



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*

**MODELISATION NUMERIQUE DE LA PROPAGATION DE  
L'ENDOMMAGEMENT ET DE LA RUPTURE DANS UN MATERIAU  
COMPOSITE NATUREL SISAL/EPOXYDE SOUS SOLlicitATIONS  
HYGROTHERMIQUE**

Présenté par :

1 : BESSGHIR NOUR ELYAKINE.

2 : MUSOMONI MUTAMBA CHRISTIAN.

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

Président : Pr ZENASNI Ramdane

UMAB - Mostaganem

Examineur : Dr BENDOUKHA Mohammed

UMAB - Mostaganem

Encadreur : Dr KHIAT Mohammed Amine

UMAB - Mostaganem

**Année Universitaire : 2020 / 2021**

## **Remerciements**

Au terme de ce travail de fin d'études, nous tenons tout d'abord à exprimer notre profonde gratitude au bon Dieu qui a rendu tout cela possible en permettant que ce travail soit bien achevé et qui a fait de ce jour une date inoubliablement gravée dans nos cœurs.

Nous tenons aussi à exprimer nos plus grands sincères remerciements à l'égard de notre encadreur, notre guide et mentor, Dr. KHIAT Mohammed Amine pour nous avoir assisté et aidé avec passion et avec tant d'amour tout au long de ce travail de recherche.

Nous tenons également à remercier toutes nos familles respectives, MUSOMONI et YAKINI pour leur soutien, plus particulièrement papa Raoul MUSOMONI et maman Geneviève NKAMA-NKAMA, Jeancy, Ruth, Joel, Rachel MUSOMONI et tante Marvina BARAWI, oncle Felly BARAWI, Rosie MUPINDI et papa BESSEGHIR Mokhtar.

Nos remerciements à ceux qui nous sont très chers, Jo MWANE, Joel MPONGA, Elie KANEFU, Chris LIZATA, Dulys MESO, Yanick NGILA NGILA, Reagan NGANSIA, Manassé LUWAWU, Marcel KIFWA, Debbi BOUMEDIENE, Hama SEDIK, Zemouli MOKHTAR, Bouali IMENE

Nos remerciements vont enfin vers tous ceux qui ont contribué de loin ou de près à l'élaboration de ce travail.

## Résumé

Le présent travail rejoint toujours le même axe de recherche sur l'endommagement des composites unidirectionnels et cela, afin d'améliorer les effets de la défaillance et vieillissement du composite naturel en Sisal et la matrice en époxyde. L'objectif de ce travail est de faire une modélisation numérique de la propagation d'endommagement et de rupture dans un matériau composite naturel Sisal/Epoxyde sous sollicitations hygrothermiques (variations des températures et les concentrations d'humidités). L'emploi de ce type de matériaux augmente nettement l'efficacité de telles structures. De nos jours, la mécanique d'endommagement des matériaux composites aux interfaces matrice-fibre est devenue un domaine de recherche d'intérêt scientifique et technologique très prospère.

L'évolution des caractéristiques particulières de la fibre naturelle, de la matrice et de l'interface fibre/matrice en fonction de la température et l'humidité sont des facteurs les plus importants pour évaluer la dégradation de la résistance du composite d'un 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 de cisaillement par l'intermédiaire de la matrice entre deux fibres voisines intacte et cassée.

En second lieu, une analyse probabiliste de la contrainte appliquée au composite unidirectionnel a été effectuée afin d'évaluer les facteurs d'importances en se basant sur la concentration de contraintes et la longueur inefficace à l'aide de la méthode Monte-Carlo.

## **Abstract**

The present work still joins the same research axis on the damage of unidirectional composites and this, in order to improve the effects of the failure and aging of the natural composite in Sisal and the epoxy matrix. The goal of this work is to make a numerical modeling of the propagation of damage and rupture in a natural composite material Sisal / Epoxy under hygrothermal stresses (variations in temperatures and humidity concentrations). The use of this type of material significantly increases the efficiency of such structures. Nowadays, the damage mechanics of composite materials at matrix-fiber interfaces has become a very prosperous field of research of scientific and technological interest.

The evolution of the particular characteristics of the natural fiber, of the matrix and of the fiber / matrix interface as a function of temperature and humidity are the most important factors in evaluating the degradation of the composite strength of a point 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 shear stresses through the matrix between two neighboring intact and broken fibers.

Second, a probabilistic stress analysis applied to the unidirectional composite was performed to assess the factors of importance based on stress concentration and inefficient length using the Monte Carlo method.

## ملخص

لا يزال العمل الحالي ينضم إلى نفس محور البحث حول تلف المركبات أحادية الاتجاه وهذا من أجل تحسين آثار فشل وشيخوخة المركب الطبيعي في السيزال ومصفوفة الأيبوكسي. الهدف من هذا العمل هو عمل نمذجة عددية للتكاثر على الضرر والتمزق في مادة مركبة طبيعية السيزال / الأيبوكسي تحت الضغوط الحرارية (التغيرات في درجات الحرارة وتركيزات الرطوبة). يزيد استخدام هذا النوع من المواد بشكل كبير من كفاءة هذه الهياكل في الوقت الحاضر، أصبحت ميكانيكا الضرر للمواد المركبة في واجهات ألياف المصفوفة مجالاً للبحث العلمي والتكنولوجي المزدهر للغاية.

يعد تطور الخصائص الخاصة للألياف الطبيعية والمصفوفة وواجهة الألياف / المصفوفة كدالة لدرجة الحرارة والرطوبة من أهم العوامل في تقييم تدهور قوة المركب لواجهة نظر ميكانيكية دقيقة. يتم أخذ شروط الواجهة والالتصاق في الاعتبار من خلال هذا النموذج لتحديد معدل نقل ضغوط القص من خلال المصفوفة بين ألياف متجاورة سليمة ومكسورة.

ثانيًا ، تم إجراء تحليل الإجهاد الاحتمالي المطبق على المركب أحادي الاتجاه من أجل تقييم العوامل ذات الأهمية المستخدمة في تركيز الإجهاد والطول غير الفعال باستخدام طريقة مونت كارلو

---

<b>Introduction générale</b> .....	<b>1</b>
<b>Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites</b> .....	<b>3</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>3</b>
<b>I.1. Caractérisations générales</b> .....	<b>3</b>
<b>I.2. Classification des matériaux composites</b> .....	<b>4</b>
I.2.1. Classification suivant la forme des constituants .....	4
I.2.1.1. Composites à fibres .....	4
I.2.1.2. Composites à particules .....	5
I.2.2. Classification suivant la nature des constituants [6] .....	5
<b>I.3. Les constituants</b> .....	<b>7</b>
I.3.1. Résines .....	8
I.3.1.1. Les résines époxydes .....	9
I.3.2. Les Charges et additifs.....	9
I.3.2.1. Introduction.....	9
I.3.2.2. Les charges .....	10
I.3.2.3. Charges renforçantes .....	10
I.3.2.4. Charges non renforçantes .....	10
I.3.3. Les additifs [1] .....	11
I.3.4. Les fibres .....	11
I.3.4.1. Les principales fibres .....	12
I.3.4.1.a Fibres de verre .....	12
I.3.4.1.b Fibres de carbone.....	12
I.3.4.1.c Fibres d'aramide .....	13
I.3.4.1.d Fibres naturelles.....	14
I.3.4.1.e Fibres de bore .....	14
I.3.5. L'interface .....	14
<b>I.4. Mises en œuvre des composites</b> .....	<b>15</b>
<b>I.5. Architectures et types de composites</b> .....	<b>15</b>
I.5.1. Architectures de renforts .....	16
I.5.1.1. Les unidirectionnels (UD) .....	16
I.5.1.2. Les bidirectionnels .....	16
I.5.2. Types de composites .....	17
I.5.2.1. Les monocouches .....	17
I.5.2.2. Les stratifiés.....	18
I.5.2.3. Sandwichs.....	18
<b>I.6. Avantages et inconvénients des matériaux composites</b> .....	<b>19</b>
<b>I.7. Les secteurs d'application des composites</b> .....	<b>19</b>
<b>Conclusion</b> .....	<b>20</b>
<b>Chapitre II : Généralités sur les fibres naturelles</b> .....	<b>21</b>
<b>Introduction</b> .....	<b>21</b>
<b>II.1. Les fibres naturelles</b> .....	<b>22</b>
<b>II.2. Comparaison des fibres naturelles et artificielles</b> .....	<b>23</b>
<b>II.3. Différence dans les types de fibres naturelles</b> .....	<b>25</b>
<b>II.4. Quelques fibres naturelles et leurs usages</b> .....	<b>26</b>
<b>II.5. Les avantages et les impacts environnementaux des fibres naturelles comparées aux fibres artificielles</b> .....	<b>26</b>

