : modélisation géométrique de l'âme du panneau sandwich.....	47
Figure III.5 : modélisation géométrique des semelles du panneau sandwich.....	48
Figure III.6 : propriétés mécanique de l'âme.....	48
Figure III.7 : propriétés mécaniques des semelles.....	49
Figure III.8 : Assemblage du modèle.....	49
Figure III.9 : le module step.....	50
Figure III.10 : contact de l'âme avec les deux semelles.....	50
Figure III.11 : Conditions aux limites de module load.....	51
Figure III.12: Définition des forces de module load. (Chargement en flexion à 3 points).....	51
Figure III.13: Définition des forces de module load (chargement en flambement).....	52
Figure III.14 : Configurations pour la validation de la sensibilité au maillage.....	53
Figure III.15 : Étude de la sensibilité du maillage.....	53
Figure III.16 : maillage de la semelle et de l'âme.....	54
Figure III.17: analyse des résultats (module job).....	54

CHAPITRE IV

Figure IV.1 : propagation des contraintes dans le panneau sandwich symétrique (SS-JJ).....	57
Figure IV.2 : propagation des contraintes dans panneau sandwich symétrique (SS-PP).....	57
Figure IV.3 : propagation des contraintes dans le sandwich dissymétrique (SD-PJ).....	58
Figure IV.4 : propagation des contraintes dans le sandwich dissymétrique (SD-JP).....	59
Figure IV.5: propagation des contraintes dans le panneau renforcé dans sa semelle inférieure par le tissu de jute (PR-FI).....	60
Figure IV.6: Evolution des déplacements globaux dans le sandwich symétrique (SS-JJ).....	61
Figure IV.7 : Evolution des déplacements globaux dans le panneau sandwich symétrique (SS-PP).....	61
Figure IV.8 : Evolution des déplacements globaux dans le panneau sandwich dissymétrique (SD-PJ).....	62

Figure IV.9 : Evolution des déplacements globaux dans le panneau sandwich dissymétrique (SD-JP).....	63
Figure IV.10 : évolutions des déplacements dans le panneau renforcé dans sa face inférieure par le tissu de jute (PR-FI).....	64
Figure IV.11 : évolutions des dommages dans le sandwich symétrique (SS-JJ).....	65
Figure IV.12 : évolutions des dommages dans le sandwich symétrique (SS-PP).....	65
Figure IV.13 : évolutions des dommages dans les sandwichs dissymétriques (SD-PJ).....	66
Figure IV.14 : évolutions des dommages dans les sandwichs dissymétriques (SD-JP).....	67
Figure IV.15: évolutions des dommages dans le panneau renforcé dans sa face inférieure par le tissu de jute (PR-FI).....	68
Figure IV.16 : confrontation des courbes force-déplacement des sandwichs symétriques et dissymétrique en flexion	69
Figure IV.17 : confrontation des courbes force-déplacement du sandwich symétrique (SS-JJ) et du panneau renforcé dans sa face inférieure (PR-FI) en flexion.....	70
Figure IV.18 : courbe et histogramme de la variation de l'épaisseur des semelles du panneau sandwich dissymétrique.....	71
Figure IV.19 : propagation des contraintes de flambage dans le sandwich symétrique (SS-JJ).....	72
Figure IV.20 : propagation des contraintes de flambage dans le sandwich symétrique (SS-PP).....	72
Figure IV.21 : propagation des contraintes de flambage dans le sandwich dissymétrique (SD-PJ).....	73
Figure IV.22 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich symétrique (SS-JJ).....	74
Figure IV.23 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich symétrique (SS-PP).....	74
Figure IV.24 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich dissymétrique (SD-PJ).....	75
Figure IV.25 : évolution des dommages en flambage dans le panneau symétrique (SS-JJ).....	76
Figure IV.26 : évolution des dommages en flambage dans le panneau symétrique (SS-PP).....	76
Figure IV.27 : évolution des dommages en flambage dans le panneau dissymétrique (SD-PJ).....	77
Figure IV.28 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs Symétriques et dissymétriques chargés en flambement.....	77

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau I-1 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts	7
Tableau I.2: technique de réparation des fissures.....	13

Chapitre II

Tableau II.1 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles.....	32
Tableau II.2 : Production en tonnes de fibre de jute 2011-2012 (données de la FAO).....	35
Tableau II.3 : Avantages et inconvénients des fibres naturels.....	38

Chapitre III

Tableau III.1 : Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton.....	44
Tableau III.2 : Paramètres du modèle élastique isotrope pour le tissu de jute.....	45
Tableau III.3 : Paramètres du modèle élastique isotrope pour le tissu polypropylène.....	46
Tableau III.4: Paramètres de la résine Epoxyde.....	46
Tableau III.5: Paramètres du modèle élastique isotrope du tissu composite (tissu de jute + résine Epoxyde).....	46
Tableau III.6 : Paramètres du modèle élastique isotrope du tissu composite (polypropylène + résine Epoxyde).....	46
Tableau III-7: paramètres du modèle élastoplastique pour les matériaux d'âme.....	47

Principales Notations

dt : variable d'endommagement en traction

dc : variable d'endommagement en compression

$\tilde{\varepsilon}_t^{pl}$: déformation plastique en traction

$\tilde{\varepsilon}_c^{pl}$: déformation plastique en compression

θ : température

fi : variable prédéfinis

ε^{el} : déformation élastique

ε^{pl} : déformation plastique

D_0^{el} : matrice de raideur élastique

Ec : *module de Young instantanée*

σ : contrainte de rupture

ν : coefficient de poisson

fc : Contrainte en compression

$fc0$: Contrainte élastique en compression

$ft0$: Contrainte maximale en traction

Ψ : Angle de dilatation sous compression

M : moment de flexion

N : un effort normal

T : un effort tranchant

Introduction générale

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

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques.

Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes.

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.

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

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 fibres d'agaves. Les semelles inférieures et supérieures sont respectivement confectionnées en tissu de jute et polypropylène 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 finis capable de prédire et de modéliser le comportement de notre système mécanique sous chargement de flexion de flambement.

Ce mémoire se divise en quatre chapitres :

Le premier chapitre présente une synthèse bibliographique concernant les matériaux composites, leurs constituants et l'intérêt de leurs utilisations ainsi que les différents domaines d'application. Nous avons parlé aussi sur les principales méthode et techniques de réparation du béton à l'aide des matériaux composite. En deuxième lieu, nous avons présenté le comportement mécanique de ces structures, 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 constitués 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 fibre d'agave en compression et en traction, et un modèle élastique fragile isotrope pour les 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.

Pour finir, dans la conclusion générales nous avons résumé l'ensemble des résultats obtenus dans ce travail, en mettant en exergue les points les plus essentiels et originaux de cette recherche.

I.1. Introduction

Le mot composé dans le terme matière composite signifie que deux matériaux ou plus sont combinés sur une échelle macroscopique pour former un troisième matériau utile. La clef est l'examen macroscopique du matériau où les composants peuvent être identifiés à l'œil nu. Différents matériaux peuvent être combinés sur une échelle microscopique, comme dans l'alliage des métaux, mais le matériau résultant est, pour tous les buts pratiques, macroscopiquement homogène, c.-à-d., les composants ne peuvent pas être distingués par l'œil nu et essentiellement agir ensemble. L'avantage des matériaux composites est que, si bon conçu, ils montrent habituellement les meilleures qualités de leurs composants ou constituants et souvent quelques qualités que ni l'un ni l'autre constituant ne possède. Certaines des propriétés qui peuvent être améliorées en formant une matière composite sont: Rigidité, Résistance à la corrosion, Poids, Résistance à la fatigue, Isolation thermique,... L'objectif de la conception est de créer un matériau qui a les caractéristiques requises pour accomplir la tâche de conception. [1]

I.2. Définition des matériaux composites

Un matériau composite est constitué d'une phase continue (matrice) et d'une phase discontinue (renfort), dans le sens large, le mot « composite » signifie qu'il est constitué de deux ou plusieurs parties différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau a performance supérieur à celui des composantes pris séparément [2].

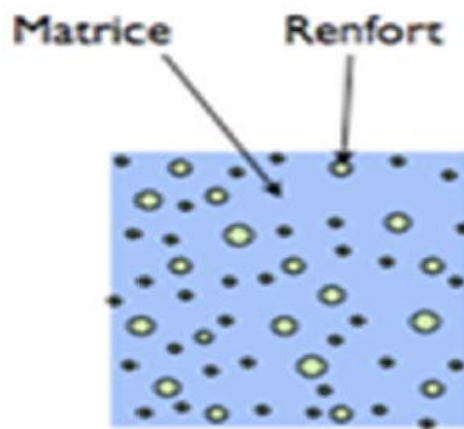


Figure I-1:Matériau composite [29].

Homogène : même propriétés en tout points du matériau.

Isotrope : même propriétés dans toutes les directions.

Isotrope transverse : il existe un axe de symétrie, symétrie par rapport à une droite.

Hétérogène : en deux-points différents, implique propriétés différentes.

Orthotrope : propriétés symétriques par rapport à deux plans orthogonaux.

Anisotrope : les propriétés sont différents selon les différentes directions.

➤ **Les propriétés des matériaux composites résultent de:**

- propriétés des matériaux composant les matériaux composites.
- Leurs distributions géométries.
- Leurs interactions.

➤ **La distribution d'un matériau composite est spécifiée par:**

- La nature des constituants et leur propriété intrinsèque.
- La géométrie de renfort, sa distribution.
- Nature de l'interface matrice-renfort.

➤ **La géométrie de renfort est caractérisée par:**

- La forme, la taille, la concentration, l'orientation.

I.3 Constituants des matériaux composites

Un matériau composite représente l'association de deux constituants appelés matrice et renfort.

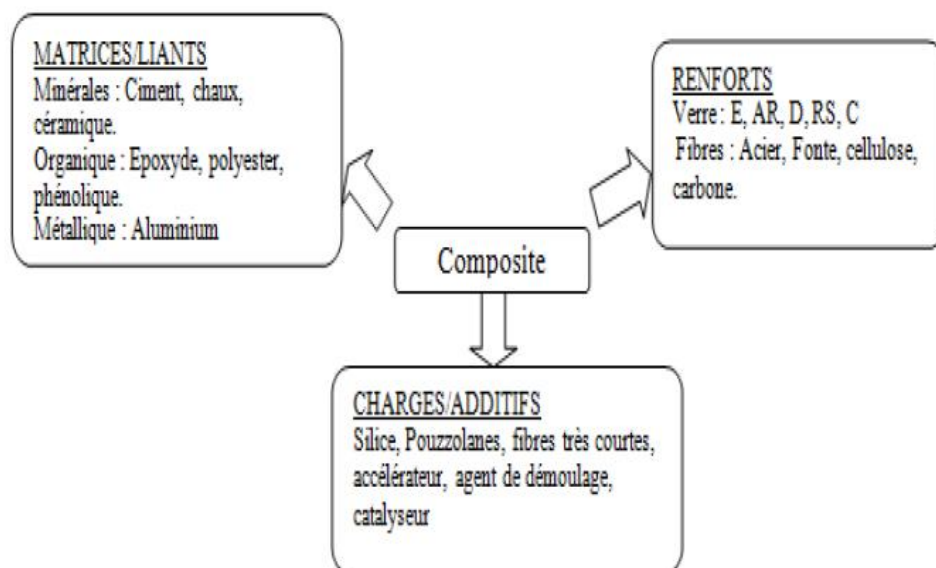


Figure I.2.Composition générale d'un matériau composite [28]

I.3.1 La matrice

La matrice lie les fibres renforts, répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion), assure la protection chimique. Par définition, c'est un polymère ou une résine organique [20]

➤ Les différentes familles de matrice

La matrice a pour rôle de lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables que l'on associe à des fibres longues. Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés.

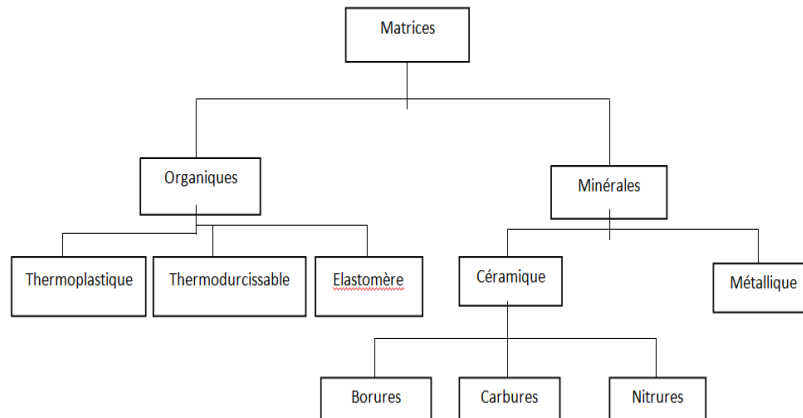


Figure I.3: Différents familles de matrice [27]

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

- **Les résines thermodurcissables (TD) :** Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants.
- **Les résines thermoplastiques (TP) :** Les résines thermoplastiques ont des propriétés faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très hautes température.

I.3.2 les renforts

Le but des renforts dans les matériaux composites est essentiellement d'accroître leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, ect...) et d'améliorer des propriétés physiques, et les propriétés électriques. Outre les propriétés élevées qu'ils procurent, les caractéristiques recherchées dans les renforts sont une masse volumique faible, une compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre. Les renforts peuvent provenir d'origines diverses (animale, végétale, synthétique, ect...) [21]

I.3.2.1 Principaux matériaux de renforts

Il existe plusieurs types de renforts fibreux

- **Fibres de verres:**

Les fibres de verre constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres : [22]

E : pour les composites de grandes diffusion et les applications courantes ;

R : pour les composites hautes performances ;

D : pour la fabrication de circuit imprimé (propriétés diélectriques)

➤ **Fibre de carbone:**

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres utilisées sont des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile. La qualité de fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille est également utilisé pour produire des fibres de carbone. [20]

➤ **Fibre aramides:**

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

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

La fibre haute module: employées dans le renforcement pour les composites hautes performances [22]

➤ **Fibres céramiques:**

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2000°C. Quelques exemples de fibres céramiques: [20]

- fibres de Carbure de silicium

-fibre de Bore

-Fibre de Bore carbure de silicium

Tableau I-1 : Caractéristiques moyennes des fibres et renforts [30].

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (kg.m^{-3})	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient de Poisson	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement à rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	d	Mv	E	G	k	C _r	A	α
Verre E	16	2 600	74 000	30 000	0,25	2 500	3,5	$0,5 \cdot 10^{-3}$
Verre R	10	2 500	86 000		0,2	3 200	4	$0,3 \cdot 10^{-3}$
Carbone HM	6,5	1 800	390 000	20 000	0,35	2 500	0,6	$0,08 \cdot 10^{-3}$
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0,3	3 200	1,3	$0,02 \cdot 10^{-3}$
Kevlar 49	12	1 450	130 000	12 000	0,4	2 900	2,3	$-0,2 \cdot 10^{-3}$
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0,8	$0,4 \cdot 10^{-3}$
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000			3 000	1,5	
Polyéthylène		960	100 000			3 000		

I.3.2.2 Architecture des fibres:

Les structures composites sont anisotropes. La plus part des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée [22]. Il existe différentes géométries et textures de renforts:

- **Les unidirectionnels (1D)** : fibres assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres (employés pour la reprise d'effort dans le sens des fibres).
- **Toile ou taffetas** : bonne planéité et rigidité, mais les nombreux entrecroisements successifs imposent une longueur de fil importante.
- **Serge**: a une plus grande souplesse que la toile et une bonne densité de fils, ci-dessous un sergé 2/2 (employé pour les pièces difficiles à mettre en œuvre).
- **Satin** : Tissu souple et adapté pour surfaces complexes (employé pour de grandes résistances).
- **Mats** : Fibres coupées ou continues disposées aléatoirement suivant toutes les directions. Non compatibles avec les résines époxydes. Utilisés en naval (c

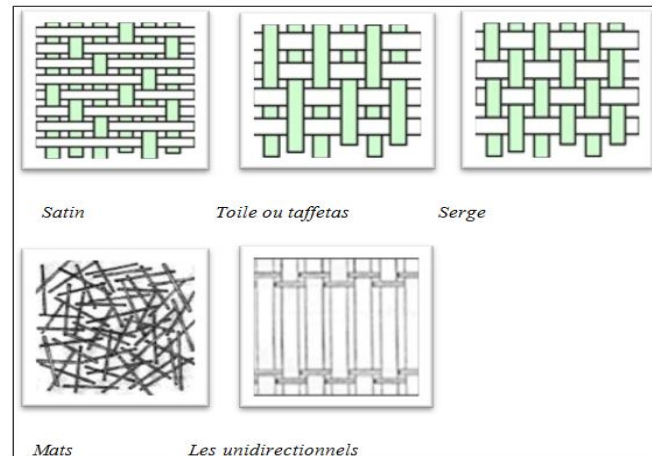


Figure I.4: Géométries des renforts

I.4 Classification des matériaux composites

Les composites peuvent être classés suivant la forme des constituants ou suivant la nature des constituants [23]

➤ Classification suivant la forme des constituants:

- **Composites à fibres** : les fibres sont soit continues, soit discontinues, les propriétés sont modifiées par : la nature des constituants, la proportion, l'orientation des fibres.
- **Composites à particules** : renfort sous forme de particules permet d'améliorer : rigidité, tenue à la température, diminution des retraits, résistance à l'abrasion.

➤ Classification suivant la nature des constituants

- **Les composites à matrice organique** : (papier, carton, panneau de fibre, plastiques renforcés). Et les constituants sont (résine/charge/fibre cellulosique, résine/fibre de bois, résines/microsphère).
- **Les composites à matrice minérale** : (béton, carbone, céramique), et comme constituants on a ciment/sable/granulats, fibre de carbone, fibre céramique.
- **Les composites à matrice métallique** : fibre de bore et fibre de carbone.

I.5 les structures composites

I.5.1. 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.3).

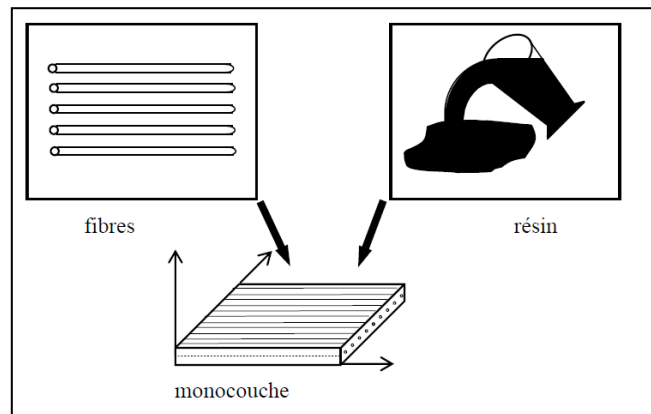


Figure I.5 : Constitution d'une structure composite monocouche

I.5.2 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 pli. 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.4 et I.5.

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

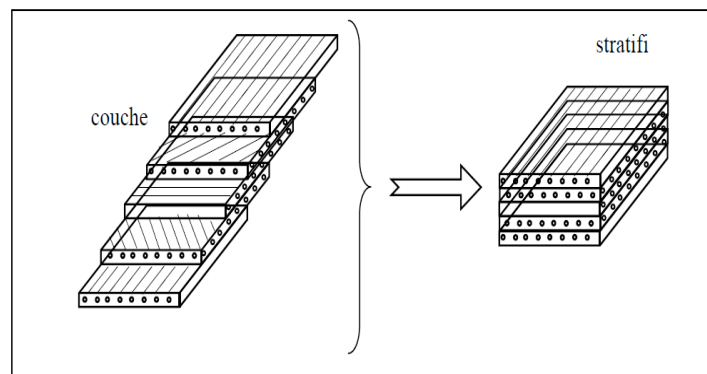


Figure I.6: Constitution d'un stratifié [1].

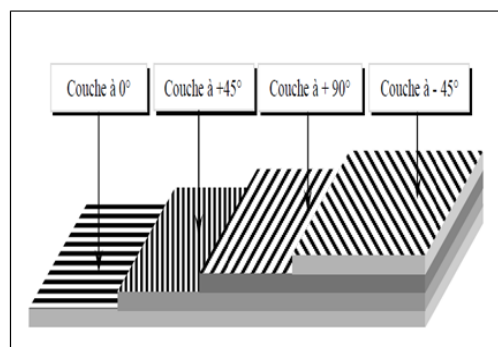


Figure I.7 : Désignation d'une structure composite stratifiée [1]

I.5.3 Les structures sandwichs

I.5.3.1 Structures sandwichs 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. Une telle structure présente des rapports résistance/masse et rigidité/masse très importants sous chargement de flexion.

I.5.3.2 Structures sandwich dissymétriques

A l'instar des structures sandwichs classiques constitués d'une âme placée entre deux semelles identiques, les structures sandwichs dissymétriques reposent sur une idée différente. Un sandwich dissymétrique est constitué d'une âme et de deux peaux différentes. Par rapport aux sandwichs symétriques, les sandwichs dissymétriques ne travaillent que dans leur plan et la peau travaillante reprend la majorité des flux d'efforts de traction/compression et de cisaillement.

Une autre différence fondamentale est que leur comportement non linéaire géométrique dû au décalage de la ligne moyenne par rapport au plan de chargement. Ce décalage induit un moment de flexion d'autant plus important que la flèche est élevée. On a ainsi un couplage effort/déplacement qui génère une réponse non-linéaire [6].

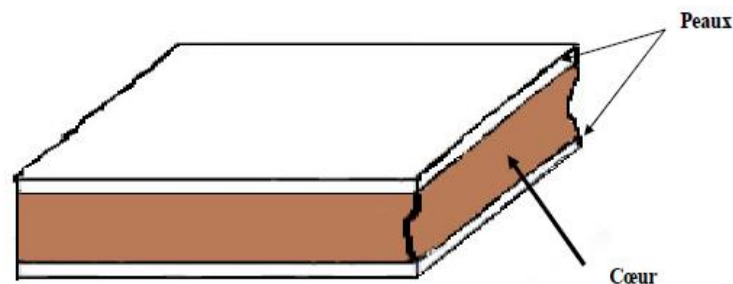


Figure I.8. Composite sandwichs. [1]

I.6. Les constituants des matériaux multicouches

I.6.1. L'âme

Le rôle principal de l'âme dans le matériau sandwich est de résister aux efforts de cisaillement. Par ailleurs, l'âme doit pouvoir supporter des charges localisées de poinçonnement. Dans les faits, c'est le constituant de l'âme qui permet de classer les différentes structures en matériau sandwich [7].

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 [8]. Parmi les âmes les plus utilisées, citons celles en mousse, en nid d'abeilles et en bois de balsa:

– *Les mousses* : ce sont les plus fréquemment utilisées, elles sont produites à partir de polychlorure de vinyle, polystyrène, polyuréthane ou d'autres polymères synthétiques. Elles sont thermo formables et permettent donc de réaliser des pièces de formes complexes. Leurs

propriétés mécaniques sont bonnes, elles adhèrent bien à la résine et absorbent peu d'eau. Néanmoins, leur point faible réside dans une faible résistance à l'impact.

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

– *Le nid d'abeilles* : l'âme en nid d'abeilles, connue sous le nom « Nida », est un matériau structural souple constitué de mailles hexagonales. Elle est réalisée à partir de différents matériaux comme par exemple le papier ou l'aluminium. Le Nida étant une structure anisotrope, ses propriétés varient selon le sens transversal ou longitudinal des alvéoles (taille de mailles). De plus, la taille de celles-ci, l'épaisseur des parois du Nida et la méthode de mise en œuvre sont des paramètres qui influencent la résistance au cisaillement transversal et longitudinal du Nida. Les variétés les plus courantes sont le Nomex et le Korex et sont fabriquées à partir du Kevlar [7].

I.6.2. Les peaux

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

I.6.3. L'adhésif

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.7 Avantages et inconvénients des matériaux composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à:

- Leurs légèretés
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants
- Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion:

- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte

L'industrie des matériaux composites doit donc aujourd'hui relever certains défis tels que :

- La maîtrise des émanations de produits organiques volatiles, par exemple le styrène
- La maîtrise des procédés de transformation et des performances des matériaux qui sous-entend une très bonne connaissance des constituants mis en place
- La mise en place de technologies et des filières pour la gestion des déchets en fin de vie qui est la partie la plus difficile à satisfaire en raison du caractère thermostable de la plupart des composites.

En plus dans ce dernier point, le recyclage est actuellement très limité parce que le broyage ou les autres procédés sont très coûteux et fournissent une matière de faible qualité. Ces quelques inconvénients et défis à relever, ont poussé les chercheurs et les pouvoirs publics à investir et orienter les recherches vers les ressources renouvelables et biodégradables [21].

I.8 Réparation du béton par des matériaux composites

Dans le souci d'assurer une bonne durabilité de la structure les chercheurs veillent à ce que la matrice béton et l'acier qui lui est associé gardent leurs performances (meilleure étanchéité, évitant la corrosion, limitation de la perte de rigidité, etc...) sous différentes sollicitations. Plusieurs techniques de réparation efficace et réhabilitation durable sont proposées pour reprendre les désordres structurels tels que le collage extérieur avec des matériaux composites appropriés. Cette méthode de collage est maintenant très couramment utilisée pour la réparation ou le renforcement des structures en béton.

I.8.1 principales méthodes de réparation de surfaces

Des méthodes des réparations des surfaces sont plus que nécessaires vu le fort coût de reconstruction de structures neuves, le développement de ces méthodes permettra de réparer les différents défauts possibles qui apparaissent pendant la durée de service des structures risquant ainsi de provoquer son effondrement.

I.8.1.1 réparation des fissures

Nombreuses sont les méthodes de réparation des fissures dans les structures. Certaines d'entre elles sont proposées particulièrement pour freiner et même arrêter la propagation des fissures dites actives tandis que d'autres méthodes sont proposées dans le cadre de la réparation des fissures dites stables. Il existe de nombreuses méthodes de réparation des fissures

Tableau I.2: technique de réparation des fissures.

Cicatrisation	Ajout d'armature
Injection	Scellement
- Injection de polymères	- Scellement flexible
- Injection de ciment portland	- Scellement par gravité
- Injection de résine [EL_H_98]	Couches de revêtement
Evidage et calfeutrage	Revêtement de matériaux composites
Calfeutrage par forage et blocage	Réparation par le collage des feuilles ou des
Agrafage	plaques en composites

I.8.1.2 Réparation par le collage de feuilles ou de plaque en composite

Le choix des matériaux à utiliser pour la réparation des structures doit se faire judicieusement, certaines propriétés des matériaux composites ont conduit le concepteur à les prendre en compte pour le renforcement et la réhabilitation des structures. Il est intéressant de pouvoir remplacer le renforcement traditionnel par des matériaux composites relativement inertes à l'oxydation. Les expériences menées jusqu'à présent utilisent des matériaux composites en fibre de verre, en fibre de carbone ou en fibre d'aramide. Les matériaux composites sont connus pour leur bonne rigidité, résistance mécanique, résistance à la corrosion.

I.9 Domaines d'application des matériaux composites

Les matériaux composites (à matrices métalliques, élastomères, polymères ou céramiques) offrent aux industriels et aux designers des possibilités nouvelles d'associer fonction, forme et matériaux, au sein de réalisations, matériaux, systèmes de plus en plus performants. Poids, anisotropie, plurifonctionnalité sont autant d'atouts de principe. Des processus nouveaux de conception, d'industrialisation et de fabrication permettent d'étendre les possibilités techniques, et de mieux satisfaire des besoins parfois contradictoires (poids, fonctions...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement. La compétition reste très dure entre les solutions composites et les matériaux classiques, disposant d'une avance considérable en termes d'expérience et d'investissement chez les producteurs et les utilisateurs. [10] En effet voici quelque exemple de secteurs d'application de composites:

I.9.1. Domaine du génie civil

L'introduction des matériaux composites dans le génie civil s'inscrit dans les nouvelles technologies les plus employées pour le renforcement ou la réparation des structures nouvellement construites ou ayant déjà servies et d'améliorer leurs comportement mécanique. En effet les techniques de renforcement et le choix des matériaux qui répondent mieux aux

sollicitations auxquelles les structures sont soumises, sont des atouts très importants pour une bonne conception (résistance, durabilité, économie,...)

➤ **Utilisation des barres de FRP la fabrication des poutres en béton armé**

Un plastique renforcé de fibres FRP consiste en deux ou plusieurs matériaux distincts combinés à l'échelle macroscopique afin de produire un produit possédant des caractéristiques qui dépassent celle de leurs composantes seules. Un FRP est une combinaison de fibres à haute résistance (les fibres de verre, de carbone et d'aramide sont les plus utilisés) dans une matrice (polyester, vinylester, époxy ou autre). Le matériau ainsi obtenu est hétérogène et anisotrope. Les fibres donnent la résistance mécanique alors que la matrice unit les fibres, les protège et transfère les charges aux fibres par cisaillement.

➤ **Utilisation de barre de FRP pour des ancrages souterrains.**

De nombreux ouvrages géotechniques ont besoin d'un système d'ancrage souterrain pour soutenir une structure, comme pour les murs de soutènement ou bien pour d'autres ouvrages de stabilisation des sols. Le principe derrière l'utilisation de ces ancrages est de retenir la structure en créant une contrainte entre l'extrémité de l'ancrage et le sol. On utilise des barres de précontrainte en acier comme dans les poutres, mais le même problème de corrosion persiste. L'utilisation de câbles en FRP a su démontrer les performances de ce matériau dans un milieu corrosif.

