



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre :...../GM/2021

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Etude et simulation des performances des
composites à base de quatre fibres naturelles et
matrice en époxyde**

Présenté par :

1 : ETHALI Mohamed El Amine

2 : SAFI AMEUR Abdalkedar

Soutenu le 07/ 07/ 2021 devant le jury composé de :

Président : Pr ZENASNI Ramdane

UMAB - Mostaganem

Examineur : Dr BENKABOUCHE Sallah.E.

UMAB - Mostaganem

Encadreur : Dr KHIAT Mohammed Amine

UMAB - Mostaganem

Année Universitaire : 2020 / 2021

Remerciement

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer ma profonde gratitude et mes sincères remerciements au département de génie mécanique, université de Mostaganem **ABDELHAMID IBN BADIS**.

Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à notre encadreur de mémoire, **Mr.KHIAT** Je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé et conseillé.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions et ont accepté de me rencontrer et de répondre à mes questions durant mes recherches.

Je ne puis mentionner tous ceux qui ont contribué directement ou indirectement à la réalisation de ce travail que ceux qui m'ont aidé d'un simple encouragement à un Appuis continu trouvent ici l'expression de ma reconnaissance très sincère.

Enfin, Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi et pour leurs encouragements.

À tous ces intervenants, je présente mes remerciements, mon respect et ma gratitude.

Résumé

Les matériaux composites sont nés de l'association de matériaux aux caractéristiques complémentaires, pour conférer à cet assemblage des propriétés originales. Cependant, les matériaux composites et en particulier les composites à fibres naturelle ne sont utilisés de manière systématique que lorsque les matériaux traditionnels ne peuvent plus concorder aux exigences d'utilisation ou lorsque leur surcoût de fabrication est compensé par le gain de poids dû à leur faible densité. L'essor de ces matériaux est à l'origine lié au développement de l'industrie, l'aéronautique, et récemment dans le domaine du génie civil, dans le cadre d'une politique d'économie d'énergie et de protection de l'environnement. En effet, ces applications nécessitent des matériaux qui soient, à la fois légers, résistants, rigides et moins coûteux. Afin de valoriser les causes et les conséquences de la défaillance des plaques en matériaux composites, la compréhension complète des lois de comportement qui génèrent l'évolution du phénomène d'endommagement de ces matériaux sous des chargements critiques, doit être établie.

Le présent travail rejoint toujours les différents travaux réalisés jusqu'à maintenant sur l'endommagement des matériaux composites à fibres naturelles afin de prévoir la résistance et la durabilité d'un composite unidirectionnel en comparons cette fois-ci quatre cas de fibres naturelles, le Jute, Ramie, Alfa et Sisal dans une matrice en époxyde. Ce modèle suppose qu'un groupe de fibres cassées est entouré d'un nombre de fibres intactes sous forme d'un arrangement bien défini. L'évolution des charges des caractéristiques particulières de la fibre, la matrice, et l'interface fibre/matrice, sont les facteurs les plus importants pour évaluer la résistance du composite de point de vue micromécanique. Les conditions d'interfaces et d'adhérences sont prises en considération par ce modèle pour quantifier le taux de transfert des contraintes normales de cisaillement par l'intermédiaire de la matrice entre deux fibres voisines intacte et cassée.

Mots Clés : Micromécanique, Composite unidirectionnel, Interface Matrice époxyde

-Fibre naturelle.

Abstract

Composite materials are born from the association of materials with complementary characteristics, to give this assembly original properties. However, composite materials and in particular natural fiber composites are only used systematically when traditional materials can no longer meet the requirements of use or when their additional manufacturing cost is offset by the weight saving due to their low density. The development of these materials is originally linked to the development of industry, aeronautics, and recently in the field of civil engineering, as part of a policy of energy saving and protection of the environment. Indeed, these applications require materials which are at the same time light, resistant, rigid and less expensive.. In order to assess the causes and consequences of the failure of composite material plates, a complete understanding of the constitutive laws which generate the evolution of the phenomenon of damage to these materials under critical loads, must be established.

The present work always joins the various works carried out so far on the damage of composite materials with natural fibers in order to predict the resistance and the durability of a unidirectional composite by comparing this time if four cases of natural fibers, Jute, Ramie, Alfa and Sisal in an epoxy matrix. This model assumes that a group of broken fibers is surrounded by a number of intact fibers in the form of a well-challenged arrangement. The changing loads of the particular characteristics of the fiber, the matrix, and the fiber / matrix interface, are the most important factors in evaluating the strength of the composite from a micromechanical point of view. The interface and adhesion conditions are taken into account by this model to quantify the rate of transfer of normal shear stresses through the matrix between two neighboring intact and broken fibers.

Keywords : Micromechanics, Unidirectional composite, Epoxy matrix interface - Natural fiber.

ملخص

تنشأ المواد المركبة من ارتباط المواد ذات الخصائص التكميلية ، لإعطاء هذا التجميع الخصائص الأصلية. ومع ذلك ، لا يتم استخدام المواد المركبة وخاصة مركبات الألياف الطبيعية بشكل منهجي إلا عندما لا تتمكن المواد التقليدية من تلبية متطلبات الاستخدام أو عندما يتم تعويض تكلفة التصنيع الإضافية عن طريق توفير الوزن بسبب كثافتها المنخفضة. يرتبط تطوير هذه المواد في الأصل بتطوير الصناعة والملاحة الجوية، ومؤخراً في مجال الهندسة المدنية ، كجزء من سياسة توفير الطاقة وحماية البيئة. في الواقع ، تتطلب هذه التطبيقات مواد تكون في نفس الوقت خفيفة ومقاومة وصلبة وأقل تكلفة.. من أجل تقييم أسباب ونتائج فشل ألواح المواد المركبة يجب إنشاء فهم كامل للقوانين التأسيسية التي تولد تطور ظاهرة تلف هذه المواد تحت الأحمال الحرجة.

ينضم العمل الحالي دائماً إلى الأعمال المختلفة التي تم تنفيذها حتى الآن بشأن تلف المواد المركبة بالألياف الطبيعية من أجل التنبؤ بمقاومة ومتانة مركب أحادي الاتجاه من خلال مقارنة هذا الوقت إذا أربع حالات من الألياف الطبيعية ، الجوت ، رامي ، ألفا والسيزال في مصفوفة إيبوكسي. يفترض هذا النموذج أن مجموعة من الألياف المكسورة محاطة بعدد من الألياف السليمة في شكل ترتيب جيد التحدي. تعتبر الأحمال المتغيرة للخصائص الخاصة للألياف والمصفوفة وواجهة الألياف / المصفوفة من أهم العوامل في تقييم قوة المركب من وجهة نظر ميكانيكية دقيقة. يتم أخذ شروط الواجهة والالتصاق في الاعتبار من خلال هذا النموذج لتحديد معدل نقل ضغوط القص العادية من خلال المصفوفة بين ألياف متجاورة سليمة ومكسورة.

الكلمات الدالة : الميكانيكا الدقيقة ، مركب أحادي الاتجاه ، واجهة مصفوفة إيبوكسي - ألياف طبيعية.

Table des matières

Remerciement	
Résumé.....	I
Table des matières	
Liste des figures.....	IV
Liste des tableaux.....	VI
Liste des symboles.....	VII
Introduction générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites	
I.1. Définition.....	4
I.1.2. Caractéristiques générales.....	4
I.1.3. Type des matériaux composites.....	6
I.1.4. Classification des matériaux composites.....	7
I.1.5. Constituants des matériaux composites.....	7
I.1.5.1. La matrice.....	7
I.1.5.1.1. Différentes natures de la matrice.....	7
I.1.5.2. les résines.....	7
I.1.5.2.1. Les divers types de résines.....	7
I.1.5.3. Les renforts.....	8
I.1.5.3.1. Différents types de renfort.....	8
I.1.5.3.2. Différentes natures de renfort.....	9
I.2 Stratifiés monolithique plans.....	10
I.3 Les principales fibres.....	11
I.3.1 Les fibres de verre.....	11
I.3.2 Les fibres de carbone.....	11
I.3.3 Les fibres d'aramide (Kevlar) ou de polypropylène.....	12
I.3.4 Les fibres céramiques.....	12
I.3.5 Les fibres synthétiques thermostables.....	13

Références Bibliographiques	13
Chapitre II : Généralité sur les fibres naturelles	
II.1 Introduction.....	14
II.1.1 Les fibres végétales.....	14
II.1.1.1 Utilisations des fibres végétales.....	14
II.1.1.2 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts des matériaux composites.....	15
II.1.2 Les fibres naturelles.....	16
II.1.2.1 Intérêt de l'utilisation des fibres naturelles.....	16
II.1.2.2 La classification des différentes fibres naturelles.....	17
II.1.2.3 Avantages des composites renforcés de fibres naturelles.....	17
II.1.2.4 Inconvénients principaux.....	17
II.2 Présentations des différentes fibres végétales.....	18
II.2.1 Le chanvre.....	18
II.2.2 Le Coton.....	18
II.2.3 Le Kénaf.....	19
II.2.4 Le Coco.....	19
II.2.5 L'Abaca.....	20
II.3 Conclusion.....	21
Références Bibliographiques	21
Chapitre III : généralités sur les fibres Ramie, Jute, Alfa et Sisal	
III.1 Types et classification des fibres.....	22
III.1.1 Les fibres végétales.....	22
III.1.2 Les fibres animales.....	22
III.1.3 Les fibres minérales	22
III.2 Présentations des différentes fibres végétales.....	24

III.2.1 Le jute.....	24
III.2.1.1 Production.....	24
III.2.1.2 Utilisation.....	25
III.2.1.3 Caractéristiques mécaniques.....	25
III.2.2 La Ramie.....	25
III.2.2.1 Caractéristiques.....	26
III.2.2.2 Product.....	26
III.2.2.3 Utilisations.....	26
III.2.3 L'alfa.....	27
III.2.3.1 Domaine d'utilisation des fibres d'alfa.....	28
III.2.4 Sisal.....	28
III.2.4.1 Utilisation de sisal.....	29
III.2.4.2 Ses propriétés.....	30
III.2.4.3 Caractéristiques mécaniques.....	30
Références Bibliographiques	30

Chapitre IV : Formulation et application

IV.1 Formulation du Problème	32
IV.2 Applications	34
IV.3 Facteur de concentration de contrainte	37
IV.4 Evolution de la zone localement plastifiée [a].....	
IV.5 Evolutions de la longueur inefficace [δ].....	40
IV.5.1 Cas pour une fraction basse $V_f = 0.3$	40
IV.5.2 Cas pour une fraction moyenne $V_f = 0.5$	42
IV.5.3 Cas pour une forte fraction volumique $V_f = 0.7$	43
IV.6 Evolution des déplacements longitudinaux	43
Conclusion.....	46

Liste des figures

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Figure I.1 Matériaux composites.....	4
Figure I.2 Matériau composite.....	6
Figure I.3 Différentes familles de matrice.....	7
Figure I.4 Différents types de fibres de verre (documentation Ahlstrom).....	9
Figure I.5 Différentes familles du renfort.....	9
Figure I.6 Stratifiés monolithique plans.....	10
Figure I.7 Différents types d'armatures de tissu.....	10
Figure I.8 Stratifiés selon les angles d'orientation.....	11
Figure I.9 fibre de verre.....	11
Figure I.10 fibre de carbone.....	12
Figure I.11 La fibre d'aramide.....	12
Figure I.12 Les fibres céramiques.....	12

Chapitre II : Généralités sur les fibres naturelles

Figure II.1 Evolution de la production mondiale des fibres végétales.....	15
Figure II.2 Classification des fibres naturelles.....	17
Figure II.3 la plante de chanvre.....	18
Figure II.4 la plante de Coton.....	19
Figure II.5 la plante de Kénaf.....	19
Figure II.6 Palmier de Coco.....	20
Figure II.7 la plante de l'Abaca.....	20

Chapitre III : Généralités sur les fibres Ramie, Jute, Alfa et Sisal

Figure III.1 Classification des fibres naturelles.....	22
Figure III.2 La plante du jute.....	25

Liste des figures

Figure III.3 La plante de rami	26
Figure III.4 Fibres de ramie au cours du processus de transformation.....	27
Figure III.5 Micrographie en MEB de la surface des fibres d'Alfa.....	27
Figure III.6 L'Alfa dans les régions arides de l'Algérie.....	27
Figure III.7 Utilisation de l'alfa a) Artisanales, b) Tapisseries, c) Pâturages.....	28
Figure III.8 La plante de Sisal.....	30

Chapitre IV : Formulation et application

Figure IV.1 Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes.....	32
Figure IV.2 Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace.....	35
Figure IV.3 Géométrie de l'échantillon.....	36
Figure IV.1 Evaluation de la concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées et une variante du chargement croissant variable de pas= 0.2 et $V_f = 0.5$	38
Figure IV.2 Evaluation de la Longueur de la Zone plastique en fonction de nombre de fibres cassées pour quatre cas de matériaux différents avec des chargements croissants de 0.2 au chargement complet ($\sigma = \sigma_0$), et une fraction volumique moyenne $V_f=0.5$	40
Figure IV.3 Evaluation de la Longueur de la longueur inefficace $[\delta]$ en fonction de nombre de fibres cassées pour quatre matériaux différents avec des chargements croissant ($\sigma = 0.3, 0.5, 0.7$ et σ_0) et pour une fraction basse $V_f=0.3$	41
Figure IV.4 Evaluation de la Longueur de la longueur inefficace $[\delta]$ en fonction de nombre de fibres cassées pour quatre matériaux différents avec des chargements croissant et pour une fraction moyenne $V_f=0.5$	42
Figure IV.5 Evaluation de la Longueur inefficace $[\delta]$ en fonction de nombre de fibres cassées pour quatre matériaux différents avec des chargements croissant et pour une fraction volumique $V_f=0.7$	43
Figure IV.6 La variation du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée et le nombre de fibres cassées pour quatre fibres naturelles.....	44

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Tableau I.1 Exemples de matériaux composites, pris au sens large.....	5
--	---

Chapitre II : Généralités sur les fibres naturelles

Tableau II.1 principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites.....	15
--	----

Chapitre III : Généralités sur les fibres Ramie, Jute, Alfa et Sisal

Tableau III.1 Exemple de fibres végétales et leurs compositions.....	23
---	----

Chapitre IV : Formulation et application

Tableau IV. 1 Caractéristiques mécaniques et géométriques des échantillons en composite Jute-Alfa-Ramie et Sisal / époxyde	36
---	----

Liste des symboles

d	La densité
D	Le diamètre
a	Zone de décollement localement plastifiée
α	Coefficient d'indice de la matrice
A_m	Surface de la matrice
A_f	Surface de la fibre
β	Paramètre des modules de géométrie fibre-matrice
c	Indice du composite en bloc
cc	Indice d'humidité absorbée
E_c	Module de Young du composite
E_f	Module de Young de la fibre
E_m	Module de Young de la matrice
E_l	Module des fibres adjacentes intactes
f	Coefficient d'indice de la fibre
g	Température Shift relatif par unité d'humidité absorbée
G_m	Module de cisaillement de la matrice
σ_c	Contrainte de traction du composite
σ_0	Contrainte de référence de la fibre
σ_{fu}	Contrainte à la rupture de la fibre
σ_m	Contrainte en traction de la matrice

σ_{mu}	Contrainte à la rupture de la matrice
τ_0	Contrainte de cisaillement
ρ	Masse volumique
η	Paramètre de cisaillement
L	Longueur de l'échantillon
L_0	Longueur de référence de l'échantillon
r_f	Rayon de la fibre
R_2	Quantité géométrique du composite
n_i	Number de fibres cassées
ν_m	Coefficient de poisson de la matrice
V_f	Fraction volumique de la fibre
t	Epaisseur de l'échantillon
T_{opr}	Température d'utilisation
T_{rm}	Température de référence
T_{og}	Température de transition vitreuse dans un milieu sec
W	Largeur de l'échantillon
P_c	Poids du composite
P_m	Poids de la matrice
P_f	Poids de la fibre
U_i	Déplacements
j	L'accroissement de la charge

INTRODUCTION GENERALE :

Actuellement, les producteurs des structures dans le domaine des transports tels que les structures aéronefs, les bateaux de plaisances, et les secteurs ferroviaires et automobiles même en génie civil sont plongés dans un marché à forte concurrence. La contrainte principale de ces structures est le coût d'exploitation. Une solution pour réduire ce coût et le poids est de jouer sur la nature des fibres et les dimensions de la structure. Afin d'y parvenir, le remplacement des matériaux traditionnels par des matériaux plus légers, tels que les matériaux bio-composites constitués d'un renfort des fibres naturelles noyé dans une résine [1].