<b>II.6. Développement du marché de fibres naturelles .....</b>	<b>29</b>
<b>II.7. Les intérêts du sujet : Sisal/époxyde .....</b>	<b>30</b>
II.7.1. Description du sisal et cycle de vie [22] .....	30
II.7.2. Culture et production [22] .....	31
II.7.3. Fibres .....	31
II.7.4. Les usages du sisal [23] .....	32
<b>Conclusion.....</b>	<b>33</b>
<b><i>Chapitre III : Modèle de rupture longitudinale avec les résultats .....</i></b>	<b><i>34</i></b>
<b>Introduction .....</b>	<b>34</b>
<b>III.1. Modèle de rupture longitudinale avec effet hygrothermique .....</b>	<b>34</b>
<b>III.2. Analyse mécanique .....</b>	<b>41</b>
III.2.1. Evaluation de la concentration de contrainte .....	41
III.2.2. Evolution du Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée .....	46
<b>III.3. Analyse de sensibilité.....</b>	<b>48</b>
III.3.1. Influence de différents facteurs de sensibilité sur la concentration de contrainte .....	48
<b><i>Conclusion générale.....</i></b>	<b><i>51</i></b>
<b><i>Références bibliographiques et webographiques.....</i></b>	<b><i>53</i></b>

## Liste des figures

---

Figure I.1 : Des constituants du composites .....	7
Figure I.2 : Fibres de verre.....	12
Figure I.3 : Fibres de carbone.....	13
Figure I.4 : Fibres d'aramide.....	13
Figure I.5 : Nappe unidirectionnelle.....	16
Figure I.6 : Toile.....	16
Figure I.7 : Serge.....	17
Figure I.8 : Plis UD.....	17
Figure I.9 : Stratifiés.....	18
Figure I.10 : Sandwichs.....	19
Figure II.1 : Schéma détaillé de fibres naturelles.....	22
Figure II.2 : Comparaison de fibres naturelles en fonction de module de Young [16] .....	25
Figure II.3 : Fibres de sisal .....	31
Figure III.1 : Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes. ....	37
Figure III.2 : Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace .....	39
Figure III.3 : Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation de $T^{\circ}$ , et pour trois cas de concentration d'humidité ( $C=1\%$ , $50\%$ et $100\%$ ). ....	42
Figure III.4 : Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation de concentration d'humidité de $1\%$ , $50\%$ , et $100\%$ pour des températures de $20^{\circ}$ à $120^{\circ}$ et pour un chargement $\sigma= 0.5 \sigma_0$ .....	44
Figure III.5 : Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation de concentration d'humidité de $1\%$ , $50\%$ , et $100\%$ pour des températures de $20^{\circ}$ à $120^{\circ}$ et pour un chargement complet $\sigma= \sigma_0$ .....	46
Figure III.6 : Evaluations du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée et pour de différentes conditions hygrothermiques .....	47
Figure III.7 : Facteurs d'importance de la Concentrations de Contraintes pour quatre cas de conditions hygrothermiques. ....	50



## Liste des tableaux

---

<i>Tableau I.1</i> Caractéristiques mécaniques de matériaux dits standards [1].....	6
<i>Tableau I.2</i> Caractéristiques mécaniques des matériaux composites.....	6
<i>Tableau II.1</i> : : Caractéristiques de fibres naturelles [16].....	23
<i>Tableau II.2</i> : Propriétés des fibres naturelles [16] .....	24
<i>Tableau II.3</i> : Comparaison entre les fibres naturelles & artificielles [16] .....	24
<i>Tableau II.4</i> : Comparaison sur les impacts environnementaux [17].....	27
<i>Tableau II.5</i> : Comparaison sur les impacts environnementaux [17].....	27
<i>Tableau II.6</i> : Comparaison sur les impacts environnementaux [17].....	28
<i>Tableau II.7</i> : Comparaison de réduction de poids [17].....	28
<i>Tableau II.8</i> : Evolution de l'utilisation de fibres naturelles dans le secteur d'automobile [20] .....	29
<i>Tableau II.9</i> : Production et composition de fibres naturelles [21].....	29
<i>Tableau III.1</i> : Caractéristiques mécaniques d'un échantillon en composite Sisal/époxy .....	40
<i>Tableau III.2</i> : Caractéristiques géométriques d'un échantillon en composite Sisal/époxy .....	41

## Liste des symboles

---

$A_m$  : Surface de la matrice

$A_f$  : Surface de la fibre

$a$  : Zone du décollement localement plastifiée

$a$  : Coefficient d'indice de la matrice

$d$  : la densité

$D$  : le diamètre

$\beta$  : paramètre des modules de géométrie fibre-matrice

$c$  : Indice du composite en bloc

$C_c$  : 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

$\sigma_c$  : Contrainte de traction du composite

$\sigma_0$  : Contrainte de référence de la fibre

$\sigma_{fu}$  : Contrainte à la rupture de la fibre

$\sigma_m$  : Contrainte en traction de la matrice

$\sigma_{mu}$  : Contrainte à la rupture de la matrice

$\tau_0$  : Contrainte de cisaillement

$\rho$  : La masse volumique

$\eta$  : 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

## Liste des symboles

---

$n_i$  : Nombre de fibre cassée

$\nu_m$  : 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 générale**

Il fut un temps où l'homme eut bâti de grands édifices et fit évoluer son environnement grâce à la découverte et à l'exploitation de l'industrie lithique. Nous pouvons observer d'où nous venons pour arriver là où nous sommes aujourd'hui avec cette technologie du temps moderne. Nous reconnaissons que l'homme a fourni de grands efforts en commençant par l'industrie lithique en passant par l'âge du cuivre, ensuite l'âge du fer et enfin nous avons aujourd'hui l'exploitation et l'élaboration des innombrables alliages de fer qui sont considérés les métaux-rois dans le monde industriel depuis leur apparition et ne cessent de faire florès jusqu'à présent. Et pas longtemps encore, il y a eu l'apparition des autres matériaux très développés pour des usages spéciaux grâce encore au progrès scientifique et à l'avancée technologique. En l'occurrence, nous parlons de matériaux composites qui sont élaborés pour des usages spéciaux et l'objectif principal de notre thème est d'analyser à quel niveau et comment ils peuvent être endommagés. Rappelons que ce genre d'étude de la mécanique de rupture a vu le jour à la suite de quelques incidents spectaculaires qui se sont déroulés dans les années antérieures.

Les matériaux composites aux interfaces matrice-fibre sont très sensibles à des contraintes environnementales (humidité, température) et mécanique qui peuvent engendrer des dégradations dans le composite et le rendre inutilisable. Le développement des modèles de résistance d'un composite est devenu de plus en plus complexe au cours des dernières années. Le plus simple de ces modèles est celui qui considère la résistance d'un groupe de fibres du matériau composite et cela, le modèle qui est abordé dans notre travail. Ce type de modèle qui ignore la résistance de la résine humide, tends à offrir une estimation très proche de la résistance du composite avec la prise en considération de la contribution de la matrice comme jonction entre les fibres endommagées. Un autre facteur ayant poussé le développement des composites, c'est la spécificité qu'ils donnent, que ça soit d'un point de vue mécanique, thermique, etc.