➤ **Réhabilitation des colonnes**

Les colonnes qui forment les structures ouvertes (ponts, parkings) sont très affectées par les conditions environnementales. Le béton de recouvrement est souvent fissuré par les cycles de gel-dégel, sans compter la participation des agents de déglacage qui ont pour effet d'accélérer le processus. Le plus fréquemment, on enlève la couche de béton fissurée puis on la remplace par un mortier et la réparation s'arrête là, mais ces techniques ne permettent pas d'éliminer le processus d'infiltration d'eau par les parois pour protéger les armatures. La technique de renforcement, propre aux colonnes en béton armé, consiste à envelopper ces colonnes de feuilles de FRP. Les fibres sont placées dans la direction circonférentielle (voir figure 1.3).



Figure I.9: Confinement de colonnes de ponts par matériaux composite [3]

➤ Réhabilitation des murs

Seulement quelques cas d'application de matériaux composites destinés au renforcement de murs ont été publiés. Le plus documenté d'entre eux concerne un immeuble à appartement de six étages à Zurich, en Suisse [LAP 99]. Étant donné que le bâtiment a été construit en 1930 et converti en bâtiment à bureau avec certaines modifications au niveau de son système de résistance latérale, le système structural a donc été réévalué. Parmi ces changements, des murs en maçonnerie non renforcée conçus pour les charges sismiques ont été enlevés, et ceux restant devaient prendre une charge beaucoup plus grande. L'utilisation des matériaux composites s'avérait donc très utile. On a collé des plaques de fibres de carbone en forme de X pour chacun des étages. Un système d'ancrage avec des tiges d'acier a servi pour améliorer l'adhésion entre les fibres et le mur. Avec les composites, la ductilité du mur a été augmentée à un coût relativement faible et dans des délais très raisonnables.



Figure I.10 : Réhabilitation d'un mur en maçonnerie (Suisse) [26]

➤ Réhabilitation des dalles

L'utilisation de composites en bandes peut aussi améliorer la résistance en flexion de dalles en béton armé. Leurs légèreté et flexibilité s'avèrent efficace, la réparation ou le renforcement peuvent se réaliser dans un délai de temps très court, avec très peu d'embarras et un espace de travail limité



Figure I.11 : Renforcement d'une dalle de pont [3]

En Algérie, on recense un seul cas de renforcement de dalle, fait à l'usine LPA de Boudouaou près de Boumerdes en 2001.

➤ Réhabilitation des poutres

Le renforcement des poutres par matériaux composites a connu une percée au cours de la dernière décennie, en réponse aux problèmes rencontrés avec l'usage de plaque d'acier. On peut effectuer avec les FRP un renforcement en flexion en collant les bandes sur la surface inférieure de la poutre. Un renforcement en cisaillement peut être apporté par le collage des bandes sur les joues de ces mêmes poutres. En Algérie, le premier cas d'utilisation de ces produits a été le renforcement des consoles en béton armé du stade de la ville de Tlemcen 1999 [SIK 03]. Depuis cette réparation, de nombreux autres cas d'utilisation de composite sont répertoriés (pont d'Hydra, pont de Oued Larbaâ, Pont Blanc d'El Harrach, etc.). Le cas du pont Blanc, situé à El Harrach, Alger, présente un des premiers exemples concrets de l'utilisation à grande échelle des composites pour le renforcement des ponts en Algérie.



Figure I.12 : Réhabilitation du Banc d'El Harrach, Alger (photo CTC\Est)
a) Renforcement en flexion, b) Renforcement en cisaillement



Figure I.13: Renforcement ou réparation de structures en béton armé par collage de matériaux composites [24].

Il existe principalement deux méthodes pour la mise en œuvre des renforts composites et leurs installations sur ouvrage: [25]

- La première technique consiste à imprégner des tissus de fibres souples au moyen d'une résine époxy liquide et à les placer sur la structure à renforcer. Il s'agit d'une stratification au contact, dans laquelle la résine joue à la fois le rôle de matrice du composite, et celui d'adhésif assurant la liaison entre le composite et le substrat béton.
- La seconde méthode consiste à utiliser des lamelles stratifiées rigides fabriquées en usine par le procédé de pultrusion (composites carbone/époxy). Ces lamelles sont collées sur la surface en béton au moyen d'un adhésif époxy de consistance pâteuse et polymérisable à température ambiante. Les lamelles rigides ne peuvent pas épouser les formes du support, cette technique est plutôt adaptée à des surfaces planes ou ayant de grands rayons de courbure.

I.9.2. Construction aéronautique

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. 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 I.14: Avion militaire Britannique en structure multicouche [11].

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[12] 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[13] 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 [14]

I.9.3. Construction automobile

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, comme le montrent les décisions récentes de grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) de développer des coffres et hayons. Les composites à matrice thermoplastique sont, par contre, de plus en plus fréquents. Les entreprises françaises de transformations de composites, notamment les deux leaders du marché de l'équipement automobile - Inoplast et Matra Automobile - devront profiter du rattrapage probable de l'Europe sur les Etats-Unis dans l'utilisation des composites dans l'automobile (estimée globalement à 113 kg par voiture aux Etats Unis contre 30 kg en Europe).[10]

I.9.4. Loisirs et sports

Les constructeurs de matériels de sport et loisirs ont depuis longtemps adopté les composites, développés notamment par Shappe Technique et Ems Chimie (Suisse); ces nouveaux matériaux leur ont permis de faire preuve d'une grande créativité, tout en présentant des propriétés mécaniques intéressantes qui ont, dans une large mesure, été à l'origine du développement récent des sports de glisse modernes. L'environnement présente également un fort potentiel de débouchés pour les composites à matrices organiques, comme le démontrent les initiatives récentes du Pôle de plasturgie de l'Est de développer des matériaux composites pour leur équipement de traitement des eaux.[10]

I.10.Comportement mécanique des multicouches

Comme on l'a vu précédemment, on constate une progression importante dans l'emploi des matériaux composite dans des domaines aussi divers que l'aéronautique, l'automobile, le sport et les loisirs. Parmi les matériaux composites les plus utilisés, on peut citer les matériaux sandwichs. Les structures sandwichs occupent un large créneau dans la construction des pièces composites. L'objectif de cette partie est de mettre en évidence leurs comportements vis-à-vis de différentes sollicitations mécaniques.

Un sandwich peut être soumis aux sollicitations suivantes:

- un moment de flexion M ,
- un effort normal N ,
- un effort tranchant T .

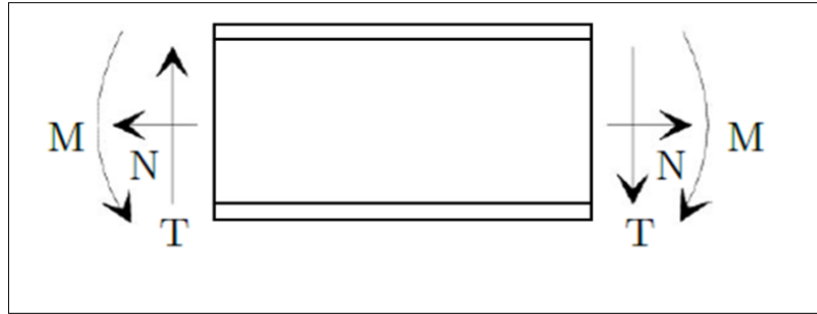


Figure I.15: Sollicitations mécaniques.

I.10.1 Comportement mécanique des multicouches en flexion

I.10.1.1 Flexion en trois points:

La flexion en trois points est 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 [15].

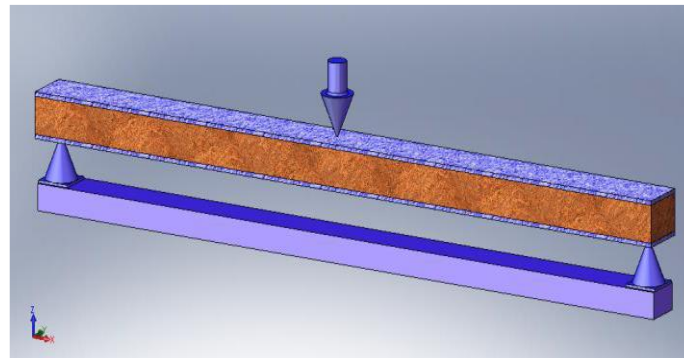


Figure I.16: Flexion 3 points [17]

Lorsqu'on augmente progressivement la charge sans dépasser la limite de résistance pratique, la poutre se déforme suivant une flèche déterminée selon la nature des composants constituant de la poutre. Les essais de flexion 3 et 4 points sont effectués sur une machine universelle de type *Instron 8561* équipée d'un capteur de 10 kN. La vitesse d'avance est de 2 mm/mn. L'acquisition des données est réalisée à l'aide d'un logiciel qui enregistre le déplacement en fonction de la force.

I.10.1.2 Flexion en quatre points:

Dans ce cas on utilise les mêmes appuis simples, mais on applique deux charges au lieu d'une seule charge concentrée.

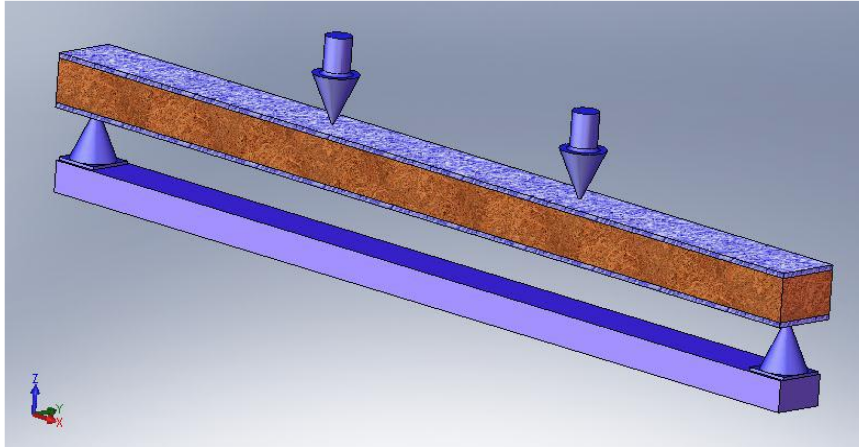


Figure I.17: Flexion 4 points [17]

Lorsqu'on augmente progressivement la charge sans dépasser la limite de résistance pratique la poutre se déforme suivant une flèche déterminée selon la nature des composants constituant de la poutre. Cet essai s'effectue sur la même machine que la flexion trois points. La flexion 4 points permet en particulier de créer un moment de flexion pur dans la zone c

I .10.2. Comportement mécanique des multicouches en flambement

Le 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 (passage d'un état de compression à un état de flexion). on distingue quatre type de comportement suivant le montage et les liaisons utilisées pour cette expérience. 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]

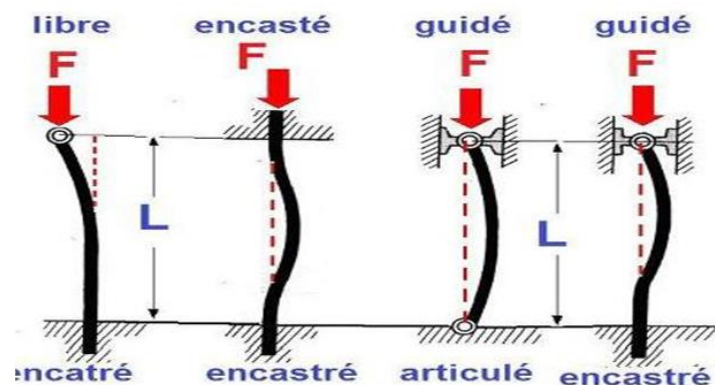


Figure I.18: Flambement d'une poutre [18]

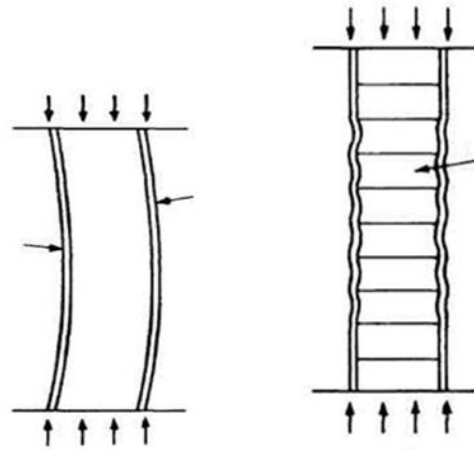


Figure I.19:Flambement généralisé des peaux et flambement localisé des peaux [17].

I.11 Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes attachés à présenter et à définir les notions liées aux matériaux composites structuraux. Dans un premier lieu nous avons présentés l'architecture des matériaux composites multicouche ainsi que leurs constituants et leurs intérêts dans divers domaines. En deuxième lieu nous nous sommes intéressés de présenter le comportement mécanique des multicouches vis-à-vis de la flexion et le flambement.

Bien que généralement conçues pour être soumises à des efforts en flexion, les structures sandwichs le sont aussi pour répondre à d'autres exigences, comme l'isolation thermique, etc. Le choix du type de sandwich dépend surtout de son application.

Cependant, ce genre de structures n'est pas le meilleur en termes de stabilité. Le phénomène de flambement est la cause principale des instabilités locales et globales des structures sandwichs. De nombreuses études sont menées dans l'objectif de remédier à ce problème et augmenter la performance des matériaux sandwichs.

II.1. Introduction

On a cherché depuis longtemps à renforcer les matériaux de construction fragiles à l'aide de fibres de différentes natures, Citons par exemple, les briques en terres armées de pailles, le mortier de chaux armé de poils d'animaux, le plâtre armé de fillasse, le ciment renforcé de fibres d'amiantes, etc. En rappelant que l'état fragile des matériaux correspond à une faible résistance à la traction, une faible énergie de rupture ou une faible plasticité en compression ou en traction. Des fibres de toute nature ont été expérimentées dans le renforcement des matériaux. Les plus répondues sont: l'amiante, le verre, l'acier, le plastique (nylon et polypropylène), le carbone, et les fibres végétales [31].

Actuellement le monde connaît de récents développements dans le domaine de renforcement du ciment et béton avec des fibres végétales. Suite aux problèmes de santé posés par les fibres d'amiante, plusieurs axes de recherches sont orientés vers la substitution de celles-ci par les fibres végétales. Le faible coût et les propriétés mécaniques spécifiques élevées (résistance et rigidité) des fibres végétales sont des avantages essentiels. Au contraire, leur propension à absorber de l'eau en grande quantité et leur faible tenue en température tendent à les dévaloriser [32].

II.2. Définition de la fibre végétale

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [34].

II.3. Différents types de fibres

Les différentes fibres actuellement disponibles peuvent être classées selon leur origine en trois grandes familles de fibres :

- Fibres naturelles minérales et végétales: amiante, cellulose;
- Fibres synthétiques d'origine minérale: verre, carbone, fibres métalliques
- Fibres synthétiques organique: polyamides, polypropylène, acrylique, kevlar, aramide.

Les fibres naturelles sont classées généralement en fonction de leurs origines : Animale, végétale et minérale. Les fibres d'origine végétale sont constituées majoritairement de cellulose et possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles d'origine animale. Ces dernières, telles que la laine et la soie, sont largement utilisées dans le domaine du textile Les fibres d'origines végétales peuvent être classées en sous familles selon d'où elles ont été extraites ; graines, fruits, écorce, feuilles, bois, tiges ou canne [35].

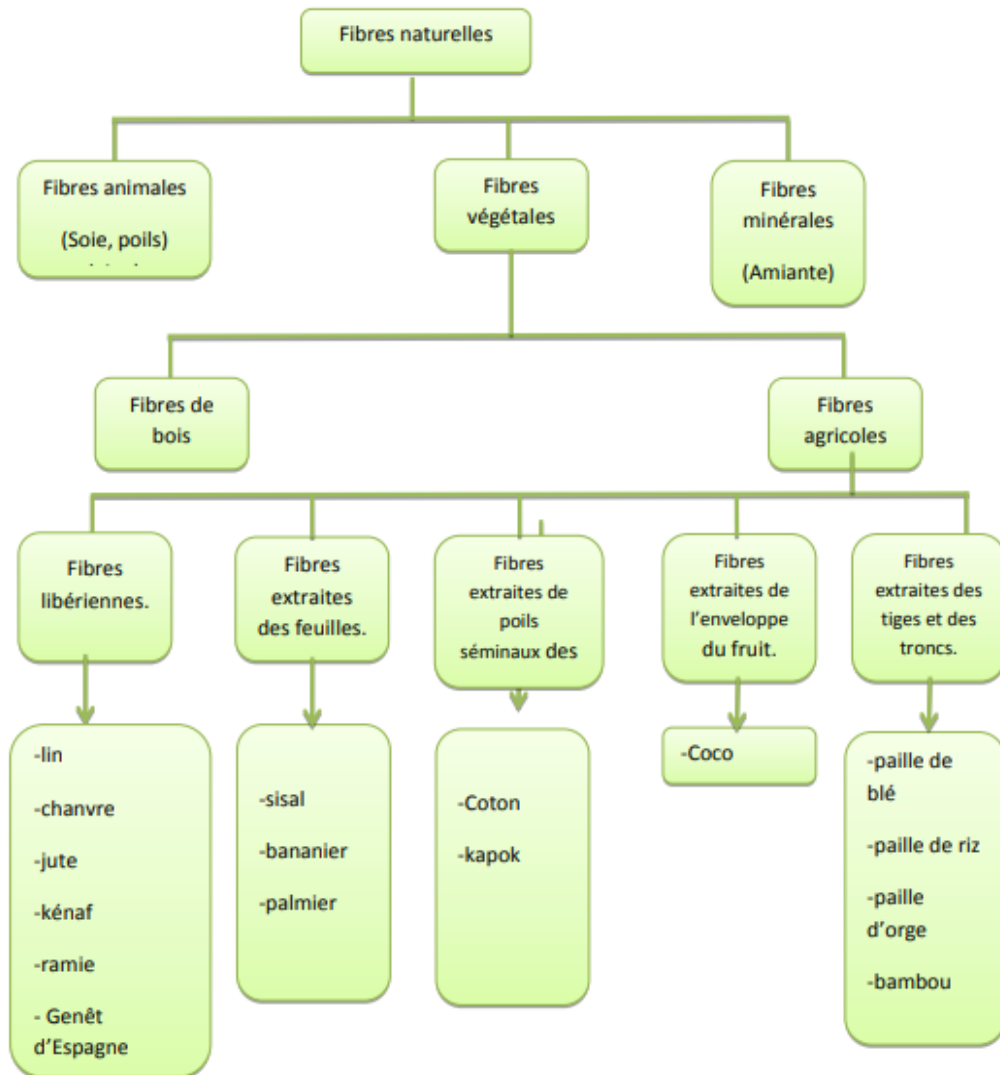


Figure II.1 : Organigramme des différents types de fibres naturelles. [69]

II.4. Fibres végétales

La principale fibre végétale est la cellulose qui résiste aux alcalis. Les fibres végétales, résistent aussi à la plupart des acides organiques, mais sont détruites par les acides minéraux forts. Il existe quatre sortes de fibres végétales: les fibres provenant des poils, les fibres du liber, et les fibres extraites des troncs de certaines graminées. Elles sont souvent utilisées dans la fabrication du papier et dans les panneaux de construction [36].

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres:

- ❖ Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (Kénaf , jute, lin, ramie), et de feuilles (Sisal, abace , paille de graminée) [33].
- ❖ Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigide provenant de matériels

ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) [34].

- ❖ Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libérienne, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine. et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues [33].

Les fibres végétales sont principalement composées d'hémicellulose, de pectine et de cellulose, ce dernier constituant est le seul à présenter une forme cristalline conférant à la fibre des propriétés thermomécaniques intéressantes.

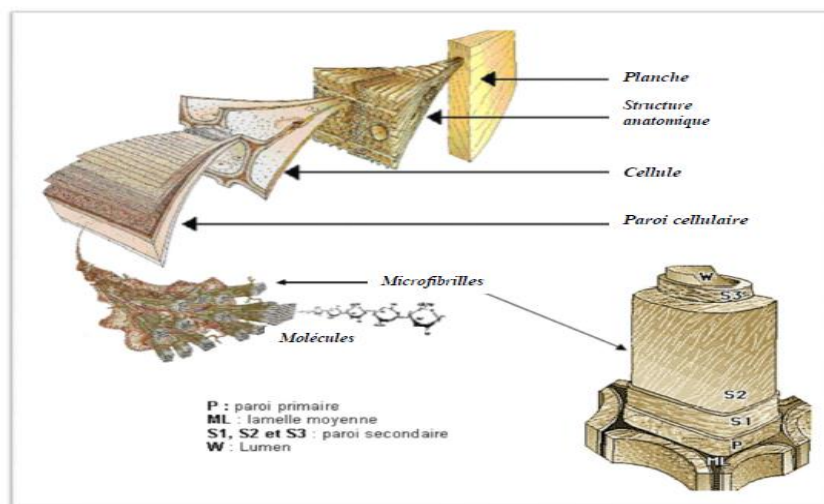


Figure II.2 : Structure des fibres de bois (observations multi échelles: d'après Harrington, 1998) [50]

La lamelle mitoyenne M d'épaisseur de 0.5 à 2 μm en périphérie qui est commune aux cellules voisines. Elle est composée principalement de lignine (70%) associée à d'autres composés organiques tels les hémicelluloses, la pectine, la cellulose. La lamelle mitoyennes ou de les fibres les unes aux autres et leur confère une grande rigidité grâce à la présence de la lignine.

- La paroi secondaire, principale partie de la fibre comprend trois parties distinctes :

- La paroi externe S1 mince (0.1 à 0.2 μm) dans laquelle les fibrilles sont enroulées en hélices parallèles, de sens opposés (une couche dans un sens, l'autre couche croisée).
- La paroi centrale S2, de beaucoup la plus épaisse (0.5 à 8 μm). Les fibrilles sont disposées en hélices parallèles, la rigidité de la fibre dépend de l'épaisseur de cette paroi.

- La paroi interne S3 (appelée paroi tertiaire) ; mince (0.04 à 0.1 μm). Entre les fibres, il existe des espaces qui sont partiellement composés de lignine et d'hémicelluloses.

Les parois sont constituées de micro fibrilles de cellulose qui sont les éléments de base des fibres végétales (64 à 85% en masse [39] [40]). Elles peuvent être considérées comme des couches composites renforcées par des micro fibrilles arrangées de manière hélicoïdale, dans une matrice amorphe composée de pectine. L'interface entre les couches est constituée d'hémicelluloses [41] [42]. L'orientation des micro fibrilles au sein des parois cellulaires confère aux fibres végétales les caractéristiques structurales les plus importantes. Leur inclinaison par rapport à l'axe de la fibre influe fortement sur les propriétés mécaniques de cette dernière [43] [44]. Plus l'angle d'inclinaison est faible et meilleures sont les caractéristiques mécaniques car les micro fibrilles de cellulose tendent à être sollicités suivant leur axe. A ce titre, on peut remarquer que parmi toutes les couches, celle notée S2 est la plus épaisse et possède les micro fibrilles ayant l'inclinaison la plus faible (Figure II.2). Il en résulte que cette couche confère à la fibre l'essentiel de sa rigidité et sa résistance. L'angle micro fibrillaire est mesuré entre 6 et 11° selon [45-49].

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale (Figure II.3) [37].

La fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire qui découle de celle de la porosité des fibrilles [38].

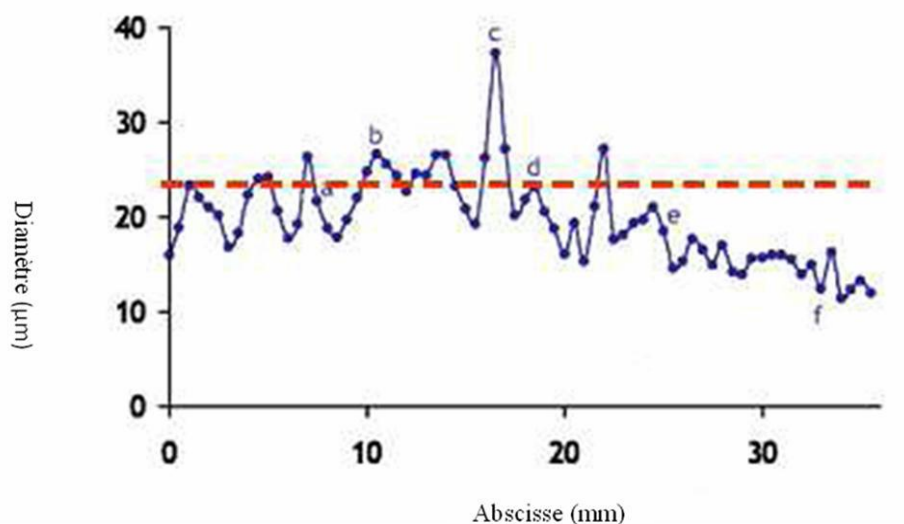


Figure II.3: Variation du diamètre le long de la fibre de lin [37]

La morphologie des fibres végétales peut constituer une donnée importante pour bien appréhender les transferts de contrainte aux interfaces fibre-matrice.

La figure II.4 présente à titre d'exemple la structure torsadée d'une fibre de coton. D'autres fibres ont des morphologies, encore plus tourmentées. La géométrie des fibres végétales est donc un problème important et difficilement surmontable pour ce qui concerne la micromécanique des composites renforcée par de telles fibres [36]

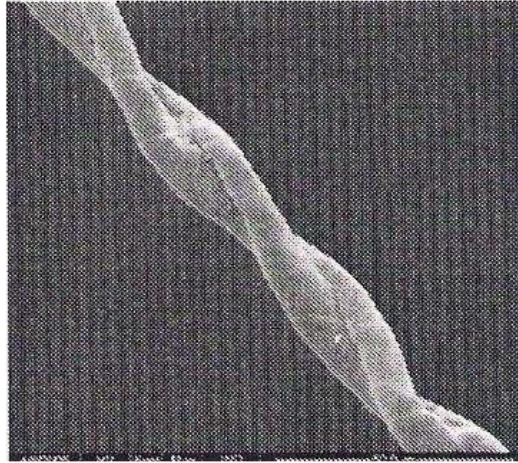


Figure II.4: Photographie en microscopie électronique à balayage d'une fibre de coton [32]

II.5. Composition chimique des fibres végétales

La biomasse végétale est constituée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de la paroi végétale. Comme nous l'avons vu précédemment les composées les plus majoritaire sont la cellulose, l'hémicellulose les pectines et les lignines. Ces différents constituants sont agencés de manière très complexe

Dans le bois, la cellulose est concentrée à l'intérieur de la fibre. Les parois extérieures de la fibre sont composées principalement de lignines et d'hémicelluloses et les lamelles de jonction inter fibres sont composées presque uniquement de lignine. Un réseau supplémentaire de pectines (polymères de polysaccharides acides) augmente la complexité de la matrice. Le réseau polysaccharidique peut également être solidifié par un réseau secondaire de protéines HRGP (Hydroxyproline Rich Glyco Proteins).

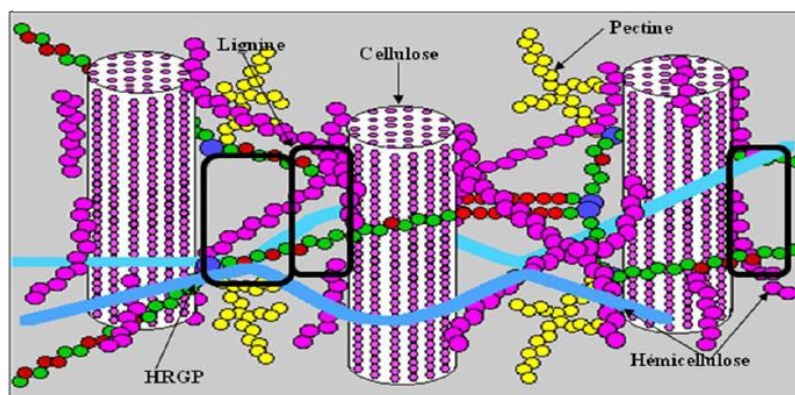


Figure II.5 : Représentation schématique d'une fibre de bois [60].

II.5.1. Cellulose

La cellulose est le constituant principal de la masse végétale. Ce polymère linéaire de glucose présente est à l'état presque pur (>90%) dans la fibre de coton. Il est aussi, avec de la lignine, l'un des constituant essentielle du bois (50%) [61]. Selon Willtatter et Zechmeister (1913) la formule brute exacte de cette macromolécule est $(C_6H_{10}O_5)_n$. Elle est composée des unités de D-anhydrocopyranos reliées entre elle par des liaisons β 1-4. L'unité répétitive est le cellobiose (deux glucoses réunis). Ces unités élémentaires s'associent par paquet pour former les micros fibrilles [62]

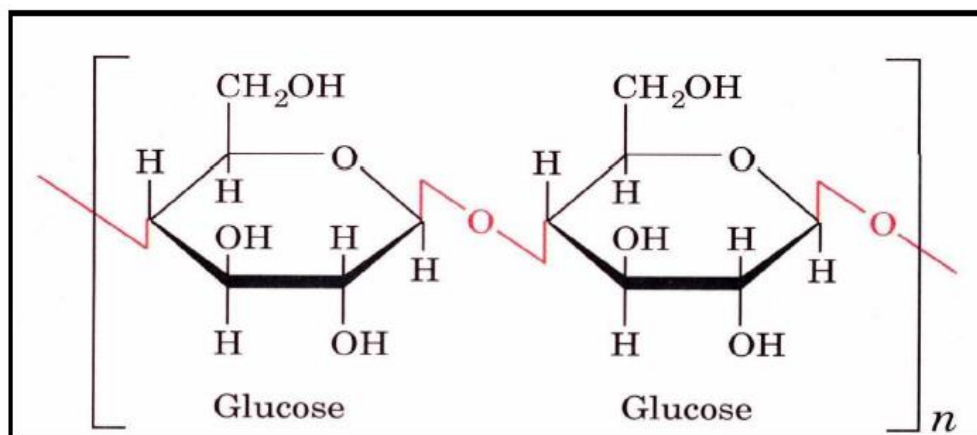


Figure II.6 : Représentation de la chaîne de cellulose [44].