Deux de ces propriétés sont essentielles dans le dimensionnement de structures composites, il s'agit de la spécification à l'échelle micromécanique des modules élastiques et de la résistance mécanique. Une synthèse de ces propriétés peut être consultée dans les travaux de Christensen [2]. Ces recherches sont basées sur les modèles micromécaniques et ont fait appel à la définition d'un volume élémentaire représentatif afin d'effectuer une régulation de la composite fibre naturelle/résine. Par la suite plusieurs théories d'endommagement et rupture des composites unidirectionnels basées sur la statique, ont été développées pour décrire le comportement mécanique des matériaux composites renforcés par des différentes fibres naturelles. Ces matériaux ont fait l'objet de très nombreux travaux de recherche, parmi ces travaux nous citons les modèles Zweben et Rosen [3,4] qui se voient parmi les plus anciens modèles pour la prédiction de la résistance des bio-composites à matrice polymère. Aussi Case et Al [5] ont proposé une technique d'analyse efficace pour l'étude du comportement d'un matériau composite unidirectionnel contenant des fibres cassées. Le modèle est basé sur l'espacement des fibres (fraction volumique V_f) et cela pour avoir une représentation proche de la réalité des fibres intactes voisines. Case et Reifsnider [6] a abordé aussi le problème d'une fissure au centre de plusieurs cylindres concentriques. Gao et Reifsnider [7] ont proposé une analyse de répartition de charge utilisée en se servant du modèle probabiliste de Batdorf pour prévoir la résistance à la traction.

Le présent travail s'inscrit toujours dans le cadre de la continuité des différents travaux de recherches effectués auparavant [9-10-11 et 12]. Une analyse d'évolution de la rupture longitudinale incluant les interactions micromécaniques entre les fibres naturelles utilisées et la matrice, est nous allons effectuer des comparaisons des fibres naturelles mais cette fois-ci en Ramie, Jute, Alfa et Sisal.

Le présent modèle qui est basé sur le modèle de Gao et Reifsnider [7] qui permet de prévoir la résistance et la durabilité d'un composite unidirectionnel en servant des techniques

micromécaniques. Ce modèle suppose qu'un groupe de fibres cassées est entouré d'un nombre de fibres intactes. Si la contrainte responsable de la rupture d'une fibre est suffisamment importante, elle peut être transmise à la fibre voisine adjacente par l'intermédiaire de la matrice, en créant tout d'abord une zone localement plastifiée puis une probable rupture [12]. L'estimation de la longueur inefficace limitant la zone localement plastifiée ainsi que le facteur de concentration de contraintes permettent une évaluation de la résistance de notre composite unidirectionnel en variant les contraintes appliquées au point de rupture pour chaque cas de ces quatre fibres afin de décrire la résistance et le bon choix de notre bio-composite à base de fibre purement naturelle.

Pour accéder à cet objectif, nous avons structuré notre travail en quatre chapitres. Au premier chapitre, nous avons présenté une recherche bibliographique sur les différents matériaux composites. Au deuxième chapitre, nous avons abordés les différents types des fibres naturelles dite bio-composite et leurs utilisations dans différents domaine. Puis le troisième chapitre a été consacré au modèle de rupture longitudinale d'un composite unidirectionnel pour suivre la propagation de la rupture d'un groupe de fibres cassées entouré d'un nombre de fibres intactes sous forme d'un arrangement hexagonal. Les développements mathématiques utilisés dans le programme Fortran sont présentés pour justifier la forme de la répartition des contraintes autour de la fibre cassée et des fibres voisines adjacentes les plus proches.

Au quatrième et dernier chapitre, des applications ont été effectuées afin d'évaluer la résistance et le type d'endommagement à travers l'évolution de la longueur inefficace et la concentration des contraintes pour les quatre cas des matériaux utilisés.

Finalement, nous avons clôturé notre mémoire par une conclusion générale qui résume les principaux résultats et les futures recommandations.

Bibliographie :

- [1] C.M.Boyer. « Composites unidirectionnels : modèles probabilistes de rupture et évaluation de la fiabilité». Thèse d'université, Blaise Pascal, 1997.
- [2] R. M. Christensen. Mechanics of composite materials. Krieger publishing company, Malabar, Florida, 1991.
- [3] Rosen, B.W., 1964. Tensile failure of fibrous composites. AIAA J. 2, 1985–1991.
- [4] Zweben, C., 1968. Tensile failure of fiber composites. AIAA J. 6, 2325–2331.
- [5] Case, S. W., Carman, G. P., Lesko, J. J., Fajardo, A. B., Reifsnider, K. L. “Fiber Fracture in Unidirectional Composites,” Journal of Composite Materials, Vol. 29, No. 2, 1995, pp. 208-228.
- [6] Case, S. W., Reifsnider, K. L. “Micromechanical Analysis of Fiber Fracture in Unidirectional Composite Materials,” International Journal of Solids and Structures, Vol.33, No. 26, 1996, pp. 3795-3812.
- [7] Gao, Z., Reifsnider, K. L. “Micromechanics of Tensile Strength in Composite Systems,” Composite Materials: Fatigue and Fracture, Fourth Volume, ASTM STP 1156, 1993, pp. 453-470
- [8] GHARBAOUI Asma Master 2 Génie Mécanique, thème : Effet De L'Orientation Des Fibres Naturelles Sur La Résistance Locale D'un composite Partiellement Endommagé, Soutenu le 16 Juin 2015
- [9] BOUDEBZA Taha Yacine et BAMOUNE Sofiane Master 2 Génie Mécanique, thème : Prédiction de la résistance micromécanique et l'évolution thermomécanique d'un composite Ramie/Epoxyde unidirectionnels en milieu humide, Soutenance le 28 Mai 2018
- [10] ABASSINI Sahar et GUENOUNA Mokhtaria, Master 2 Génie Mécanique, thème : Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans les matériaux composites Jute/Époxyde unidirectionnels pour des températures variable, Soutenance le 28 Mai 2018
- [11] L.Belgacem. “Contribution à l'étude de l'endommagement des pipes en matériaux composites hybrides sollicités au flambement,” Thèse Doctorat En-Sciences, Université de Mostaganem, 2018 «
- [12] A.M. BELHADJ et H. BENNACEUR Master 2 Génie Mécanique, thème : Etude et comparaisons de l'endommagement d'un composite unidirectionnel pour différents types de fibres naturelles, Soutenance le 25/06/2020

I.1 Définition:

Dans un sens large, le mot “composite” signifie “constitué de deux ou plusieurs parties différentes”. En fait, l'appellation matériau composite ou composite est utilisée dans un sens beaucoup plus restrictif, qui sera précisé tout au long de ce chapitre. Nous en donnons pour l'instant la définition générale suivante. Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux de natures différentes, se complétant et permettant d'aboutir à un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément [13]. Des exemples de matériaux composites pris au sens large sont donnés au tableau 1.1.

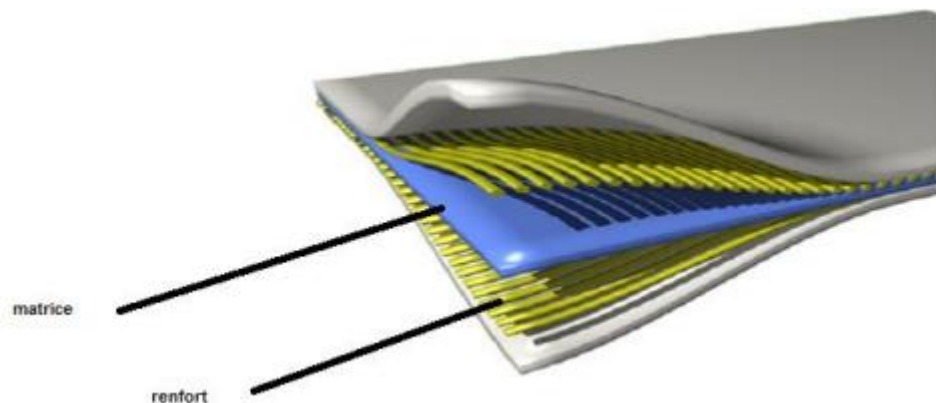


Figure I.1 Matériaux composites [14].

I.1.2 Caractéristiques générales:

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant (figure 1.1). Une exception importante à la description précédente est le cas de polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomères. Pour ce type de matériau, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont pratiquement pas modifiées par l'adjonction de particules élastomères, alors que les caractéristiques au choc sont améliorées [13]. Les propriétés des matériaux composites résultent :

- ✓ Des propriétés des matériaux constituants.
- ✓ De leur distribution géométrique.
- ✓ De leurs interactions, etc.

Tableau I.1 Exemples de matériaux composites, pris au sens large [13].

Type de composite	constituants	Domaine d'application
1. composite à matrice Organique Papier, carton Panneaux de particules Panneaux de fibres Toiles enduites Matériaux d'étanchéité Pneumatique Stratifiés Plastique renforcés	Résine/charges/fibres cellulosiques Résine/copeaux de bois Résine/fibres de bois Résine souples/tissus Elastomères/bitume/textiles Caoutchouc/toile/acier Résine/charges/fibres de verre de carbone, etc. Résine/microsphères	Imprimerie, emballage, etc. Menuiserie Bâtiment Sports, bâtiment Toiture, terrasse, etc. Automobile Domaines multiples
2. composites à matrice Minérale Béton Composite carbone- carbone Composite céramique	Ciment/sable/granulats Carbone/fibres de carbone Céramique/fibres céramique	Génie civil Aviation, espace sports, biomédecine, etc. Pièces thermomécanique
3. composite matrice métallique	Aluminium/fibres de bore Aluminium/fibres de carbone	Espace
4. sandwiches {Peaux ames	Métaux, stratifiés, etc. Mousses, nids d'abeilles, balles plastique renforcés, etc.	Domaines multiples

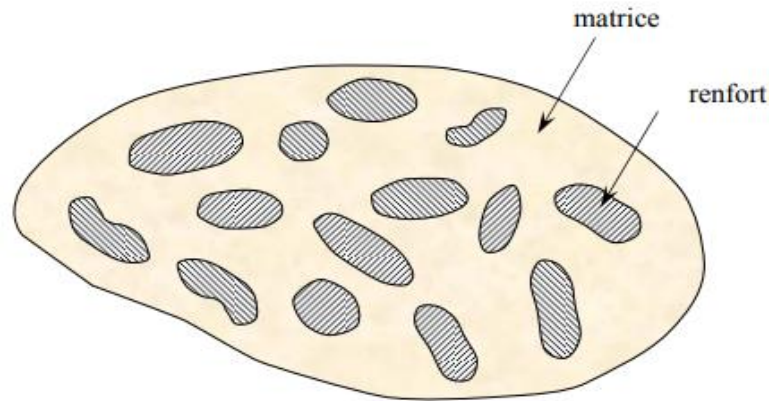


Figure I.2 Matériau composite.

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- ✓ La nature des constituants et leurs propriétés,
- ✓ La géométrie du renfort, sa distribution,
- ✓ La nature de l'interface matrice-renfort.

La géométrie du renfort sera caractérisée par : sa forme, sa taille, la concentration du renfort, sa disposition (son orientation), etc. Si l'ensemble de ces paramètres concourt à déterminer les propriétés du composite, les modélisations descriptives ne tiendront compte que de certains paramètres, du fait de la complexité des phénomènes mis en jeu. Par exemple, la forme du renfort sera schématiquement approchée soit par des sphères, soit par des cylindres. La concentration du renfort est habituellement mesurée par la fraction volumique (fraction en volume) ou par la fraction massique (fraction en masse). La concentration du renfort est un paramètre déterminant des propriétés du matériau composite [13].

I.1.3 Type des matériaux composites [15] :

- **Grande diffusion** : Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, sa composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration des matériaux (moulage par contact, SMC et injection).
- **Hautes performances** : Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%. Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes : - drapage autoclave, enroulement filamentaire, RTM. - beaucoup de procédés encore manuels. - CMM, CMC.

I.1.4 Classification des matériaux composites [16] :

- **Homogène** : mêmes propriétés en tout point.
- **Hétérogène** : propriétés différentes d'un point à un autre.
- **Isotrope** : mêmes propriété dans toutes les directions.
- **Orthotrope** : propriétés symétriques par rapport à 2 plans de symétrie Anisotrope : propriétés différentes selon les directions.

I.1.5 Constituants des matériaux composites [17] :

I.1.5.1. La matrice (résine) : La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres.

I.1.5.1.1 Différentes natures de la matrice :

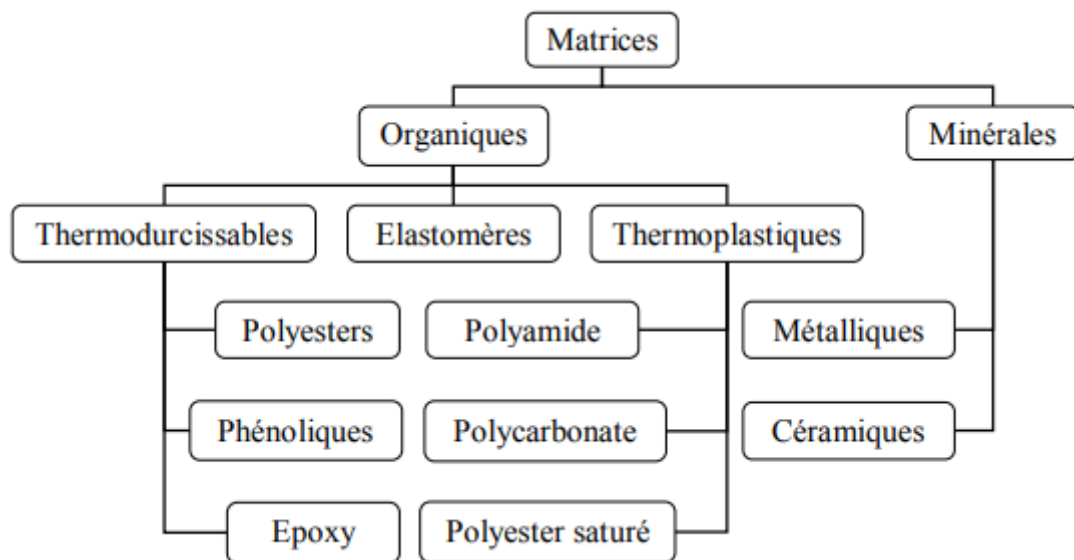


Figure I.3 Différentes familles de matrice.

- ✓ Résine thermodurcissable: sont mis en forme et se polymérisent selon la forme souhaitée. La transformation irréversible.
- ✓ Résine thermoplastique: mis en forme par chauffage, durcissent au cours du refroidissement. La transformation est réversible.

I.1.5.2 La résine :

I.1.5.2.1 Les divers types de résines :

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les résines doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres.

- **Les résines thermodurcissables :** Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage :
 - ✓ les résines polyesters insaturées.
 - ✓ les résines de condensation.
 - ✓ les résines époxydes.
- **Les résines thermoplastiques :** La famille des résines thermoplastiques (on parle de “plastiques”) est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou techno polymères)
- **Les résines thermostables :** Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200°C. Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables.

I.1.5.3 Les renforts :

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques).

I.1.5.3.1 Différents types de renfort :

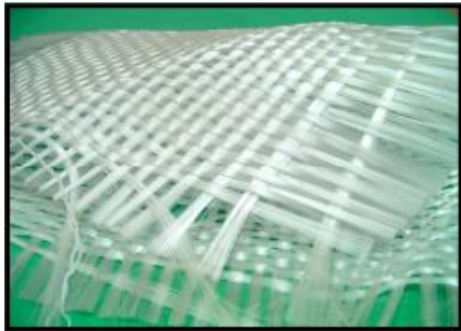
Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou formes dérivées et constituent une fraction volumique de matériau composite généralement comprise entre 0.3 et 0.7.

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales.

- ✓ Sous forme de roving (fils, mèches, etc. ...): le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.
- ✓ Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc. ...): le tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving. Les tissus de roving peuvent peser jusqu'à 800 g/m².
- ✓ Sous forme de mat (à fil coupé, à fil continu): le mat est un matelas de fils coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine.