Deux propriétés sont essentielles dans le dimensionnement de structures composites, il s'agit de la caractérisation à l'échelle micromécanique et macromécanique des modules élastiques et de la résistance mécanique. Une synthèse de ces propriétés peut être consultée dans les travaux de Christensen [1]. Ses travaux sont basés sur les modèles micromécaniques d'homogénéisation et ont recours à la définition d'un volume élémentaire représentatif afin d'effectuer une homogénéisation du composite. Parmi tant de modèles sur l'endommagement d'un matériau composite moderne depuis son apparition, nous avons jugé bon d'en utiliser quelques-uns à la suite de nos attentes de résultats et de paramètres à prendre en compte. Bien que les modèles Zweben et Rosen soient considérés comme étant les plus anciens modèles pour la prédiction de la résistance à la traction, en se basant sur l'analyse du cisaillement des fibres disposées dans une direction unique. Cependant,

nous n'allons pas les utiliser, à cause du fait qu'ils ne tiennent pas compte des effets de la concentration de contraintes dans les fibres adjacentes à celles de fibres cassées. [2,3]

Au cours de dernières années, l'homme étant confronté aux problèmes liés à la dégradation de l'environnement, se sent obligé de reconnaître l'importance de développer de plus en plus de matériaux composites à base de fibres naturelles. Dans le but de limiter les dégâts que peuvent causer les composites à base de fibres synthétiques à son environnement. Nous allons détailler en long et en large sur leur importance dans un chapitre consacré uniquement aux fibres naturelles.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la continuité des travaux de recherche déjà effectués auparavant par nos collègues. C'est ainsi que nous poursuivons le même travail en utilisant cette fois-ci les fibres naturelles en sisal. Une analyse du processus de la rupture longitudinale incluant les interactions micromécaniques entre les fibres naturelles et la matrice en tenant compte des effets hygrothermiques sur la dégradation des constituants du composite.

Le présent modèle qui est basé sur le modèle de Gao et Reifsnider [4] permet de prévoir la résistance et la durabilité d'un composite unidirectionnel en utilisant de techniques micromécaniques. Ce modèle suppose qu'un groupe de fibres cassées est entouré d'un nombre de fibres intactes. Si la contrainte est responsable de la rupture d'une fibre, celle-ci 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. 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 sisal/époxyde sous les sollicitations hygrothermiques. Par la suite, nous allons voir quels sont les facteurs d'importances pour prédire la résistance micromécanique de notre composite Sisal/époxyde unidirectionnel toujours sous les sollicitations hygrothermiques.

Pour atteindre ce but, nous avons scindé notre travail en trois chapitres. Au premier chapitre, nous avons présenté une recherche bibliographique sur les différents matériaux composites. Au deuxième chapitre, nous avons abordé les différents types de fibres naturelles, en particulier le Sisal. Ensuite, le troisième et dernier chapitre a été consacré au modèle de rupture d'un composite unidirectionnel pour suivre le développement de rupture d'un groupe de fibres cassées entouré d'un nombre de fibres intactes, et à la fin nous avons déterminé les facteurs d'importances pour prédire la résistance micromécanique de notre composite Sisal/Epoxyde Unidirectionnels toujours sous les sollicitations hygrothermiques.

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

### Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

#### Introduction

Le mot composite vient du mot latin « compositus » qui veut dire : composé ou constitué de deux ou plusieurs parties différentes.

En fait, le terme matériau composite est employé de façon générique et pour désigner un matériau obtenu par 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 de phases prises individuellement ou séparément. [5]

Autrement, nous pouvons dire, avant l'assemblage, chacun de ces matériaux à assembler présente des performances ou des qualités moins inférieures à ce que le concepteur veut avoir pour une application visée, d'où le fait de les composer ou les mettre ensemble lui permet de satisfaire son besoin, voire plus.

#### I.1. Caractérisations générales

Les matériaux composites représentent dans le cas le plus général des matériaux constitués d'au moins deux phases de natures différentes comme sa définition l'indique ci-dessus. La phase discontinue répartie dans une phase continue et plus précisément en science et ingénierie des matériaux, il s'agit bien de renforts, de multiples formats, noyés dans une matrice. La première des caractéristiques des composites est donc qu'ils doivent être étudiés et caractérisés à diverses échelles d'observation. Par la suite, la mécanique des composites comporte plusieurs volets qui visent essentiellement à comprendre les comportements mécaniques aux diverses échelles, induits par les sollicitations d'origine mécanique, mais également thermique, hydrique ou hygrothermique ou encore liées à des changements physico-chimiques. [5]

Dans le cadre de notre travail, nous avons plus parlé ou traité les sollicitations à l'origine hygrothermique.

Comme il est coutume pour tout matériau que l'on veut élaborer pour une application quelconque, de bien choisir et connaître les composants qui sont aptes à le constituer dans l'optique d'avoir les propriétés souhaitées de tout genre à la fin de la fabrication de celui-ci. Ainsi nous disons les propriétés des matériaux sont les résultats :

- Des propriétés des matériaux constituants ;
- De leur distribution géométrique ;
- De leurs interactions.

## **Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites**

---

Le but de cet assemblage est de constituer un matériau résultant dont les caractéristiques mécaniques (mais aussi thermiques, acoustiques, etc.) spécifiques, c'est-à-dire rapportées à la masse volumique, sont plus intéressantes que celles de matériaux dits standards. [5, 6]

Nous notons du point de vue global que les propriétés mécaniques des composites sont de l'ordre de celles des autres matériaux de structure, pour une densité moindre et un coût qui tend à devenir compétitif. Nous allons montrer dans les lignes suivantes à travers des tableaux comment les propriétés mécaniques de matériaux composites sont équivalentes, voire supérieures à celles de matériaux traditionnels. [5, 6]

### **I.2. Classification des matériaux composites**

Les matériaux composites peuvent être classés en deux catégories, soit suivant la forme des composants, soit suivant la nature des composants.

#### **I.2.1. Classification suivant la forme des constituants**

Sur base de la forme des constituants, nous distinguons deux classes qui sont : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

##### **I.2.1.1. Composites à fibres**

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc. L'arrangement des fibres leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites pour obtenir des matériaux allant des matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan. [6]

Le concepteur possède donc un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécaniques et physiques en jouant sur :

- La nature des constituants ;
- La proportion des constituants ;
- L'orientation des fibres.

Cela est fait suivant le cahier des charges imposé.

L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques [6]. En conséquence, notre travail sera essentiellement consacré à l'étude de ce type de matériaux qui est le plus utilisé dans plusieurs applications industrielles grâce à sa haute performance.

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

---

### I.2.1.2. Composites à particules

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimensions privilégiées. [6]

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques. [6]

Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple, des inclusions de plomb dans les alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage. Des particules de métaux fragiles tel le tungstène, le chrome et le molybdène, incorporées dans de métaux ductiles, augmenteront leurs propriétés à températures élevées, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante. [6]

Les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît au jour le jour, mais nous ne le traiterons pas dans les lignes suivantes en vue de l'objectivité de notre travail.

### I.2.2. Classification suivant la nature des constituants [6]

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice métallique ou à matrice minérale.

Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'associations ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche.

Nous citons :

Composites à matrice organique (résine, charges), avec :

- Des fibres minérales : verre, carbone ;
- Des fibres organiques : kevlar, polyamides ;
- Des fibres métalliques : bore, aluminium.

Composites à matrice métallique (alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :

- Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC) ;
- Des fibres métalliques : bore ;
- Des fibres métallo-minérales : fibre de bore revêtues de carbure de silicium (SiC).