Le nombre de maillons D-glucopyranose (n), appelé degré de polymérisation (DP) n'est pas connu dans la cellulose native. De plus, il est toujours exprimé comme une moyenne puisque dans la plupart des échantillons, il y a une large distribution de masse moléculaire. Il diffère énormément selon l'origine de la cellulose, il est d'environ 26500 dans l'algue valonia 9000 dans le chanvre et dans le lin, et de l'ordre de 8000 pour l'épicéa [45].

La diffraction des rayons X par les monocristaux de la cellulose a permis d'établir que deux motifs β -D-glucopyranosyles adjacents ne sont pas dans le même plan moyen. Ceci est dû aux liaisons hydrogène intramoléculaires entre l'oxygène hétérocyclique et l'hydrogène du groupement hydroxyle fixée sur le carbone 3', ainsi la dimension de l'unité cellobiose est toujours de $10.3\text{\AA}$.

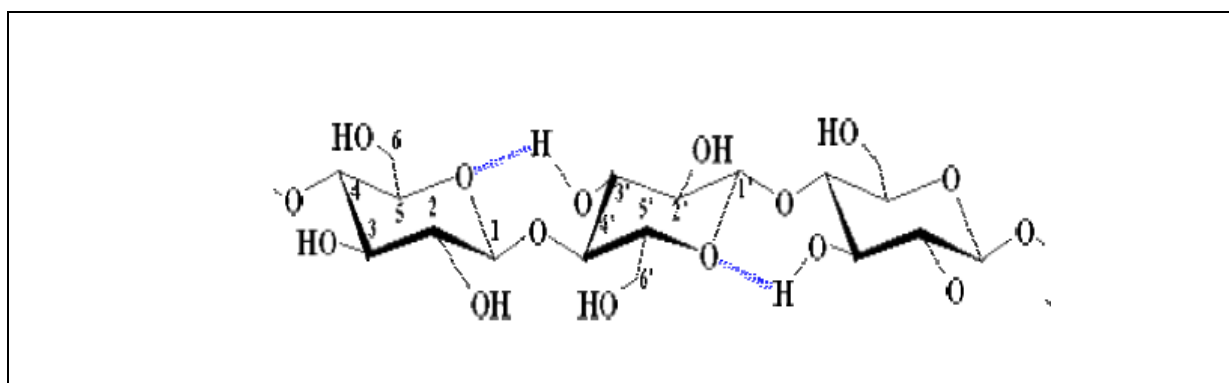


Figure II.7 : Liaisons hydrogène O - H-3' intramoléculaires [45].

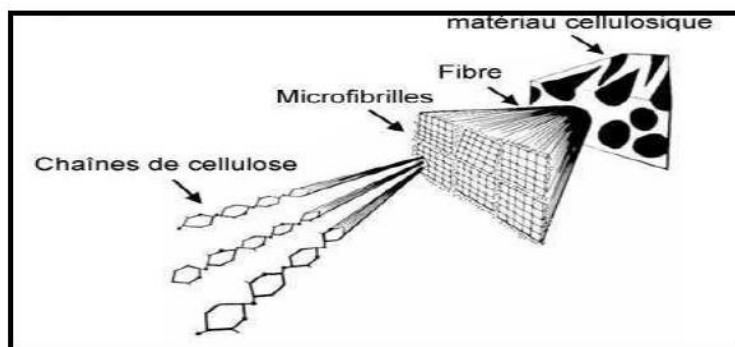


Figure II.8 : Représentation schématique de la hiérarchie de structure dans une fibre cellulosique [64].

Dans la cellulose pure, la structure moléculaire est presque parfaitement régulière car elle ne contient de défauts que dans une unité sur mille environ. Le centre de ces micros fibrilles est très cristallin tandis que les chaînes de surface sont de nature plus désordonnées et constituent des zones para cristallines. Ces zones, ainsi que les défauts de cristallinité qui surviennent lors de la biosynthèse de la cellulose forment la phase amorphe de la cellulose. Donc les micros fibrilles de cellulose sont constituées de zones cristallines parfaitement ordonnées et de zones amorphes, au contraire, totalement désordonnées [64].

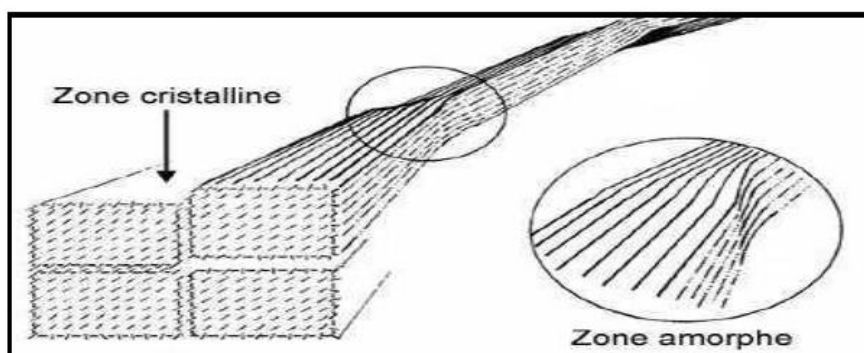


Figure II.9 : Représentation schématique de l'alternance des zones cristallines et désorganisées le long d'une microfibrille [64].

II.5.2. Hémicelluloses

On désigne par hémicellulose tout polysaccharide soluble dans l'eau et pouvant être extrait de la paroi des cellules végétales par des solutions acides. Les hémicelluloses sont une classe de polymères très variés (de nombreux monomères et de nombreux branchements différents). Elles sont donc assez mal définies. Dans leurs états naturels, leur structure est fonction de l'espèce végétale. Elles ont un degré de polymérisation compris entre 200 et 300. La figure II.11 montre les unités mono saccharidiques les plus représentatives des différentes familles d'hémicelluloses. Ce sont des polysaccharides dont la chaîne principale linéaire est constituée respectivement de xylose, de mannose et de galactose [65].

II.5.3 Pectines

Les pectines jouent un rôle capital dans l'architecture de la paroi végétale. Ces substances pectiques sont présentes avec des proportions variées dans la plupart des végétaux (environ 1% dans le bois). Elles jouent le rôle de ciment intercellulaire et contribuent à la cohésion des tissus végétaux [66].

Sur le plan structural, les pectines sont une famille de polysaccharides complexes qui contiennent un enchaînement d'unités d'acide α -D-galacturonique liées entre elles par des liaisons α (1-4), interrompu par la présence d'unités L- rhamnopyranose.

Les pectines portent aussi des substances non sucrées, essentiellement le méthanol, l'acide acétique, l'acide phénolique et parfois des groupes d'amide. L'estérification des résidus d'acide galacturonique avec le méthanol ou l'acide acétique est une caractéristique qui joue un rôle très important sur les propriétés physicochimiques des pectines particulièrement sur la formation de gel [67].

II.5.4 Lignine

La lignine est après la cellulose, la matière organique renouvelable et la plus abondante à la surface terrestre. La lignine originelle ou "protolignine" constitue la plus importante fraction non saccharique des fibres végétales. C'est la matière "incrustante" de la cellulose. La lignine est constituée de polymères phénoliques tridimensionnels, amorphes possédant trois unités différentes de type pénylopropane : les alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique [68].

Parce qu'il est impossible d'isoler la lignine native du bois sans la dégrader, sa masse moléculaire reste encore inconnue. Nous pouvons trouver des masses moléculaires approximatives dont les valeurs moyennes sont de 5000 à 10000 g/mol pour les bois durs (des feuillus), et de 20000 g/mol pour les bois tendres (des Résineux). La figure. II. 10 présente les motifs élémentaires de la lignine.

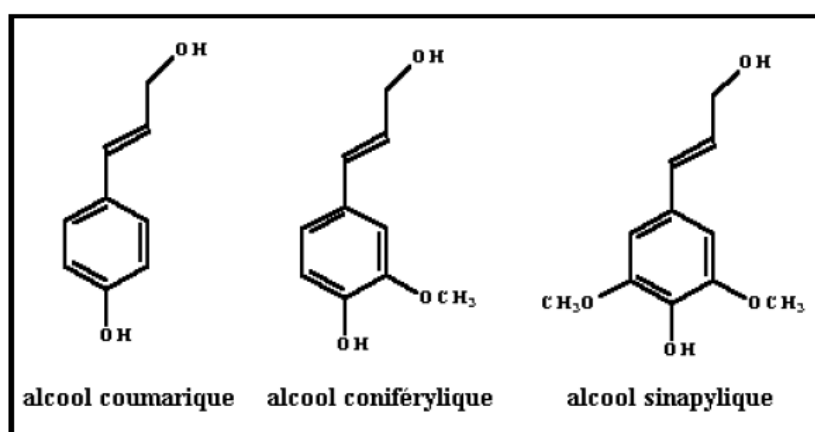


Figure II.10 : Motifs élémentaires de la lignine [60].

La lignine est peu sensible à la dégradation biologique et contribue à la protection naturelle des végétaux contre certaines attaques parasitaires [60].

I.6. Propriétés mécaniques de la fibre végétale

Il est très difficile de présenter un tableau qui répertorie toutes les propriétés des fibres ligno cellulosiques. La grande variabilité constitutive et anatomique de la fibre végétale implique une variabilité de leurs propriétés mécaniques. La faiblesse de la masse volumique des fibres végétales (1,2 à 1,5 g/cm³) confère à ces matériaux des propriétés mécaniques spécifiques intéressantes. Les fibres longues ont des contraintes en traction plus faibles que les fibres courtes, du fait que les premières ont de plus grandes probabilités de contenir des défauts de formation.

La cellulose cristalline est l'un des polymères ayant un module d'élasticité relativement plus élevé (90-137 Gpa), comparé à celui de la fibre de verre qui est de 75 Gp. Ainsi un index de cristallinité de la cellulose d'une fibre élevé est indicateur de propriétés mécaniques élevées. Les fréquents défauts structuraux (Fig. N11) observés de la surface des fibres sont des conséquences de la grande variabilité de morphologie, de composition chimique, de structure et de comportement mécanique spécifique de ces fibres.

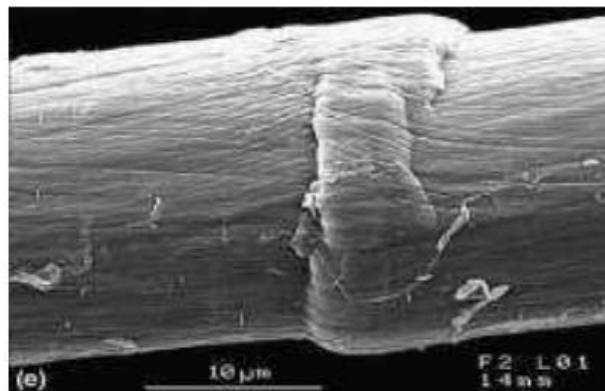


Figure II.11 : Exemple de défaut structural sur une fibre de lin [37]

L'angle micro fibrillaire explique en partie la déformation élastique de la fibre végétale et dès lors son allongement à la rupture en traction. En effet, sous l'action de forces de traction relativement faibles, la fibre ligno cellulosique subit une déformation réversible du fait de l'alignement progressif des micros fibrilles cellulosiques avec l'axe de la fibre et une déformation élasto-viscoplastique des polymères amorphes[37].

Si la sollicitation de la fibre est plus forte, la déformation de celle-ci entre dans une phase irréversible qui peut se poursuivre jusqu'à la rupture. Un angle micro fibrillaire élevé suppose une déformation élastique plus importante pour une sollicitation de la fibre en traction faible [47]. Le tableau II. 1 ci-dessous présente les propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec certaines fibres de renforcement convention.

Tableau II.1 : Propriétés mécaniques des fibres naturelles en comparaison avec des fibres de renforcement conventionnelles [31].

Fibre	Densité (g/cm ³)	Allongement(%)	Résistance à la traction (Mpa)	Module de Young (Gpa)
Coton	1.5-1.6	7.0 - 8.0	287–597	5.5-12.6
Jute	1.3	1.5 - 1.8	393–773	26.5
Lin	1.5	2.7 - 3.2	345–1035	27.6
Chanvre	–	1.6	690	–
Ramie	–	3.6-3.8	400–938	61.4-
Sisal	1.5	2.0 - 2.5	511–635	128 6.4-
Coco	1.2	30.0	175	22.0
Verre E	2.5	2.5	2000–3500	4.0-6.0
Verre S	2.5	2.8	4570	70.0
Aramide	1.4	3.3 - 3.7	3000–3150	86.0
Carbone	1.4	1.4 - 1.8	4000	63.0-67.0

II.6.1. Paramètres influençant les propriétés des fibres végétales

Plusieurs facteurs peuvent influencer les propriétés des fibres. On peut notamment distinguer l'influence des conditions : i) culturales de la plante pendant sa croissance (variété de semis, terrain, traitements phytosanitaires, engrais, maturité), ii) climatiques (saison, température, pluviométrie) et les étapes de l'élaboration (séchage, rouissage, teillage, filature ,traitements). Par ailleurs, la géométrie des fibres testées a une influence sur les propriétés. En effet, il apparaît que le module d'Young a tendance à diminuer avec le diamètre moyen [50] [51] [52] et la longueur [40] [53] de la fibre. Charlet [51] a rapporté que les fibres de lin, de la variété Hermès, localisées dans la zone médiane de la tige présentent, bien que de façon trèsdispersée, de meilleures propriétés mécaniques. [54]

Les paramètres extrinsèques, tels que les techniques d'extraction des fibres [40], les traitements chimiques [40], mécaniques [55] ou biologiques [56] ainsi que les réglages des paramètres des procédés, les conditions d'essai (humidité, température, vitesse de sollicitation), ou encore les méthodes d'analyses (déformation, section), sont autant de facteurs pouvant avoir une influence importante sur les résultats [55].

II.7. Exemples de fibres végétales

II.7.1. Lin

Le lin appartient à la famille des lénacées. C'est une plante annuelle dont la tige atteinte de 0.6 à 1.2 mm de hauteur pour un diamètre de 1 à 3 mm. Le lin textile est une culture septentrionale. En Europe, on le trouve en Russie, en Pologne, en Belgique et en France (principalement en Normandie). Le lin est soit coupé, soit arraché. On récupère la matière textile qui se trouve être la tige de la plante, sous forme de faisceaux qui constituent la fibre technique. Cela requiert trois opérations : le

rouissage, le teillage et le peignage. La cellule élémentaire (ou fibre ultime de lin apparaît comme un cylindre imparfait polygonal, généralement à six côtés, comportant éventuellement un lumen (cavité centrale d'une fibre végétale).

II.7.2. Ramie

La ramie (*bochnerianivea*) est un arbuscule de la famille des urticacées (en anglais Chinagrass). Elle se présente sous la forme d'une touffe formée de tiges d'environ 1,5 à 3 m de hauteur avec de grandes feuilles. L'extraction de la fibre nécessite un décortilage et un dégomunage très poussé. La cellule élémentaire, ressemblant davantage à celle du coton qu'à celle du lin, peut atteindre 17cm de longueur ; elle présente une concentration en cellulose importante, une haute et un degré de polymérisation élevé. Sa blancheur et son aspect soyeux la destinent à l'habillement.

II.7.3. Chanvre

Le chanvre (*canabis sativa*) est une plante annuelle dont la hauteur varie de 1 à 3 m. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe en France et en Italie. Le processus d'obtention de la fibre du chanvre est identique à celui du lin. La fibre ultime est moins régulière, plus aplatie et légèrement plus lignifiée que celle du lin

II.7.4. Coir de la noix de coco

Le cocotier (*Cocos nucifera*) est un palmier poussant dans les pays tropicaux. Les fibres sont prélevées dans le coir (mésocarpe fibre) de la noix de coco et sont utilisées en corderie et en sparterie (objet tissé, vanné ou tressé).

II.7.5. Jute

On distingue :

❖ Plante

"Jute" est le nom commun des plantes du genre *Corchorus*, plantes tropicales annuelles de la famille des Tiliaceae. Les deux principales espèces exploitées pour produire la fibre de jute sont *Corchorus Capsularis* et *Corchorus Olitorius*. Il s'agit d'une culture annuelle qui prend environ 120 jours pour arriver à maturité. Le jute prospère dans les terres tropicales situées à faible altitude et ayant un taux d'humidité compris entre 60 et 90 pour cent. C'est une culture pluviale peu gourmande en engrais et pesticides. Son rendement est d'environ deux tonnes de fibre sèche par hectare. C'est une plante de type herbacé dont la hauteur peut atteindre de 3 à 4m de hauteur et la tige fibreuse 1cm de diamètre. Les feuilles sont de 10 à 15cm de longueur et d'environ 5 cm de largeur les fleurs sont petites de couleur jaune.

Le berceau de leur culture se situe en Inde et au Bangladesh, dans les vallées du Gange et du Brahmapoutre. Ces deux pays rassemblent 80% des surfaces consacrées à cette culture. Elle est aussi cultivée au sud de l'Europe comme plante textile. En moyenne, l'Inde cultive 800 000 hectares le Bangladesh 650 000 hectares, et le reste du monde

260 000 hectares. La fibre représente environ 6% du poids de la masse verte. Les rendements sont en moyenne de 800 à 1600 kg/ha en Inde, avec des maximums de 2400kg/ha.



Figure II.12: Plante de jute Typique a, b et c fibres extraite de la tige de jute. [58]

❖ *La fibre*

Les vaisseaux de phloème situés sous l'écorce de la tige principale représentent la fibre de jute exploitable. Sa longueur va de 1 à 4 mètres et son diamètre de 17 à 20 microns. Elle est essentiellement composée de cellulose végétale et de lignine, qui sont respectivement les principaux composants de la fibre végétale et de la fibre de bois. Les méthodes de rouissage utilisées pour séparer l'écorce filamenteuse de la tige peuvent être biologiques ou chimiques, mais les premières sont plus répandues compte tenu du coût des produits chimiques. Le rouissage biologique englobe plusieurs techniques consistant à lier les tiges en faisceaux avant de les faire tremper afin de séparer plus facilement les fibres de la tige. Cette fibre naturelle d'aspect soyeux est surnommée « fibre d'or », en raison de ses reflets.

Le jute est une des fibres naturelles les moins chères, les plus longues et les plus utilisées. On le retrouve dans divers textiles. Il vient en deuxième position après le coton sur le plan de volumes produits comme de la diversité des usages.

❖ *La toile de jute*

Il existe plusieurs types de toiles de jute que l'on classe suivant leur grammage (Toile de jute forte: 400g, Toile de jute claire: 300g et Toile de jute très claire: 280g).

La production mondiale de jute et fibres apparentées a été de l'ordre de 3 millions de tonnes en 2012, dont l'Inde fournit 60 % et le Bangladesh 30 %. La plus grande partie de la fibre est transformée localement. Le tableau 1.2 représente la production de la fibre de jute entre 2011 et 2012 selon la FAO (Food and Agricultural Organization).

Tableau II.2 : Production en tonnes de fibre de jute 2011-2012 (données de la FAO).

Pays producteurs	Production en tonnes, données de la FAO STATISTIQUES			
	2011		2012	
Inde	1789000	65 %	1789000	65 %
Bangladesh	792000	29 %	800000	29 %
Chine	56000	2 %	68000	2 %
Birmanie	50000	2 %	50000	2 %
Autres pays	62747	2 %	66642	2 %
Total	2749747	100 %	2773642	100 %

Le principal exportateur de fibre brute est le Bangladesh, qui exporte environ 300 000 tonnes de jute par an. C'est aussi le premier exportateur de fibre transformée (fils de jute, sacs, tissus), avec 400 000 t, suivi par l'Inde avec 95 852 t.

Les principaux pays importateurs de fibre brute sont l'Inde (73 000 t), le Pakistan (74 000 t) et la Chine (60 000 t), tandis que la fibre transformée est expédiée principalement vers l'Europe et le moyen orient, avec, respectivement 250 000 t et 20 000 t.

II.7.6.Sisal

Les fibres du sisal sont issues de l'Agave sisalana, originaire du Mexique. Cette plante résistante pousse toute l'année dans des climats chauds et arides souvent impropres aux autres cultures. Elle s'accommode de la plupart des types de sols saufs ceux les sols argileux, très salins et humides. Sa culture est relativement simple car elle résiste bien aux maladies et nécessite comparativement peu d'intrants. Le sisal peut être récolté deux ans après avoir été planté et sa vie productive peut atteindre 12 ans. Chaque plante peut produire de 180 à 240 feuilles selon la situation géographique, l'altitude, la pluviométrie et la variété considérée.

**Figure II.13** : plante de sisal [59]

Même si le degré d'humidité des feuilles de sisal est de quelque 90 pour cent, elles sont rigides et leur pulpe charnue est très ferme. Les fibres, situées à l'intérieur des feuilles dans le sens de la longueur, sont plus abondantes vers la surface. Il faut donc défibrer immédiatement la récolte afin d'éviter de les abîmer durant le nettoyage. Pour ce faire, on gratte la pulpe, généralement à l'aide d'un procédé mécanique, mais aussi à la main. La production de sisal induit des pertes minimales en amont et aval de la récolte. Le rendement moyen en fibres séchées s'établit à une tonne par hectare. En Afrique de l'Est, ce chiffre peut atteindre quatre tonnes par hectare.

Le sisal est la ressource renouvelable par excellence et pourrait aider à relever le défi du changement climatique. Tout au long de son cycle de vie, il absorbe plus de dioxyde de carbone qu'il n'en produit. Au cours de la transformation, il génère principalement des déchets organiques et des résidus de feuilles qui peuvent être utilisés pour produire de la bioénergie et fabriquer des aliments pour animaux, des engrais et des logements écologiques; en fin de cycle, il est totalement biodégradable. Les fibres synthétiques ne possèdent aucune de ces caractéristiques. De surcroît, le sisal réduit l'érosion des sols en raison de ses profondes racines et contribue à une bonne gestion des bassins versants. Planté en haies, il constitue une barrière végétale efficace pour protéger les cultures et les forêts des prédateurs et des intrus.

Les applications du sisal sont très diverses:

- ❖ **Usages traditionnels** – Ficelles, cordes et fils, qui peuvent être utilisés pour fabriquer des tapis, des nattes et divers produits artisanaux. La concurrence exercée par les matières synthétiques a affaibli la demande de sisal pour ces usages. Cependant, la demande pour les fibres naturelles s'est renouvelée et le sisal devrait bénéficier de l'expansion de ces marchés à plus forte valeur ajoutée (papiers, composites de renforcements, composites plastiques).
- ❖ **Pâtes et papiers à base de sisal** – La biomasse du sisal contient une forte proportion de cellulose et sa pulpe peut donc être utilisée comme substitut de la fibre de bois pour épaissir le papier et le carton. Ses qualités d'absorption et sa résistance au pliage en font un intrant de qualité pour les produits de papier. Compte tenu de sa porosité, il peut notamment être utilisé dans les filtres des cigarettes et les sachets de thé.
- ❖ **Textiles** – Le sisal sert souvent à fabriquer les chiffons de polissage car il est assez solide pour polir l'acier et suffisamment doux pour ne pas le rayer. Renforcement des composites – Le sisal peut être utilisé en substitut ou en complément de la fibre de verre employée pour renforcer le plastique dans les automobiles, les bateaux, les meubles, les tuyaux et les réservoirs d'eau. Le sisal peut aussi renforcer les mélanges de ciment pour la construction de logements à bas coût et remplacer l'amiante dans les toitures et les plaquettes de frein. Il s'agit également d'un isolant et il peut se substituer au bois dans les panneaux de fibres.

- ❖ **Déchets du sisal** – Les sous-produits de l'extraction du sisal peuvent être utilisés pour fabriquer du biogaz, des ingrédients pharmaceutiques et du matériel de construction. La biomasse restant après le défibrage, qui peut représenter jusqu'à 98 pour cent de la plante, est rarement utilisée. Afin de valoriser économiquement ces résidus, qui représentent quelque 15 millions de tonnes par an, le Fonds commun pour les produits de base, l'ONUDI et l'industrie tanzanienne du sisal ont créé la première usine de traitement des résidus du sisal pour produire du biogaz, de l'électricité et des engrais. L'évaluation actuelle de l'usine indique que 75 pour cent de l'énergie produite pourrait être distribuée aux foyers ruraux et 25 pour cent utilisée pour transformer le sisal.

Le sisal est cultivé pour sa fibre dans plusieurs pays: Afrique du Sud, Angola, Brésil, Chine, Cuba, Haïti, Indonésie, Kenya, Madagascar, Mozambique, Mexique, Tanzanie et Thaïlande. Les modes de production varient d'un pays à l'autre. En Tanzanie et au Kenya, le sisal est essentiellement une culture de plantation, tandis qu'au Brésil, il est surtout cultivé artisanalement. La production mondiale de sisal et d'henequen (une fibre similaire issue d'une autre agave) est estimée à 300 000 tonnes, soit une valeur de 75 millions d'USD. Les principaux producteurs sont le Brésil (120 000 tonnes), la Tanzanie (30 000 tonnes) et le Kenya (25 000 tonnes). Le Brésil exporte près de 100 000 tonnes de fibre brute et de produits manufacturés, en particulier de la corde à destination des États-Unis. Le Kenya exporte environ 20 000 tonnes et la Tanzanie 15 000 tonnes. La Chine est un producteur et un consommateur important.

II.7.7 Utilisation des fibres végétales: avantages et inconvénients

Outre l'avantage direct de réduire l'impact négatif sur l'environnement au stade de la fabrication, un composite renforcé par des fibres naturelles peut également contribuer au respect de l'environnement durant la phase de production en plus de son poids réduit.

-Culture renouvelable,

- Culture non polluante : pas de traitements phytosanitaires (herbicides, fongicides),
- Bonne rentabilité économique pour les agriculteurs notamment dans les pays peu industrialisés.

Les fibres végétales constituent une alternative intéressante aux fibres de verre en raison de leur recyclabilité. Ces fibres présentent de nombreux avantages comme renfort de matériaux composites. En revanche, certains inconvénients peuvent être un frein au niveau du développement industriel. Les principaux avantages et inconvénients sont rassemblés dans le tableau ci-dessous

Tableau II.3 : Avantages et inconvénients des fibres naturels.

Avantages	Inconvénients
Faible cout	Absorption d'eau
Biodégradabilité	Faible stabilité dimensionnelle.
Neutre pour l'émission de CO ₂ .	Mauvaise tenue en vieillissement.
Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres.	Faible tenue thermique (200 à 230 °Cmax).
Pas de résidus après incinération.	Fibres anisotropes.
Ressource renouvelable	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, de la météo...
Demande peu d'énergie pour être Produite	Pour des applications industrielles.
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité).	Renfort discontinu.
Bonne isolation thermique et Acoustique	
Non abrasif pour les outillages	

II.8 Conclusion

Cette recherche bibliographique nous a permis d'orienter notre travail de recherche vers une proposition d'une nouvelle structure composite en panneau sandwich, constituée d'une âme à base d'une matrice mortier allégé par des fibres de sisal. Les semelles inférieures et supérieures sont confectionnées en tissu de jute 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 pour des contraintes mécaniques acceptables. 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 compression.

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.

III.2 présentation du logiciel Abaqus

III.2.1 Les Logiciels sur le marché.

Il faut savoir que les logiciels de conception et de calculs assistés par ordinateur sont très nombreux sur le marché. Les plus utilisés sont Nastran, Catia, ABAQUS et SolidWorks. Tous ces logiciels effectuent les mêmes tâches, c'est à dire qu'ils génèrent des structures, ses caractéristiques et celles du problème étudié ensuite ils calculent le devenir de cette structure (déformations, ruptures, plastification...). Ils permettent aussi de traiter ces résultats afin d'en sortir des données utilisables et exploitables. La plupart des entreprises utilisent un assortiment de ces logiciels qui sont plus ou moins performants dans l'une ou l'autre de ces tâches, par exemple, dessiner avec Catia, calculer avec Abaqus et faire du post traitement avec Nastran. Il vous sera donc certainement demandé dans le monde de l'entreprise une maîtrise de plusieurs de ces outils, d'où l'intérêt de s'intéresser au logiciel Abaqus.

III.2.2 Les caractéristiques du logiciel Abaqus

ABAQUS a été développé par Hibbit, Karlsson & Sorensen (HKS) (devenue ABAQUS, Inc depuis) depuis 30 ans et le début de la théorie des éléments finis et a été amélioré au fur et à mesure pour intégrer toutes les nouveautés de la théorie et des besoins de l'entreprise, jusqu'à ce que l'entreprise soit rachetée par Dassault industries en Octobre de l'année 2005.