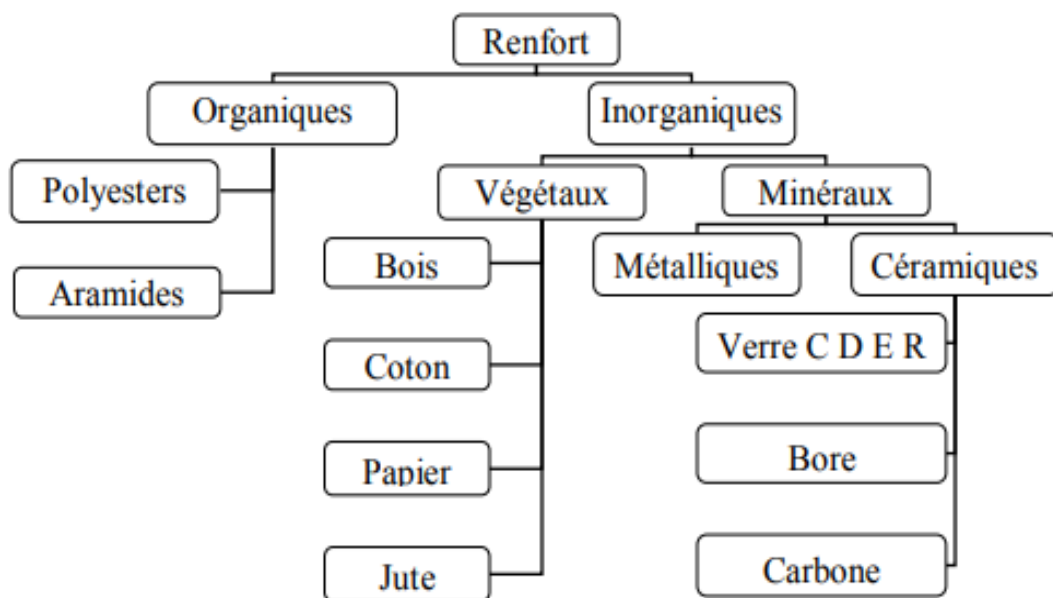
a – Roving de verre



b – Tissu de verre

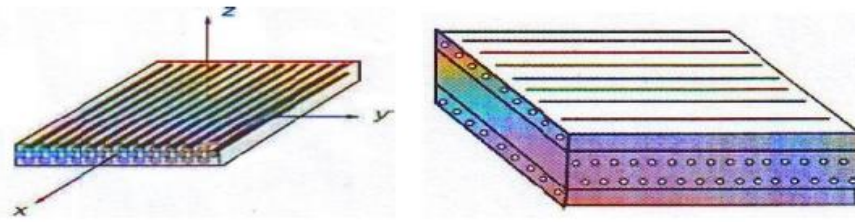


c – Mat de verre

Figure I.4 Différents types de fibres de verre (documentation Ahlstrom).**I.1.5.3.2 Différentes natures de renfort :****Figure I.5** Différentes familles du renfort.

I.2 Stratifiés monolithique plans:

Les stratifiés sont les matériaux composites qui ont les meilleures performances structurales. L'idée de base est celle de superposer des couches anisotropes, renforcées avec des fibres longues, uni- ou bi- directionnelles. Si la disposition des couches successives de tissu de telle sorte que les fils de chaîne coïncident, on dit qu'on a une stratification parallèle unidirectionnelle : Si on dispose les couches alternativement de façon que les fils de chaîne soient en correspondance avec les fils de chaîne de la couche suivante on dit qu'on a une stratification croisée bidirectionnelle [18].



(a) .Composite unidirectionnel.

(b).Composite stratifié croisé.

Figure I.6 Stratifiés monolithique plans.

Si les fibres sont croisées entre elles avec un nœud de jonction alterné, sous forme d'un tissage simple, double ou triple, on dit que nous avons un composite stratifié tissé.

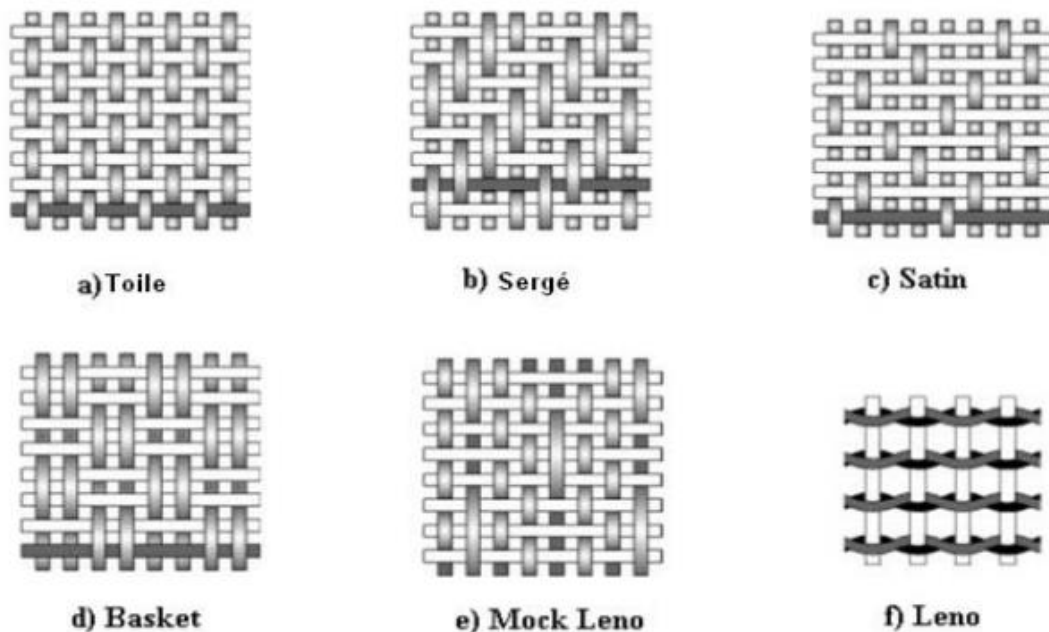


Figure I.7 Différents types d'armatures de tissu.

Enfin on peut disposer les couches de manière à avoir une superposition de plis diversement orientés ce que les fils. Cette orientation des couches permet d'obtenir un matériau final ayant

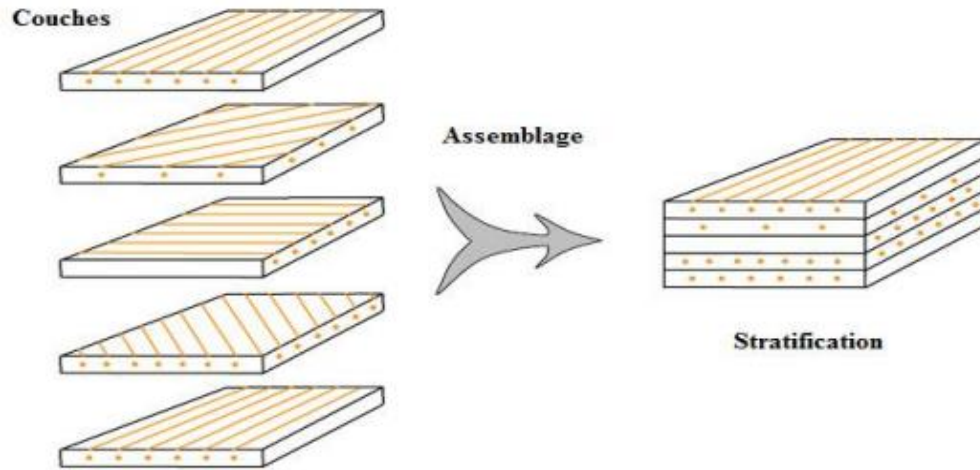


Figure I.8 Stratifiés selon les angles d'orientation.

I.3 Les principales fibres [17] :

Les fibres sont les éléments principaux du matériau composite, on considère deux types des fibres :

- ✓ Fibre courtes: quelque centimètres ou fraction de millimètre.
- ✓ Fibre longues.

I.3.1 Les fibres de verre :

Les fibres de verre sont élaborées à partir d'un verre filable, appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, qui les place de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites

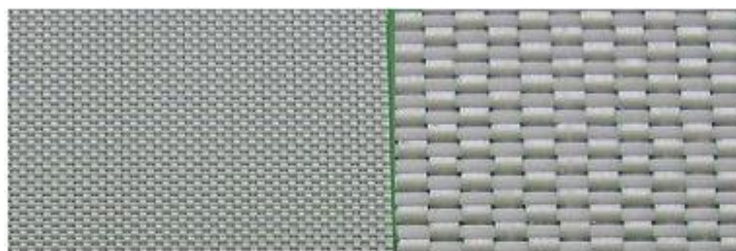


Figure I.9 Fibre de verre.

I.3.2 Les fibres de carbone :

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur, se présentant lui-même sous forme de fibres orientées et réticulées. Actuellement, les fibres utilisées sont les fibres acryliques élaborées à partir du poly acrylonitrile (PAN). Ces fibres acryliques sont

connues sous divers noms commerciaux: crylor, courtille, dralon, orlon, etc. La qualité des fibres de carbone finales dépend des qualités du précurseur.

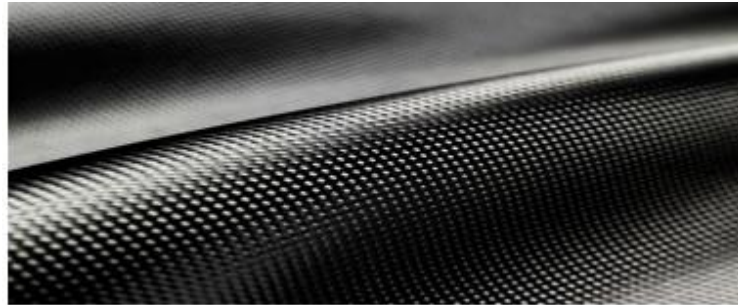


Figure I.10 fibre de carbone.

I.3.3 Les fibres d'aramide (Kevlar) ou de polypropylène :

Plus résistantes aux chocs et plus tenaces que le carbone, d'où leur utilisation, entre autres, dans les gilets pare-balles et autres protections balistiques



Figure I.11 La fibre d'aramide.

I.3.4 Les fibres céramiques :

Diverses fibres de matériaux réfractaires ou céramiques (carbures, borures, nitrures, etc.) peuvent être élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support.



Figure I.12 Les fibres céramiques.

I.3.5 Les fibres synthétiques thermostables :

Les fibres synthétiques thermostables sont des fibres organiques obtenues par synthèse, et qui conservent leurs caractéristiques mécaniques à températures élevées. Associées à des résines thermostables, elles permettent d'obtenir des matériaux dont les caractéristiques mécaniques en température sont conservées.

Références Bibliographiques :

[13] Jean-Marie Berthelot Mécanique des Matériaux et Structures Composites, Imprimé en France par Jean-Marie Berthelot Les Clousures, Chemin des Horts 05290 Vallouise Septembre 2013.

[14] Rouam,k. « élaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles» université m'hamed bougera-boumerdes ,2014.

[15] Cours des matériaux composites Master 2 génie mécanique Mostaganem.

[16] PFE matériaux composites le titre présenté par ABASSINI Sahar et GUENOUNA Mokhtaria edition 2017 / 2018.

[17] jean-marie berthelot« matériaux composites 5e édition révisée»2012,lavoisier,paris.

[18] PFE Effet De L'Orientation Des Fibres Naturelles Sur La Résistance Locale D'un composite Partiellement Endommagé le titre présenté par Melle : GHARBAOUI ASMA édition 2014/2015

II.1 Introduction:

Un matériau composite se définit comme un arrangement de fibres, continu ou non d'un matériau résistant (le renfort), noyé dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice (le liant) conserve la disposition géométrique du renfort et lui transmet les sollicitations auxquelles est soumise la pièce. Elle peut appartenir à la famille des polymères, des métaux ou des céramiques. Sous le terme « fibres naturelles » se trouvent des fibres organiques, d'origine végétale (cellulosique) et animale (protéinique), et des fibres minérales telles que l'amiante [19].

Dans ce chapitre nous n'aborderons que les fibres végétales parmi les fibres naturelles.

II.1.1 Les fibres végétales :

Les fibres végétales sont couramment utilisées car ce sont les fibres les plus disponibles. Leur structure complexe est assimilable à celle de matériaux composites renforcés par des fibrilles de cellulose disposées en hélice. (Les paramètres les plus importants sont le pourcentage de cellulose (renfort) et l'angle micro fibrillaire (orientation du renfort)).

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 [19].

II.1.1.1 Utilisations des fibres végétales :

La connaissance des propriétés caractéristiques des fibres est indispensable en vue de leur utilisation dans des composites. Les fibres végétales présentent en général de bonnes propriétés mécaniques, mais leur utilisation est limitée par leur caractère hydrophile et leur faible stabilité thermique. De même, la compatibilité fibres matrice va dépendre non seulement de la nature des fibres mais également de la nature de la matrice de polymère. La grande diversité des fibres végétales et le large domaine d'applications des matériaux composites, sont à l'origine du grand nombre de travaux concernant le développement des matériaux composites à renforts fibres végétales [20].

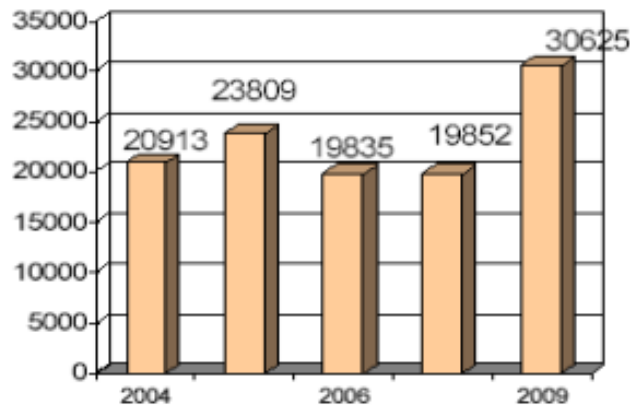


Figure II.1 Evolution de la production mondiale des fibres végétales (En millions de tonnes).

II.1.1.2 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme Renforts des matériaux composites [21] :

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.1 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme renforts de matériaux composites [19].

AVENTAGES	INCONVENIENTS
Faible coût	Absorption d'eau
Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)	Faible stabilité dimensionnelle
Biodégradabilité	Biodégradabilité
Non abrasif pour les outillages	Faible tenue thermique (200 à 30°C max)
Neutre pour l'émission de CO ₂	Fibres anisotropes
Demande peu d'énergie pour être produite	Variation de qualité en fonction du lieu de croissance de la météo. .
Pas de résidus après incinération	Pour des applications industrielles demande la gestion d'un stock

Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres	Renfort discontinu
Bonne isolation thermique et acoustique	
Ressource renouvelable	

II.1.2 Les fibres naturelles [22] :

Les fibres naturelles sont des fibres produites par des plantes, des animaux et des processus géologiques. Ils peuvent être utilisés comme composant de matériaux composites, ou l'orientation des fibres influe sur les propriétés. Les fibres naturelles peuvent également être matées en feuilles pour fabriquer du papier ou du feutre.

Les fibres naturelles sont de bons absorbeurs de sueur et peuvent être trouvées dans une variété de textures. Les fibres de coton fabriquées à partir de l'usine de coton, par exemple, produisent des tissus légers en poids, doux en texture, et qui peuvent être fabriqués en différentes tailles et couleurs. Les vêtements faits de fibres naturelles comme le coton sont souvent préférés par rapport aux vêtements faits des fibres synthétiques par des gens qui vivent dans des climats chauds et humides. Les fibres sont sous forme de cordes ou de longs filaments avec de très petits diamètres allant de (3 μ m -10 μ m).

II.1.2.1 Intérêt de l'utilisation des fibres naturelles [19] :

D'une manière générale, l'utilisation des fibres naturelles comme renfort de matériaux composites se justifie pour :

- valoriser une ressource locale dans des pays peu industrialisés, les composites à fibres naturelles ouvrant de nouveaux débouchés aux produits agricoles.
- développer des matériaux et des technologies prenant en compte les impacts sur l'environnement. Les fibres naturelles sont des matériaux de qualité qui se fabriquent et se recyclent naturellement sur terre depuis des millions d'années (matériaux biodégradables et renouvelables par culture).

Dans cet esprit, on envisage de remplacer les fibres de verre par des fibres naturelles, pour faire des économies, et parce que les matières premières renouvelables présentent des avantages écologiques.