Composites à matrice minérale (céramique), avec :

- Des fibres métalliques : bore ;



## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- Des particules métalliques : cermets ;
- Des particules minérales : carbures, nitrures.

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300 ° C, alors que les matériaux composites à matrice métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600° C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000 ° C pour une matrice céramique. [6]

Nous comprenons mieux alors que les matériaux composites les plus répandus utilisant des renforts tel que le carbone, le verre ou encore l'aramide présentent des propriétés mécaniques bien égales à celles des matériaux standards, mais pour une masse plus faible.

Sans oublier de souligner ce facteur pour passer autre chose que les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite. Les fractions volumiques et massiques sont un des facteurs les plus importants qui déterminent les caractéristiques mécaniques d'un matériau composite, c'est la proportion relative de matrice et de renfort. Il est donc nécessaire de les savoir sans en passer de l'une à l'autre. [6]

Tableau I.1 Caractéristiques mécaniques de matériaux dits standards [1]

Propriétés Matières	Module E (GPa)	Contrainte à la rupture $\sigma_u$ (MPa)	Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Module spécifique E/ $\rho$ (MN m/kg)	Contrainte spécifique $\sigma_u/\rho$ (Kn m/kg)
Acier	210	340-2100	7800	26,9	43-270
Alliages d'aluminium	70	140-620	2700	25,9	52-230
Bois	30	-	390	33,3	-
Verre	70	700-2100	2500	28	280-840
Tungstène	350	1100-4100	19300	18,1	57-210
Béryllium	300	700	1830	164	380

Tableau I.2 Caractéristiques mécaniques des matériaux composites

Fibres de	Module E (Gpa)	Contrainte à la rupture $\sigma_u$ (MPa)	Masse volumique $\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	Module spécifique E/ $\rho$ (MN m/kg)	Contrainte spécifique $\sigma_u/\rho$ (Kn m/kg)
Verre-E	72,4	3500	2540	28,5	1380
Verre-S	85,5	4600	2480	34,5	1850
Carbone à -haut module -contrainte élevée	390 240	2100 3500	1900 1850	205 130	1100 1890
Kevlar (aramide)	130	2800	1500	87	1870
Bore	385	2800	2630	146	1100

Ces deux tableaux ci-dessus présentent de différentes valeurs expérimentales des caractéristiques mécaniques en établissant une comparaison intéressante. Nous remarquons combien les fibres artificielles (renforts) possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques équivalentes à celles des matériaux dits standards, mais à une seule différence, elles présentent des masses volumiques spécifiques faibles.

### I.3. Les constituants

Comme nous l'avons précisé dans les lignes précédentes, un matériau composite est constitué d'une matrice et d'un renfort, constitué de fibres. La matrice est elle-même composée d'une résine et de charges dont le but est d'améliorer les caractéristiques de la résine tout en diminuant le coût de production. Et aussi constitué des renforts, les renforts apportent au matériau composite ses performances mécaniques élevées, alors que la matrice a pour rôle de transmettre à ceux-ci les sollicitations mécaniques extérieures et de les protéger vis-à-vis des agressions extérieures. Le choix de constituants est donc plus important que dans les autres matériaux, indissociable du procédé d'élaboration envisagé. [5]

Les paragraphes suivants ont pour objet de dégager d'une manière précise et concise les divers constituants du matériau composite avec l'œil d'un mécanicien.

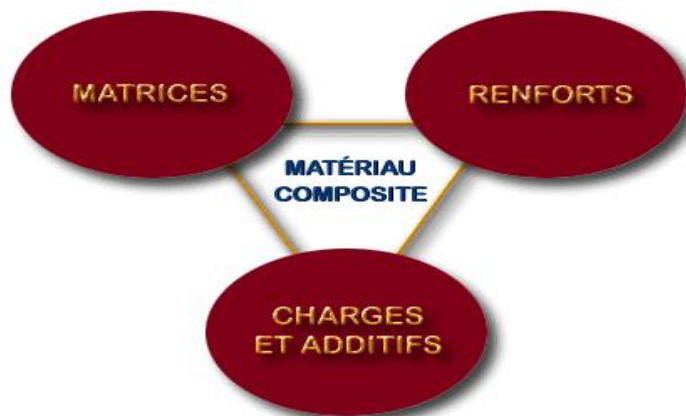


Figure I.1 : Des constituants du composites

### I.3.1. Résines

Une résine désigne en fait un produit polymère qui est utilisé comme une matière de base dans certaines applications. Elles peuvent être naturelles, artificielles et synthétiques. Dans ce cas précis, nous étudions les résines synthétiques qui sont généralement employées dans plusieurs domaines. Nous citons les polymères thermodurcissables et les polymères thermoplastiques. Il est important de souligner que les résines doivent être dotées de certaines qualités requises pour une application voulue, entre autres être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les éléments que nous voulons le composer (fibres, etc.).

Qui plus est, elles doivent avoir une masse volumique faible de façon à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Toutes ces qualités requises des résines se présentent comme étant des contraintes que nous devons suivre à la lettre ou traiter avec grand soin pour satisfaire nos besoins.

Parmi les deux grandes familles de résines mentionnées, une d'entre elles est la plus employée dans les applications qui nécessitent les matériaux composites. Ces deux grandes familles des résines possèdent la faculté de pouvoir être moulées ou mises en forme pour obtenir un produit fini, soit un produit semi-fini dont la forme peut être modifiée. [6]

Parlons des résines de la famille des thermoplastiques, elles sont issues de la polymérisation par addition, c'est-à-dire l'union de plusieurs molécules d'un composé pour former une grosse molécule. Autrement nous pouvons dire, elles possèdent la propriété de pouvoir être mises en forme plusieurs fois par chauffages et refroidissements successifs. [7] Et un de leurs grands avantages est qu'elles peuvent donc être récupérées et facilement recyclées.

Les résines thermodurcissables prennent leur forme définitive après la réaction chimique (polymérisation par condensation) accompagnant leur transformation. Comparativement aux résines thermoplastiques, les résines thermodurcissables ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. En effet, comme expliqué ci-dessus, après la polymérisation par apport de chaleur en présence d'un catalyseur, le réseau tridimensionnel ou la structure géométrique obtenu leur confère un caractère d'irréversibilité thermique. C'est ainsi qu'elles possèdent des propriétés mécaniques et surtout thermomécaniques plus élevées que celles des résines thermoplastiques. [6, 7]

A la suite de leurs propriétés mécaniques élevées, elles sont actuellement et depuis toujours les plus utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites.

Deux autres classes de résines à usages spécifiques sont également employées, ce sont :

Les résines thermoplastiques qui peuvent résister pendant un travail continu à des températures de l'ordre de 200 ° C, voire plus.

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

---

Les élastomères étant des polymères à caractère amorphe ou cristallin, elles possèdent des propriétés remarquables en élasticité, amortissement et étanchéité (air, eau). Ils sont thermoplastiques et deviennent thermodurcissables par vulcanisation. [6, 7]

### I.3.1.1. Les résines époxydes

Elles sont les plus utilisées après les résines polyesters insaturées, d'ailleurs tout au long de notre travail et dans les chapitres qui viennent, nous allons parler plus de l'époxyde pour la mise en œuvre d'un matériau composite.

Les époxydes ne représentent que 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé 5 fois plus que celui des polyesters. Nous pouvons dire, grâce à leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, dans la plupart de cas utilisées sans charges, et elles donnent les matrices de composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.). [6]

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- Masse volumique 1100 à 1500 Kg/m<sup>3</sup> ;
- Module d'élasticité en traction 3 à 5 GPa ;
- Contrainte à la rupture en traction 60 à 80 MPa ;
- Contrainte à la rupture en flexion 100 à 150 MPa ;
- Allongement à la rupture 2 à 5 % ;
- Résistance au cisaillement 30 à 50 MPa ;
- Température de fléchissement sous charge 290° C.