ABAQUS est avant tout un logiciel de simulation par éléments finis de problèmes très variés en mécanique. Il est connu et répandu, en particulier pour ses traitements performants de problèmes non-linéaires. Le cœur du logiciel Abaqus est donc ce qu'on pourrait appeler son "moteur de calcul". À partir d'un fichier de données (caractérisé par le suffixe .inp), qui décrit l'ensemble du problème mécanique, le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier.odt. Deux tâches restent à accomplir : générer le fichier de données (cela s'appelle aussi effectuer le prétraitement), et exploiter les résultats contenus dans le

fichier.odb (ou post traitement). La structure du fichier de données peut se révéler rapidement complexe : elle doit contenir toutes les définitions géométriques, les descriptions des maillages, des matériaux, des chargements, etc..., suivant une syntaxe précise. Il faut savoir que le pré traitement et le post traitement peuvent être effectués par d'autres logiciels. Abaqus propose le module Abaqus CAE, interface graphique qui permet de gérer l'ensemble des opérations liées à la modélisation :

- La génération du fichier de données,
- Le lancement du calcul proprement dit,
- L'exploitation des résultats.

III.2.3 Bases de l'interface d'Abaqus

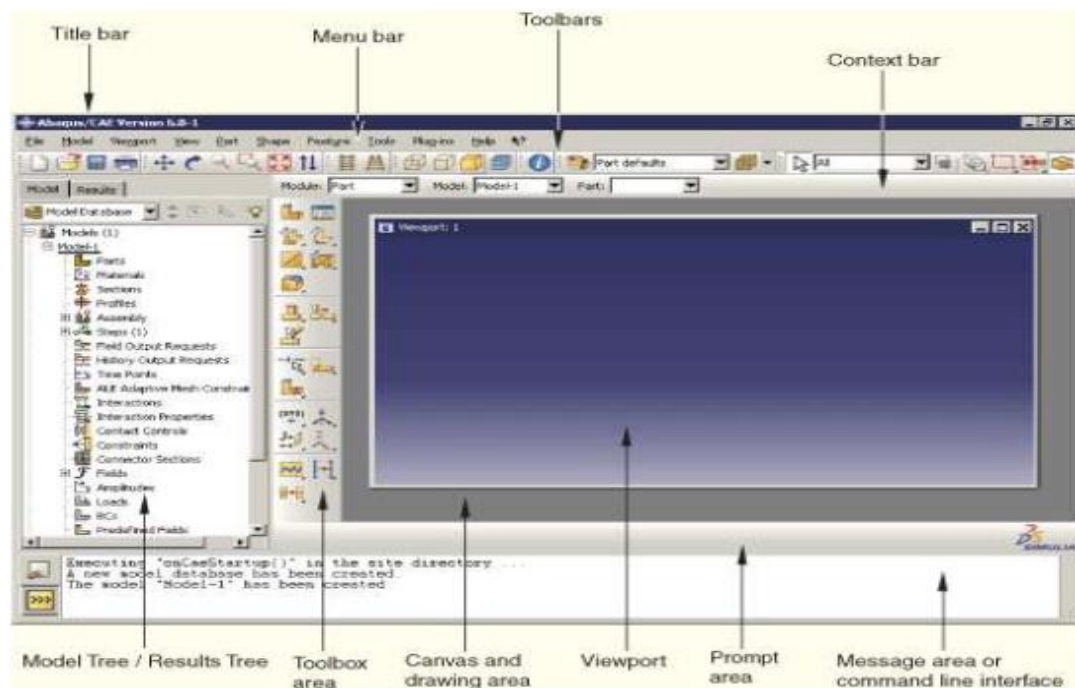


Figure III.1 :L'interface d'Abaqus.

- Organisation de l'interface

On retrouve dans l'interface les éléments essentiels suivants :

- la fenêtre d'affichage graphique
- une première barre de menus en haut : ces menus sont relatifs au module dans lequel on se trouve une deuxième barre horizontale d'outils : y sont disposées les icônes correspondant aux commandes les plus courantes, c'est-à-dire les commandes d'ouverture et de sauvegarde de fichiers, et les commandes réglant l'affichage des vues (perspective, ombrage, zoom, rotations, etc.)
- une troisième barre de menus déroulant permettant d'accéder aux autres modules, ou désélectionner le modèle ou la pièce sur lesquels on souhaite travailler. Plus important:

- on dispose à gauche d'une colonne d'icônes permettant d'accéder aux outils disponibles à l'intérieur du module dans lequel on se trouve.
- L'espace juste sous la fenêtre d'affichage graphique est celui dans lequel Abaqus vous parle : les messages affichés à cet endroit sont faits pour vous guider dans l'action que vous avez entreprise. Lisez-les, suivez-les attentivement, ils vous seront d'une grande aide.
- Enfin, une fenêtre en-dessous sur fond blanc est utilisée pour afficher des messages informatifs : réponses à des questions posées, avertissements liés à des problèmes rencontrés, etc.

III.2.4 Les Modules.

Abaqus CAE est divisé en unités fonctionnelles appelées modules. Chaque module contient les outils qui sont propres à une partie de la tâche de modélisation.

Le module « PART ».

Le module Part permet de créer tous les objets géométriques nécessaires à notre problème, soit en les dessinant dans Abaqus CAE, soit en les important d'un logiciel de dessin tiers.

Le module « PROPERTY ».

Le module Property permet, comme son nom l'indique, de définir toutes les propriétés d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

Le module « ASSEMBLY ».

Ce module permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle Abaqus contient un seul assemblage.

Le module « STEP ».

Ce module permet de définir toutes les étapes et les requêtes pour le post traitement, c'est à dire le moment (temps) à partir duquel une force est appliquée et jusqu'à quand, il est aussi possible de créer des forces ou des conditions limites qui s'activent à des moments donnés.

Le module « INTERACTION ».

Grâce ce module, il est possible de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, qu'elles soient mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante.

Le module « LOAD ».

Le module Load permet de spécifier tous les chargements, conditions limites et champs. Il faut savoir que les chargements et les conditions limites sont dépendants des steps, par exemple une force est appliquée au step 1 mais inactive au step 2.

Le module « MESH ».

Ce module contient tous les outils nécessaires pour générer un maillage élément fini sur un assemblage.

Le module « JOB ».

Une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module Job pour analyser ce modèle. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et en tirer des résultats.

Le module « VISUALIZATION ».

Ce module permet de visualiser le modèle et les résultats, les courbes de charges, les déformations...

Le module « SKETCH ».

Ce module permet de créer des formes bidimensionnelles qui ne sont pas associés à un objet. Il peut être utilisé pour des extrusions par exemple.

III.3 Le modèle Concrete Damaged Plasticity

Le modèle « *Damaged plasticity for concrete and other quasi-brittle materials* » fournit une capacité générale pour la modélisation du béton et d'autres matériaux quasi-fragiles dans tous les types de structures. Il utilise le concept d'élasticité isotrope endommagé en combinaison avec la traction et la plasticité isotrope de compression pour représenter le comportement inélastique du béton. Le modèle considère deux critères de rupture : La fissuration en traction et le broyage en compression. Ce modèle se réfère à un équivalent de déformations plastiques en traction, et en compression.

III.3.1 Comportement en compression

Le béton possède un comportement ductile sous un chargement de compression uniaxiale, la courbe contrainte-déformation est définie par deux phases : élastique et plastique. Dans la première phase, la réponse est linéaire jusqu'à la valeur de la limite élastique, la deuxième phase est généralement caractérisée par un écrouissage suivi d'adoucissement au-delà de la contrainte de rupture. Le béton contient des microfissures qui commencent à se développer et se propager jusqu'à l'atteinte de la fissuration globale du béton (rupture)

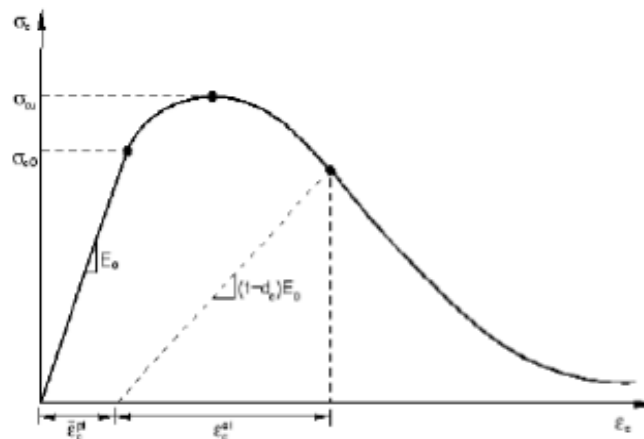


Figure III.2 : Comportement du béton soumis à une compression uni axiale [70]

III.3.2 Comportement en traction

Le comportement général du béton soumis à une traction uni-axiale est quasi-fragile, sa représentation est donnée sur la Figure (III.3). Cette courbe est linéaire élastique jusqu'à l'atteinte de la valeur de la contrainte ultime. Au-delà de cette contrainte, la direction de propagation des fissures est perpendiculaire à la direction de la contrainte appliquée.

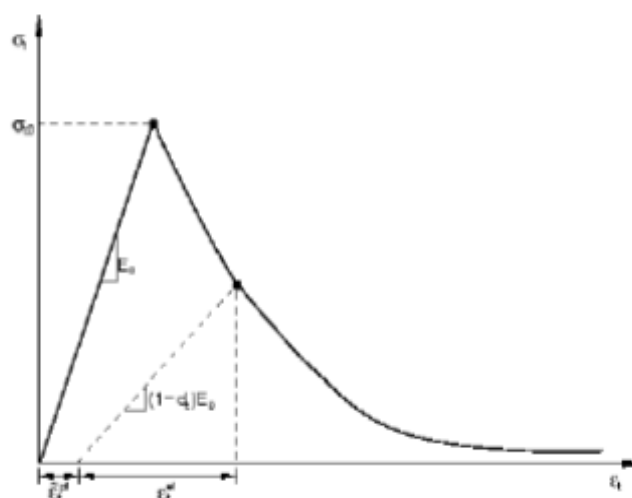


Figure III.3 : Comportement du béton soumis à une traction uni axiale [70].

Comme le montre ces figures, lorsque l'échantillon de béton est déchargé de tout point de l'adoucissement, la rigidité élastique du matériau est endommagée ou dégradée. La dégradation de la rigidité est caractérisée par deux variables d'endommagement qui sont en fonction des déformations plastique, la température et variables prédéfinis :

$$dt = dt(\tilde{\epsilon}_t^{pl}, \theta, fi), (0 \leq dt \leq 1)$$

$$dc = dc(\tilde{\epsilon}_c^{pl}, \theta, fi), (0 \leq dc \leq 1) \dots \dots \dots (III. 1)$$

Les variables d'endommagement peuvent prendre des valeurs de 0 ce qui représente un matériau sain (rigidité initiale) et 1 ce qui représente l'endommagement totale du matériau (une perte totale de rigidité). Pour décrire le caractère irréversible des déformations $\boldsymbol{\varepsilon}^p$, la théorie de la plasticité est utilisée. La partition de la déformation totale est effectuée en une partie élastique et une partie plastique.

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \boldsymbol{\varepsilon}^{el} + \boldsymbol{\varepsilon}^{pl} \quad \text{..... (III. 2)}$$

Dans le cadre d'une théorie de petite déformation, le tenseur de déformation $\boldsymbol{\varepsilon}_{ij}$ est obtenu à partir du premier gradient du champ de déplacement (ux,uy,uz) tel que :

$$\boldsymbol{\varepsilon}_{ij} = \frac{1}{2} (u_{i,j} + u_{j,i}) \quad \text{..... (III.3)}$$

La relation contrainte-déformation est définie par :

$$\boldsymbol{\sigma} = (1-d) D_0^{el} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{pl}) = D^{el} : (\boldsymbol{\varepsilon} - \boldsymbol{\varepsilon}^{pl}) \quad \text{..... (III.4)}$$

Avec D_0^{el} est la matrice de raideur élastique, et $D^{el} = (1-d) D_0^{el}$ représente la matrice de raideur après endommagement, $\boldsymbol{\sigma}$ est le tenseur de contrainte effective. L'utilisation du principe de la contrainte effective conduit à une relation liant la contrainte réelle à la contrainte effective. Avec E_c et σ_c sont le module de Young instantané et la contrainte maximale en compression.

Tableau III.1 : Les différentes lois utilisées pour le modèle adopté pour le béton.

Noms	Equations
Contraintes effectives en Traction	$\bar{\sigma}_t = \frac{\sigma_t}{(1-d_t)} = E_0(\varepsilon_t - \varepsilon_t^{pl})$
Contraintes effectives en compression	$\bar{\sigma}_c = \frac{\sigma_c}{(1-d_c)} = E_0(\varepsilon_c - \varepsilon_c^{pl})$
Contrainte post élastique : Partie écrouis en compression	$\sigma_{c(2)} = \frac{E_c \frac{\varepsilon_c}{f_c} - (\varepsilon_c / \varepsilon_{c1})^2}{1 + (E_c \frac{\varepsilon_{c1}}{f_c} - 2) \frac{\varepsilon_c}{\varepsilon_{c1}}} f_c$
Contrainte post élastique : Partie adoucissante en compression	$\sigma_{c(3)} = \left(\frac{2 + \gamma_c f_c \varepsilon_{c1}}{2 f_c} - \gamma_c \varepsilon_c + \frac{\gamma_c \varepsilon_c^2}{2 \varepsilon_{c1}} \right)^{-1}$
Contrainte post élastique en traction	$\frac{\sigma_t(w)}{f_t} = \left[1 + (c_1 w / w_c)^3 \right] e^{-c_2 \frac{w}{w_c}} - \frac{w}{w_c} (1 + c_1^3) e^{-c_2}$
Dommages en compression	$d_c = 1 - \frac{\sigma_c E_c^{-1}}{\varepsilon_c^{pl} (1/b_c - 1) + \sigma_c E_c^{-1}}$
Dommages en traction	$d_t = 1 - \frac{\sigma_t E_c^{-1}}{\varepsilon_t^{pl} (1/b_t - 1) + \sigma_t E_c^{-1}}$

III.3.3 Couplage plasticité-endommagement

Le modèle béton « *Concrete Damaged Plasticity* » intégré dans le code Abaqus [72] permet de gérer les problèmes de plasticité couplés à l'endommagement du béton qui est un matériau qui appartient à la famille des matériaux quasi-fragile.

Pour des charges relativement faibles, le béton reste dans le domaine élastique, c'est-à-dire que les déformations sont les résultats des mouvements quasi réversibles d'atomes.

Pour des sollicitations plus importantes, la rupture a lieu rapidement d'où le caractère fragile de ce matériau. C'est le phénomène de la décohésion pâte-grains qui donne alors lieu à des déformations permanentes et de ruptures. Des glissements apparaissent dans les cristaux des grains, contribuant eux aussi à la déformation permanente qui se produit à volume constant [73].

III.4 Interface béton -matériau composite

Le comportement de l'adhésif est considéré comme élastique isotrope jusqu'à rupture. Les paramètres à identifier dans un essai de traction sur une éprouvette en colle sont le module de Young E_{adh} et le coefficient de poisson ν_{adh} . Le comportement à la rupture de la couche adhésive est bien décrit par la théorie de Mohr-coulomb.

Le comportement à la rupture de la couche adhésive sera considéré dans le contexte de la structure renforcée. La couche adhésive avec le matériau composite et le béton forment le joint adhésif. La décohésion dans le système composite étudié peut avoir lieu soit dans les différentes composites, soit à l'interface entre les composites. La fissuration inter faciale suit la trajectoire qui nécessite le minimum d'énergie. La rupture à l'interface n'a lieu que dans le cas d'une mauvaise préparation de la surface des composantes ou dans le cas où la technologie de collage n'est pas respectée.

III.5 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 de jute et tissu polypropylène), et un modèle élastoplastique pour les matériaux d'âme à savoir : le mortier de ciment allégé par des fibres d'agaves

III.5.1 Modèle élastique-fragile pour les composites

Les paramètres du modèle élastique-fragile du composite sont soigneusement reportés dans le code de calcul Abaqus et qui sont représentés dans les tableaux ci dessous.

Tableau III.2 : Paramètres du modèle élastique isotrope pour le tissu de jute.

Dénomination	Symbole & unité	Valeur
Module d'Young instantané du tissu de jute	$E (Mpa)$	26500
Coefficient de poisson du tissu de jute	ν	0,3
Contrainte de rupture en traction	$\sigma(Mpa)$	583

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

Dénomination	Symbole & unité	Valeur
Module d'Young instantané du tissu polypropylène	$E (Mpa)$	1930
Coefficient de poisson du tissu polypropylène	ν	0,31
Contrainte de rupture en traction	$\sigma (Mpa)$	19,3

Tableau III.4: Paramètres de la résine Epoxyde

Dénomination	Symbole & unité	Valeur
Module d'Young instantané de la résine Epoxyde	$E (Mpa)$	3500
Coefficient de poisson de la résine Epoxyde	ν	0.33
Contrainte de rupture en traction	$\sigma(Mpa)$	70

Tableau III.5: Paramètres du modèle élastique isotrope du tissu composite (tissu de jute + résine Epoxyde).

Dénomination	Symbole & unité	Valeur
Module d'Young du tissu composite	$E (Mpa)$	19600
Coefficient de poisson du tissu composite	ν	0.309
Contrainte de rupture en traction	$\sigma(Mpa)$	429.1

Tableau III.6 : Paramètres du modèle élastique isotrope du tissu composite (polypropylène + résine Epoxyde)

Dénomination	Symbole & unité	Valeur
Module d'Young instantané du tissu composite	$E (Mpa)$	2401
Coefficient de poisson du tissu composite	ν	0.307
Contrainte de rupture en traction	$\sigma (Mpa)$	34.51

III.5.2 Modèle élasto-plastique pour les matériaux d'âme

Un modèle numérique élasto-plastique 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.

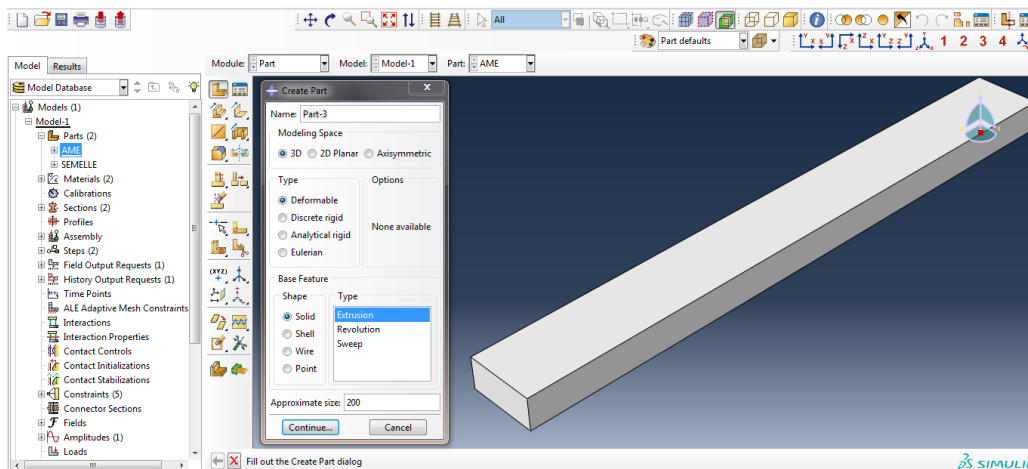
Ce modèle fournit une capacité générale pour la modélisation des matériaux quasi-fragiles dans tous les types de structures. Il utilise le concept d'élasticité isotrope en combinaison avec la traction et la plasticité isotrope de compression pour représenter le comportement inélastique. Les paramètres du modèle numérique du mortier allégé par les fibres d'agaves utilisé dans cette étude numérique sont représentés dans le tableau III.7.

Tableau III.7:paramètres du modèle élasto-plastique pour les matériaux d'âme.

Dénotation	Symbole & unité	Valeur
Module d'Young instantané	$E(Mpa)$	20000
Coefficient de poisson	ν	0.19
Contrainte en compression	$f_c(Mpa)$	25
Contrainte élastique en compression	$f_{c0}=0.6f_c(Mpa)$	15
Contrainte maximale en traction	$f_{t0}=0.6+0.06f_c(Mpa)$	2.1
Angle de dilatation sous compression	Ψ	32°
Rapport entre contrainte bi-axial et uni-axial	$\alpha_f = \alpha_{b0}/\alpha_{c0}$	1.16
Paramètre de potentiel d'écoulement	a_e	0.1

III.6 Étapes de la modélisation

- *Dessiner le modèle* : le module PART permet de créer tous les objets géométriques nécessaires au problème, soit en les dessinant dans Abaqus Cae, soit en les important d'un autre logiciel de dessin. Dans le cas d'une modélisation tridimensionnelle
 - Dessiner le profil 2D (l'esquisse) de la forme voulue
 - Le développer en 3D.
 - Rajouter les détails manquants (chanfreins...).

**Figure III.4** : modélisation géométrique de l'âme du panneau sandwich

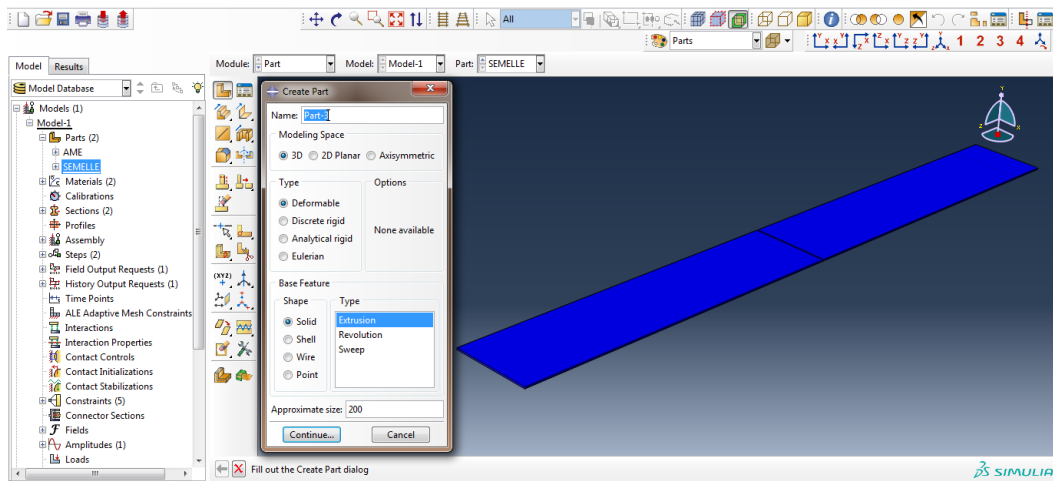


Figure III.5 : modélisation géométrique des semelles du panneau sandwich

- *Affecter les propriétés matériau à l'objet* : le module PROPERTY définit toutes les propriétés matérielles d'un objet géométrique ou d'une partie de ces objets.

- Créer le matériau



- Créer les sections sur lesquelles appliquer ces matériaux



- Affecter les matériaux aux sections correspondantes

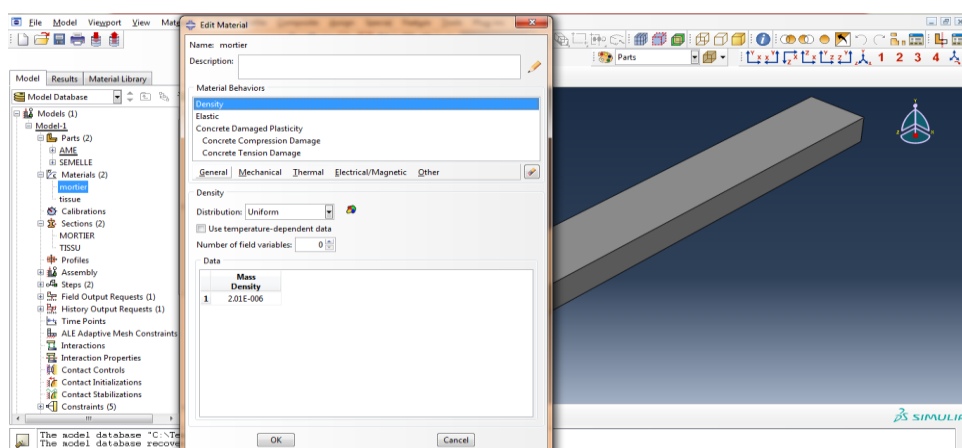
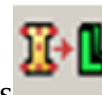


Figure III.6: propriétés mécaniques de l'âme

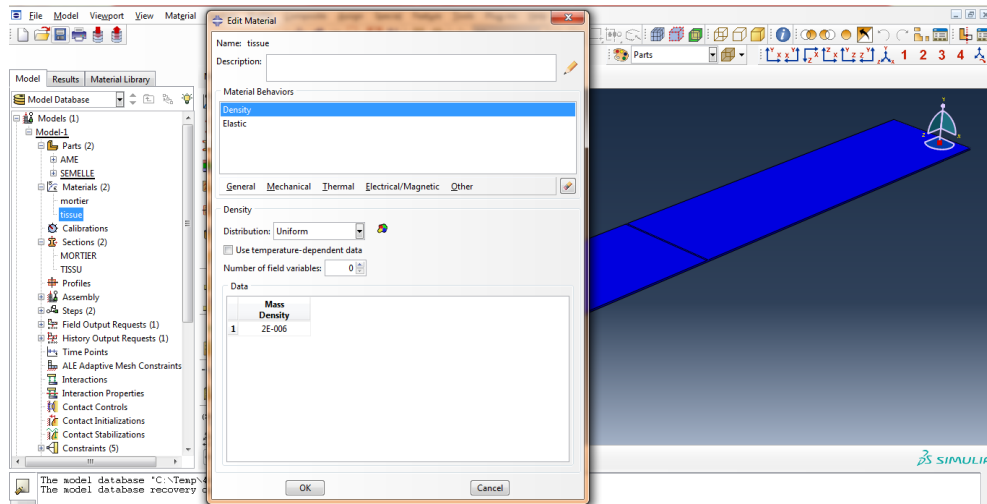


Figure III.7 : propriétés mécaniques des semelles.

- **Assembler le modèle** : le module ASSEMBLY permet d'assembler les différents objets géométriques créés dans un même repère de coordonnées global. Un modèle ABAQUS contient un seul assemblage.

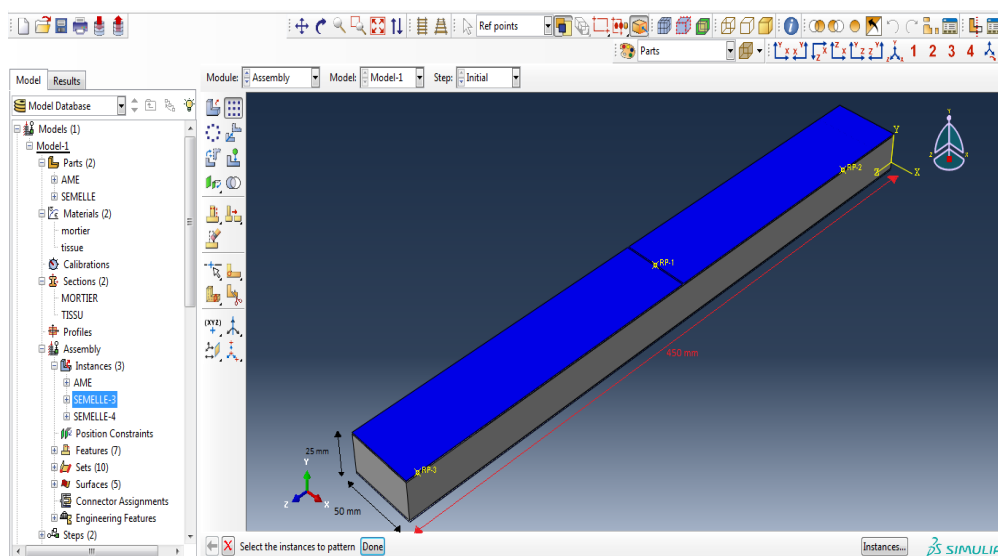


Figure III.8 : Assemblage du modèle.

Définir les étapes d'analyse: Le module step permet aussi de définir toutes les requêtes pour le post traitement on peut par exemple créer un STEP pendant lequel des forces ou des conditions aux limites sont appliquées ; et un STEP pendant lequel ces forces et/ou conditions aux limites ne sont pas appliquées.

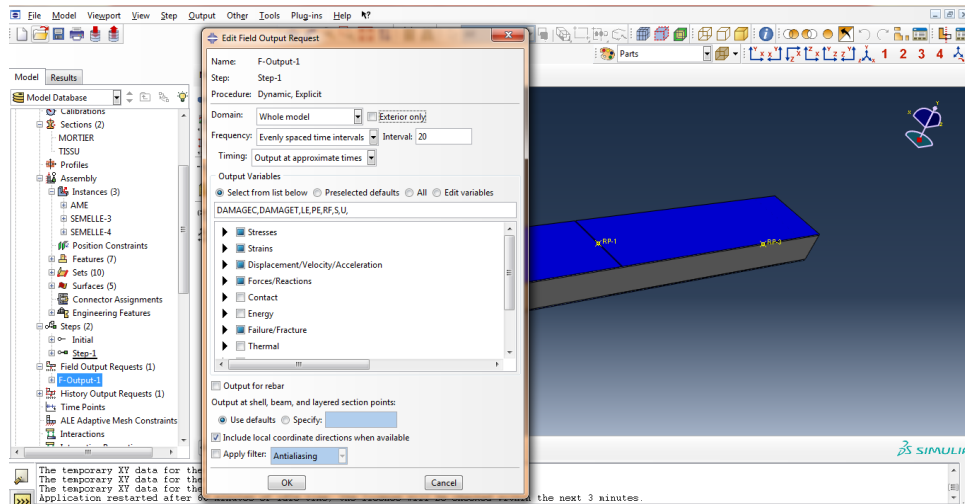


Figure III.9 : le module step.