Les principaux avantages des fibres naturelles (tableau II.1) sont leur coût, leur légèreté, leur disponibilité et leurs propriétés mécaniques spécifiques élevées. Grâce à un compromis idéal rigidité/résistance/légèreté, les composites renforcés par des fibres végétales concurrencent efficacement les matériaux traditionnels contenant des charges ou fibres minérales. Ces matériaux

font notamment une percée importante dans le domaine de l'automobile en raison de leur légèreté. Les fibres naturelles peuvent apporter un gain de poids de 40 % par rapport aux fibres de verre, ce qui représente 10 à 20 % de poids en moins dans un compound.

II.1.2.2 La classification des différentes fibres naturelles [21] :

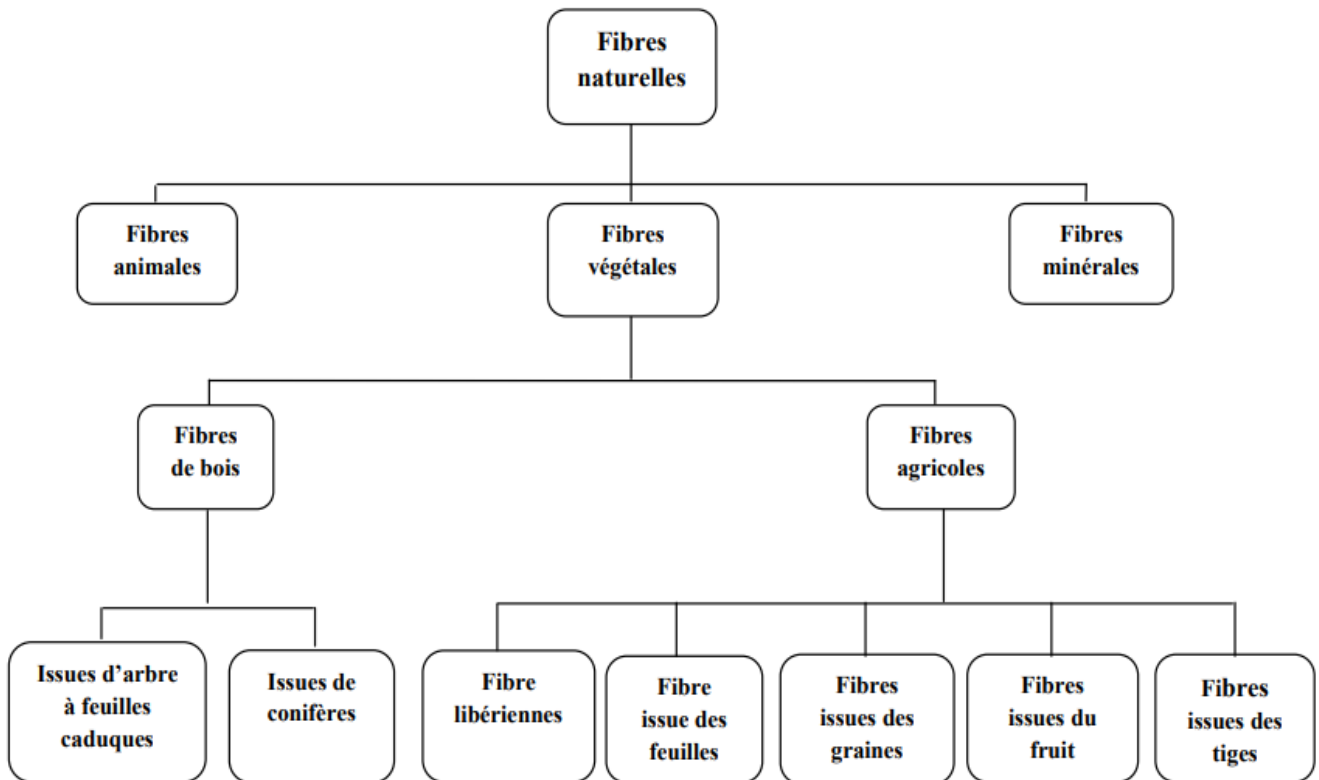


Figure II.2 Classification des fibres naturelles.

II.1.2.3 Avantages des composites renforcés de fibres naturelles :

- ✓ Impacts environnementaux plus faibles lors de la production des fibres naturelles.
- ✓ Quantité de fibres plus élevée pour des performances équivalentes.
- ✓ Réduction du poids des structures composites.
- ✓ Crédits de carbone et d'énergie lors de l'incinération des fibres naturelles.

II.1.2.4 Inconvénients principaux :

- ✓ Utilisation d'engrais dans la production de fibres agricoles.
- ✓ Les composites renforcés de fibres naturelles pourraient avoir une durée de vie plus faible comparés aux composites renforcés de fibres de verre.

II.2 Présentations des différentes fibres végétales [21] :**II.2.1 Le chanvre :**

Le chanvre est une fibre libérienne, tout comme le lin, le kenaf, le jute et la ramie. Les plantes de cette famille présentent toutes des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses. Par ses possibilités techniques, la fibre de chanvre répond à des besoins textiles traditionnels tout en ouvrant la voie à une foule d'innovations. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe, en France et en Italie. La France est le premier producteur en Europe pour la production de chanvre, avec environ 9 100 ha cultivés en 2005. La fibre de chanvre est en effet très recherchée comme substitut de la fibre de verre et d'autres matériaux synthétiques utilisés dans divers composites agglomérés, par exemple des pièces automobiles, des matériaux de construction et divers biens de consommation. En milieu industriel, le chanvre comporte en fait de nombreux atouts. Ses caractéristiques physiques lui confèrent une grande force, ainsi qu'une excellente rentabilité dans le domaine des composites et du papier. On pourrait en effet fabriquer de la fibre de chanvre plus légère, plus solide et moins chère que la fibre de verre.



Figure II.3 La plante de chanvre.

II.2.2 Le Coton :

Le cotonnier est un petit arbuste annuel de 1 à 1,50 m de haut. Il est cultivé dans les zones chaudes d'Amérique, d'Afrique, d'Asie et mêmes d'Europe (Espagne). Les fibres de coton proviennent des graines, et sont appelés linters. Le rendement en linters de coton est de seulement 0,05 t/ha/an. Cette fibre est utilisée pour ses bonnes caractéristiques physique et mécanique. En effet, les linters de coton mesurent 2 à 5 mm et ont une largeur de 18 μ m. Elle est utilisée pour des papiers dits de luxe. Elles sont également utilisées pour les papiers fiduciaires et principalement pour les billets de banques, papiers pour lesquels la caractéristique essentielle est la résistance au pliage. Cette fibre est aussi beaucoup utilisée dans le domaine du textile.



Figure II.4 La plante de Coton.

II.2.3 Le Kénaf :

Le kénaf est une plante herbacée dont la tige peut atteindre 3 m de haut. Il se trouve principalement dans les régions tropicales et en Amérique du Sud. La production de kénaf en Europe est rare. Elle est destinée uniquement pour le domaine papetier. Le rendement en fibre atteint près de 10 t/an/ha. La longueur moyenne des fibres (1,5 mm) est comprise entre celle des fibres de feuillus et celle des fibres de résineux.



Figure II.5 La plante de Kénaf.

II.2.4 Le Coco :

Les fibres de coco proviennent de la couche fibreuse qui entoure la noix de coco. Elles sont filées et tissées après avoir été assouplies dans l'eau. Le filage grossier et irrégulier donne au coco un aspect rustique. Le coco est très résistant, il est isolant, imputrescible et antibactérien. On utilise plutôt dans des pièces spacieuses et lorsqu'on veut mettre en avant son côté rustique.



Figure II.6 Palmier de Coco.

II.2.5 L'Abaca :

L'Abaca ou chanvre de Manille est un bananier textile (Musacées) qui pousse aux Philippines : les fibres dans les gaines foliaires forment un pseudo tronc très recherché pour la fabrication de cordages légers et insubmersibles, pour des rabanes, des nappes, des stores ou des vêtements. La fibre d'Abaca a une longueur de 6 mm pour un diamètre de 22 μm . Elle est utilisée principalement dans la composition des papiers filtres, des sachets de thé. Ce sont des papiers poreux demandant une bonne résistance, en particulier au déchirement.



Figure II.7 La plante de l'Abaca.

II.3 Conclusion:

Comme tous les produits naturels, les propriétés mécaniques et physiques des fibres naturelles varient considérablement. Ces propriétés sont gouvernées par la composition chimique et structurale et dépendent du type de la fibre et des conditions de croissance. La cellulose, le composant principal de toutes les fibres végétales, varie d'une fibre à une autre. Les propriétés mécaniques des matériaux composites sont influencées principalement par l'adhérence entre la matrice et les fibres. Si de nombreux articles ont pu montrer que les fibres végétales possédaient des propriétés mécaniques comparables aux fibres de verre traditionnellement utilisées, en revanche, les propriétés des matériaux composites les intégrant restent inférieures. De nombreuses études ont donc porté sur l'amélioration de ces propriétés, notamment par le biais de traitement physique ou chimique des fibres.

Références Bibliographiques :

[19] PFE étude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort en matière végétale le titre présenté par AYADI A. et MEDDAHI A. Boumerdès soutenu en 2006.

[20] PFE étude de l'introduction des fibres d'alfa de tailles différentes dans une matrice polychlorure de vinyle en vue d'améliorer ses propriétés physico- mécanique présenté par M me HERROUDJ née HAMOUR Noura soutenu le 12/07/2010.

[21] PFE Effet De L'Orientation Des Fibres Naturelles Sur La Résistance Locale D'un composite Partiellement Endommagé le titre présenté par Melle : GHARBAOUI ASMA édition 2014/2015.

[22] Rapport Fibres Recherche Développement-ADEME, p. 38.

III.1 Types et classification des fibres [23] :

Les fibres naturelles sont d'origine végétale (coton, lin, chanvre, ortie...) ou animale (laine, soie). Leur transformation est essentiellement mécanique (ce qui n'exclut pas les traitements chimiques par après).

On peut subdiviser les fibres naturelles en trois grands groupes selon leur origine (figure 1).

III.1.1 Les fibres végétales : Qui comprennent les fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok) ; les fibres libériennes extraites de tiges de plantes (lin, chanvre, jute, ramie) ; les fibres dures extraites de fouilles (sisal), de troncs (chanvre de Manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco)

III.1.2 Les fibres animales : Qui proviennent des poils, telle que la toison animale, et des sécrétions telles que la soie.

III.1.3 Les fibres minérales :

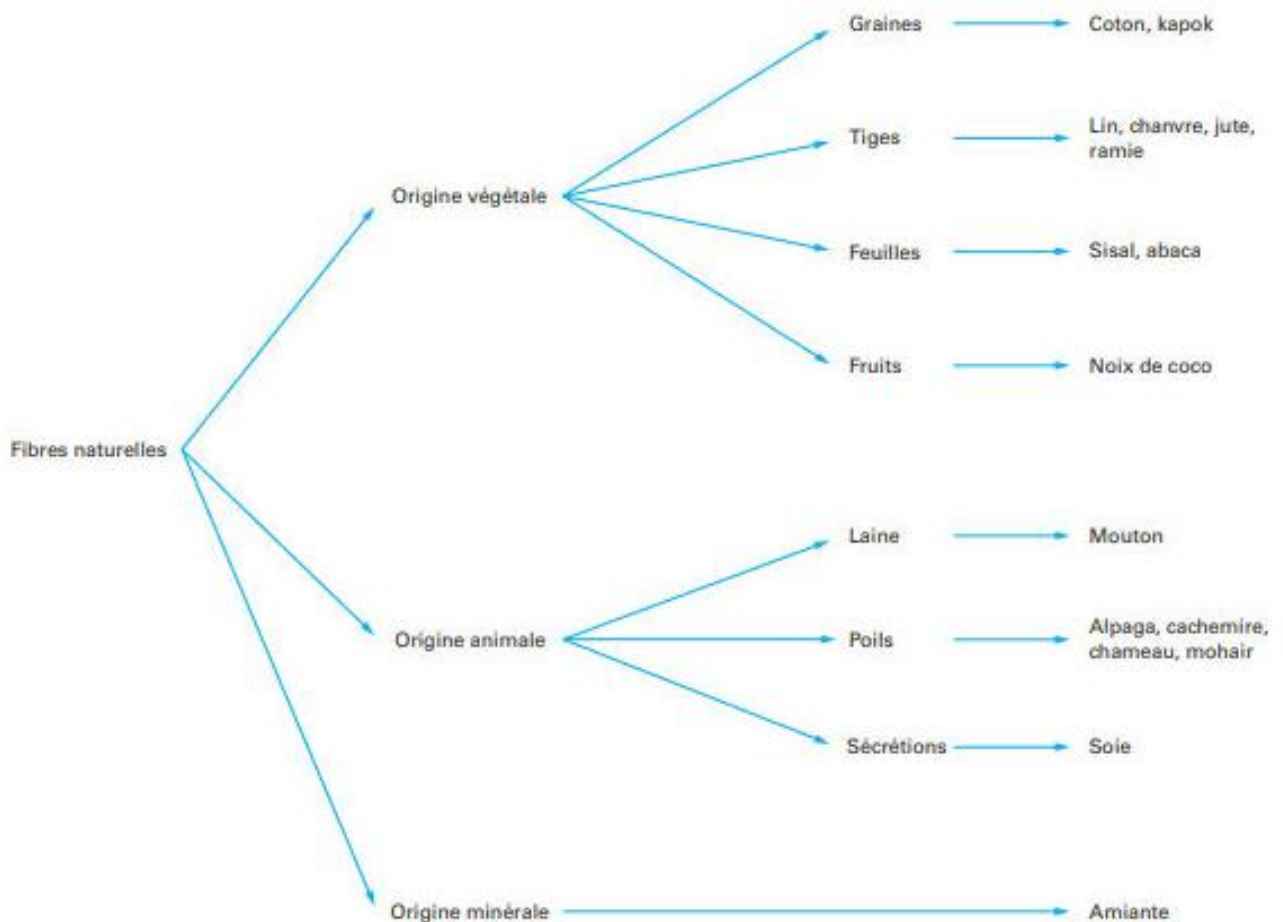


Figure III.1 Classification des fibres naturelles.

III.1.4 Comparaison des propriétés mécaniques en traction de diverses fibres:

Le tableau I présente les caractéristiques mécaniques en traction de différentes fibres d'origine naturelle, ainsi que celles des fibres de renfort couramment utilisées pour le renforcement de matériaux composites courants [24].

Tableau III.1 Exemple de fibres végétales et leurs compositions [24].

Plante	Alfa	Coton	Line	chanvre	ramie	sisal	abaca	jute
Organe utilisé	Tige	Feuille	Graine	Graine	Graine	Tige	Tige	Graine
Densité d (g /cm³)	1.4	1.51	1.4	1.48	1.4	1.2-1.4	1.5	1.46
Longueur L (mm)	0.6-14	25	33	22	120	3	3-11	2.5
Diamètre D (micro)	5-10	19	19	25	40	18	16-32	20
Cellulose (%)	50-54	92-95	62-71	67-75	68-76	66-73	63-68	59-71
Hémicellulose (%)	27-32	5.7	16-18	16-18	13-14	12-13	19-20	12-13
Lignine (%)	17-19	0	2-2.5	2.9-3.3	0.6-0.7	9.9	5.1-5.5	11-13
Pectine (%)	1-2	1.2	1.8-2	0.8	1.9-2.1	0.8	0.5	0.2-4.4
Cire (%)	0.5	0.6	1.5	0.7	0.3	0.3	0.3	0.5
Absorption Humidité(%)	12	8-25	7	8	12-17	11		12

III.2 Présentations des différentes fibres végétales :

III.2.1 Le jute [25] :

Provenant de l'écorce du tronc du jute blanc (*Corchorus capsularis*), la fibre de jute porte le nom de « fibre d'or » en raison de ses reflets dorés.

Le jute réclame un environnement particulier pour prospérer, à savoir un milieu tropical situé à faible altitude et dont le taux d'humidité se trouve entre 60 et 90%. Ces conditions particulières expliquent pourquoi les plus grandes parcelles de jute se trouvent en Inde et au Bangladesh et représentent 95% de la production mondiale, les 5% restants étant partagés entre le Népal et le Myanmar (anciennement la Birmanie).

La culture du jute est annuelle, s'étend d'avril à août et ne nécessite que très peu de pesticides et d'engrais. Il faut environ 120 jours au jute pour arriver à maturité.