Les résines époxydes conduisent généralement à un ensemble de performances élevées. Toutefois, il y'a un prix à payer pour bénéficier réellement de ces performances, ce prix consiste à avoir des durées de transformations (des époxydes) et surtout de cuisson très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevée (50 à 100° C). [6]

### I.3.2. Les Charges et additifs

#### I.3.2.1. Introduction

La résine en soi possède certaines caractéristiques, cependant il arrive d'ajouter à cette résine de différents produits pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût selon les besoins à satisfaire dans une application visée.

L'addition des produits qui peuvent être incorporés à la résine a pour fonction soit d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques du produit fini, soit d'en faciliter la mise en œuvre. Nous citons dans les paragraphes suivants quelques exemples de charges et d'additifs. [6]

### I.3.2.2. Les charges

### I.3.2.3. Charges renforçantes

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine. Elles sont classifiées suivant leur forme géométrique en :

- Charges sphériques et ;
- Charges non sphériques.

A ce qui concerne les charges non sphériques, le mica est les charges renforçantes les plus utilisées. Il est incorporé sous forme d'écailles de dimensions de 100 à 500  $\mu\text{m}$ , et d'épaisseur de 1 à 20  $\mu\text{m}$ . Il est utilisé pour les applications électroniques et électriques. [6]

- Charges sphériques

L'intérêt essentiel ou l'importance de ces charges se trouve dans leur forme sphérique qui évite les concentrations de contraintes et, par conséquent, diminue la susceptibilité à la fissuration de la matrice par rapport à des charges non sphériques. Les charges sphériques se présentent sous forme de sphères, appelées généralement microbilles ou microsphères. Ces sphères pleines ou creuses ont un diamètre généralement compris entre 10 et 150  $\mu\text{m}$ . Elles peuvent être en verre, en carbone ou en matière organique (époxyde, phénolique, polystyrène, etc.). Les microbilles de verre creuses représentent plus de 99 % des charges sphériques utilisées. [6]

### Les microbilles de verre creuses

Le principal avantage des microbilles de verre creuses réside dans une masse volumique faible (100 à 400  $\text{Kg}/\text{m}^3$ ) apportant du module spécifique de la résine chargée et de sa tenue en compression. [6]

### I.3.2.4. Charges non renforçantes

Les charges non renforçantes ont pour rôle principal de diminuer le coût des résines en conservant les performances de résines, soit aussi d'améliorer certaines propriétés des résines. [6]

### Charges de faible coût

Ces charges sont extraites de roches ou de minerais, d'où leur faible coût. Généralement, l'incorporation de ces charges conduit à une augmentation [6] :

- De la masse volumique de la matrice ;
- Du module d'élasticité ;
- De la dureté, etc.
- Et à une diminution :

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

---

- Du prix ;
- De la résistance à la traction et à la flexion.

Quelques exemples de charges sont :

Les carbonates (craies ou calcites,  $\text{CaCO}_3$ ). Ce sont les charges les plus utilisées ; les silicates ; les silices.

### Charges ignifugeantes

Ces charges ajoutées aux résines ont pour rôle de réduire ou d'empêcher les phénomènes de combustion. Parmi ces charges, nous citons [6] :

- L'hydrate d'alumine, produit le plus utilisé dans les résines thermodurcissables ;
- L'oxyde d'antimoine.

### I.3.3. Les additifs [1]

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage ;
- Pigments et colorants ;
- Agents anti-retrait ;
- Agent anti-ultraviolets.

Tous ces additifs ont pour objet de faciliter le façonnage de la résine et de réduire la tendance de la résine et de réduire la tendance de la résine à adhérer aux moules, aux mandrins, etc.

### I.3.4. Les fibres

Les matériaux de renfort jouent un rôle très important au composite du point de vue mécanique. Leurs caractéristiques mécaniques confèrent aux composites : rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc. Ils permettent également d'améliorer certaines de propriétés physiques entre autres : comportement thermique tenue en température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques, etc. [6]

En fonction des utilisations, les renforts peuvent être d'origines diverses : végétale, minérale, artificielle, synthétique, etc. Dans notre travail, nous allons étudier et utiliser des renforts d'origine végétale connus mondialement sous le nom de « sisal ».

Toutefois, les renforts qui sont les plus utilisés se présentent sous forme de fibre ou formes dérivées, et constituent généralement une fraction volumique du matériau composite comprise entre 0,3 et 0,7. Les renforts fibreux se présentent sous diverses formes commerciales [6] :

- Sous forme linéique (fils, mèches) ;
- Sous forme de tissus surfaciques (tissus simples, mats) ;

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

---

- Sous forme multidirectionnelle (tresses, tissus complexes, etc.).

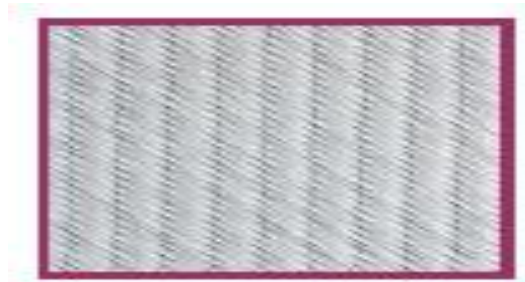
Nous allons aborder dans les lignes suivantes les principales fibres suivant leurs matériaux de mises en œuvre et aussi parler d'autres architectures développées pour la mise en œuvre des matériaux composites.

### I.3.4.1. Les principales fibres

#### I.3.4.1.a Fibres de verre

Elles 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). Il y'a plusieurs différents types de fibres de verre, nous citons :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ; (à usage général et ayant de bonnes propriétés électriques) ;
- R, S : pour les composites à hautes performances (haute résistance mécanique).



*Figure I.2 : Fibres de verre*

Leur élaboration est faite par fibrage du verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage platine-rhodium, et percés à leur base d'orifices calibrés d'environ 2 mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières, chauffées par effet Joule, aux environs de 1 250 °C. [6]

#### I.3.4.1.b Fibres de carbone

Ce sont les fibres les plus utilisées dans les applications à hautes performances, précisément dans les domaines aéronautique et spatial. Elles sont obtenues par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). [6] Selon la température de combustion, il existe principalement deux types de fibres de carbone, nous citons :

- Fibres à haute résistance (HR) autrement appelées à haute ténacité (HT) : sont obtenues par une combustion de 300 °C à 1 100 °C (lors de leur carbonisation).
- Fibres à haut module (HM) : sont obtenues par une combustion de 1800 °C à 2600 °C (lors de leur carbonisation).



*Figure I.3 : Fibres de carbone*

Comme mentionné ci-dessus, 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. Les fibres utilisées sont les fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). Ces fibres acryliques sont connues sous divers noms commerciaux : crylor, courtelle, dralon, orlon, etc. Leur procédé d'élaboration est reparti en 4 étapes : oxydation, carbonisation, graphitisation et traitement de surface. [6]

### **I.3.4.1.c      Fibres d'aramide**

Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de « Kevlar », nom commercial de la fibre mis au point par Dupont de Nemours (Etats-Unis), et commercialisé en 1972. Elles sont issues de la chimie des polyamides aromatiques de synthèse dont la structure est constituée de noyaux benzéniques reliés par des groupes CO et HN. [6]

L'élaboration des fibres aramides est effectuée par synthèse à basse température (-10 °C), puis par filage en solution, enfin elles sont étirées et traitées thermiquement pour augmenter leur module d'élasticité. [6]



*Figure I.4 : Fibres d'aramide*

Nous soulignons que les propriétés mécaniques élevées que présentent les fibres d'aramide sont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbones, cependant leurs propriétés mécaniques en compression sont faibles, tel est leur inconvénient. La faible résistance à la compression de fibres d'aramide est due à une mauvaise adhérence des fibres dans la matrice (résines).