➤ *Créer les interactions entre les instances* : le module interaction permet de spécifier toutes les interactions entre les différentes parties et régions du modèle, elles peuvent être de différentes natures mécaniques, thermiques ou autres. Il faut savoir qu'Abaqus ne prend en compte que les interactions explicitement définies, la proximité géométrique n'étant pas suffisante, la procédure de spécification des interactions est la suivante :

- Créer les surfaces
- Définir les types de contacts
- Associer des surfaces avec des types de contact

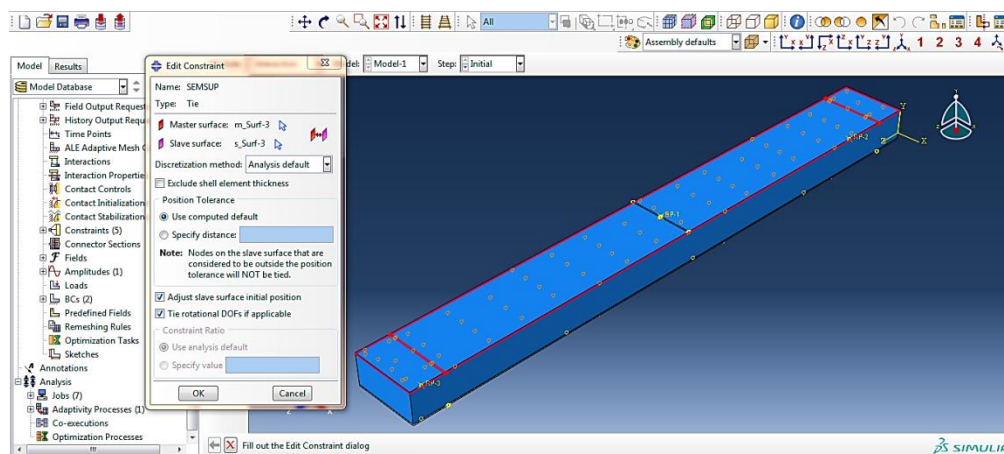


Figure III.10 : contact de l'âme avec les deux semelles.

Mode de chargement et conditions aux limites

Le module load permet de spécifier tous les chargements, conditions aux limites et champs.

- "CreateBoundary Condition"(Bcs) : l'étape de création des conditions aux limites.
- "CreateLoad" (load) : regroupe l'ensemble des forces auxquelles le système est soumis.

Afin de pouvoir valider les résultats expérimentaux et vérifier la pertinence de la technique proposée, on a réalisées des conditions de chargements similaires pour le panneau multicouche modélisée qui est soumis à un chargement monotone de flexion trois points et de flambement croissant jusqu'à la rupture. Les figures ci-dessous illustrent clairement les conditions aux limites ainsi que le mode de chargement pour chaque essai.

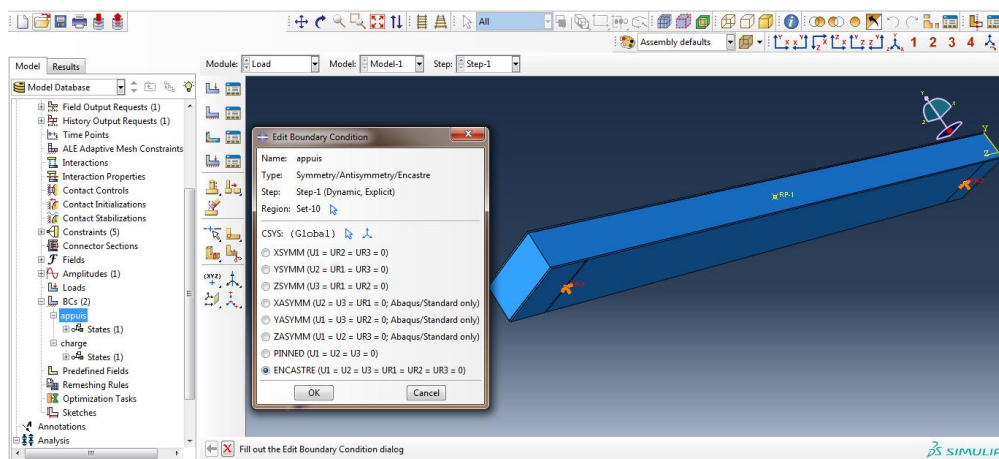


Figure III.11 : Conditions aux limites de module load.

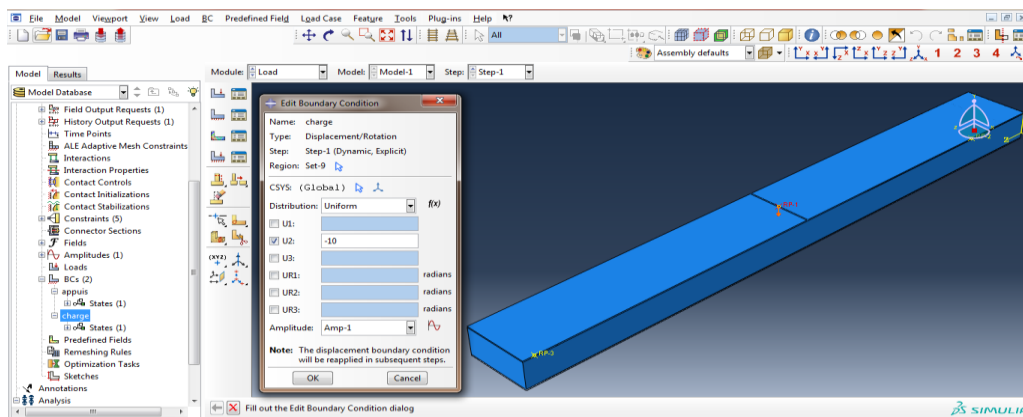


Figure III.12: Définition des forces de module load.(Chargement en flexion a 3 points).

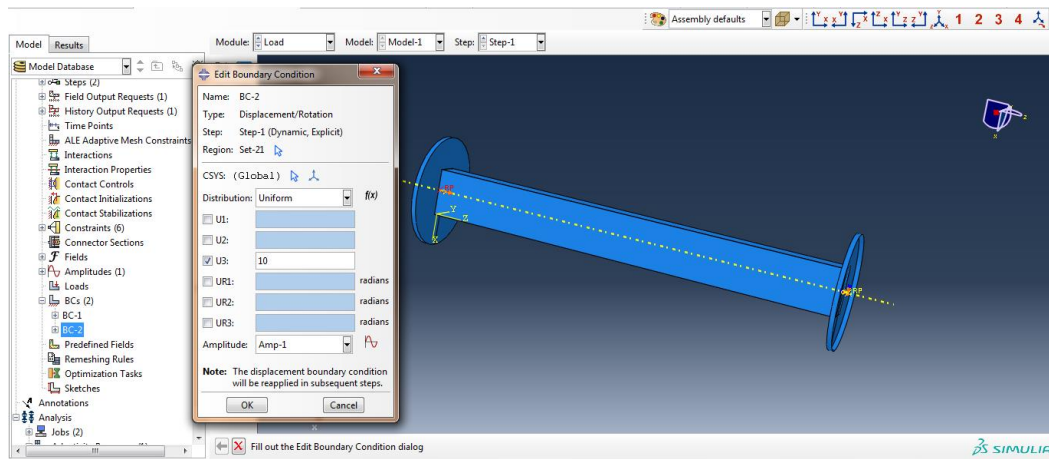


Figure III.13: Définition des forces de module load (chargement en flambement).

➤ **Mailler le modèle:** le module mesh contient tout les outils nécessaires pour générer un maillage éléments finis sur un assemblage :

- Partitionner le modèle
- Choisir les techniques de maillage.
- Choisir les types d'éléments.
- Discrétiser le modèle.
- Mailler le modèle

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. 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.7 Étude de la sensibilité du maillage

On a réalisé une étude de sensibilité de maillage dont l'objectif est de définir la dimension des éléments finis qui convient à notre panneau et 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 composé de semelles en tissu de jute soumis à un chargement de flexion 3 points monotone jusqu'à la rupture, l'étude est réalisée avec des éléments finis hexaédriques de dimensions variées à savoir : 10mm, 5mm, 4mm, 3 mm et 2mm (Voir Figure)

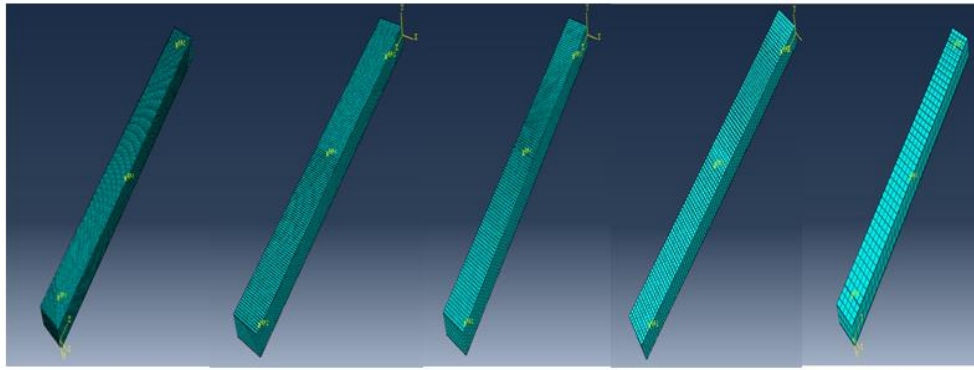


Figure III.14 : Configurations pour la validation de la sensibilité au maillage.

La figure ci-dessous montre la réponse des panneaux multicouche en flexion à travers l'évolution du chargement extérieur appliqué en (N) en fonction du déplacement vertical à mi-travée (flèche en (mm)) jusqu'à la rupture pour les variantes de dimensions des éléments finis considérées. On constate que la réponse commence à converger pour une dimension d'élément fini 3 mm.

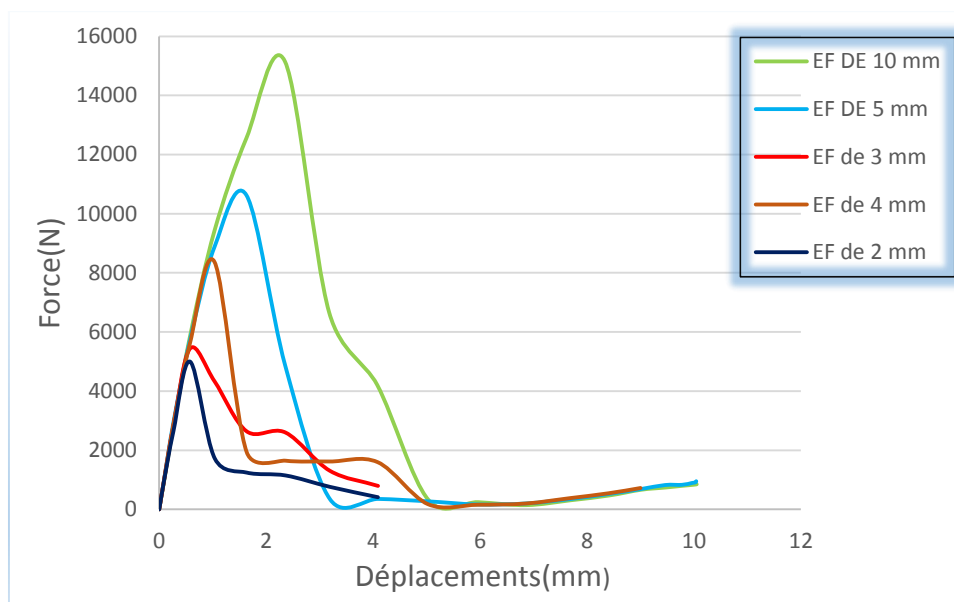


Figure III.15 : Étude de la sensibilité du maillage.

D'après cette étude de convergence de maillage, les panneaux sont maillés par des éléments finis hexaédrique avec une dimension de 3 mm dans les trois directions de l'espace, ce qui assure un maillage très raffiné.

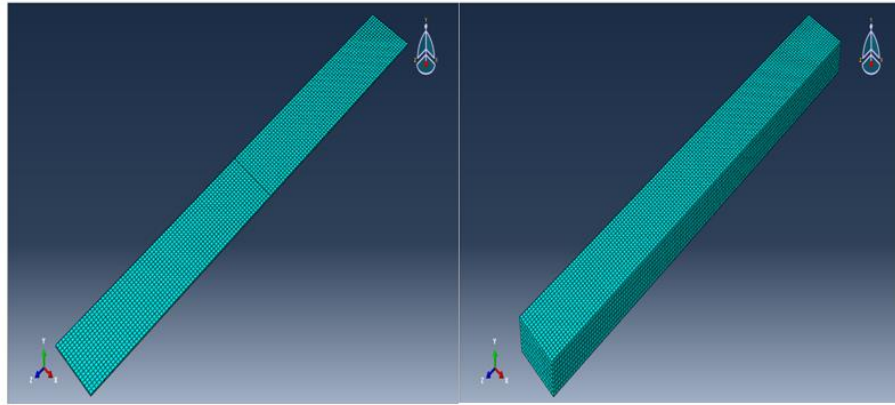


Figure III.16 : maillage de la semelle et de l'âme.

- Créer et soumettre un calcul : une fois que toutes les tâches de définition du modèle ont été réalisées, il faut utiliser le module job pour analyser ce modèle. Abaqus va alors réaliser tous les calculs nécessaires et post-traiter les résultats demandés.

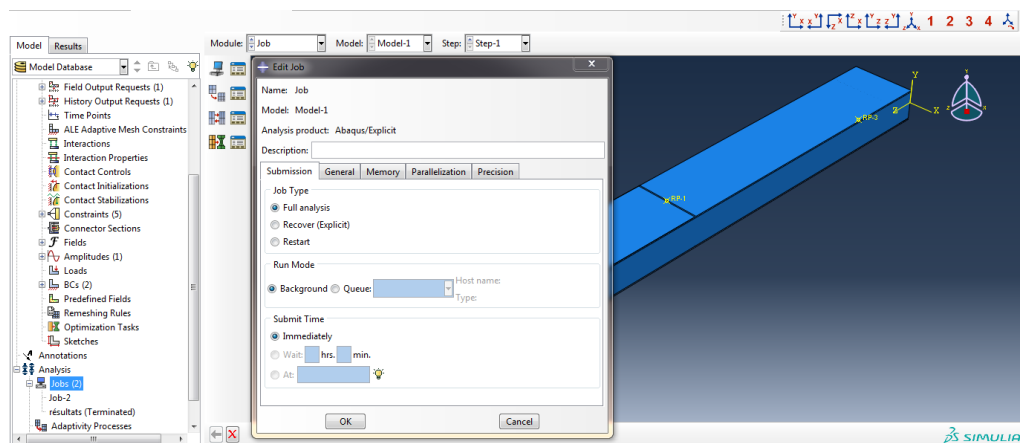


Figure III.17: analyse des résultats (module job).

- *visualiser les résultats* : Le module visualisation permet l'affichage graphique ou numérique des résultats de L'utilisateur voit ces résultats dans "Result" : soit par la visualisation des déformations dans "Field Output": Par exemple, les déformations, les contraintes, les vitesses ou les forces nodales, soit par les courbes dans "History Output" : Par exemple, l'énergie cinétique ou l'énergie totale de l'ensemble du modèle, l'énergie de dissipation ou des déformations.

III.8 Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons présentés le code de calcul Abaqus en résumant les étapes principales à effectuer pour créer nos modèles. Nous avons aussi présentés les modèles numériques des matériaux utilisés dans la présente étude à savoir : le tissu de jute et le polypropylène collés avec de la résine époxyde formant un matériau composite et un mortier de ciment allégé par des fibres d'agaves.

Nous avons par la suite présentés les modèles étudiés du côté géométrique et caractéristique mécaniques.

- le modèle choisi pour le calcul mécanique est élastique fragile pour les peaux constituées de tissu plus la résine
- Nous avons adopté un comportement élasto-plastique pour l'âme constituée de mortiers, fibres d'agaves.

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présentons les modèles géométriques virtuels des panneaux sandwichs en âmes pleines par les moyens de Conception Assisté par Ordinateur (CAO). C'est sous la plateforme du logiciel Abaqus que le modèle mécanique a été soigneusement conçu. La méthode des éléments finis est utilisée pour modéliser le comportement mécanique de cette structure.

Tous les résultats sont présentés sous forme de cartographies de contraintes, déplacements et des dommages dans le but de mieux comprendre le comportement de notre structure, suivi de l'interprétation des différents résultats obtenus à l'issue des simulations numériques, menée sur le comportement mécanique des panneaux sandwichs chargés en flexion trois-points et en compression. Cinq variantes d'études sont prises en considération à savoir : deux panneaux sandwichs symétriques à semelle en tissu de jute et en polypropylène, dénommés: (SS-JJ) et (SS-PP), deux panneaux dissymétriques dénommés: (SD-PJ) et (SD-JP) et enfin un panneau renforcé dans sa face inférieure par le tissu de jute, dénommé: (PR-FI).

IV.2 Résultats de la flexion 3-points :

Dans ce cas les panneaux multicouches, de dimension 450x23x50mm, sont modélisés dans un espace tridimensionnel, ils sont chargés en flexion trois-points suivant la norme NF T 54-606[74]. 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 figures et cartographies ci-dessous.

IV.2.1 Cartographie des contraintes :

Nous reproduisons dans ce qui suit l'évolution de la distribution des contraintes de Von Mises, lors de la simulation numérique des panneaux sandwichs et cela pour les trois états de chargements différents.

IV.2.1.1 Sandwichs symétriques :

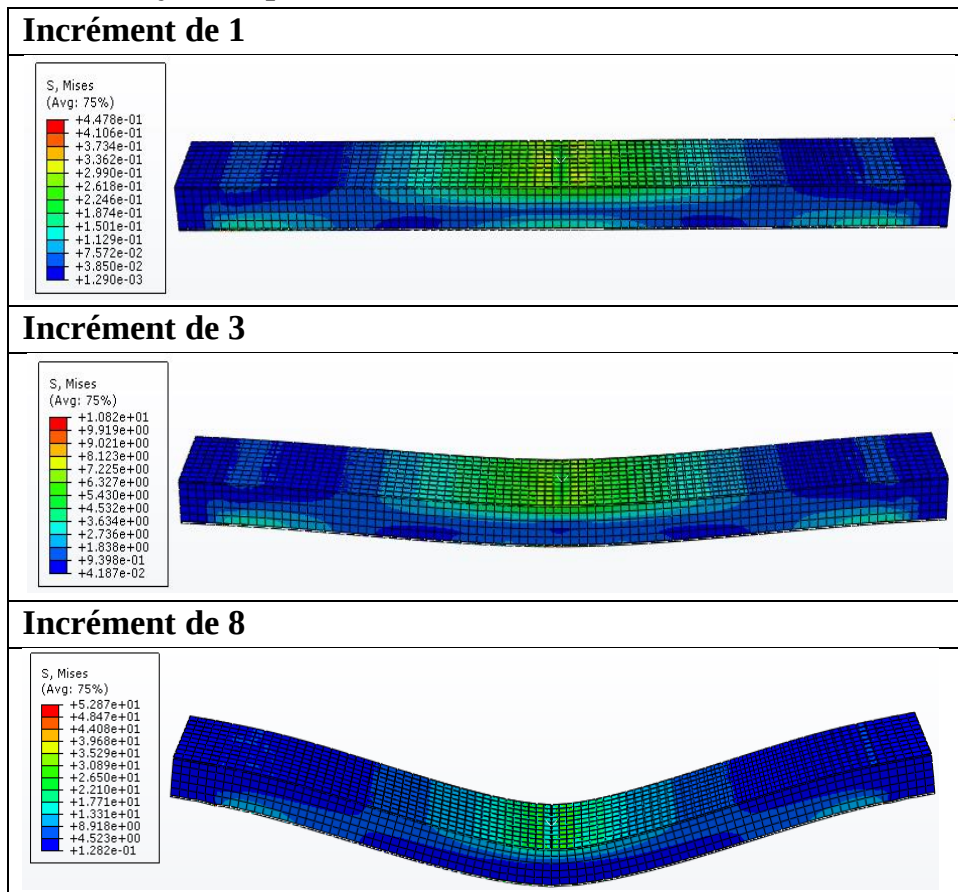


Figure IV.1 : propagation des contraintes dans le panneau sandwich SS-JJ.

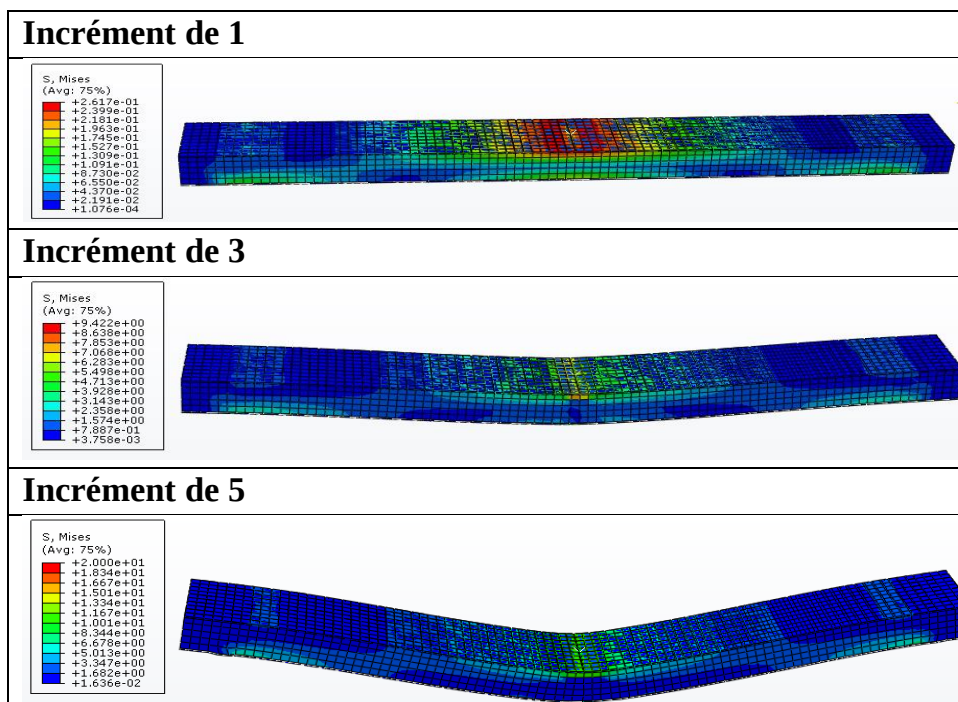


Figure IV.2 : propagation des contraintes dans le panneau sandwich SS-PP.

L'évolution du chargement extérieur appliqué entraîne une évolution significative du champ des contraintes dans le panneau. Le champ de contrainte apparaît en premier lieu dans les semelles inférieures (zones tendues en flexion), puis il se propage avec une vitesse très importante selon des bielles inclinées dans l'âme en mortier jusqu'à la rupture. Vers la fin du chargement le champ de contrainte est localisé au niveau de semelles supérieures (zone comprimée), la vitesse de propagation du champ des contraintes est largement réduite. Dans le cas du multicouche à semelle en tissu de jute les contraintes supportées atteignent des valeurs plus importantes que dans le cas des multicouche à semelle en tissu de polypropylène.

IV.2.1.2 Sandwichs dissymétriques :

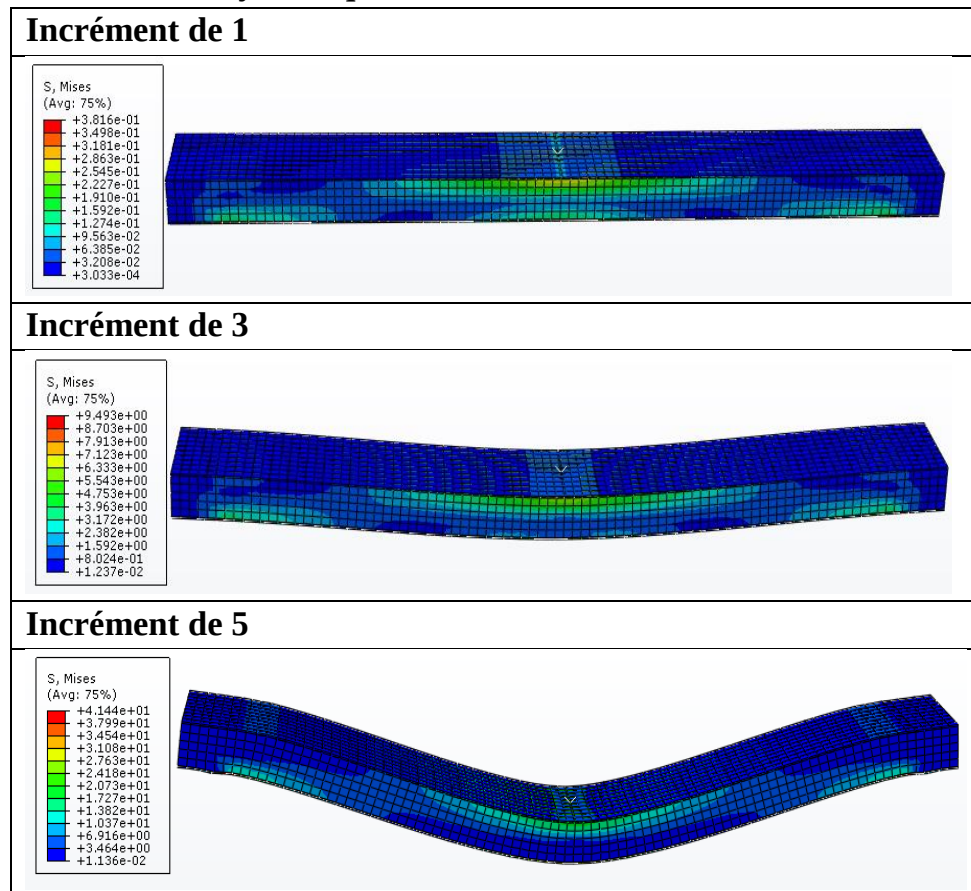


Figure IV.3 : propagation des contraintes dans
Le panneau sandwich SD-PJ.

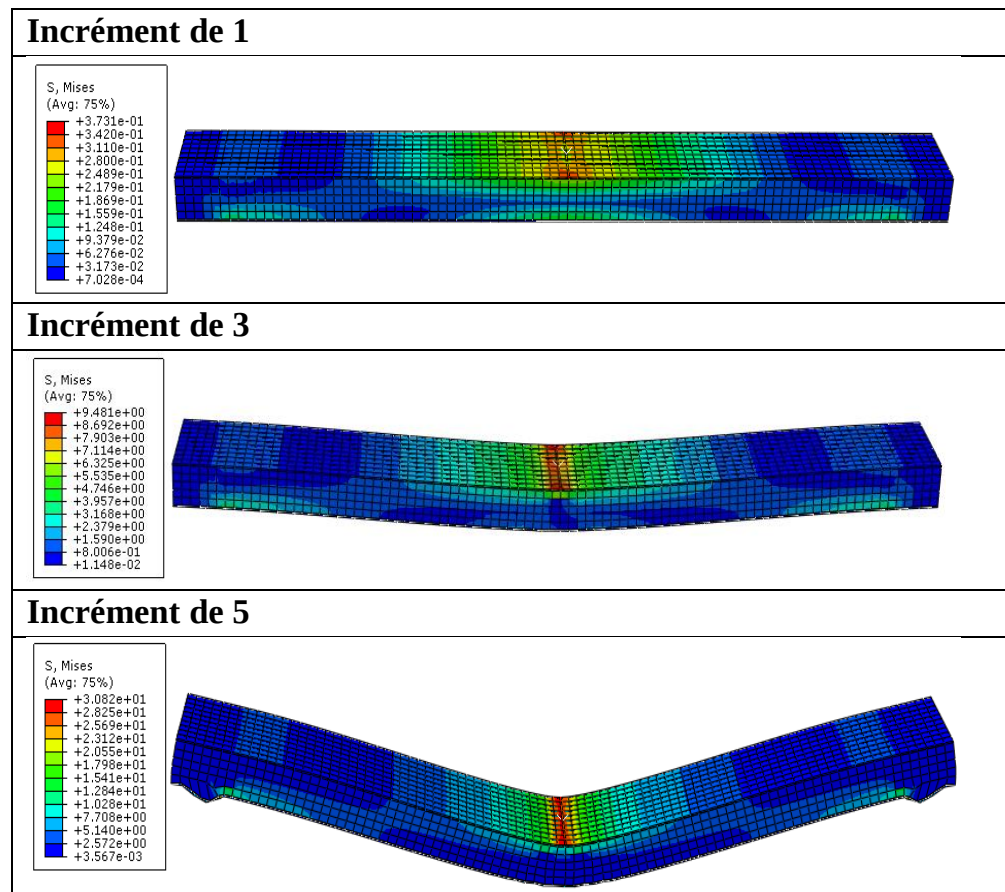


Figure IV.4 :propagation des contraintes dans

le panneau sandwich SD-JP.

Dans le cas du panneau sandwich dissymétrique (SD-PJ) les contraintes atteignent des valeurs plus importantes comparativement au panneau (SD-JP). Ce dernier atteint la phase de densification du champ de contraintes après un temps de chargement lent. Les performances mécaniques des semelles à savoir : (semelle en jute et semelle en polypropylène) procure à l'élément panneau un seuil de résistance et une rigidité flexionnelle très élevé.

Ces résultats numériques sous forment de cartographies nous renseignent sur le rôle des matériaux de semelles à savoir: la semelle en tissu de jute et en polypropylène 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.