La fibre de jute qui est biodégradable et recyclable ne produit pas de gaz toxique si elle est brûlée. Mais le jute est aussi respectueux de l'environnement dès sa culture, car un hectare de cette plante consomme près de 15 tonnes de dioxyde de carbone pour ensuite relâcher 11 tonnes d'oxygène grâce à la photosynthèse. Le jute remplace également le bois dans des pâtes à papier offrant ainsi une alternative intéressante à l'abattage méthodique des arbres pour la production papetière.

III.2.1.1 Production :

Si la culture du jute est exigeante en main-d'œuvre, elle est peu gourmande en engrais et en pesticides. La fibre est le plus souvent récoltée manuellement, la mécanisation n'étant pas adaptée à la culture à petite échelle pratiquée dans les pays en développement. Récolte : Les tiges sont fauchées et couchées sur le champ pour les débarrasser des feuilles; au bout de quelques jours, elles sont liées en faisceaux.

Rouissage : On procède ensuite au rouissage, qui consiste à faire flotter les tiges sur un cours d'eau pour les libérer de la pectine et autres substances mucilagineuses qui les soudent. Le rouissage est terminé – il dure une à trois semaines – quand l'enveloppe de la tige, qui contient la fibre, se sépare facilement du cœur ligneux.

Après avoir extrait la fibre, le plus souvent manuellement, on procède au lavage et au séchage.



Figure III.2 La plante du jute.

III.2.1.2 Utilisation [26] :

Le jute est utilisé dans une variété de produits. Les tapis de jute et les tapis de prière sont répandus en Orient, tout comme les tapis à dos de jute partout dans le monde. Cependant, la plus grande utilisation du jute est dans les sacs et les sacs, et les sacs de qualité supérieure appelés toile de jute. Les sacs en toile de jute sont utilisés pour expédier et stocker les céréales, les fruits et légumes, la farine, le sucre, les aliments pour animaux et autres produits agricoles. Les fibres de jute sont également transformées en filaments et cordes grossiers.

III.2.1.3 Caractéristiques mécaniques :

- ✓ Densité d (g/cm³) : 1.46
- ✓ Contrainte maximum en traction σ (MPa) : 393 – 773
- ✓ Module d'Young E (GPa) : 26,5
- ✓ Déformation maximum en traction (%) : 1,5 – 1,8

III.2.2 La Ramie [27] :

Ramie est le nom usuel de la *Boehmeria nivea* en français, « grass-cloth » pour les britanniques, mosi pour les coréens, les habitants de l'île japonaise de Miyako, distinguent par deux mots différents le fil obtenu manuellement selon les méthodes traditionnelles choma et pour le fil industriel ramie.

Originaire de l'Asie de l'Est, la ramie (*Boehmeria nivea*), ou ortie de Chine, est une plante à fleurs appartenant à la famille de l'ortie; son écorce est utilisée depuis des millénaires pour la fabrication de ficelles, de fils et d'un tissu nommé lin de Chine. Elle donne une fibre blanche à l'aspect soyeux et très résistant dont le pouvoir absorbant et la densité rappellent ceux du lin.

III.2.2.1 Caractéristiques [28] :

Les fibres des tiges de la ramie (*Boehmeria nivea* (L.) Gandisch, Urticaceae, "ortie de Chine") sont constituées de cellulose quasi pure de très bonne qualité et utilisées pour le tissage et la fabrication de papiers résistants. Les fibres sont longues (50 à 250 mm), très solides (un fil ne peut être cassé à la main), imputrescibles, brillantes de sorte que les étoffes rappellent la soie et ont été qualifiées de "soie végétale".

III.2.2.2 Production :

Les différentes phases de traitement sont :

- ✓ **Récolte** : les tiges sont coupées à la floraison
- ✓ **Décortilage** : (au lieu du rouissage) l'écorce est enlevée par grattage des tiges fraîches
Dégommage : les fibres sont séparées par dissolution de la colle végétale.
- ✓ **Blanchiment** : des agents de blanchiments décolorent la fibre
- ✓ **Filage** : cardage, peignage, pré filage et filage.

III.2.2.3 Utilisations :

Les Chinois utilisent la ramie comme fibre textile depuis des siècles. En Europe, cette fibre végétale sert à fabriquer des étamines (des toiles très fines), du fil de couture industriel, des filets de pêche et des tissus pour l'ameublement.

Dans les vêtements, elle est fréquemment mélangée à d'autres fibres textiles plus courtes comme la laine

A noter : les fibres de ramie entrent en faible proportion dans la fabrication du papier monnaie pour la Banque de France ; elles sont aussi utilisées pour fabriquer du papier à cigarettes.



Figure III.3 La plante de Rami.



Figure III.4 Fibres de ramie au cours du processus de transformation.

III.2.3 Alfa :

De toutes les fibres naturelles, Alfa (figure II.6) est une des plus solides et des plus faciles plante à trouver dans la région arides et semi arides d'Afrique du Nord sous forme de touffes vivaces. Cette plante xérophile appartenant à la famille des graminées pousse sous forme de tiges cylindriques d'une longueur allant jusqu'à 120 cm [29]. Selon plusieurs études mènes afin de déterminer la composition chimique de l'alfa, cette dernière est constituée particulièrement de 45% de cellulose, 23% de lignine, 25% hémicellulose et pectine et 5% de cire [30]. Alfa est la désignation arabe de *Stipatenacissima* qui se régénère par dissémination végétative et se reproduit également par graines, étant une espèce mâte réputée [31],

Cette plante est renouvelable, biodégradable et très écologique. En fait, elle nécessite très peu d'eau pour pousser et aucun insecticide ni pesticide n'est nécessaire [32]. Ces fibres sont principalement utilisées dans la production de papier de haute qualité. Récemment, elles ont été utilisées en tant que renfort dans la réalisation de matériaux composites écologiques [33,34] pour leurs nombreux avantages comme fibre végétale [35]. Le module d'Young de la fibre élémentaire d'Alfa est de l'ordre de 13.4 GPa, et de 944 MPa en résistance à la traction [36].



Figure III.6 L'Alfa dans les régions arides de l'Algérie.

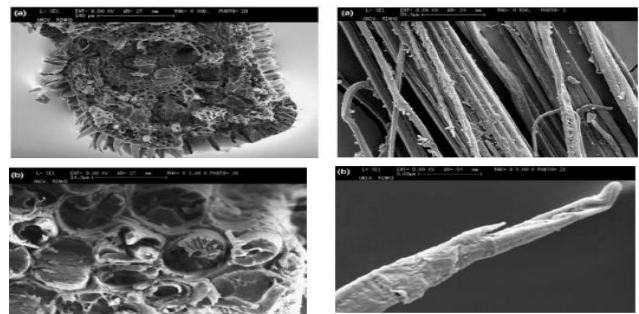


Figure III.5 Micrographie en MEB de la surface des fibres d'Alfa.

III.2.3.1 Domaine d'utilisation des fibres d'alfa :

La culture de la plante d'alfa est reconnue par sa relativisation respectueuse envers l'environnement vu qu'elle a besoin que d'une petite quantité d'eau pour pousser dans un environnement aride. Pendant plusieurs années les tiges d'alfa ont longtemps été utilisées pour l'artisanat comme le cordage, tapisserie et les objets de sparterie (Figure II.9.a), les graines germées d'alfa peuvent être consommées par les humains, car ces feuilles ont des acides gras insaturés, dont l'acide oléique et l'acide linoléique qui peuvent être évalués dans le domaine

Alimentaire et les jeunes feuilles d'alfa peuvent être utilisées pour le pâturage des chevaux, chameaux (Figure II.9.b) mais il est trop riche en lignine pour d'autres herbivores. Elle constitue également un facteur essentiel de l'équilibre pastoral et de la lutte contre la désertification [37]. Les fibres naturelles sont généralement traitées pour être utilisées comme matière première dans l'industrie papetière ou comme combustible pour l'énergie production. Par contre, des utilisations nouvelles et de plus grande valeur pour les fibres naturelles sont en voie de développement, en particulier en tant que matériaux de renforcement permettant la production de composants dans de nombreuses industries. Plusieurs recherches menées ont permis d'étudier les performances des fibres extraites des tiges d'alfa et qui ont été testées en tant que renfort dans les composites, pour obtenir de nombreuses et propriétés mécaniques souhaitables tout en respectant l'environnement lorsqu'il est utilisé comme renfort dans les composites polymères. [36].



(a)

(b)

(c)

Figure III.7 Utilisation de l'alfa a) Artisanales, b) Tapisseries, c) Pâturages.

III.2.4 Sisal [38] :

Le sisal est une fibre naturelle utilisée comme revêtement de sol, et aussi de manière plus large en décoration. Satiné, doux au pied, il est disponible dans un arc-en-ciel de couleurs variées. Revers de la médaille, le sisal supporte mal l'eau et les tâches.

Les fibres mécaniques sont surtout extraites de la périphérie de la feuille. Un plant de sisal produit environs 200 à 250 feuilles et chaque feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres. Les

méthodes de traitement pour l'extraction des fibres de sisal sont rouissage et le teillage. Les fibres sont ensuite lavées à grand eau pour enlever les déchets en surplus.

L'Agave sisalana, appelée communément sisal, est une plante de la famille des Agavaceae originaire de l'est du Mexique, où on la trouve sous l'appellation de henequén.

Sisal est également le nom de la fibre extraite des feuilles de cette plante. Très résistante, cette fibre sert à la fabrication de cordage, de tissus grossiers et de tapis. Son nom provient de la ville portuaire de Sisal, située dans l'État mexicain du Yucatán, car à l'origine, c'était à partir du port de Sisal qu'étaient expédiées les fibres dans le monde entier.

La plante de sisal a besoin d'arrosage trois fois au début de sa plantation et puis elle peut tenir pendant 11 ans sans être arrosée», explique Abdelkader Fateh Bougherara, l'un des initiateurs de ce projet.

Le sisal est une fibre « dure » extraite des feuilles d'un agave.

Les feuilles du sisal sont coupées à la machette et passent dans une « défibreuse ».

- ✓ Le défibrage doit se faire dans les 24 heures suivant la coupe du sisal. Un lavage simultané des fibres accompagne l'opération.
- ✓ Les fibres de sisal sèchent ensuite à l'air libre. Puis, dans les 48 heures, on les blanchit au soleil.
- ✓ Enfin, un brossage des fibres du sisal éliminera les dernières impuretés.

III.2.4.1 Utilisation de sisal :

Traditionnellement, les fibres de sisal sont utilisées dans les filatures pour la fabrication de fils. En fonction du produit fini, les fibres de sisal proviennent du Brésil ou de l'Afrique de l'Est/Madagascar. Ces dernières années, les fibres de sisal sont utilisées de plus en plus fréquemment dans l'industrie du papier, car la pâte de cellulose en sisal est beaucoup plus résistante que la pâte de cellulose en bois. De plus, la pâte de cellulose en fibres de sisal possède une grande porosité. Grâce à ces deux propriétés, la pâte de cellulose en fibres de sisal est utilisée de préférence dans la production de papier pour filtres et condensateurs. Dans l'industrie du tabac et dans l'industrie alimentaire également, on utilise du papier à base de cellulose en fibres de sisal (en combinaison avec de la pâte de cellulose en bois). L'industrie automobile a de plus en plus recours à ce qu'on appelle les composites contenant des fibres naturelles.

III.2.4.2 Ses propriétés :

La fibre de sisal ne convient pas à la production de textiles. Le sisal étant une fibre de feuille qui contient de la lignine et de la pectine en plus de la cellulose, il est plus dur et plus grossier que le raphia. Les fibres de sisal sont extrêmement solides et résistantes à la tension et conviennent bien aux tapis qui se trouvent dans des espaces de vie et de bureau très fréquentés. En raison de leurs propriétés hydrofuges, les tapis en sisal peuvent également être utilisés à l'extérieur comme décoration ou comme tapis de couloir.



Figure III.8 La plante de Sisal.

III.2.4.3 Caractéristiques mécaniques :

- ✓ Densité d (g/cm³) : 1.2-1.4
- ✓ Contrainte maximum en traction σ (MPa) : 350-700
- ✓ Module d'Young E (GPa) : 9-21
- ✓ Déformation maximum en traction (%) : 3-7

Références Bibliographiques :

[23] OUDET (C.).- polymères structure propriétés Masson, Paris (1993).

[24] David SEDAN, Etude des interactions physico-chimiques aux interfaces fibres de chanvre/ciment. Influence sur les propriétés mécaniques du composite, Thèse de doctorat, l'Université de Limoges, (2007).

[25] <http://mag.monchval.com/le-jute-de-la-fibre-a-la-toile/> Le jute, de la fibre à la toile

- [26] <https://www.britannica.com/plant/jute-plant>
- [27] <https://www.etoiffe.com/blog/2020/11/la-ramie-une-fibre-textile-aux-multiples-facettes/>
- [28] <https://latelierdupapetier.fr/wp-content/uploads/2020/02/fibres-vegetales.pdf>
- [29] M. Ben Abderrahman, R. Ben Cheikh. Étude de la cyanoéthylation des fibres longues d'alfa. *Journal de la Société Chimique de Tunisie*, 2006, 8, 175-181.
- [30] Fatima Ezzahra El-Abbassi, Mustapha Assarar, Rezak Ayad, Nouzha Lamdouar. Effect of alkali treatment on Alfa fibre as reinforcement for polypropylene based eco-composites: Mechanical behaviour and water ageing. *Composite Structures* 133 (2015) 451–457.
- [31], Haase, Peter and Pugnaire, Francisco and Incoll, L.D. Seed production and dispersal in the semi-arid tussock grass *Stipa tenacissima* L. during masting. *Journal of Arid Environments* 31 (1995) 55–65.
- [32] Abdelhak Maghchich, Abdelkarim Haouam and Barbara Immirzi. Extraction and characterization of algerian alfa grass short fibers (*stipa tenacissima*). *Chemical technology* 7 (2013) 339-344.
- [33] A.R. Campos, A.M Cunha, PPS18 Proceedings. Guimarães, Portugal: June, 2002.
- [34] A.R. Campos and al. 5th Global Wood and natural Fibre Composites Symposium. Kassel Proceedings., Germany : 2004, 27-28.
- [35] J. Mounir, W. Béchir M. Slah and B. Mohamed. Characterization of mechanical extracted alfa fibres. *International Journal of Fiber and Textile Research* 4 (2014) 1-4.
- [36] F.Z. Arrakhiz, M. Malha, R. Bouhfid, K. Benmoussa , A. Qaiss. Tensile, flexural and torsional properties of chemically treated Alfa, coir and bagasse reinforced polypropylene. *Composites : Part B* 47 (2013) 35–41.
- [37] Sabrine Hanana, Ahmed Elloumi, Vincent Placet, Hajer Tounsi, Hafedh Belghith, Chedly Bradai. An efficient enzymatic-based process for the extraction of high-mechanical properties alfa fibres. *Industrial Crops and Products* 70 (2015) 190–200.
- [38] <https://www.elwatan.com/pages-hebdo/magazine/plantation-de-la-fibre-de-sisal-retour-sur-la-premiere-experience-a-naama-et-ghardaia-11-02-2021>

IV.1/ Formulation du Problème :

Le modèle de Gao et de Reifsnider représenté par la figure IV.1 se distingue des autres modèles semblables par la présence de l'effet du cisaillement et la prise en considération des endommagements locaux sous forme d'un décollement à l'interface. On présume qu'il existe un noyau central de i fibres cassées qui sont entourées de fibres non cassées exposées à des concentrations de contraintes dues aux fibres cassées. Les fibres non cassées sont à leur tour entourées d'un matériau homogène 'efficace' qui se déforme uniformément. On suppose encore que le noyau cassé peut être assimilé à un matériel homogène avec une section transversale circulaire dont le module de Young peut être obtenu par la règle de mélanges :

$$E = \frac{i A_f E_f + \left[i A_m - \pi (r_0^2 - (r_0 - d)^2) \right] E_m}{\pi (r_0 - d)^2} \quad (1)$$

Où A correspond à la surface, et E correspond au module et les propriétés substituées avec f se rapportent à des propriétés de fibre et les propriétés substituées avec m se rapportent à des propriétés de matrice.