## **Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites**

---

Pour remédier à cet inconvénient, des enzymages des fibres sont recommandés, l'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses de résistance à la compression des composites de fibres d'aramide. Nous citons des renforts hybrides de type : verre-kevlar ou carbone-kevlar utilisé largement dans le domaine de loisirs.

### **I.3.4.1.d      Fibres naturelles**

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3 000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Egypte, et dans bien d'autres pays africains, où la paille et d'Argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de ces dernières décennies, les matériaux composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Ils continuent à faire florès dans certaines applications. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges. Cela est bien détaillé dans le chapitre 2 consacré uniquement aux fibres naturelles. [8, 9]

### **I.3.4.1.e      Fibres de bore**

Elles sont classifiées parmi les fibres métalliques, comme les fibres d'acier, de cuivre, d'aluminium. Mais elles peuvent aussi être en verre ou en graphite (BorSiC). Leur élaboration est faite par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène (une âme en tungstène plus souvent). Elles présentent des caractéristiques thermomécaniques élevées, très résistants et à haut module élastique, mais insensibles à l'oxydation à hautes températures. Les filaments de bore sont destinés essentiellement à des applications aérospatiales. [6]

### **I.3.5.      L'interface**

La nature de l'adhésion fibre/matrice inclut le verrouillage mécanique, l'attraction électrostatique, l'enchevêtrement moléculaire et la réaction chimique. Le matériau composite est non-endommagé lorsque les renforts et la matrice sont parfaitement liés et ne peut y avoir ni glissement, ni séparation entre les différentes phases. L'interface est constituée de la surface de contact fibre/matrice ainsi que de la région d'un volume fini prolongée dans la matrice. Elle peut être considérée comme un constituant du composite, car elle possède des propriétés physiques, chimiques et mécaniques différentes de celles de fibre et de matrice. L'interface assure la liaison entre les fibres et la matrice et permet le transfert des contraintes de l'une à l'autre sans déplacement relatif. Mais, l'hypothèse qu'elle n'a pas d'épaisseur est souvent évoqué pour faciliter l'analyse micromécanique des composites.

### I.4. Mises en œuvre des composites

La plupart des méthodes de mise en œuvre consistent à élaborer les pièces en matériaux composites par couches successives comportant matrice et renfort. Cette technique est généralement appelée stratification qui conduit à l'élaboration des stratifiés. [6]

Le choix du procédé de mise en œuvre des matériaux composites est guidé à la fois par la nature du matériau (thermoplastique ou thermodurcissable), la forme de la pièce à réaliser, la forme de la pièce à réaliser, les performances visées et les exigences de productions en termes de qualité, quantité et cadence. Nous citons les procédés de fabrication principalement utilisés :

- Moulage sans pression ;
- Moulage sous vide ;
- Moulage par compression ;
- Moulage par injection de résine
- Moulage par centrifugation.

La liste de procédés de mise en œuvre des matériaux composites est non-exhaustive, nous avons cité ceux qui sont principalement les plus utilisés. Nous disons, la réalisation de pièces en composites destinées aux marchés de grande diffusion (automobile, électricité, bâtiment) nécessite la mise en œuvre des procédés de transformation fortement automatisés à productivité élevée. Les procédés de transformation des composites à hautes performances restent encore manuels ou peu automatisés. Ils sont compatibles avec la production en petites séries de pièces à haute valeur ajoutée (aéronautique, sports, loisirs, médical). [6]

Quant aux moulages au contact et par projection simultanée sont des procédés manuels adaptés à la production en petites séries de pièces. [6]

### I.5. Architectures et types de composites

L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

- Par surface : plaques, coques ;
- Par stratification de couches successives.

Les matériaux composites étant des matériaux obtenus par association de deux composants de nature différente, mais qui doivent donner la possibilité d'être associés entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, de l'interface que nous avons expliqués ci-dessus. Les différents types de composites et leurs architectures sont :

### I.5.1. Architectures de renforts

Il existe différentes géométries et textures de renforts, nous citons :

#### I.5.1.1. Les unidirectionnels (UD)

Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes par rapport aux autres à l'aide d'une trame très légère. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise. [6]

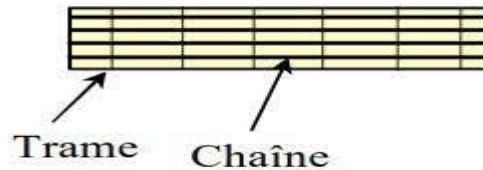


Figure I.5 : Nappe unidirectionnelle

#### I.5.1.2. Les bidirectionnels

La forme surfacique, dite aussi structure bidirectionnelle (2D), est la structure typique pour des pièces en formes de plaques ou des coques. Il s'agit d'un assemblage de fibres sous forme de mèches, orientées suivant deux directions généralement perpendiculaires, soit par couches successives, soit par tissage. [6]

- Toile ou taffetas : chaque fil de chaîne passe dessus, puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques. [6]

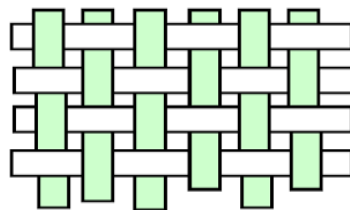


Figure I.6 : Toile

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- Serge : chaque fil de chaîne au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne. Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils. [6]

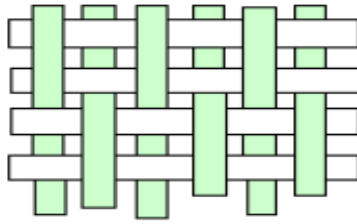


Figure I.7 : Serge

- Satin : chaque fil de chaîne au-dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme des pièces à surfaces complexes. Ce type de tissu présente une forte masse spécifique. [6]

### I.5.2. Types de composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches ;
- Les stratifiées ;
- Les sandwiches.

#### I.5.2.1. Les monocouches

Les monocouches sont les éléments de base des structures composites. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère. Ils sont caractérisés par le type de renfort utilisé : des fibres longues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus, de rubans.

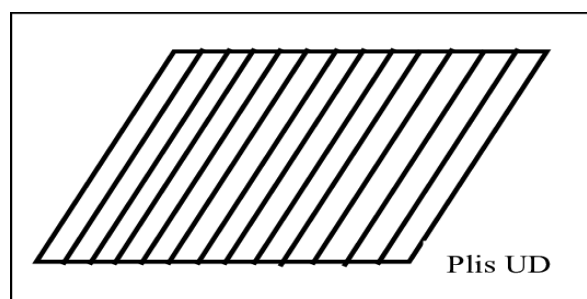


Figure I.8 : Plis UD

### I.5.2.2. Les stratifiés

On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux, et une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. 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. [6]

Si l'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 [6]

Donc les stratifiés peuvent être soit unidirectionnels, soit bidirectionnels. Mais il existe d'autres stratifiés, en l'occurrence, nous citons :

Les stratifiés hybrides, ils sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes, par exemple le matériau composite carbone-kevlar. Il est important de préciser les différentes natures de fibres qui les constituent dans leur désignation.