IV.2.1.3 Panneau renforcé dans sa face inférieure:

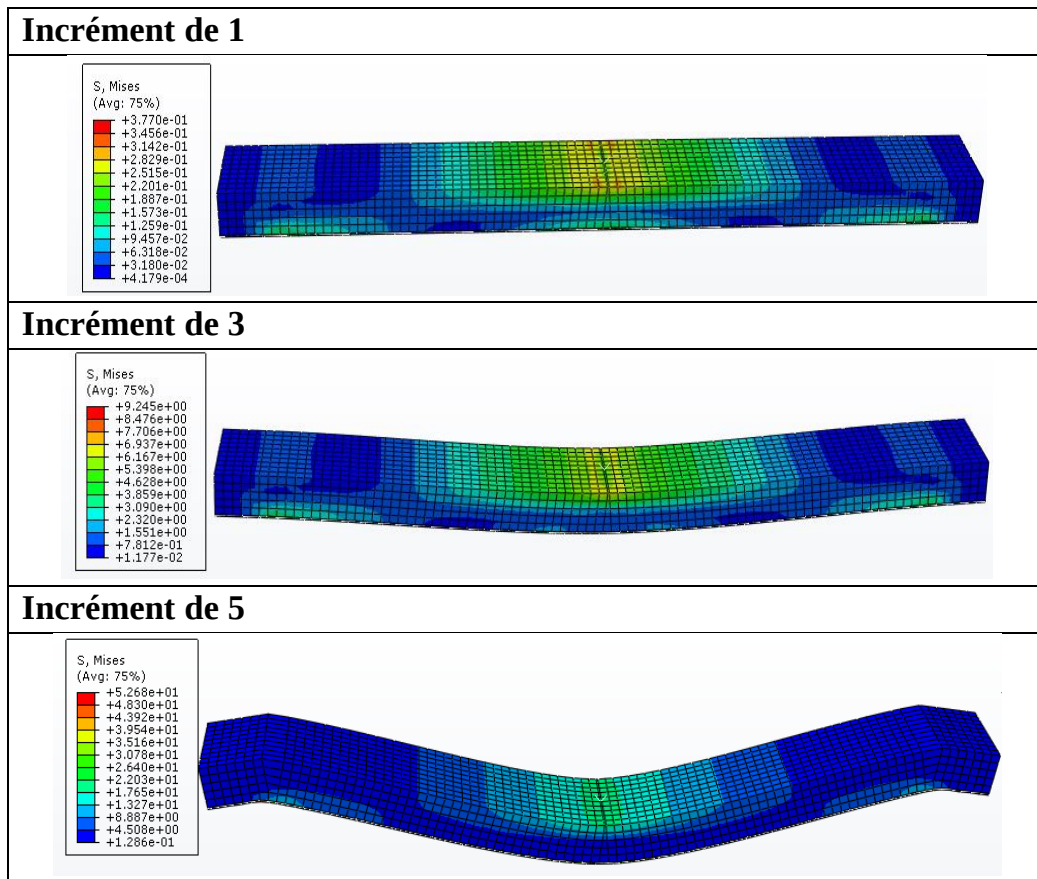


Figure IV.5: Propagation des contraintes dans le panneau PR-FI.

L'évolution de la contrainte de Von-mise dans le panneau renforcé dans sa face inférieure est légèrement moins importante que celle du multicouche à semelle en tissu de jute, on explique cette petite réduction de contrainte par l'absence de la semelle supérieur qui joue un rôle important dans la reprise des charges extérieures. Dans ce cas c'est la semelle inférieure du panneau qui reprend la majorité des sollicitations. Les cartographies montrent également que les matériaux de l'âme sont plutôt sollicités en cisaillement

IV.2.2 Cartographie des déplacements globaux :

Les cartographies des figures IV.6, IV.7, IV.8 et IV.9 montrent l'évolution des déplacements respectivement dans les différents panneaux sandwichs pour divers valeurs d'incrément de charge.

IV.2.2.1 Sandwichs symétriques :

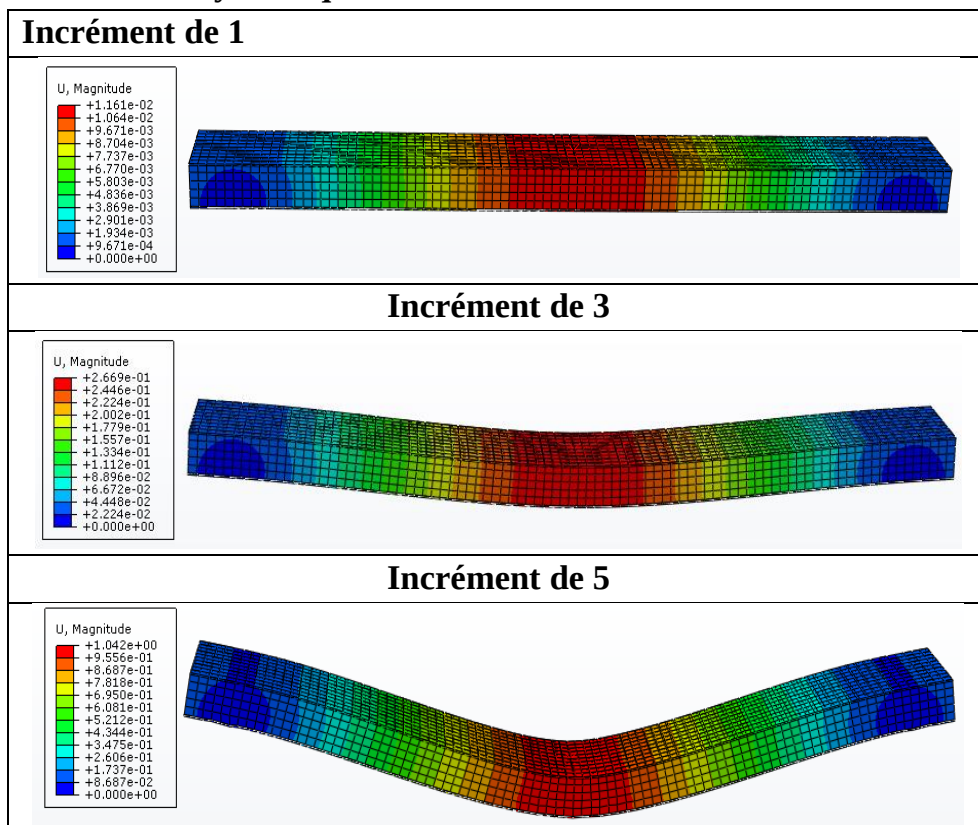


Figure IV.6: Évolution des déplacements globaux dans le sandwich symétrique (SS-JJ).

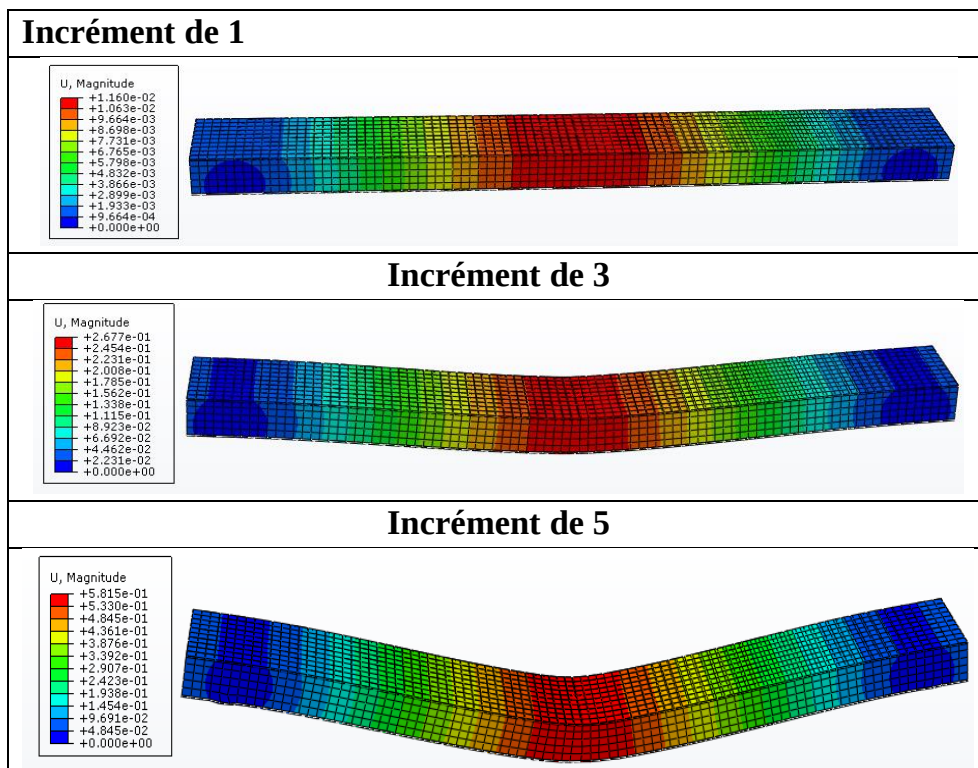


Figure IV.7 : Évolution des déplacements globaux dans le sandwich symétrique (SS-PP)

Les cartographies présentées par les figures ci-dessus nous renseignent sur l'évolution des déplacements dans les multicouches, l'état de la flèche dans la région centrale du panneau est importante, ce qui induit un déplacement aussi important dans cette région. Les déplacements maximums qui correspondent à la rupture des multicouches à semelle en tissu de jute (SS-JJ) et à semelle en polypropylène (SS-PP) sont respectivement de l'ordre de 4.09mm et 6.85 mm. La conjugaison des performances mécaniques du tissu polypropylène a induit au panneau une amélioration considérable en termes de ductilité et déformation plastique, par conséquent une propagation moins rapide des fissures avec forte consommation d'énergie de dissipation à la rupture des éléments considérés.

IV.2.2.2 Sandwichs dissymétriques :

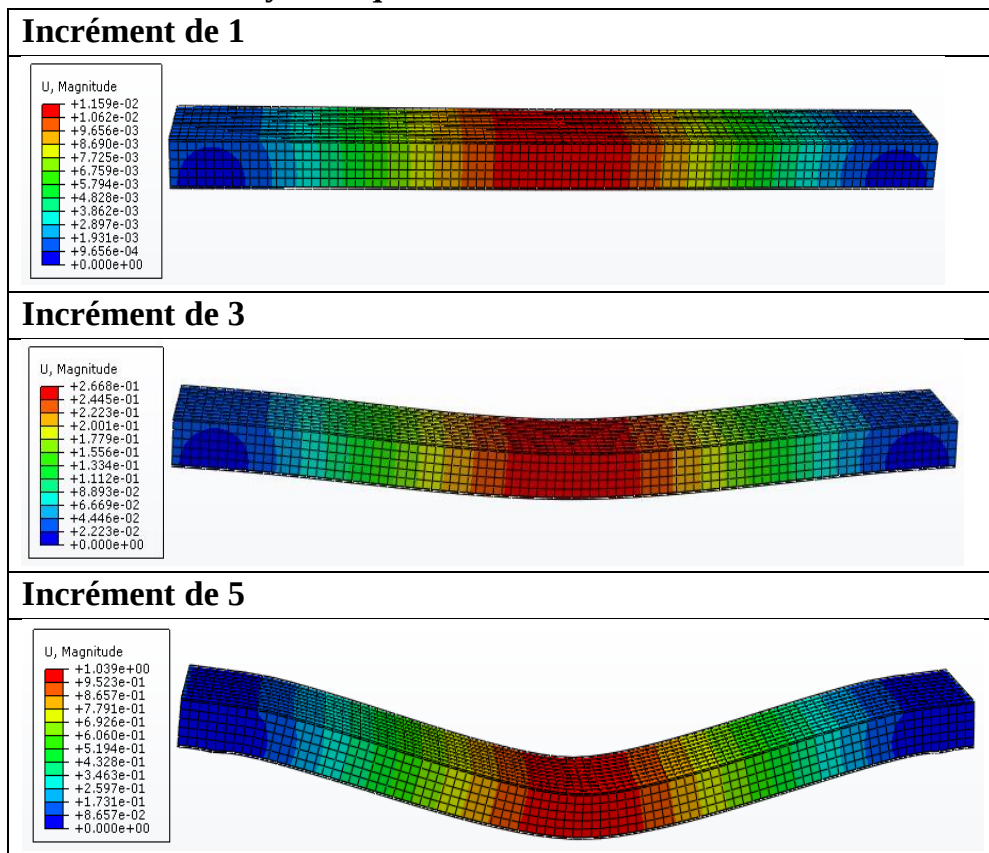


Figure IV.8 : Évolution des déplacements globaux dans le sandwich dissymétrique (SD-PJ).

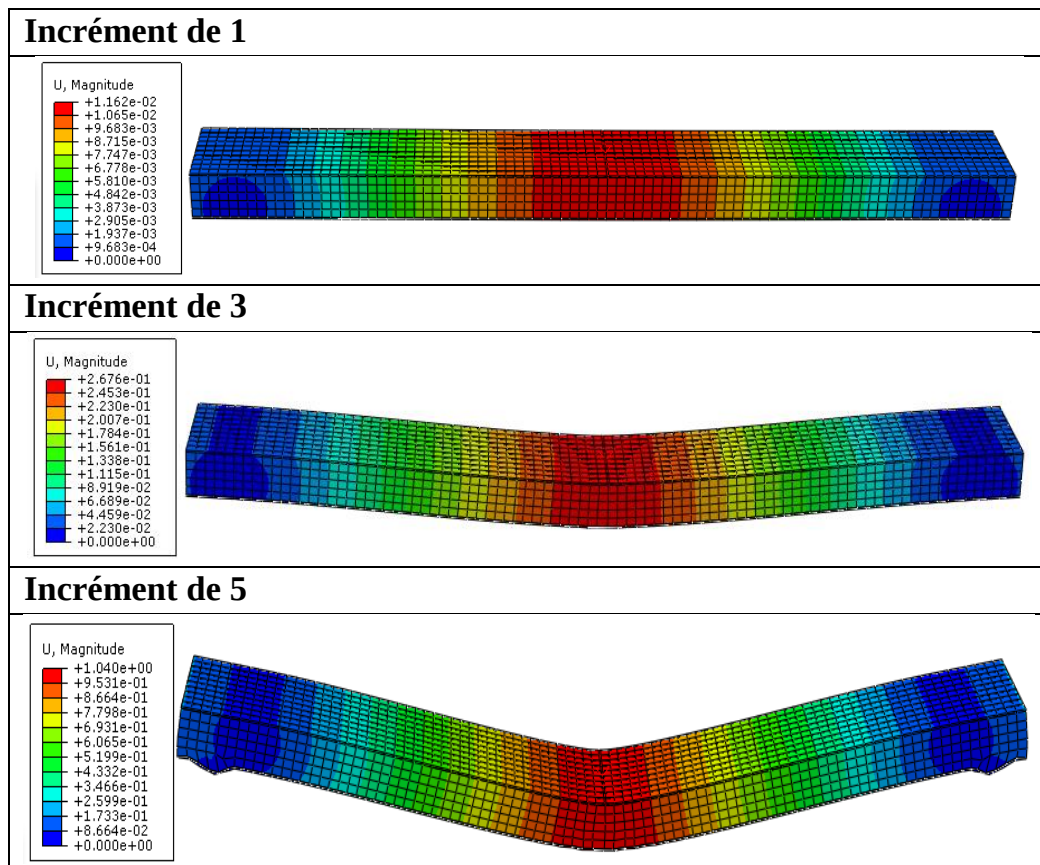


Figure IV.9 : Évolution des déplacements globaux dans le sandwich dissymétrique (SD-JP).

Les cartographies nous montrent que les panneaux sandwichs dissymétriques présentent un meilleur comportement en termes de déplacements globaux comparativement au multicouche à semelle en tissu de jute (SS-JJ). Les déplacements maximaux de rupture correspondant aux panneaux sandwichs dissymétriques (SD-JP) et (SD-PJ) sont respectivement de l'ordre de 6.84 mm et 6.86 mm

IV.2.2.3 cas du panneau renforcé dans sa face inférieure :

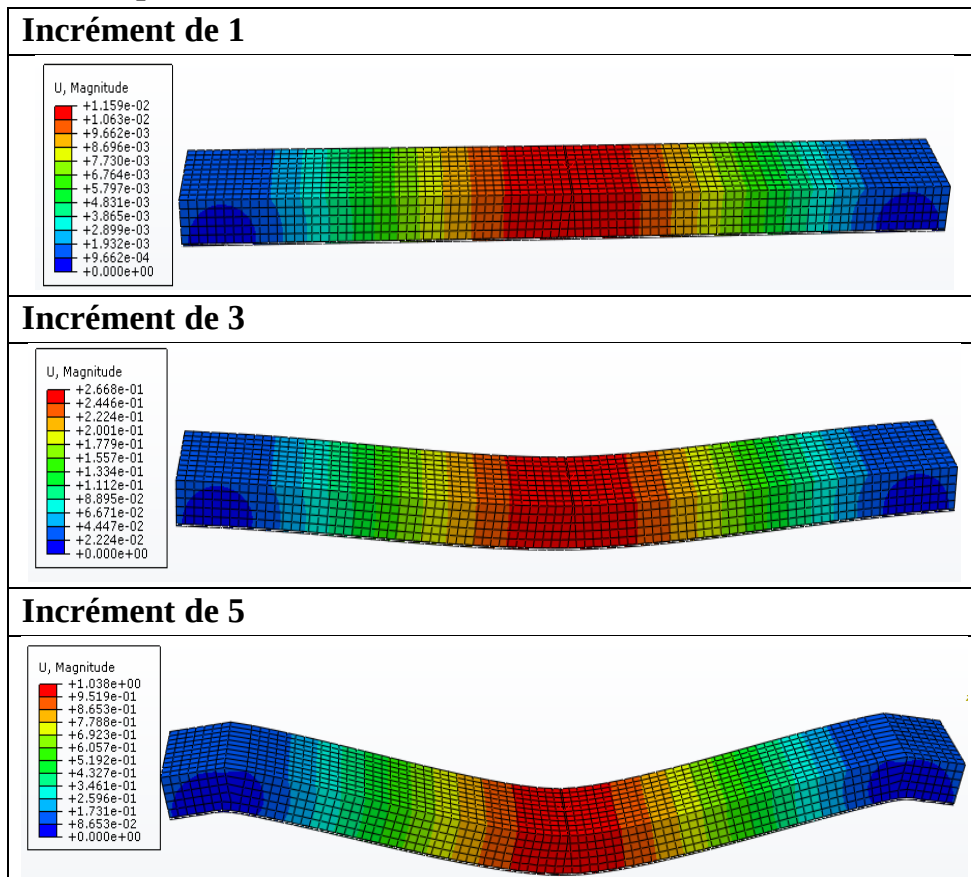


Figure IV.10 : Évolutions des déplacements dans le panneau PR-FI.

En terme de déplacement globaux, le panneau renforcé sur sa face inférieure présente également un meilleur comportement avec un déplacement maximale d'ordre de 7.66 mm, la présence de la semelle en tissu de jute dans la zone fragile du panneau (zone tendue) lui permet d'atteindre la phase de densification du champ de déformation.

IV.2.3 Cartographie des dommages :

Le modèle élément fini proposé pour la modélisation du comportement mécanique du béton permet de représenter l'évolution des fissures (propagation des fissures) dans les éléments considérés. Une analyse des processus de fissuration et des modes de rupture est réalisée, à travers l'évolution des dommages dus à la traction dans les panneaux sandwich en mortier allégé et tissu composite, pour différents taux de chargements appliqués.

I.2.3.1 Sandwichs symétriques :

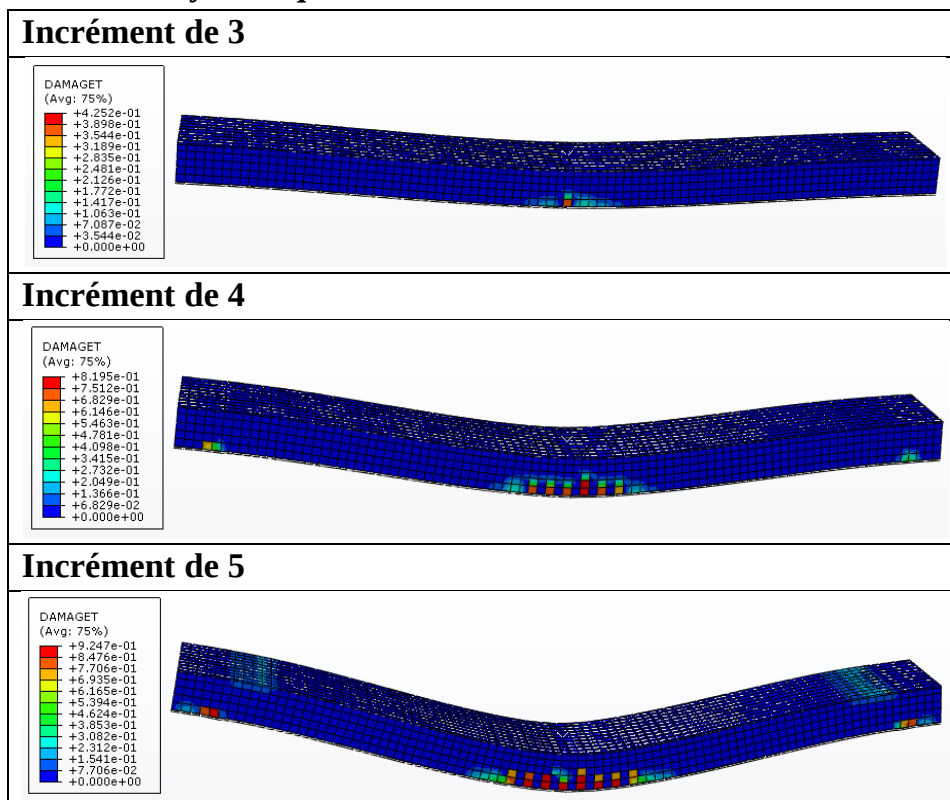


Figure IV.11 : Évolution des dommages dans le panneau symétrique (SS-JJ).

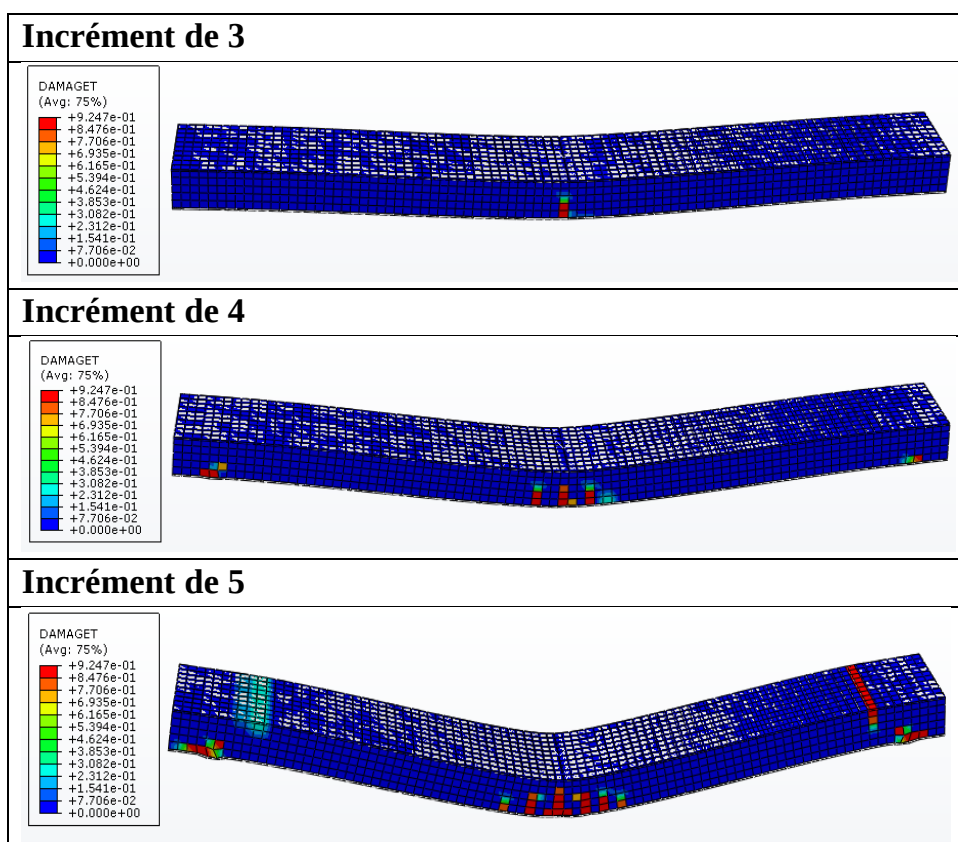


Figure IV.12 : Évolution des dommages dans le sandwich symétrique SS-PP.

On remarque qu'au cours de l'augmentation du chargement extérieur appliqué, les dommages se développent progressivement tout le long des panneaux, si on analyse d'une manière précise l'état de l'endommagement on constate qu'à un même taux de chargement et au même endroit, ceux du panneau en tissu de polypropylènes sont plus importants que ceux du panneau en tissu de jute. Des microfissures de flexion apparaissent en premier lieu dans la semelle inférieure (zone tendue) pour des chargements assez modérés, suivies des premières fissures de cisaillement dans l'âme du panneau à travers des bielles inclinées. Enfin ces microfissures apparaissent dans la semelle supérieure à la fin du chargement.

IV.2.3.2 Cas des sandwichs dissymétrique :

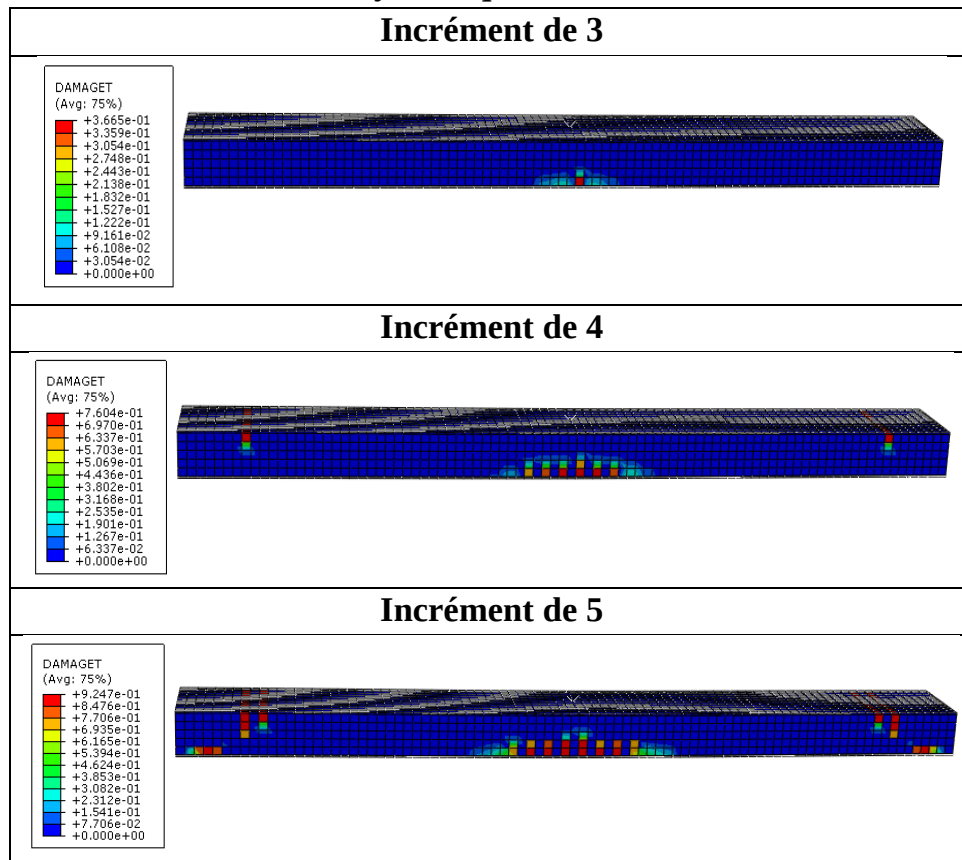


Figure IV.13 : Évolution des dommages dans les sandwichs dissymétriques SD-PJ.

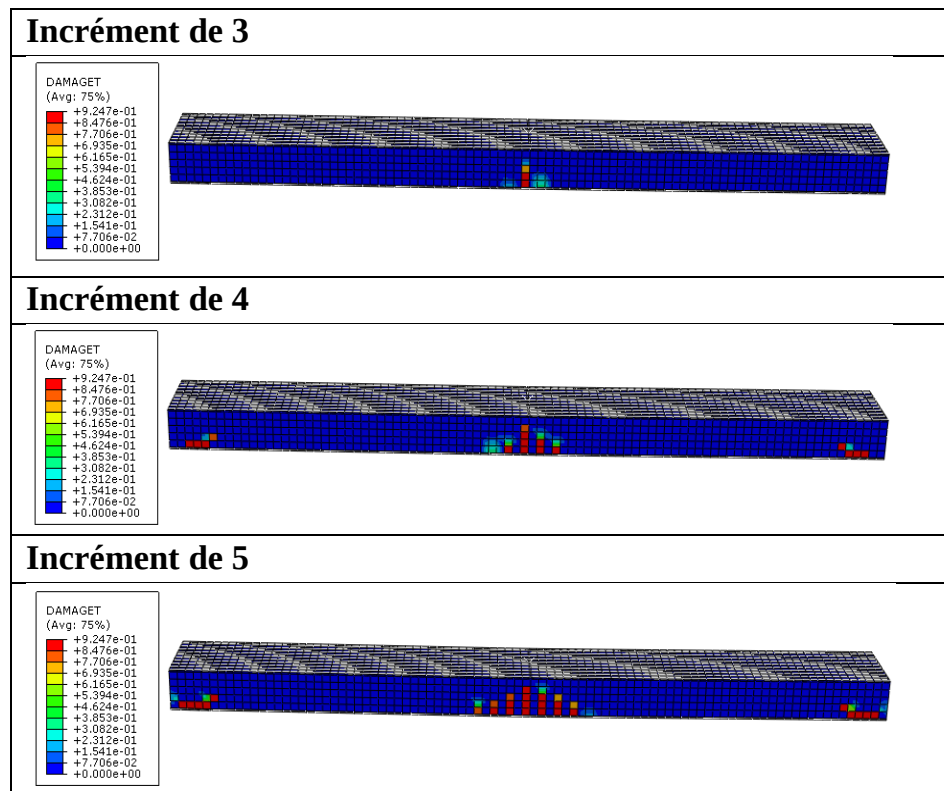


Figure IV.14 : Évolution des dommages dans les sandwichs dissymétriques SD-JP.