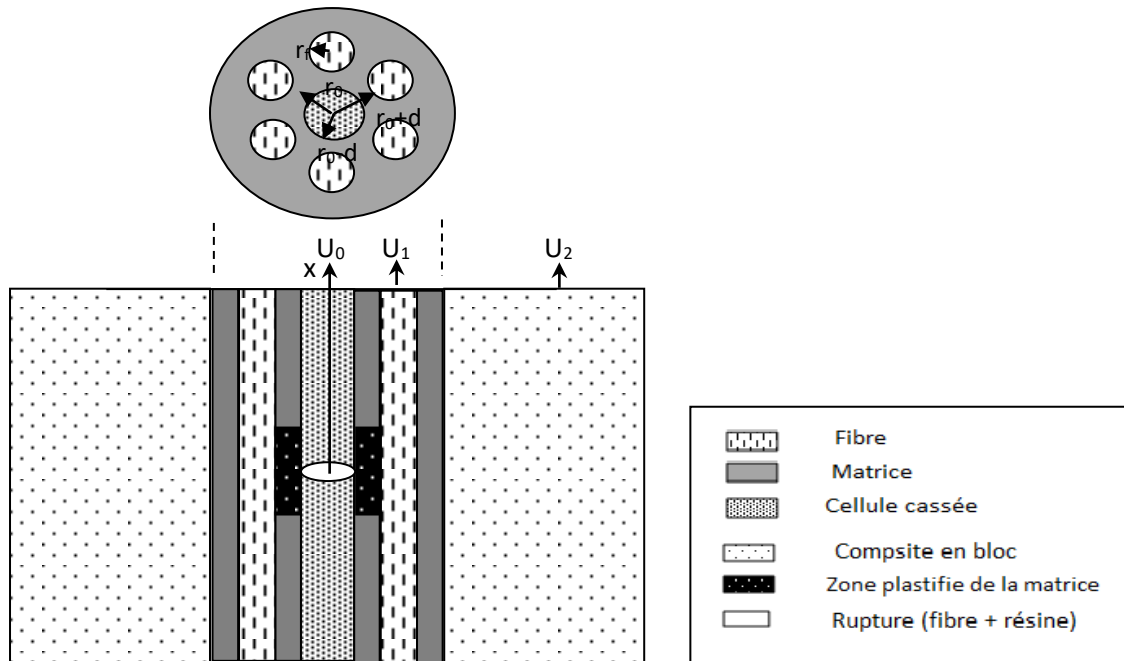


Figure IV.1 Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes.

Comme il vient d'être cité auparavant, des endommagements locaux sont inclus dans le modèle par l'introduction d'une zone de décollement et de plasticité locale (Figure IV.1), où la contrainte de Cisaillement de la matrice et de l'interface est considérées comme constante pour la valeur $\eta \tau_0$. Les équations d'équilibre dans cette zone ($0 \leq x \leq a$) sont comme suite :

$$iA_f E_f \beta \frac{d^2 U_0}{dx^2} - 2\pi_0 \eta \tau_0 = 0 \quad (2)$$

$$n_i A_f E_f \frac{d^2 U_1}{dx^2} + 2\pi(r_0 + 2d + 2r_f) \frac{G_m}{2d} (U_2 - U_1) + 2\pi_0 \eta \tau_0 = 0 \quad (3)$$

β est donné en fonction des modules de la géométrie, de la fibre et de la matrice. Cependant la distance a , elle représente la longueur de la zone de décollement localement plastifiée. La solution de ces deux équations est :

$$\begin{aligned} U_0(x) &= \frac{\eta \tau_0}{r_0 E_1} x^2 + C_0 \\ U_1(x) &= C_1 (e^{\lambda x} - e^{-\lambda x}) + \frac{2r_0 \eta \tau_0}{(R_2^2 - r_0^2) E \lambda^2} (1 - e^{-\lambda x}) + \frac{\sigma_c}{E_c} x \\ (0 \leq x \leq a) \end{aligned} \quad (4)$$

Où C_0 et C_1 sont les constantes d'intégration, et E_1 est le module des fibres adjacentes intactes, R_2 est une quantité géométrique avec $R_2 = r_0 + 2r_f + d$, et $\lambda = \frac{2R_2}{R_2^2 - r_0^2} \frac{G_m}{E} \frac{1}{2d}$ est une

valeur propre obtenue par la résolution de l'équation (3). De même, pour la région où aucun écoulement n'aura lieu à l'interface, les équations d'équilibre dans la zone $a \leq x \leq \infty$, sont :

$$\begin{aligned} E\pi(r_0 - d)^2 \frac{d^2 U_0}{dx^2} + 2\pi_0 \frac{G_m}{2d} (U_1 - U_0) &= 0 \\ n_i A_f E_f \frac{d^2 U_1}{dx^2} + 2\pi(r_0 + 2d + r_f) \frac{G_m}{2d} (U_2 - U_1) - 2\pi_0 \frac{G_m}{2d} (U_1 - U_0) &= 0 \\ a \leq x \leq \infty \end{aligned} \quad (5)$$

Pour satisfaire de telles équations, les expressions des déplacements sont données par :

$$\begin{aligned} U_0 &= \overline{U}_0 e^{-\gamma x} \\ U_1 &= \overline{U}_1 e^{-\gamma x} \\ U_2 &= \frac{\sigma_c}{E_c} x \end{aligned} \quad (6)$$

Substituant l'équation (6) dans l'équation (5), on obtient:

$$\begin{aligned} U_0(x) &= C_3 e^{-\sqrt{\gamma_2} x} + C_4 e^{-\sqrt{\gamma_2} x} + \frac{\sigma_c}{E_c} x \\ U_1(x) &= C_3 (1 - \frac{\gamma_1}{\alpha}) e^{-\sqrt{\gamma_1} x} + C_4 (1 - \frac{\gamma_2}{\alpha}) e^{-\sqrt{\gamma_2} x} + \frac{\sigma_c}{E_c} x \\ (a \leq x \leq \infty) \end{aligned} \quad (7)$$

Où γ_1, γ_2 , et α sont les quantités algébriques connues qui appariaient hors de la solution de notre système d'équation.

Par l'application des conditions aux limites appropriés, on peut donc déterminer les constantes $C_1 - C_4$ ainsi que les déplacements $U_0(x)$ et $U_1(x)$. La longueur délimitant la zone plastique à l'interface a peut également être trouvée. L'introduction des conditions de continuité des contraintes et des déformations pour le noyau cassé, et les fibres intactes adjacentes (équations 5, 7) à $x = a$, permet la détermination des constantes $C_1 - C_4$ en fonction de a . La longueur a peut être elle-même trouvée en imposant la condition de continuité de la contrainte de cisaillement à $x = a$. Sachant que la contrainte de cisaillement est considérée comme constante τ_0 dans la région $0 \leq x \leq a$ (région de plasticité) par contre en dehors de la région plastique $a \leq x \leq \infty$, cette contrainte est donnée par :

$$\tau(x) = (U_0(x) - U_1(x)) \frac{G_m}{2d_1} \quad (8)$$

La continuité de la contrainte de cisaillement est satisfaite à $x = a$ si:

$$\tau_0 = (U_0(a) - U_1(a)) \frac{G_m}{2d_1} \quad (9)$$

Une fois que la valeur de a est connue, on peut alors obtenir $U_0(x)$ et $U_1(x)$ en termes de quantités connues. Il est à noter que des solutions doivent être trouvées pour chaque nombre de cassures adjacentes possibles, et pour chaque pas de charge considéré. Les concentrations de contraintes C_i pour i fibres cassées, sont alors :

$$C_i = \frac{\left. \frac{dU_1(x)}{dx} \right|_{x=0}}{\sigma/E} \quad (10)$$

IV.2 Applications :

Pour mettre en valeur l'étude théorique présentée aux paragraphes précédents, nous allons effectuer des applications sur un échantillon d'une plaque stratifiée en différents matériaux /époxyde. Les caractéristiques mécaniques et géométriques sont regroupées respectivement aux tableaux 1 et 2. Pour apprécier l'évolution de l'endommagement aux zones localement plastifiées, nous avons procédé à une augmentation progressive de la charge extérieure par conséquent une augmentation de la contrainte de traction appliquée aux bords de l'échantillon. L'augmentation de la charge, nous a permis de quantifier l'extension de la zone localement plastifiée et la zone inefficace pour laquelle la Fibre regagne sa capacité de supporter le chargement complet et cela en fonction du nombre de fibres cassées. Finalement, nous allons déterminer l'évolution du déplacement longitudinal des

fibres cassées et intactes en fonction de la longueur de l'échantillon et cela pour comparez les différents fibres naturelles en Jute, Ramie, Alfa et Sisal.

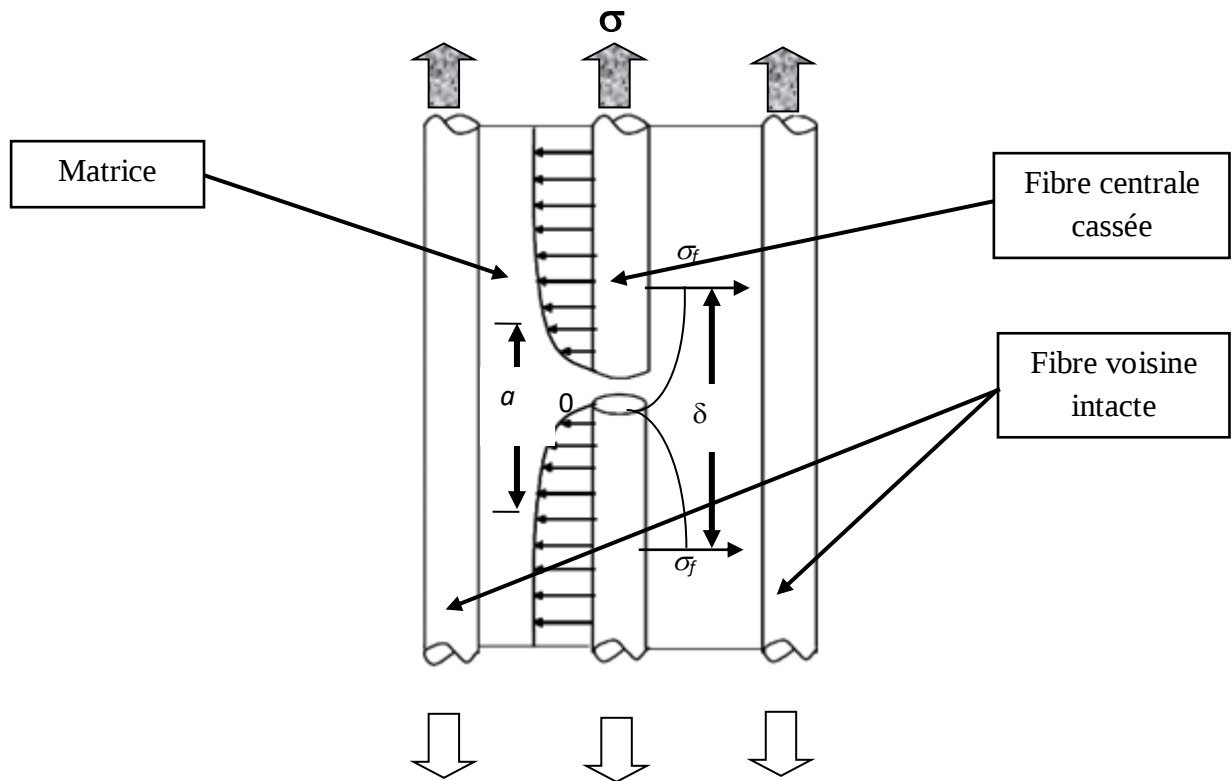
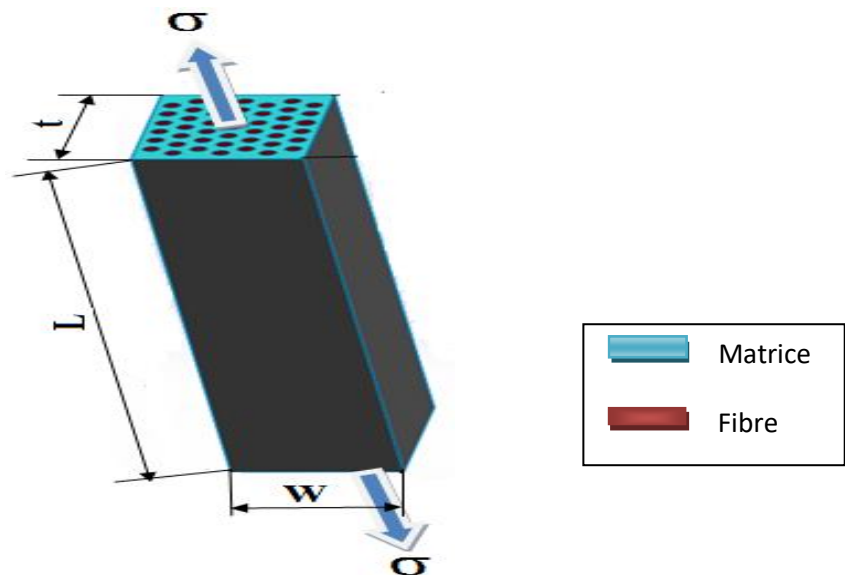


Figure IV.2 Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace.

La longueur inefficace est généralement définie comme étant la longueur comprise entre l'endroit de la rupture de la fibre jusqu'à la longueur pour la laquelle la fibre regain à sa capacité de supporter le chargement complet. Ce concept est illustré sur la figure IV.2, où σ_f dans la figure est la contrainte de la fibre et δ est la longueur inefficace. L'approche du modèle consiste à employer la condition de la contrainte de cisaillement à l'interface pour calculer les longueurs inefficaces et la concentration de contraintes autour des fibres cassées.

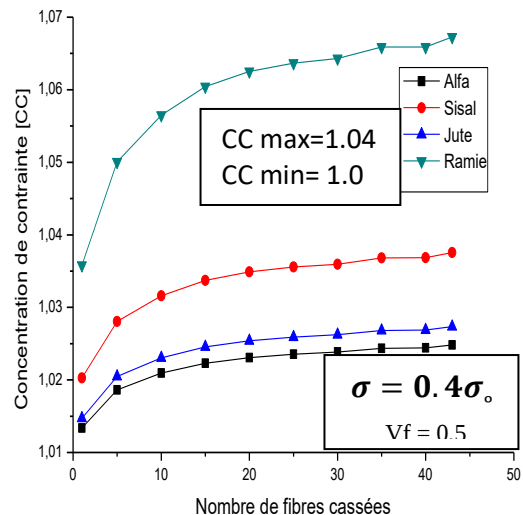
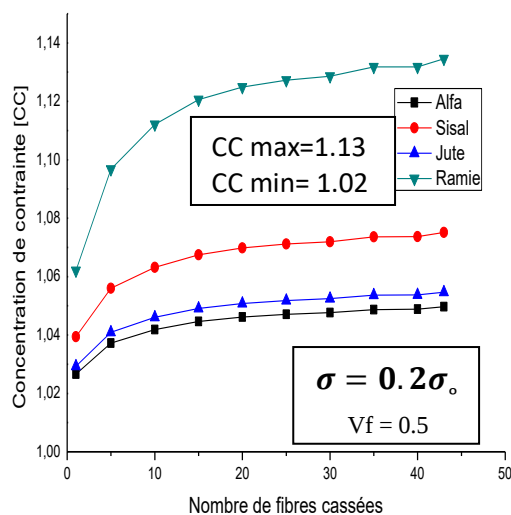
Tableau IV.1 Caractéristiques mécaniques et géométriques des échantillons en composite Jute-Alfa-Ramie et Sisal / époxyde.

Désignations	Fibre en Jute	Fibre en Alfa	Fibre en Ramie	Fibre en Sisal
Module de Young de la fibre E_f	26,5 Gpa	13,4 Gpa	80 Gpa	15 Gpa
Module de Young de matrice E_m	2,73 Gpa			
Contrainte appliquée σ_0	2,85 Gpa			
Coefficient de Poisson de la matrice ν	0.43			
Fraction Volumique des fibres V_f	0.53			
Paramètre de cisaillement η	1.0			
Longueur de l'échantillon L	180 mm			
Largeur de l'échantillon W	0,02 mm			
Epaisseur de l'échantillon t	5 mm			
Rayon de la fibre r_f	0,0005 mm	0,00075 mm	0,0004 mm	0,00015 mm
Nombre maximal de fibres cassées n_i	43			

**Figure IV.3** Géométrie de l'échantillon.

IV.3 Facteur de concentration de contrainte :

Le facteur de concentration de contraintes dans la zone endommagée des fibres peut être établi pour nous indiquer la taille de la progression sur l'évolution d'enchaînement des cassures des fibres et cela des quatre matériaux étudiés. Ce facteur est d'une grande importance car il nous donne la relation entre la contrainte déterminée au point de rupture des fibres et la contrainte externe appliquée. Celui-ci nous permettra de déterminer la concentration de la contrainte au niveau des fibres cassées, et de prévoir une rupture probable des fibres voisines adjacentes. Dans ces conditions, nous avons présenté les premiers résultats de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées, avec une augmentation des charges d'un pas de 0.2 jusqu'à le chargement complet pour les quatre fibres choisies représentés sur les figures 1.