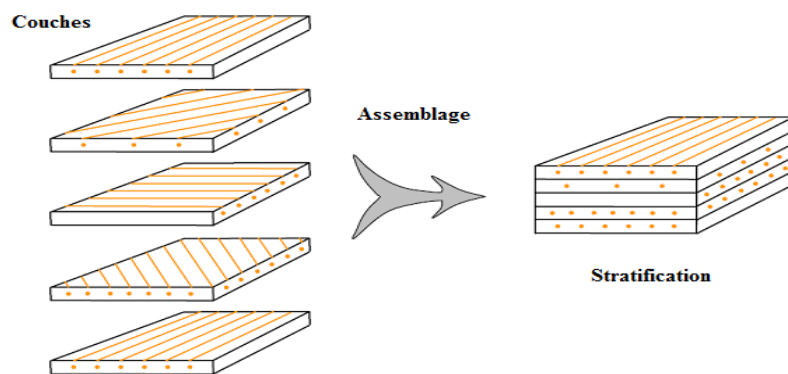


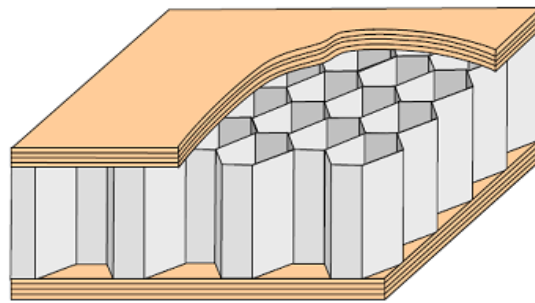
Figure I.9 : Stratifiés

### I.5.2.3. Sandwichs

Les structures composites subissant des sollicitations de type flexion ou torsion sont généralement construites en sandwichs. Une structure sandwich est composée d'une âme et des peaux. L'âme peut être soit pleine et est fabriquée couramment en balsa ou bois cellulaire, en diverses mousses cellulaires, etc. soit creuse, essentiellement nid d'abeilles, profilés et est fabriquée en alliages métalliques légers, en papier kraft, en papier polyamide, etc.

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

L'assemblage est réalisé par collage à l'aide d'une résine compatible avec les matériaux en présence. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée ou mousse. Quant aux peaux, elles sont généralement constituées de structures stratifiées. [6]



Âme en nid d'abeilles

Figure I.10 : Sandwichs

### I.6. Avantages et inconvénients des matériaux composites

Il est d'une grande importance de connaître les avantages et les inconvénients des matériaux composites, afin de les évaluer et les comparer avec les matériaux dits standards. Les paragraphes suivants vont étaler les raisons pour lesquelles de nos jours, beaucoup de secteurs dont la nouvelle technologie est utilisée pour leurs diverses applications ont porté leur choix du matériau sur les matériaux composites. Voici les avantages et les inconvénients que présentent respectivement les matériaux composites :

- Gaine de masse : économie de carburant, ou accroissement de charge utile, ou rayon d'action accru : ce sont de meilleures performances ;
- Bonne tenue en fatigue : durée de vie augmentée, il y'a économie sur l'amortissement ;
- Absence de corrosion : allègement de l'inspection lors des visites : il y'a économie sur le coût de maintenance. [10]

Les inconvénients les plus courants sont :

- Les matériaux composites ne se plastifient pas : leur limite élastique correspond à la limite de rupture (ne préviennent pas avant la rupture) ;
- Process généralement complexes ;
- Détection de défaillances difficile ;
- Ils vieillissent sous l'action de l'humidité et de la chaleur ;
- Les matériaux composites ont une tenue aux impacts et aux chocs très moyenne (inférieure à celle des matériaux métalliques). [10]

### I.7. Les secteurs d'application des composites

- Transport aérien : avions de tourisme « tout composite », planeurs « tout composite », disque de frein d'avion, arbres de transmission, pales d'hélicoptères, hélices ;
- Transport spatial : corps de propulseurs, réservoirs, tuyères ;

## Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

---

- Transport routier : pièces de carrosseries, carrosseries complètes, poutres de châssis, bras de suspension, carters, citernes routières, arbres de transmission ;

### Conclusion

Pour conclure ce chapitre, nous disons, qu'il est important de réunir quelques informations intéressantes sur l'ensemble de la science de matériaux composites, car tel est notre point de départ. C'est en partant de ce point que nous allons poser de bonnes bases de développement de notre thème. L'importance est de bien appréhender le cadre du travail, comprendre les aspects techniques, commerciaux liés à l'élaboration de composites pour bien étudier et expliquer l'objet de notre travail. Car les matériaux composites sont des matériaux de grands enjeux pour une grande expansion de la nouvelle technologie de pointe.

### Chapitre II : Généralités sur les fibres naturelles

#### Introduction

Comme nous l'avons expliqué en long et en large dans le chapitre précédent, le matériau composite pour réitérer ce que nous avons dit, à titre de rappel, est une association d'au moins deux matériaux non miscibles de nature différente.

Les premiers matériaux composites créés par l'homme furent sans doute à base de bois. Un des tous premiers composites est l'arc traditionnel mongol qui date d'environ 2000 ans av. J-C. [11]. Après plusieurs siècles passés de la création de ce tout premier objet fait à base d'un matériau composite, en 1823, Charles Macintosh créa à son tour l'imperméable en imprégnant du caoutchouc sur du tissu [12]. Par la suite, en 1892, Hennebique déposa un brevet sur un matériau très semblable au béton armé d'aujourd'hui [13]. Comme mentionné dans le chapitre 1, il est important de connaître la nature des constituants d'un matériau composite, car c'est sur base de ce critère que nous pouvons connaître à priori les propriétés de celui-ci qui découlent les avantages et les inconvénients tout au long de son usage. La question que nous nous posons est de savoir : en quoi cela est-il important d'utiliser plus les fibres naturelles comparativement aux fibres artificielles, et pourquoi cela est-il intéressant ? L'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport aux composites conventionnels puisque ce sont des matières renouvelables, biodégradables, neutre vis-à-vis des émissions du dioxyde de carbone CO<sub>2</sub> et demandant peu d'énergie pour être produites [14]

Nous tenons à spécifier que ce terme « fibres naturelles » regroupe plusieurs types de fibres naturelles d'origine différente, que nous citons : les fibres d'origine végétale (cellulose), les fibres animales (protéine) ou minérale. [14]



### II.1. Les fibres naturelles

Comme mentionné dans la page précédente, les fibres naturelles sont classées suivant leur origine. Il est donc possible de citer les différentes fibres qui font parties de grandes familles de fibres naturelles. Nous distinguons :

- Les fibres végétales : elles se subdivisent elles-mêmes selon leur provenance. Nous pouvons donc citer les fibres libériennes qui sont extraites de tiges de plantes (chanvre, lin, ramie, jute), les fibres dures qui sont extraites de feuilles, de tronc ou d'écorces de fruits (sisal, chanvre de manille, noix de coco), et les fibres qui proviennent des poils séminaux de graines (coton, kapok) ; [14]
- Les fibres animales : elles peuvent émaner des poils (toison animale) ou encore des sécrétions (soie) ;
- Les fibres minérales (amiante).