Pour le cas des sandwichs dissymétriques le panneau (SD-PJ) présente des dommages moins importants comparativement au panneau (SD-JP) donc moins de propagation de fissures. La semelle inférieure en tissu de jute confère au panneau un seuil de résistance et diminue les dommages en traction dans cette région.

IV.2.3.1 cas du panneau renforcé dans sa face inférieure :

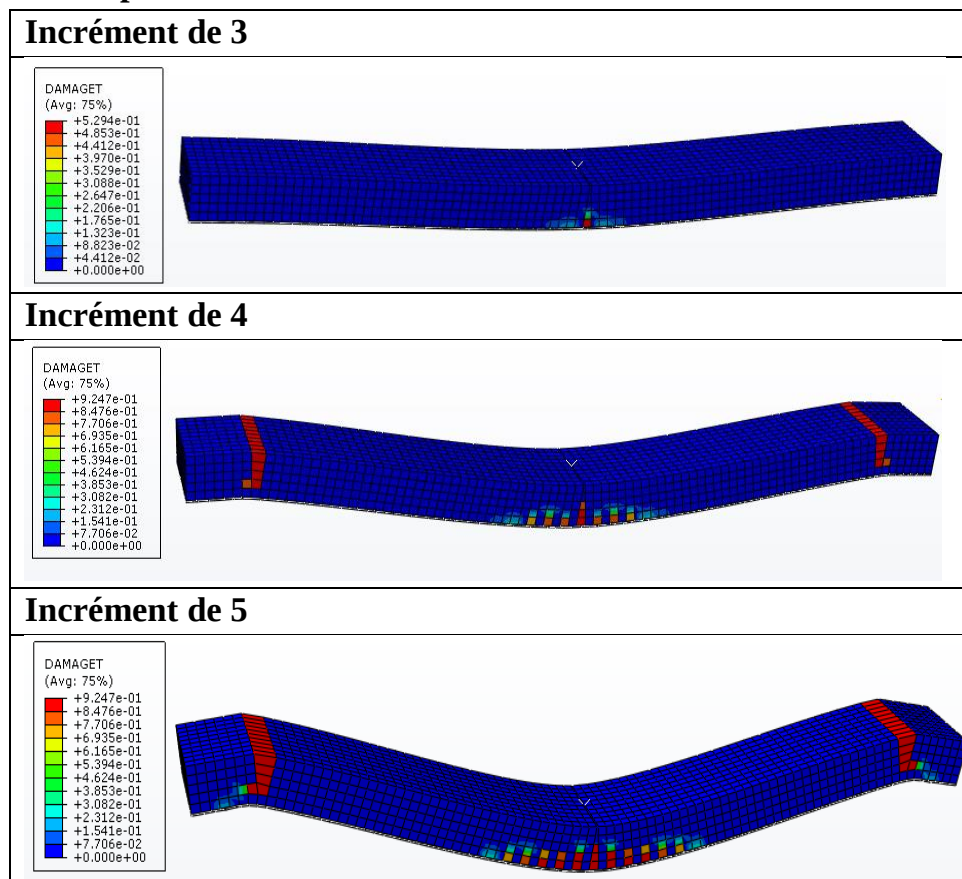


Figure IV.15: Évolution des dommages dans le panneau PR-FI.

La figure IV.15 illustre l'état d'endommagement du panneau renforcé dans sa face inférieure, on relève que les microfissures apparaissent en premier lieu dans la zone tendue du panneau, les dommages évoluent avec l'augmentation de l'incrément de charge et se propagent vers l'âme du panneau sandwich, à la fin du chargement, des dommages très importants sont remarqués dans la face supérieure du panneau précisément dans la zone d'appuis vu l'absence de la semelle supérieur, ce qui confirme encore une fois le rôle fondamentale des semelles dans la reprise des charges extérieures.

IV.2.4 confrontations des courbes force-déplacement

La confrontation des courbes forces-déplacements des différentes variantes 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.16 et IV.17. Cette confrontation met en évidence les caractéristiques mécaniques des panneaux multicouches étudiés en termes de rigidité flexionnelle, ductilité et capacité portante.

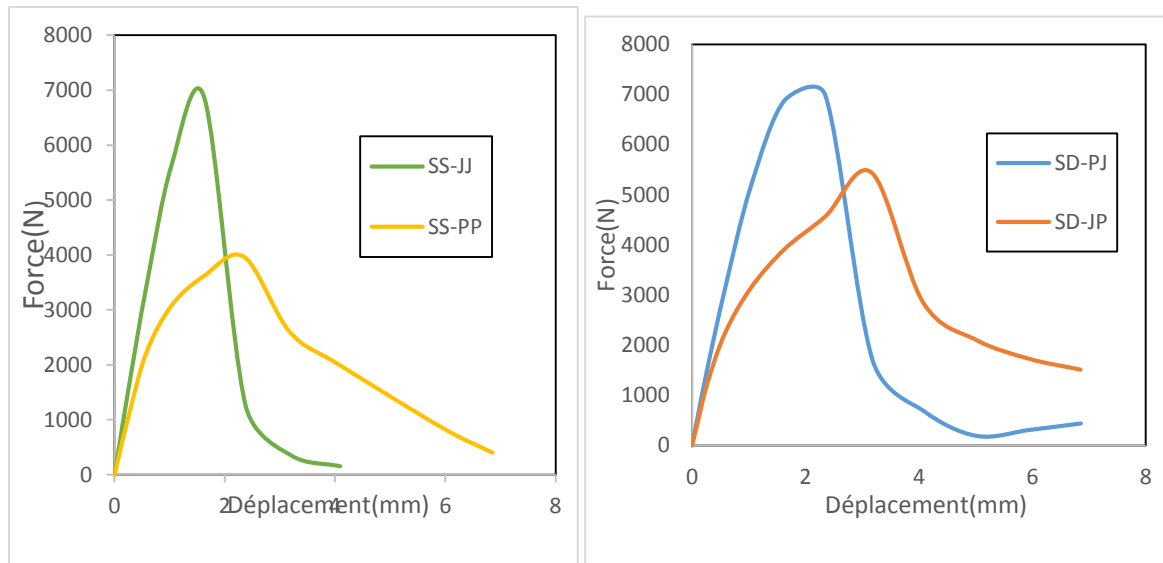


Figure IV.16 : Confrontation des courbes forces-déplacements en flexion : a) sandwichs symétriques, b) sandwichs dissymétriques.

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 et 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 supérieur à celui correspondant à la résistance maximale.

Le panneau sandwich symétrique à semelle en tissu de jute présente des capacités portantes améliorées par rapport au panneau sandwich symétrique à semelle en tissu de polypropylène. La charge ultime des panneaux (SS-JJ) et (SS-PP) sont respectivement de l'ordre de 6864.58 N et 3964.59 N avec un déplacement vertical correspondant de 1.63 mm et 2.35mm respectivement.

Le panneau sandwich dissymétrique (SD-PJ) présente une capacité portante améliorée par rapport au panneau sandwich dissymétrique (SD-JP). Les charges ultimes des sandwichs (SD-PJ) et (SD-JP) sont respectivement de l'ordre de 6978.85N et 5438.59N avec un déplacement vertical de 2.35 mm et 3.17 mm respectivement

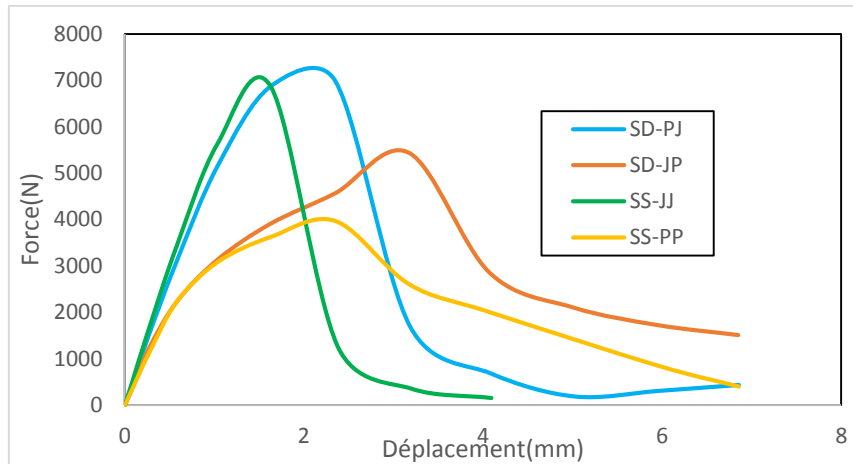


Figure IV.17 : Confrontation des courbes forces-déplacements des Sandwich symétriques et dissymétriques en flexion.

Les panneaux sandwichs dissymétriques présentent des capacités portantes améliorées comparativement aux panneaux symétriques. Le panneau sandwich dissymétrique (SD-PJ) présente un meilleur comportement en termes de capacité portante et ductilité.

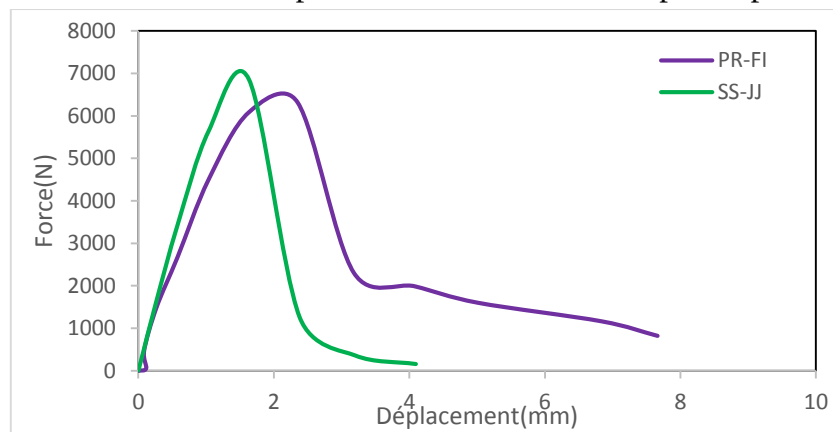


Figure IV.18: Confrontation des courbes forces-déplacements du sandwich SS-JJ et du sandwich PR-FI en flexion.

La capacité portante du panneau renforcé par le tissu de jute dans sa face inférieure (zone tendue) est légèrement moins importante que la capacité portante du sandwich symétrique (SS-JJ), sa charge ultime est de l'ordre de 6312.88 N avec un déplacement de 2.35mm. La différence de la capacité portante des deux panneaux est estimée de 8% et malgré l'absence de la semelle supérieure dans le panneau (PR-FI) la ductilité est bien améliorée. Avec ces résultats obtenus, en termes d'économie de matière on peut choisir le panneau (PR-FI) comme meilleur variante

IV.3 Étude de la variation d'épaisseur des semelles :

Dans le même concept une confrontation des courbes forces-déplacements de la meilleure variante d'étude obtenue à savoir le sandwich dissymétrique (SD-PJ) est présentée avec une étude de la variation d'épaisseur des semelles, dans le but d'obtenir une capacité portante maximale que pourra supporter le panneau sandwich.

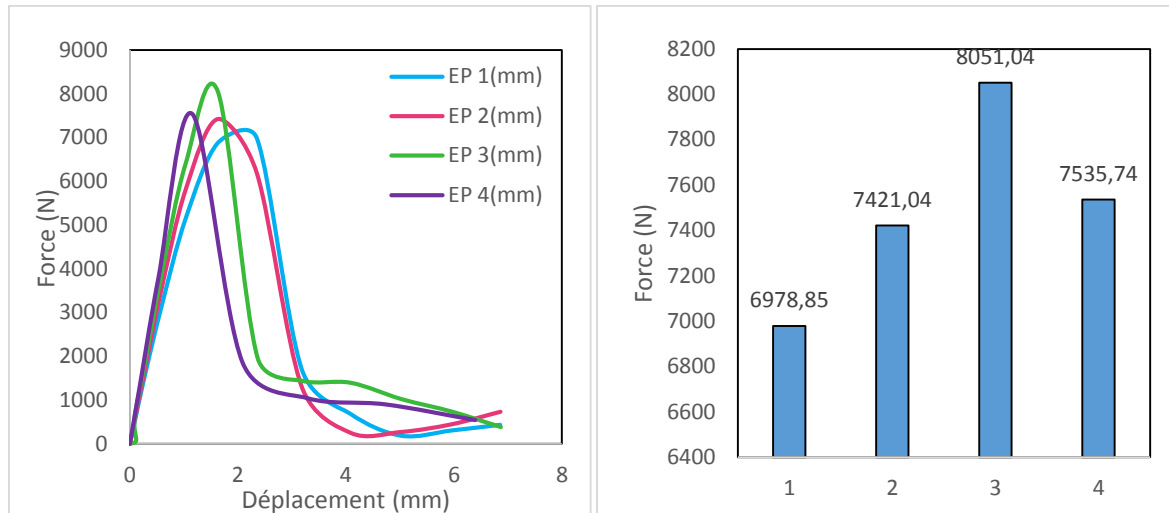


Figure IV.19: Courbe et Histogramme de la variation de l'épaisseur des semelles du panneau SD-PJ.

La figure IV.18 présentée ci-dessus montre la variation de la force en (N) en fonction du déplacement en (mm) tout en faisant varier l'épaisseur des semelles avec un pas de 1mm, la capacité portante des panneaux sandwichs continue d'augmenter pour les épaisseurs de 1mm, 2mm et 3mm avec des charges ultimes de l'ordre de 6978.85N, 7421.04N et 8051.04N respectivement. La charge ultime cesse d'augmenter à une épaisseur des semelles égale à 4mm, elle est de l'ordre de 7535.74 N.

IV.4 résultats du flambement :

Dans la deuxième partie de notre investigation numérique, une étude du comportement mécanique des panneaux sandwichs de dimension 450 x 23 X 50 mm chargés en flambement suivant la norme NF T 54-606 [1] est réalisée. Le chargement est appliqué sur l'un des bouts du panneau composite avec une incrémentation de charge très modérée. Les résultats de la simulation en termes de contraintes, déformations et dégradations de la rigidité sont recueillis et ils mettent en exergue la performance mécanique des multicouches proposés.

IV.4.1 Cartographie des contraintes :

Les différentes cartographies et figures ci-dessous montrent l'évolution de la distribution des contraintes de flambement et de Von Mises, respectivement dans les sandwichs à semelles symétriques (SS-JJ) et (SS-PP) et à semelles dissymétriques (SD-JP) et (SD-PJ), pour divers valeurs de l'incrément de charge.

IV.4.1.1 Cas des sandwichs symétriques :

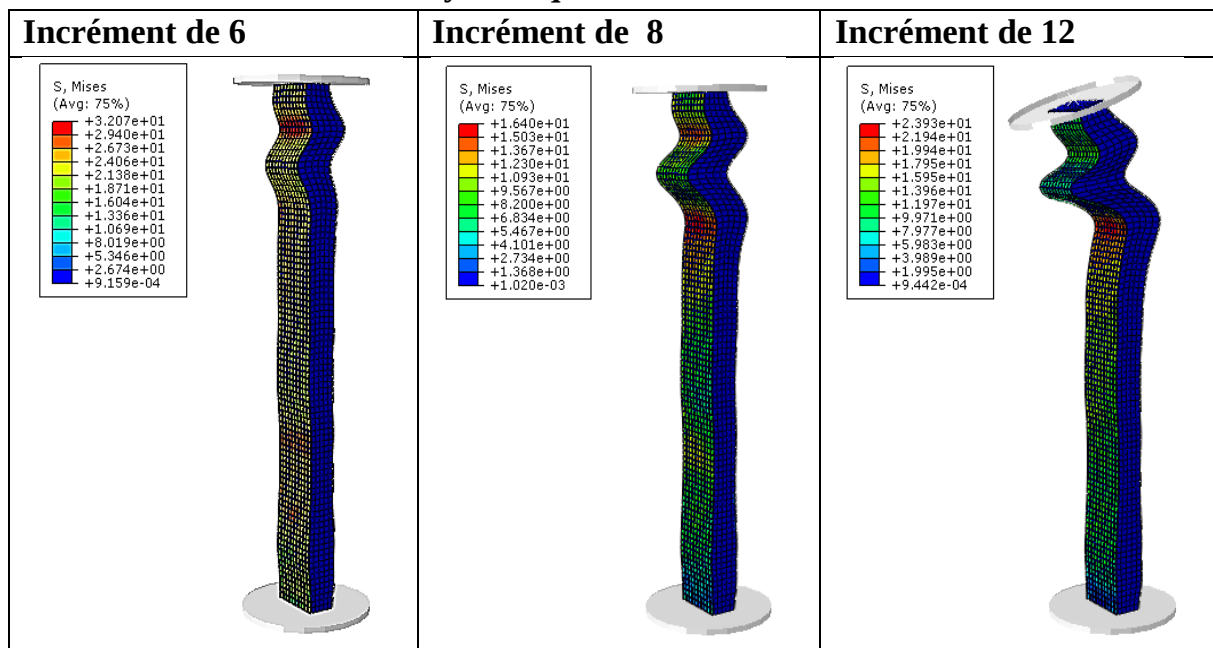


Figure IV.20: Propagation des contraintes de flambement dans le sandwich SS-JJ.

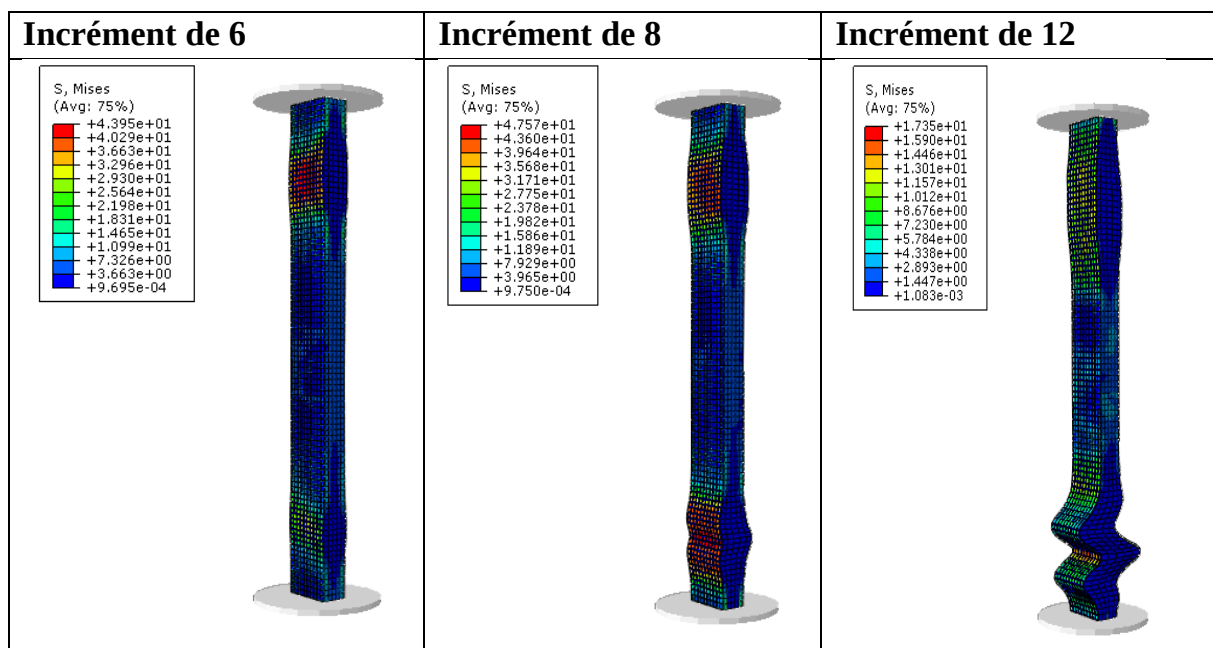


Figure IV.21: Propagation des contraintes de flambement dans le sandwich SS-PP.

IV.4.1.2 Cas des sandwichs dissymétriques :

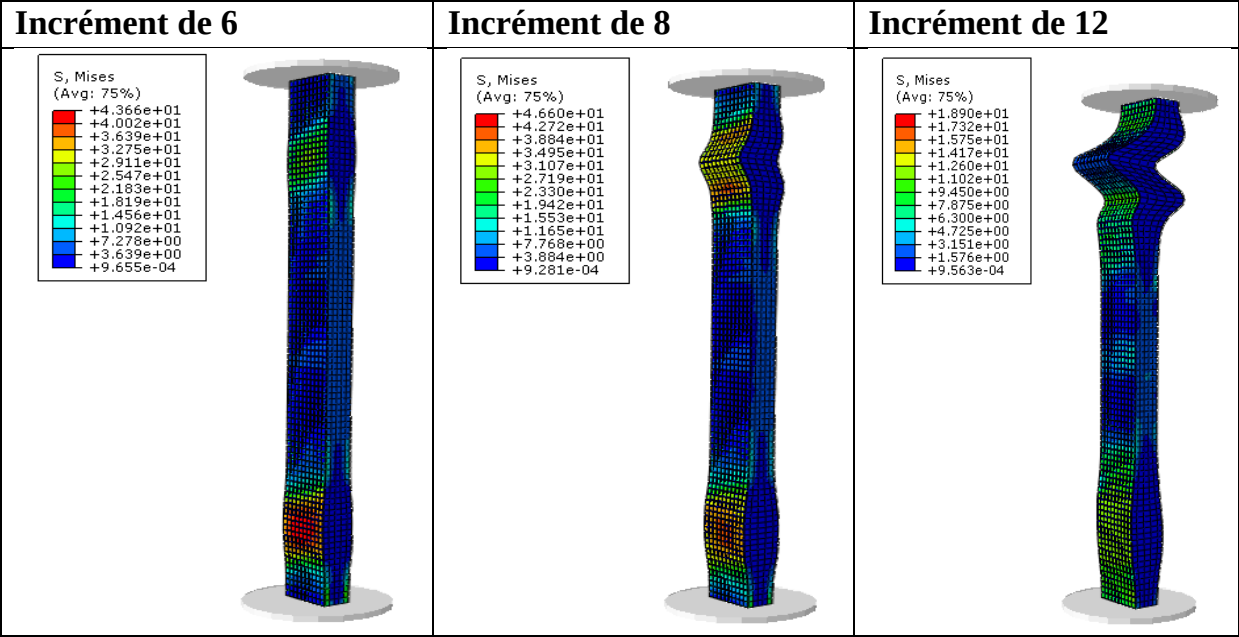


Figure IV.22 : Propagation des contraintes de flambement dans le sandwich SD-PJ.

Les cartographies des figures IV.20, IV.21 et IV.22 nous renseignent sur l'état de contrainte dans les différentes configurations des panneaux. Dans le cas des sandwichs symétriques l'évolution de champ de contraintes est plus rapide comparativement aux sandwichs dissymétriques, les éléments atteignent la phase de densification des contraintes après un temps de chargement très court, on observe que le champ de contraintes est concentré dans la région d'extrémités du panneau sandwich dès le début du chargement ce qui induit à un phénomène d'instabilité connue par le flambement local, engendrant l'ouverture des fissure qui donnera par la suite la rupture de l'élément.

On relève aussi que le champ de contraintes est moins important dans la région centrale des sandwichs, le flambement dans cette région est empêché par l'âme en raison de la grande rigidité de cette dernière dans son propre plan.

IV.4.2 Cartographies des déplacements :

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

IV.4.2.1 Cas des sandwichs symétriques :

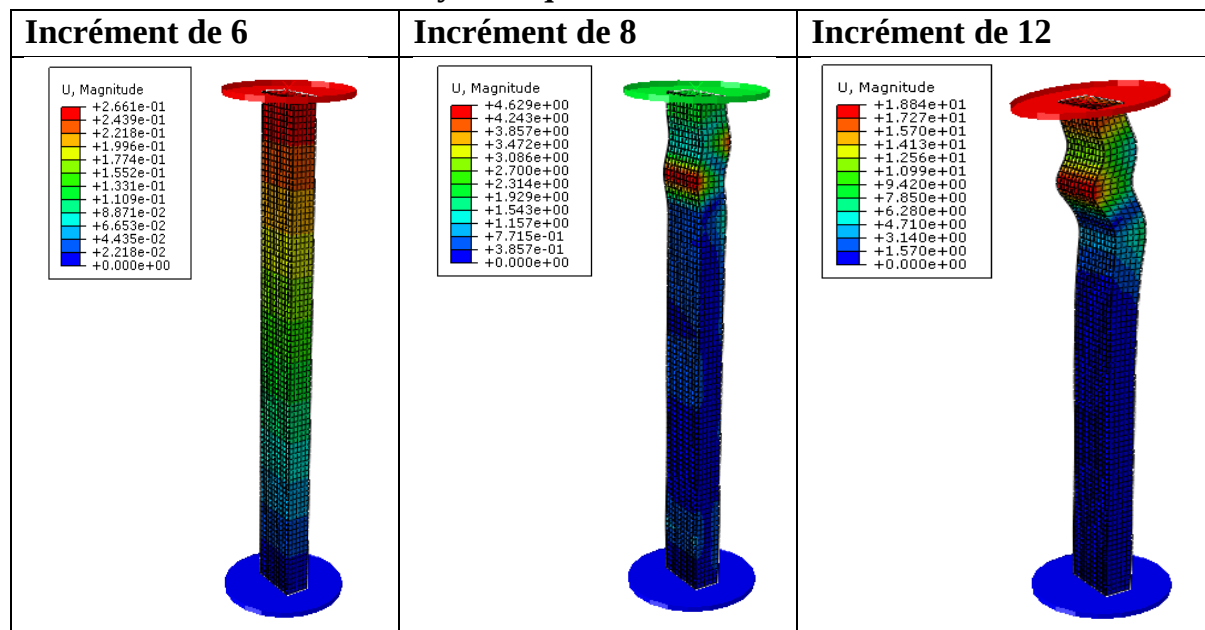


Figure IV.23 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich SS-JJ.

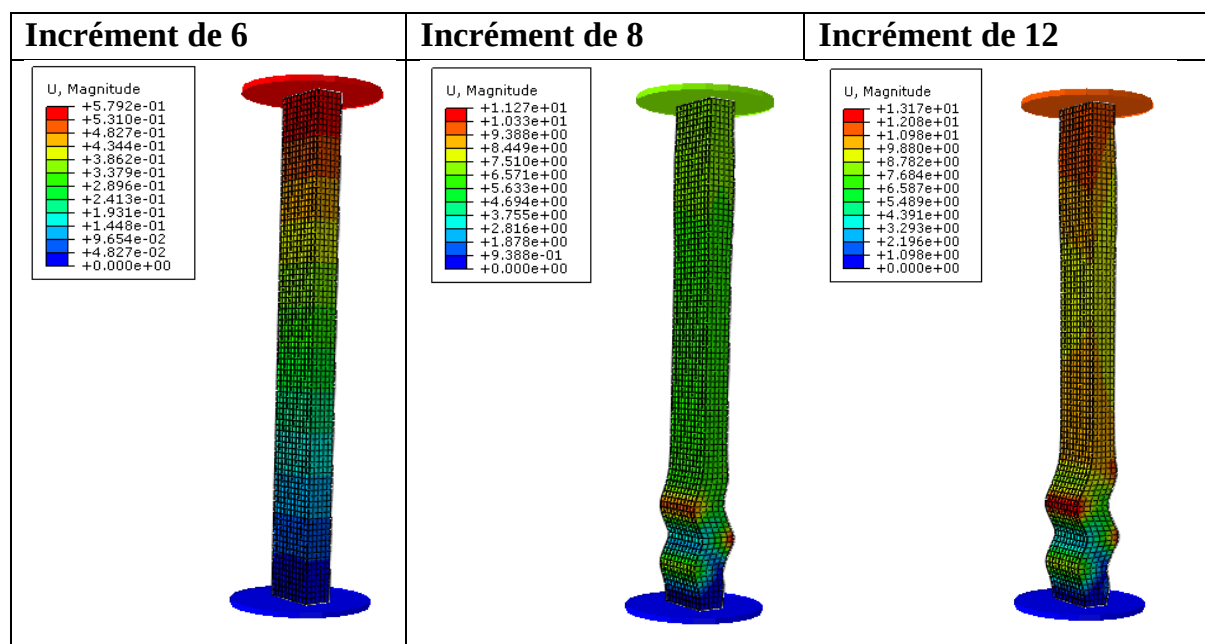


Figure IV.24 : Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich SS-PP.