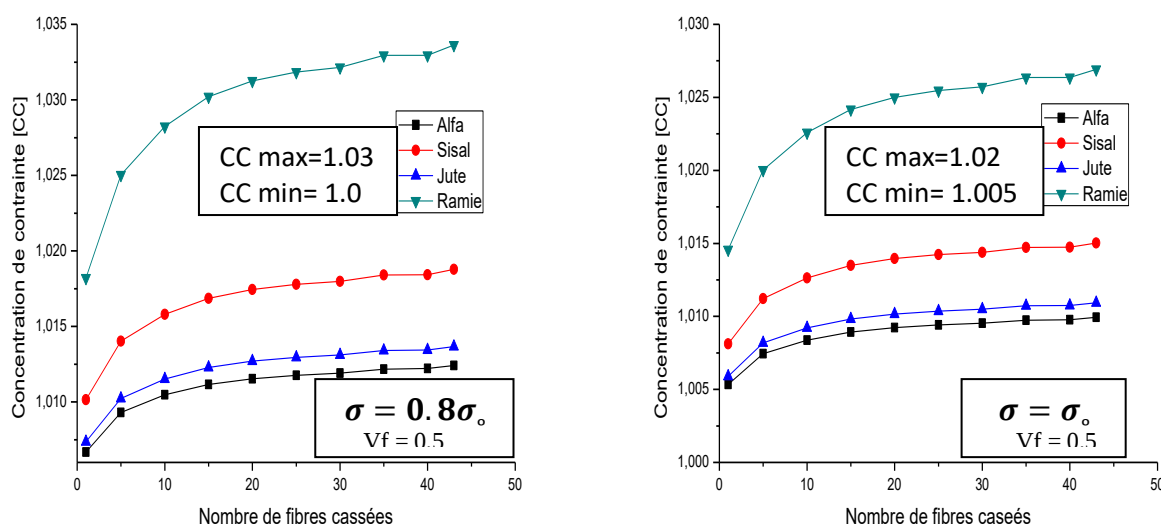


Figure IV.1 Evaluation de la concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées et une variante du chargement croissant variable de $\sigma = 0.2\sigma_0$ et $V_f = 0.5$

Le facteur de concentration de contrainte au point de rupture cas de la fibre en Lin indiquée sur les figures IV.1 montre clairement l'augmentation progressivement de ce facteur en fonction du nombre de fibres cassées. Cette augmentation est plus rapide lorsque le nombre de fibres cassées est très faible, puis il se stabilise au fur et à mesure que le nombre de fibres cassées augmente. Par contre ce facteur diminue en fonction du chargement appliquée. Et ceci pour une fraction volumique moyenne de 0.53.

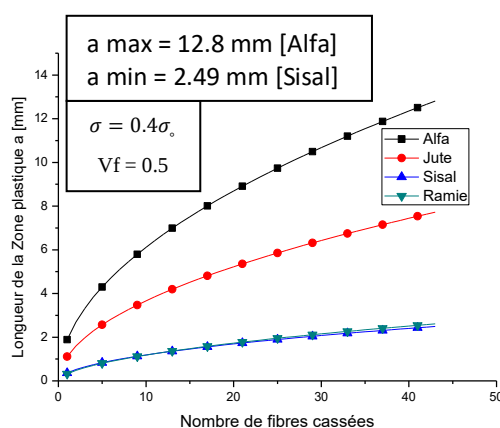
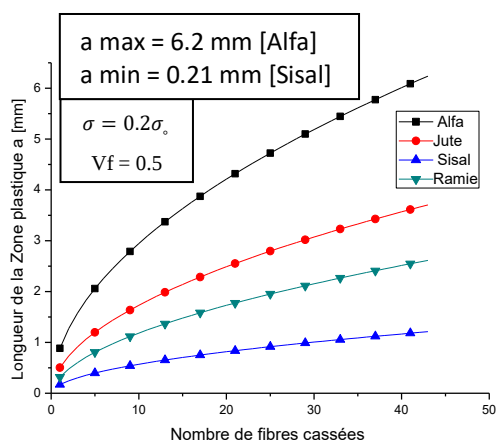
Nous remarquons aussi que le facteur de concentration de contraintes est plus important pour le matériau en ramie, en revanche les matériaux Alfa et la Jute sont beaucoup moins important que le Ramie, ce qui nous montre la bonne rigidité du matériau en Ramie par rapport simultanément le Sisal, Jute et Alfa. Ou le facteur de concentration de contraintes maximal localisé sur la première figure IV.1 pour $\sigma = 0.2\sigma_0$ et cela pour le matériau Ramie ($C_{\max} = 1.13$) pour 43 fibres cassées. Tandis que la valeur minimale de ce facteur ($C_{\min} = 1.005$) située dans la dernière figure IV.1 ($\sigma = \sigma_0$) obtenue pour une fibre cassée sous une contrainte extérieure maximale pour le matériau en Alfa.

Nous remarquons dans ces résultats que les facteurs de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et pour différents chargement sont approchants pour les fibres d'Alfa, Jute et légèrement loin du Sisal, contrairement à la fibre Ramie. Cela est dû à la grande valeur du module de Young du Ramie par rapport à celui des autres matériaux le Sisal, Jute et Alfa respectivement.

IV.4 Evolution de la zone localement plastifiée [a] :

Après la détermination du facteur de concentration de contraintes dans les zones endommagées pour les quatre fibres, simultanément nous allons déterminer la grandeur de la zone localement plastifiée en fonction des fibres cassées pour différents chargements de 0.2 au chargement complet ($\sigma = \sigma_0$), est prévoir l'efficacité des fibres utilisées. Les résultats illustrent donc l'évolution de la zone plastique de la matrice en fonction du nombre de fibres cassée endommagées pour une contrainte externe croissante et avec une fraction volumique $V_f=0.53$. Comme nous le percevons sur l'ensemble des figures IV.2 Il est évident que la zone localement plastifiée pour la fibre en Alfa elle plus importante avec l'augmentation du nombre de fibres cassées, et du chargement appliqué où elle passe de 0.21 mm pour le Sisal d'une fibre cassée pour une contrainte extérieure $\sigma = 0.2 \sigma_0$ à 32.5 mm pour quarante-trois fibres cassées de l'Alfa pour un chargement complet $\sigma = \sigma_0$.

On peut donc dire que l'extension de la zone localement plastifiée « a » dépend essentiellement du nombre de fibres cassées et de la charge appliquée pour une fraction volumique moyenne de 0,53. Cela montre également que les longueurs des zones plastiques du Sisal est moins importants que celles du Ramie, jute et Alfa. D'autre part, nous pouvons révéler à travers les courbes la résistance du matériau utilisé.



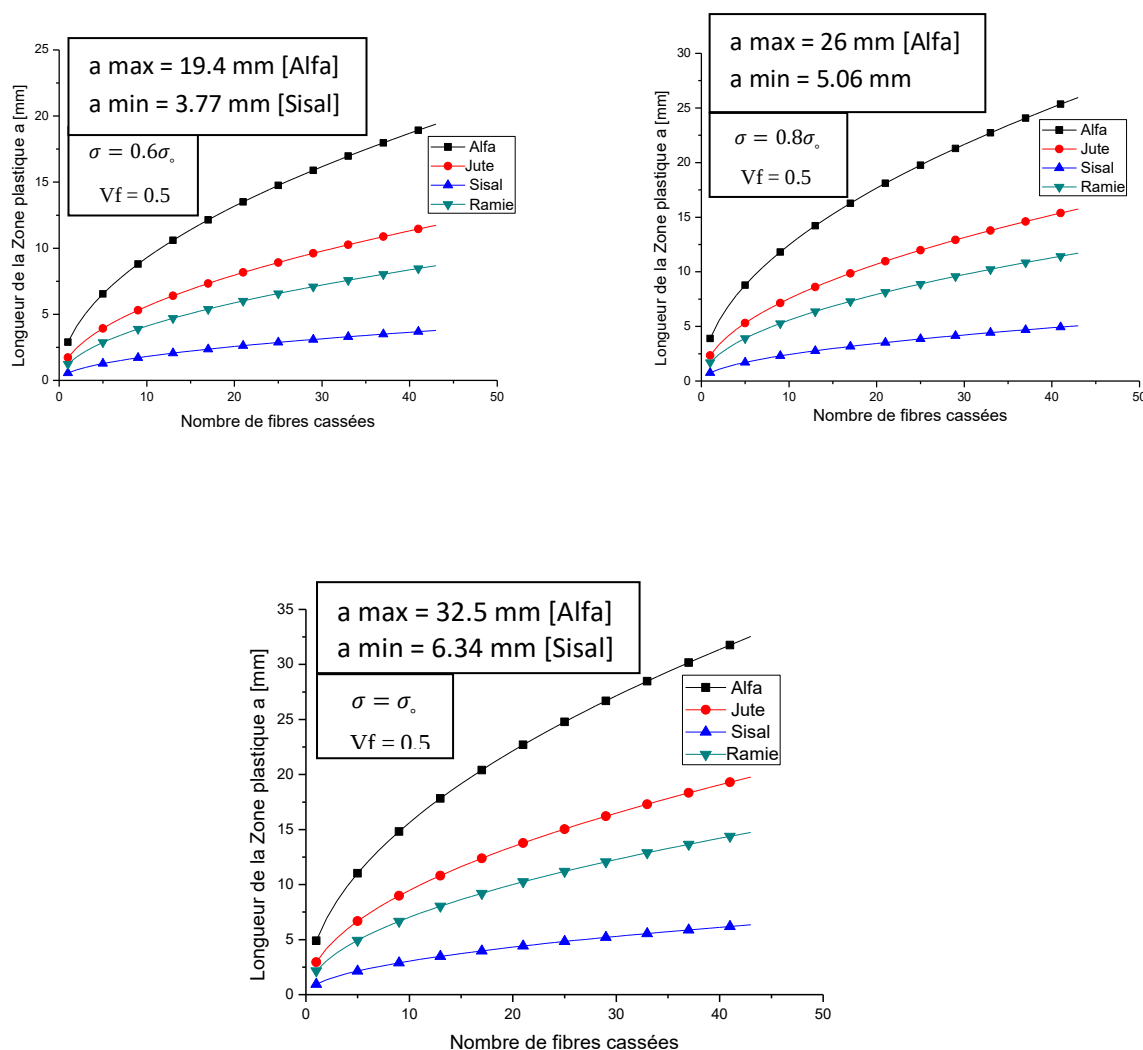


Figure IV.2 Evaluation de la Longueur de la Zone plastique en fonction de nombre de fibres cassées pour quatre cas de matériaux différents avec des chargements croissants de 0.2 au chargement complet ($\sigma = \sigma_0$), et une fraction volumique moyenne $V_f=0.5$

IV.5 Evolutions de la longueur inefficace [δ]:

IV.5.1 Cas pour une fraction basse $V_f=0.3$

La longueur inefficace δ est définie comme étant la longueur comprise entre l'endroit de la rupture de la fibre jusqu'à la longueur pour laquelle la fibre regain à sa capacité de supporter le chargement complet, donc elle doit inclure la zone localement plastifiée a ($\delta > a$). Selon les lois du comportement et à partir de l'endroit de la rupture, la fibre naturelle cassée doit passer par une zone localement plastifiée a , puis par une zone transitoire avant d'atteindre la zone parfaitement élastique délimitée par une longueur δ appelée inefficace. comme le montrent Les figures IV.3 l'évolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive du chargement pour une fraction volumique basse de 0.3, nous constatent que l'extension de la

longueur inefficace est beaucoup plus importante que celle de la zone plastique d'une part, d'autre part lorsque diminue la fraction volumique de 0.5 à 0.3 cela est du que les fibres occupent moins le volume de la matrice et rendre le composite moins rigide par rapport à $V_f=0.5$, comme le montre les différentes valeurs de δ sur les figures IV.3. D'autre par nous remarquons la bonne résistance des fibres en Ramie, Sisal et Jute par rapport à la fibre Alfa. Ceci dit que chaque fois que la longueur δ est importante la fibre devienne moins résistante est sont choix est à écarté par rapport aux autres fibres.

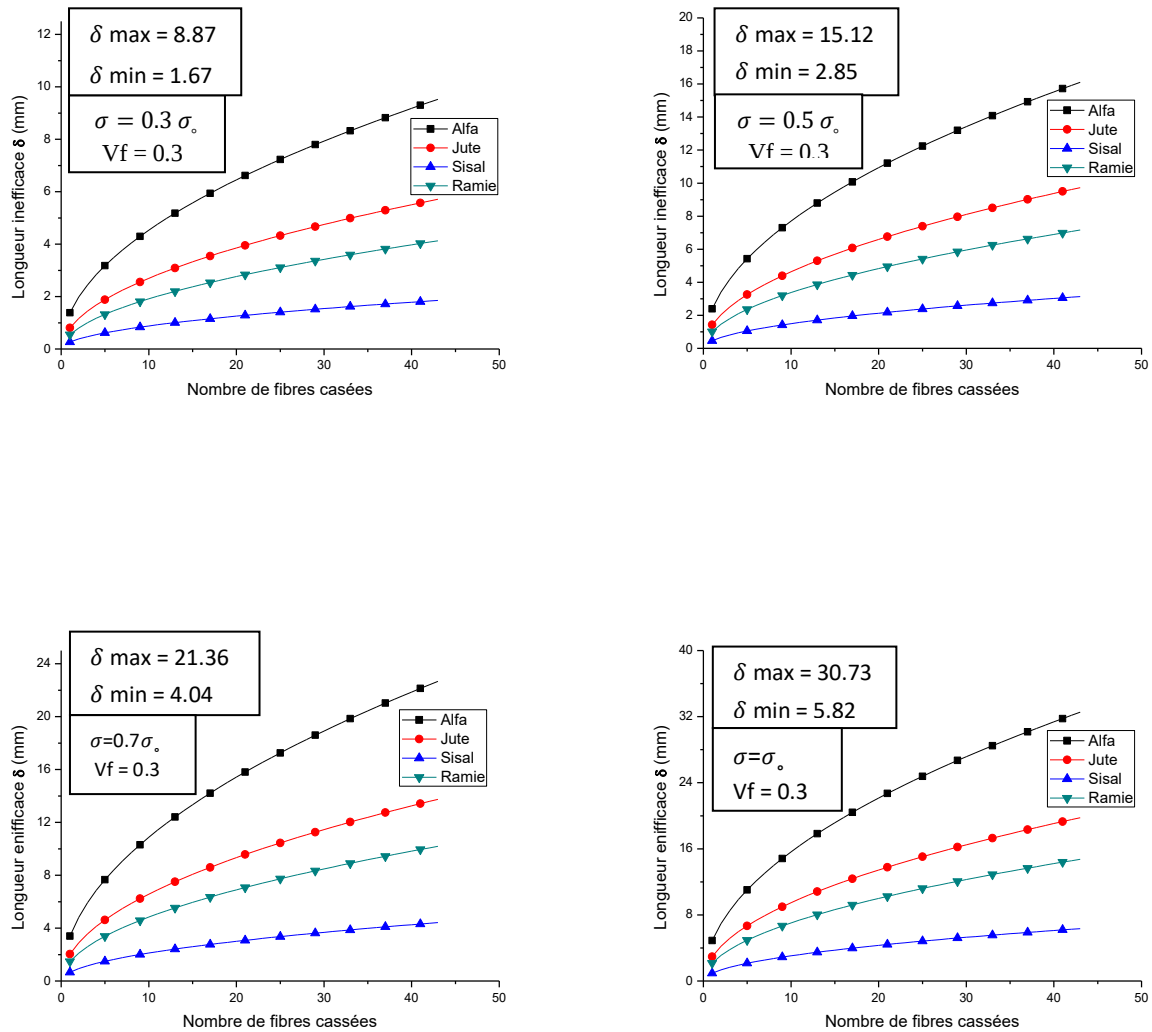


Figure IV.3 Evaluation de la Longueur de la longueur inefficace[δ] en fonction de nombre de fibres cassées pour quatre matériaux différents avec des chargements croissant ($\sigma = 0.3, 0.5, 0.7$ et σ_0) et pour une fraction basse $V_f=0.3$