IV.4.2.2 Cas des sandwichs dissymétriques :

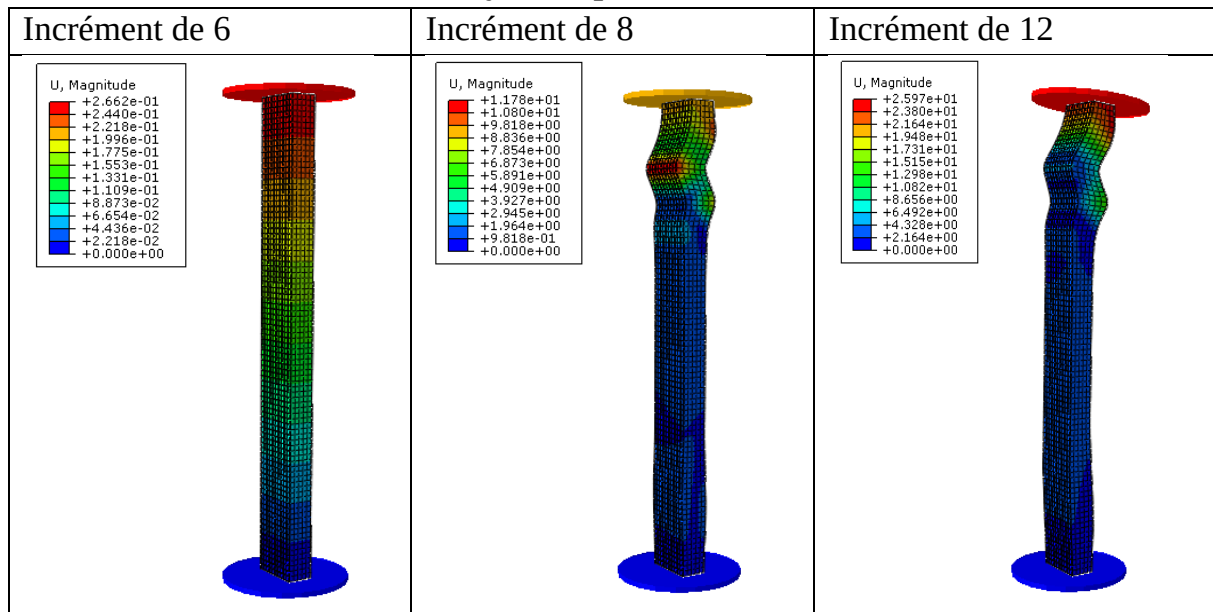


Figure IV.25: Propagation des déplacements axiaux dans le sandwich dissymétrique SD-PJ.

On observe que les déplacements axiaux sont maximaux dans la zone d'application de l'effort et nulles au niveau de l'encastrement. Les déplacements maximales des panneaux symétriques (SS-JJ) et (SS-PP) sont de l'ordre de 4.20 mm et 4.09 mm respectivement, pour le panneau dissymétrique le déplacement maximale est de l'ordre de 4.28 mm. En termes de déplacement axiale et de ductilité c'est le panneau sandwich dissymétrique qui présente le meilleur comportement.

IV.4.3 Cartographies des dommages :

A travers cette simulation numérique du modèle élément fini proposé, on représente l'évolution des dommages dus à la compression des éléments considérés ainsi que l'évolution des fissures. Les résultats sont représentés par les cartographies des figures ci-dessous.

IV.4.3.1 cas des sandwichs symétriques :

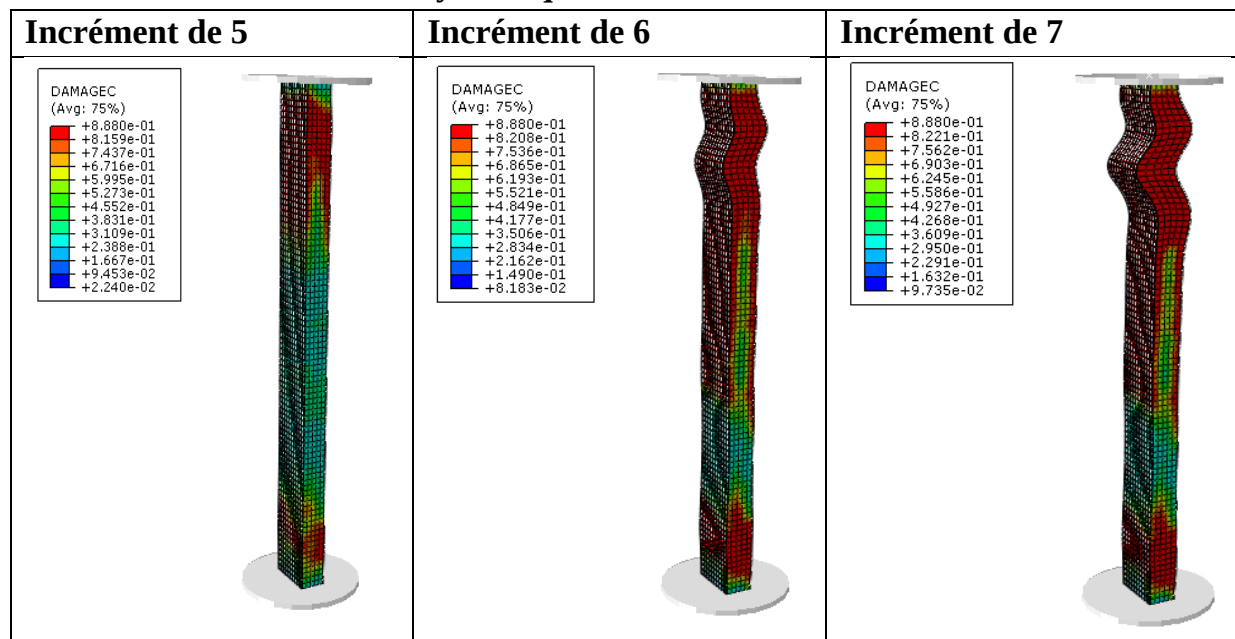


Figure IV.26 : Évolution des dommages en flambage dans le panneau SS-JJ.

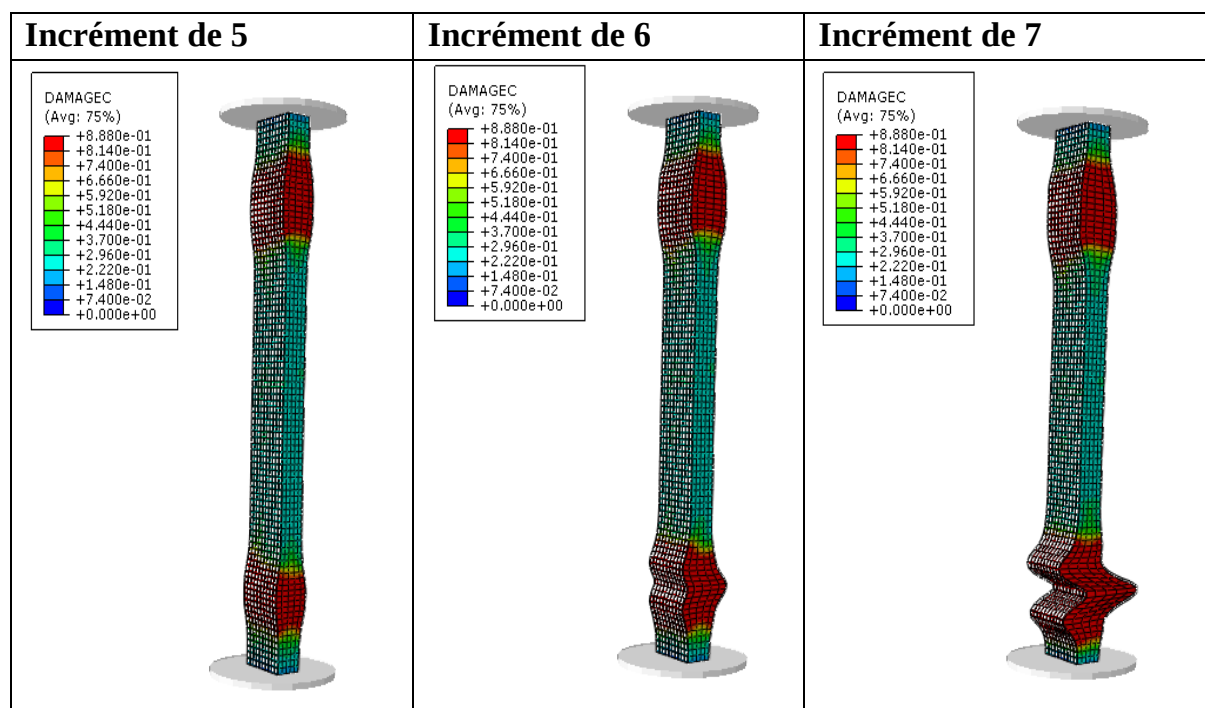


Figure IV.27 : Évolution des dommages en flambage dans le panneau SS-PP.

IV.4.3.2 cas des sandwichs dissymétriques :

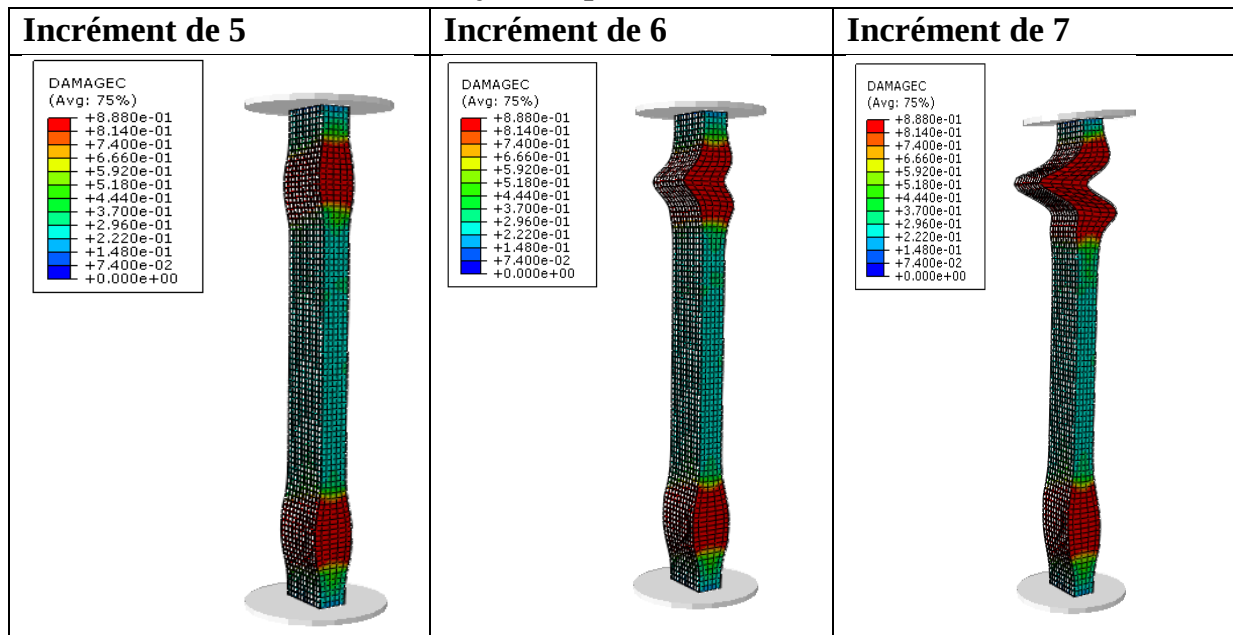


Figure IV.28: Évolution des dommages en flambage dans le panneau dissymétrique SD-PJ.

Les figures présentent l'état d'endommagement des panneaux. Les microfissures apparaissent en premier lieu dans les extrémités de l'élément en raison de la grande concentration des contraintes de flambement dans ces deux régions, les dommages évoluent progressivement avec l'augmentation de l'incrément de charge jusqu'à la rupture de l'élément.

IV.4.4 Confrontation des courbes force –déplacement :

Les résultats de la simulation en termes du comportement global des sandwichs étudiés sous chargement de compression avec flambement sont respectivement recueillis dans les courbes force-déplacement.

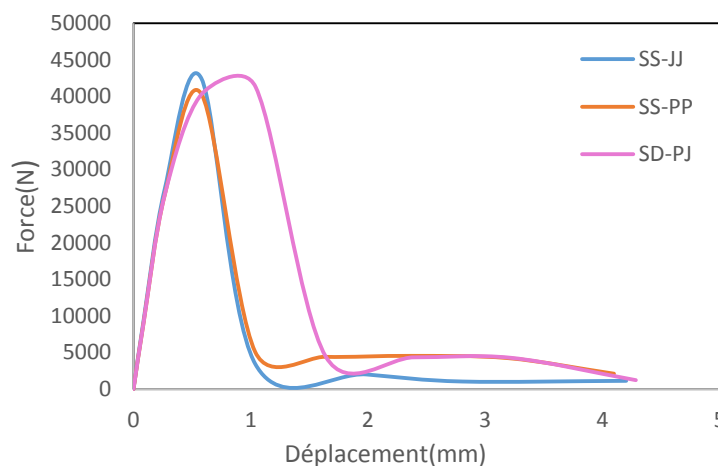


Figure IV.29 : Confrontation des courbes forces-déplacements des panneaux sandwichs SS-JJ, SS-PP et SD-PJ chargés en flambement.

Les panneaux multicouches simulés présentent des résistances mécaniques de flambement très améliorées comparativement à celle de la flexion. Leur comportement est caractérisé par une partie élastique linéaire, jusqu'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. La capacité portante de flambement des sandwichs symétriques (SS-JJ) et (SS-PP) sont respectivement de l'ordre de 42448.8 N et 40227.1 N avec un déplacement axial correspondant de 0.57 mm et 0.58 mm. Le panneau dissymétrique (SD-PJ) présente une charge ultime de flambage de l'ordre de 41253.2 N avec un déplacement axial correspondant de 1.04 mm

IV.5 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons présenté la procédure numérique, qui nous a permis de simuler le comportement mécanique des panneaux sandwichs sous chargement de flexion et de flambement. Notre modèle élément fini, permet de quantifier la réponse locale et la réponse globale de la structure étudiée, à travers l'évolution des contraintes, des déplacements, et des dommages en fonction de l'évolution de la charge appliquée avec une adéquation satisfaisante. En conclusion, une étude comparatif a été bien mené entre les différentes variantes d'étude à savoir : (les sandwichs symétriques, dissymétriques et panneau renforcé dans sa face inférieur) dans le but d'étudier le comportement de ces structures vis-à-vis de la capacité portante et de la ductilité. La visualisation des cartographies de contrainte, déplacements et propagation des zones endommagées en traction pour l'essai de flexion et en compression pour l'essai de flambement reste cohérente.

Conclusion général

Le travail présenté dans ce mémoire a fait l'objet de l'étude numérique du comportement mécanique des panneaux sandwichs innovants confectionnés à base de produits naturels. Les structures composites développées ont été élaborées avec une matrice mortier allégée par des fibres d'agaves comme âme et des tissus de jute et de polypropylène comme semelles, collés à l'aide d'une résine de nature époxyde.

Dans ce travail de recherche, une étude numérique est réalisée en utilisant le code Abaqus. L'étude est basée sur la méthode des éléments finis. Les matériaux d'âme sont modélisés suivant un modèle élasto-plastique 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 pour les matériaux composite des semelles à savoir la tissu en polypropylène et le tissu de jute. Par la suite tous les résultats obtenus, en termes de contrainte et de déformation et de dégradation de la rigidité sont discutés et présentés sous forme de cartographies d'évolution de contraintes, des déplacements et des endommagements en traction pour l'essai de flexion et en flambement pour l'essai de compression et de graphiques force déplacement, pour mettre en valeur les performances mécaniques des structures composites développées.

Les différents résultats obtenus de la simulation montrent l'efficacité des multicouches proposés en termes de résistance et ductilité. La conjugaison des performances mécaniques des tissus composites permet de réduire la propagation 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, les résultats de la simulation obtenue pour les différents essais sont les suivant :

Essais de flexion

- la charge ultime en flexion des sandwichs symétriques (SS-JJ) et (SS-PP) sont respectivement de l'ordre de 6864.58 N et 3964.59 N avec un déplacement vertical correspondant de 1.63 mm et 2.35mm respectivement.
- Les charges ultimes en flexion des sandwichs dissymétriques (SD-PJ) et (SD-JP) sont respectivement de l'ordre de 6978.85N et 5438.59N avec un déplacement vertical de 2.35 mm et 3.17 mm respectivement.
- La charge ultime en flexion du panneau renforcé dans sa face inférieur (PR-FI) est de l'ordre de de 6312.88 N avec un déplacement de 2.35mm.

Pour l'essai de la variation de l'épaisseur des semelles on a pris la meilleure variante d'étude à savoir le sandwich dissymétrique (SD-PJ) avec une épaisseur

de 3mm sa charge ultime est de l'ordre de 8051.04N avec un déplacement correspondant

Essais de compression par flambement

- Les charges ultimes en flambement des sandwichs symétriques (SS-JJ) et (SS-PP) sont respectivement de l'ordre de 42448.8 N et 40227.1 N avec un déplacement axial correspondant de 0.57 mm et 0.58 mm.
- La charge ultime en flambement du sandwich dissymétrique (SD-PJ) est de l'ordre de 41253.2 N avec un déplacement axial correspondant de 1.04 mm

Les résultats de cette simulation numérique sont très encourageant et soulignent l'intérêt de la conception proposée de panneaux de mortier, allégés de fibres végétales, dotés de propriétés mécaniques spécifiques acceptables pour leur utilisation, de faibles densités, de couts de fabrication et de main d'œuvre plus faibles, et surtout d'un impact positif sur l'environnement.

Références bibliographies

- [1] **J. Molimard**, Mécanique des Matériaux composites, Version 2, EMSE 2004.
- [2] **Claude Bathias** : « **Matériaux composites** » ; Edition L'usine Nouvelle DUNOD.2005
- [3] [KAR 00] KARBHARI, V., *Durability of frp composites for civil infrastructure –myth, mysteryor reality*, Department of Structural Engineering University of California, PresentationPower Point, 2000,
- [4] **Gay Danielle**, *Matériaux composites* ,5eme édition révisée, 2005
- [5] **Berthelot J. M.**, “*Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures*”, 4 ème édition, 1996
- [6] **B. castanié** « *contribution à l'étude des structures sandwichs dissymétriques* » Ecole national supérieur de l'aéronautique et de l'espace.
- [7] **Moustapha IDRIS**, Analyse expérimentale et par éléments finis du comportement statique et vibratoire des matériaux composites sandwichs sains et endommagés. Thèse de doctorats, Université du Maine. 201
- [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] **Vincent Plana**, caractérisation par méthode inverse et modélisations des propriétés thermo physiques orthotropes des matériaux composites. Thèse de doctorat. Ecole SUPAERO de France. 2003 page 9-10
- [10] **Louis Berreur, Bertrand de Maillard, Stanislas Nösperger** « L'industrie française des matériaux composites» : Rév. 2 du 13 mai 200. 17 décembre 2001
- [11] <http://worldwartwozone.com/forums/index.php?/topic/6307-dehavilland-dh-98-mosquito/>
- [12] **KUJALA K. and TUHKARI J.**, "All-steel corrugated-core sandwich panels for ship structures," Solihull ed: EMAS, 1989, pp. 411-422.
- [13] **KIMPARA I., et al.**, "Design and evaluation of advanced composite honeycomb sandwich structures for marine uses," ed: EMAS, 1989, pp. 37-46.
- [14] **WEISSMAN-BERMAN D.**, "Marine sandwich structures, Part 1," SAMPE journal, Vol. 28, juillet/août 1992.
- [15] **REYNE M.** - Technologies des composites (3ème édition revue et augmentée). - Paris : HERMES, 1998. - 222 p.
- [16] **LACHGUER Abdelkarim AKYOUN Mohamed** « *les matériaux sandwich et lesrisques d'instabilités géométriques locales* » étude bibliographique, Ecole Des Mines De

Douai, 2014.

[17] **A. MIR, B. BEZZAZI, R. ZITOUNE, F. COLLOMBET**-Caractérisation mécanique d'un panneau sandwich à âme en liège et peaux jute/époxy-Comptes Rendus des JNC 17 - Poitiers 2011

[18] <http://www.google.fr/imgres>

[19] Comptes Rendus des JNC 17 - Poitiers 2011

[20] **Laurent Gorent** : « Généralités sur les M.C ».Ecole d'ingénieur 2008

[21] **EL Hadj Babacaly** « nouveaux MC (thermo-formable a base fibre de cellulase)Materialchemistry.institut national polytechnique de Grenoble _INPG 2008.

[22] **GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES**,'' centre d'animation régional en matériaux avances, 2006.

[23] **Jean Marie Berthelot** : « matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures ». ; 5° édition 2012.

[24]**université de Reims** ; Champagne-Ardenne ; Laboratoire de génie civil « comportement mécanique de structure de génie civil »

[25]**Noureddine HOUHOU** ‘ Durabilité des interfaces collées béton/renforts composite : développement d'une méthodologie d'étude basée sur un dispositif de fluage innovant conçu pour être couplé à un vieillissement hygrothermique. « Thèse de doctorat de l'université Paris Est2012 »

[26] <http://www.sika.com>

[27] **ZAIDI Ali**, «Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (Effet du vieillissement). » Mémoire de magister, Université de Tizi-Ouzou. 2014

[28] **Nourredine ARABI**, contribution à l'étude du composite ciment-verre et durabilité des fibres de verre. Thèse de doctorat, université BM-ANNABA. 2006

[29] **Lionel Gendre**, « Matériaux composites et structures composites ». Université de Paris E.N.S de Cachan ,2011.

[30]Glossaire des matériaux composites– CARMA –Actualisation octobre 2006.

[31] **BLEDZKI, A. K and GASSAN**.‘‘Composites reinforced with cellulose based fibers ‘‘ ELSEVIER, Progress in polymer science, volume 24, pp.221-274, 1999.

[32] :**M.Nardin** ''interface fibre-matrice dans les matériaux composites application aux fibres végétales'', revue des composites et des matériaux avancés, Vol 16, pp 49-61, 2006.

[33] **A. Y. Nenonene**,''Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage'', thèse de

doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.

[34] **F. Michaud**, ''Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage'' thèse Phd, univ Laval, 2003.

[35] **Yahiaoui Lamia** université Ferhat Abbas –Sétif- mémoire magister 2011 (caractérisation d'un composite à la rupture à base des fibres végétale).

[36] **Malou Malika**, université Mentouri Constantine thèse doctorat 30 octobre 2007 (influence de l'introduction des fibres métalliques sur le comportement différé d'une matrice cimentaire, caractérisation-comportement monotone-microstructure).

[37] **K.Charle, C.morvan, J.Bréard, JP.Jernot, M.Gomina**, ''Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin'' revue des composites et des matériaux avancées, Vol16, pp11-24,2006.

[38] **C.Ververis, K.Georghiou, N.Christodoulakis, P. Santas, R.Santas**.'' Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their Suitability for paper production. Industrial Crops and Products 19: 245–254,2004.

[39]. **Thuault A**. Approche multi-échelle de la structure et du comportement mécanique de la fibre de lin. Thèse de doctorat, Université de Caen Basse Normandie, 2011.

[40]. **Pickering KL, Beckermann GW, Alam SN, Foreman NJ**. Optimising industrial hemp fibrefor composites. Composites: Part A, Vol. 38, pp. 461–468, 2007.

[41]. **Charlet K, Jernot JP, Gomina M, Bréard J, Morvan C, Baley C**. Influence of an Agathaflax fibre location in a stem on its mechanical, chemical and morphological properties, Composites Science and Technology. Vol. 69, N° 9, pp. 1399-1403, 2009.67

[42]. **Baley C, Morvan C, Grohens Y**. Influence of the absorbed water on the tensile strength of flax fibers. Macromol symp. N° 222, pp. 195-201, 2005.

[43]. **Bos HL, Donald AM**. In situ ESEM study of the deformation of elementary flax fibres. Journal of Materials Science. pp. 221-274, 1999.

[44]. **Sarén MP, Serimaa R**. Determination of microfibril angle distribution by X-raydiffraction.Wood Science and Technology. Vol. 40, N°6, pp. 445-460, 2005.

[45]. **Baley C**. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Vol. 5. Techniques de l'ingénieur, 2008

[46]. **Bos H**. The potential of flax fibres as reinforcement for composite materials. Thèse de doctorat, Eindhoven, 2004.

[47]. **Wang HH, Drummond JG, Reath SM, Hunt K, Watson PA**.An improved fibril anglemeasurement method for wood fibres. Wood Science and Technology. Vol.34, N° 6, pp. 493-503, 2001.

[48].**Thiery JP**. Mise en évidence des polysaccharides sur coupes fine en microscopie électronique. Vol. 6, pp. 987.1967.

[49]. **Jean-Louis Pariente, Pierre.** Histoire des Matériaux ou de l'âge de pierre aux matières plastiques. Progrès en Urologie, 15. 863-864. 2005.

[50]. **Baley C.** Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase. Composites; 2002. vol. 33, pp. 939-948.

[51]. **Charlet K, Jernot JP, Bréard J, Gomina M.** Scattering of morphological and mechanical properties of flax fibres. Industrial Crops and Products. 2010. Vol. 32, Issue 3, pp. 220-224.68

[52]. **Bourmaud A, Baley C.** Rigidity analysis of polypropylene/vegetal fibre composites after recycling. Polymer Degradation and Stability, 2009. Vol. 94, pp. 297-305.

[53]. **Nakra BC.** Vibration control with viscoelastic material. *The Shock and Vibration Digest* 1984; 16:17-22.

[54]. **Vaswani J, Asnani NT et Nakra BC.** "Vibration and damping analysis of curved sandwich beams with a viscoelastic core". *Composites Structures* 1988, 10:231-245.

[55]. **Moser K, Lumassegger M.** "Increasing the damping of flexural vibrations of laminate FPC structures by incorporation of soft intermediate plies with minimum reduction of stiffness". *Composites Structures* 1988; 10:321-333.

[56]. **Meunier M et Shenoï.** Dynamic analysis of composites plates with damping modelled using high-order shear deformation theory. *Composites Structures* 2001; 54:367-374.

[57]: **R.M. Rowell** 'Composite Materials from Agricultural Resources' Olsen, Ole; Rexen, Finn; Larsen, Jorgen, eds. Research in industrial application of non food crops, I: plant fibers: Proceedings of a seminar; 1995 May; Copenhagen, Denmark. Linkboy, Denmark Academy of Technical Science: 27-41

[58] [http://fr.wikipedia.org/wiki/Jute_\(plante\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Jute_(plante)).

[59] **CCP: JU/HF/ ST / 2012/1.** FAO, Food and Agricultural Organization of United Nations economic and social department: statistical division. Allied and Coir, Abaca, Sisal, Kenaf, Jute) (الجوت التيل الباكاجوز الهند و الألياف المماتلة) *Fibres. Statistics of September 2012.*

[60] : **C Couhert.** Pyrolyse flash à haute température de la biomasse ligno- cellulosique et de ses composés - production de gaz de synthèse'', Thèse de pour obtenir le de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris Energétique. 2007.

[61]: **D Sedan,** ''Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composites'', thèse doctorat de l'université de limoges, matériaux céramiques et traitement de surface, 2007.

[62]: **S, Berlioze,** 'Etude de l'estérification de la cellulose par une synthèse sans solvant. Etude de comportement mécanique des composite biosourcés 35 Application aux matériaux nano composites'', thèse doctorat de l'université JOSEPH FOURIER, Sciences des Polymères, 2008

[63]:N.Joly, ''synthèse et caractérisation de nouveaux films plastiques obtenues par acylation et réticulation de la cellulose'', thèse doctorat de l'université de Limoges, chimie des substances Naturelles, 2003.

[64]: C.Satge, ''Etude de nouvelles stratégies de valorisation de mono et polysaccharides'', thèse doctorat de l'université de limoges, chimie des substances naturelles, 2002.

[65]: D, Hatsch, ''Interaction hôte/pathogène : étude du modèle Cumulus lupulus Fusarium graminearum. Identification, génomique et transcriptomique du pathogène,'' thèse de doctorat de l'université de Louis Pasteur Strasbourg I, Sciences du Vivant – Aspects moléculaires et cellulaires de la biologie.2004.

[66]:B.Montiès, ''Les polymères végétaux - Polymères pariétaux et alimentaires non azotés, Gauthier Villars (ed), Paris (1980).

[67]: B.R. Sharma, Naresh L., N.C. Dhuldhoya, S.U. Merchant and U.C. Merchant Lucid ''Colloids Limited Jodhpur''-342005, Rajasthan, India,2006.

[68]: S, Thiebaud, ''Valorisation chimique de composés lignocellulosiques : obtention de nouveaux matériaux'', thèse de doctorat, Institut National Polytechnique De Toulouse, Sciences des Agroressources, 1995.

[69] P. Saha et al. «Enhancement of tensile strength of lignocellulosic jute fibers by alkali-steam Treatment. ». Bioresource Technology., Vol. 101, 2010, pp. 3182–3187.

[70] J. Lubliner, J. Oliver, S. Oller and E. Onate « A plastic-damage model for concrete» International Journal Solids Structures 25(3), 299-326; 1989.

[72] ABAQUS, Theory Manual, version 6.12 et 6.14, Karlsson H., Abaqus Simulia, HKS Inc Providence, RI USA ; 2013.

[73] Adam et Neville .M ; « Propriétés des bétons ». Editions Eyrolles, Paris, 2000.

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