IV.5.2 Cas pour une fraction moyenne $V_f=0.5$

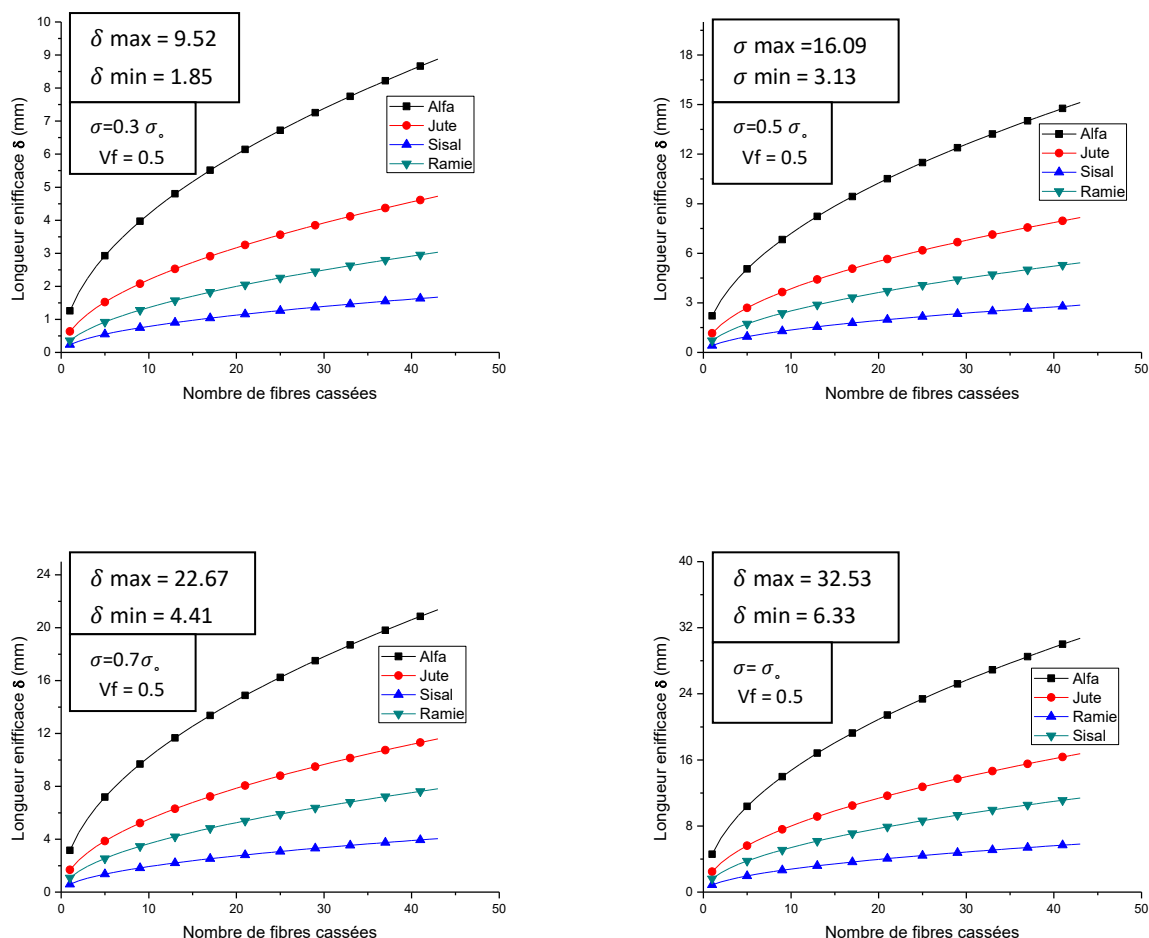


Figure IV.4 Evaluation de la Longueur de la longueur inefficace $[\delta]$ en fonction de nombre de fibres cassées pour quatre matériaux différents avec des chargements croissant et pour une fraction moyenne $V_f=0.5$

Pour le cas des figures IV.4 l'évolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive du chargement pour une fraction volumique moyenne $V_f=0.5$, nous constatons toujours l'augmentation de la longueur inefficace est plus importante que celle des figures IV.3 pour $V_f=0.3$, cela est dû au fait que les fibres occupent un peu plus le volume de la matrice et rendent le matériau un peu plus rigide par rapport à $V_f=0.3$.

IV.5.3 Cas pour une forte fraction volumique $V_f=0.7$

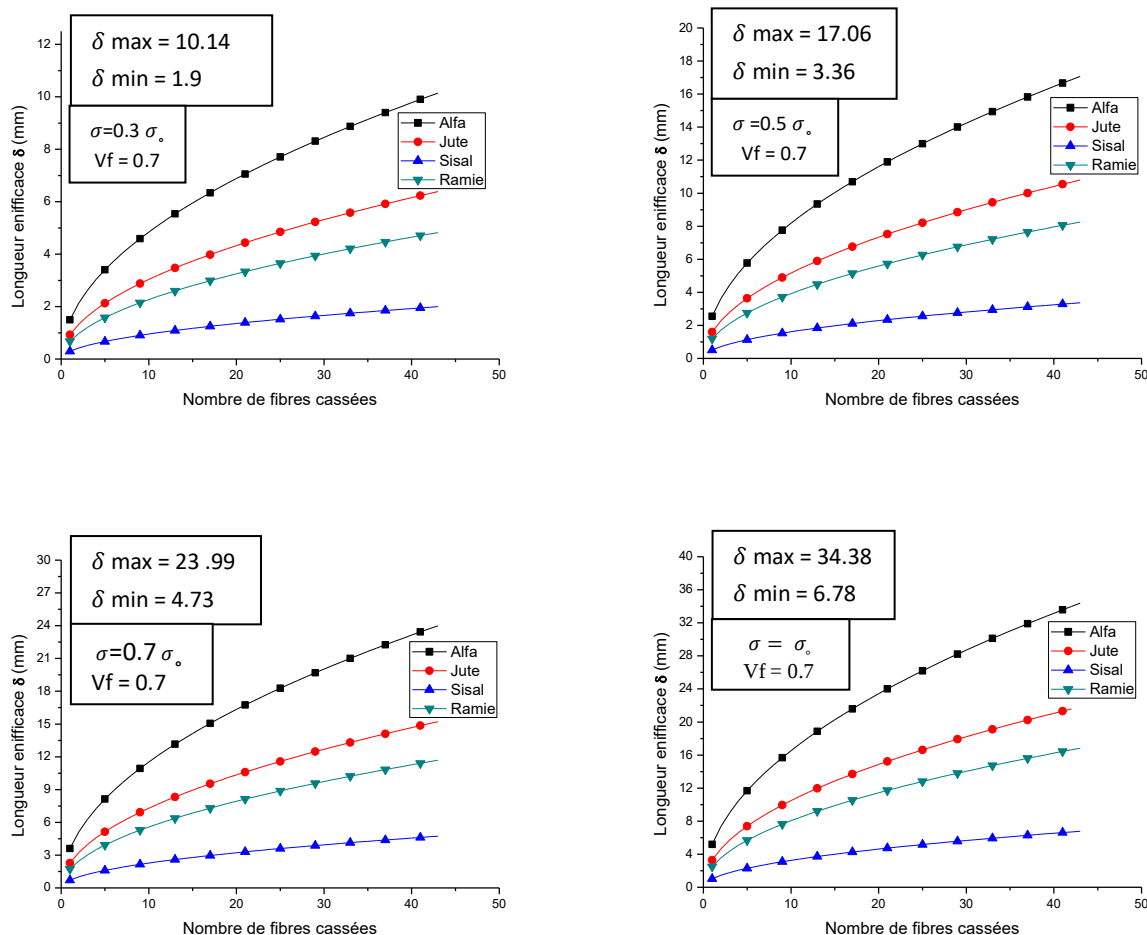


Figure IV.5 Evaluation de la Longueur inefficace $[\delta]$ en fonction de nombre de fibres cassées pour quatre matériaux différents avec des chargements croissant et pour une fraction volumique $V_f=0.7$

IV.6 Evolution des déplacements longitudinaux :

Les figures IV.6 représente la variation du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée, pour une fraction volumique moyenne $V_f = 0,53$. De ces figures, on peut dire que le déplacement augmente sous une forme plus au moins linéaire en fonction de la contrainte de traction appliquée aux bords de l'échantillon. Le déplacement croît plus rapidement avec l'augmentation du nombre de fibres cassées. Cette croissance est marquée par une divergence assez distinctive entre les différentes courbes de ces figures. D'autre part ont remarque aussi que le déplacement longitudinal des fibres Ramie, Sisal et la Jute est très faible par rapport à celui de Alfa qui est très important, ce qui montre la bonne rigidité des trois premières fibres.

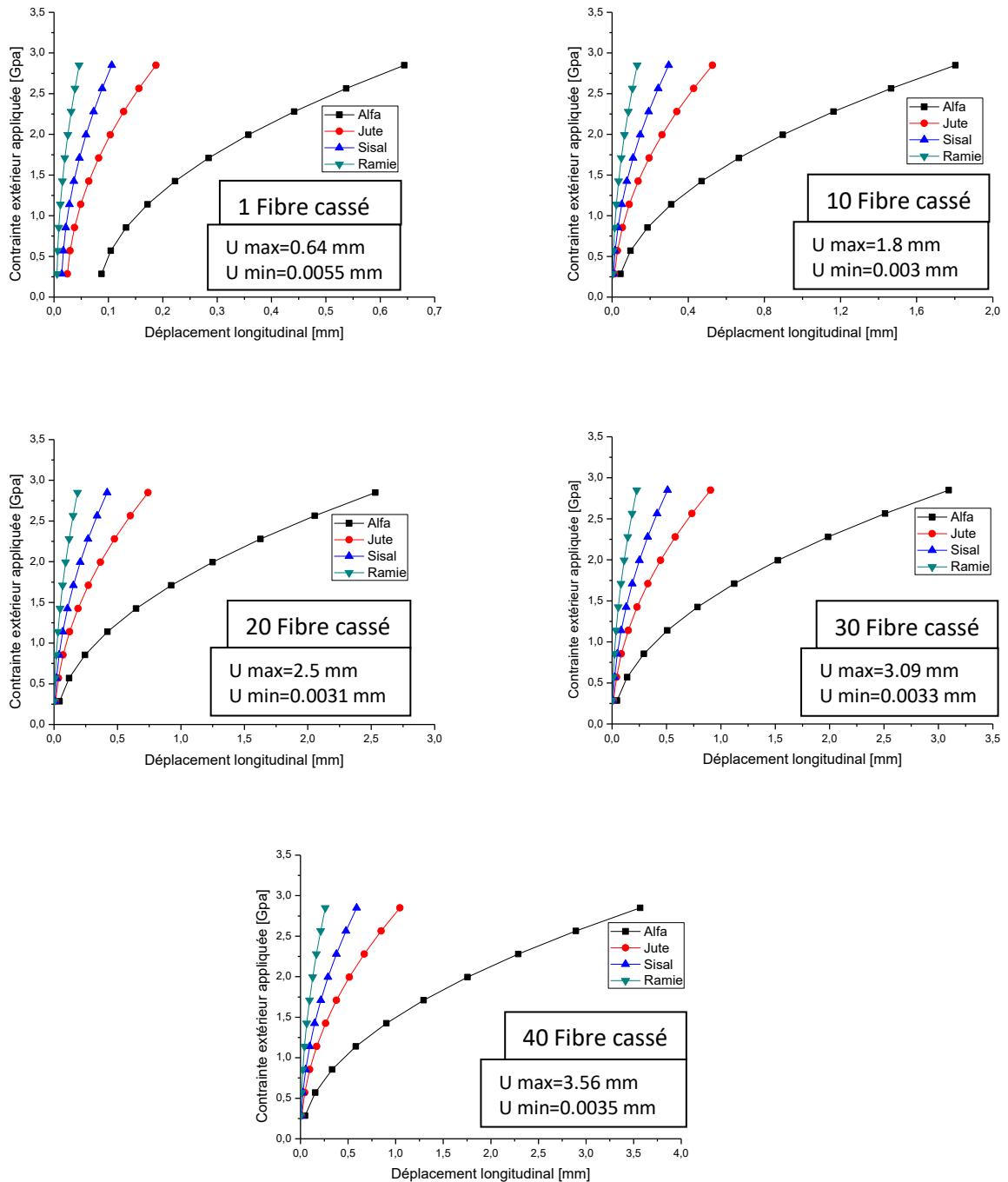


Figure IV.6 La variation du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée et le nombre de fibres cassées pour quatre fibres naturelles.

D'autre part, nous remarquons également qu'à chaque fois que le nombre de fibres cassées augmente, le déplacement de ces fibres cassées devient plus important au voisinage de la zone endommagée des fibres. Par exemple le déplacement longitudinal maximum pour les fibres Ramie, Sisal et Jute ne dépasse pas 0.18mm (cas pour une fibre cassée), par contre l'Alfa est de l'ordre 0.64

mm. En outre le déplacement longitudinal maximum pour 40 fibres cassées des fibres en Ramie, Sisal et Jute ne dépasse pas 1.1 mm, en revanche pour l'Alfa est de 3.56 mm. Cela montre que les matériaux en Ramie, Sisal et Jute sont plus résistants au déplacement longitudinal au point de rupture des fibres, cependant l'Alfa est très sensible en raison de son grand déplacement. Cela reflète le phénomène de non-linéarité dans la zone endommagée qui se caractérise par une plasticité locale.

Conclusion

Dans le cadre de ce projet de fin d'étude, les travaux ont porté principalement sur l'analyse et la comparaison de quatre cas de fibres naturelles, le Jute, Ramie, Alfa et Sisal dans une matrice en époxyde. Le présent travail a d'abord consisté à mener une recherche bibliographique sur les matériaux composites, une attention particulière a été consacrée aux renforts à base naturelles par leurs propriétés physiques et chimiques, ceci pour rejoindre les divers travaux déjà réalisés jusqu'à maintenant sur l'endommagement des matériaux composites à fibres naturelles et cela afin de prévoir la résistance et la durabilité d'un composite unidirectionnel en comparons cette fois-ci quatre cas de fibres naturelles. Pour cela, nous nous sommes contractés, sur le processus de rupture des composites unidirectionnels à renforts naturels moins chers est disponible largement utilisés dans les différentes applications industrielles. En analysant le processus d'endommagement de ces composites, certains paramètres influant sur la propagation de la rupture ont pu être identifiés tel que le déplacement longitudinal en fonction du chargement appliqué, ainsi que le facteur de concentration de contrainte aux fibres cassées et aux fibres voisines puisque la transmission de la contrainte d'une fibre à l'autre passe par la matrice.

La détermination du facteur de la concentration de contrainte, et les déplacements aux point de rupture nous a licite d'avoir un concept plus claire sur l'évolution de la rupture des quatre fibres utilisées et la probabilité d'endommagement des fibres voisines adjacentes.

D'après les résultats trouvés nous remarquons une forte concentration de contraintes est localisée au point de fissures de la fibre naturelle. Cette dernière devient moins importante en s'éloignant de la zone plastique. D'autre part l'augmentation de la fraction volumique des fibres choisies a un effet double, parce qu'elle augmente d'une part le déplacement longitudinal dans la zone plastique ce qui favorise le passage rapide de l'endommagement d'une fibre cassée à une autre, et d'autre part elle réduit le déplacement dans la zone élastique ce qui s permettra d'être en conformité avec les lois de la micromécanique.

Finalement, nous pouvons dire que le présent travail nous confirme les résultats trouvés sur le dernier travail fait par mes collègues, et d'autre part nous à permet aussi d'écarter d'autre fibre non confort. Est nous pouvons dire aussi que ce travail constitue pour nous et pour les futurs chercheurs une base pour développer d'autre axe sur l'endommagement des matériaux composites unidirectionnels à fibres naturelles.

Pour futurs recommandations, nous comptons poursuivre cet axe de recherche pour toucher d'autres phénomènes tel que la variation de l'humidité et de la température conjointement pour ces derniers travaux.