La figure illustre la classification des fibres naturelles

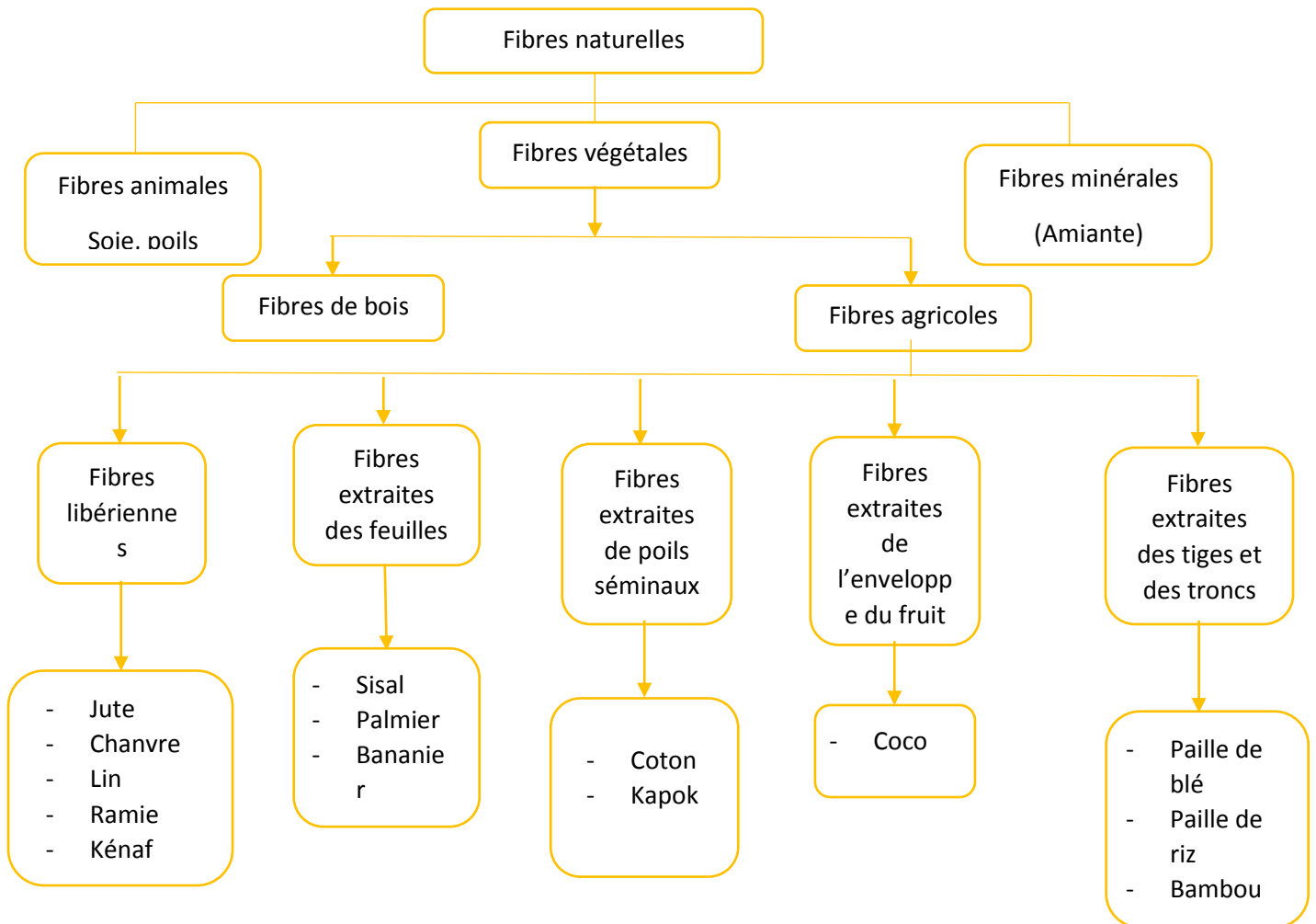


Figure II.1 : Schéma détaillé de fibres naturelles

## Chapitre II : Généralités sur les fibres naturelles

Les fibres naturelles les plus intéressantes à utiliser sont celles qui possèdent déjà à la base une propriété de renfort ou de support. Et un autre point important à soulever est que les propriétés mécaniques de fibres naturelles, varient selon chacune de leurs catégories d'origine. Les fibres d'origine animale les plus intéressantes sont sans doute les soies [15]. De par leur structure complexe, les soies possèdent d'excellentes propriétés de résistance à l'allongement que peu de fibres artificielles peuvent se vanter d'approcher.

### II.2. Comparaison des fibres naturelles et artificielles

Malgré leur différence en termes de propriétés mécaniques, les fibres naturelles sont intéressantes comme renfort dans un matériau composite. Il est certain que les fibres naturelles n'ont pas les mêmes propriétés mécaniques que les fibres artificielles. Bien que les fibres artificielles soient les plus utilisées comme renforts, surtout pour la mise en œuvre des matériaux composites à haute performance à la suite de leurs propriétés mécaniques élevées, les fibres naturelles présentent aussi certains avantages qui peuvent leur permettre de rivaliser avec les fibres artificielles. Les tableaux ci-dessous étalent quelques caractéristiques de ces fibres qui peuvent nous aider à bien les comparer pour savoir les avantages et les inconvénients.

Le tableau de caractéristiques des fibres synthétiques ou artificielles voir le chapitre 1, page 12.

Tableau II.1 : Caractéristiques de fibres naturelles [16]

Fibre	Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	Diamètre (μm)	Module de traction (MPa)	Module de Young (GPa)	Elongation à la rupture (%)
Jute	1,3 – 1,45	20 - 200	393 - 773	13 – 26,5	7,1 – 8
Lin	1,5 - 3	-	45 - 1100	27,6	2,7 – 3,2
Chanvre	-	-	690	-	1,6
Ramie	1,5	-	400 - 938	61,4 - 128	1,2 – 3,8
Sisal	1,45	50 - 200	468 - 640	9,4 - 22	3,1 – 7
Palme	-	20 - 80	413 - 1627	34,5 – 82,51	1,6
Coton	1,5 – 1,6	-	287 - 800	5,5 – 12,6	7,1 – 8
Coir	1,15	100 – 450	131 - 175	4,1 - 6	15 - 40

## Chapitre II : Généralités sur les fibres naturelles

Tableau II.2 : Propriétés des fibres naturelles [16]

Propriété	Fibres							
	Fibre de verre	Chanvre	Jute	Ramie	Coir	Sisal	Lin	Coton
Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> )	2,55	1,48	1,46	1,5	1,25	1,33	1,44	1,51
Module de traction (MPa)	2400	550 - 900	400 - 800	500	220	600 - 700	800 - 1500	400
Module d'élongation (GPa)	73	70	10 - 30	44	6	38	60 - 80	12
Elongation à la rupture (%)	3	1,6	1,8	2	15 - 25	2 - 3	1,2 - 1,6	3 - 10
Absorption d'humidité	-	8	12	12 - 17	10	11	7	8 - 25

Tableau II.3 : Comparaison entre les fibres naturelles & artificielles [16]

	Fibres naturelles	Fibres de verre
Masse volumique	Faible	Le double des fibres naturelles
Coût	Faible	Faible, mais plus élevé que les fibres naturelles
Renouvelabilité	Oui	Non
Recyclabilité	Oui	Non
Dépense d'énergie	Faible	Elevé
Distribution	Large	Large
Carbone – neutre	Oui	Non
Abrasion des machines	Non	Oui
Risque à la santé	Non	Oui
Biodégradable	Oui	Non

Pour résumer les informations mises à notre portée dans les tableaux ci-dessous, les fibres naturelles sont moins nuisibles à l'environnement que les fibres artificielles. Les fibres naturelles causent moins d'impacts environnementaux grâce à leur composition et leur obtention, puisqu'elles sont des produits 100 % naturels, d'ailleurs c'est ce qui leur permet d'être facilement renouvelable et recyclable. Tel est leur plus grand avantage en opposition avec d'autres fibres. Par contre, du point de vue mécanique, les fibres artificielles sont beaucoup plus intéressantes, car leurs propriétés en flexion, en traction et en compression ont toujours été pratiquement supérieures aux fibres naturelles. Cependant, il existe certains domaines pour réaliser quelques applications, par exemple « emballage », le but est d'avoir un matériau assez résistant, mais pas nécessairement meilleur ou ayant de performances élevées. Juste avoir des propriétés mécaniques suffisantes tout en réduisant les coûts. C'est dans ce genre de domaine que les fibres naturelles peuvent être beaucoup plus intéressantes que les fibres artificielles, puisqu'elles sont moins dispendieuses. Les fibres naturelles ont habituellement un bilan net de CO<sub>2</sub> moins important que les fibres artificielles [17]. Elles

## Chapitre II : Généralités sur les fibres naturelles

consomment moins d'énergie, sont biodégradables et endommagent habituellement moins les appareils de mise en forme que les fibres de verre ou de carbone [18]. Un dernier point de comparaison est la densité des fibres naturelles habituellement plus faible que celle des fibres artificielles. Ce facteur pourrait être un élément clé dans le domaine du transport, où la réduction de poids signifie une réduction de coût énergétique, donc une économie d'argent.

### II.3. Différence dans les types de fibres naturelles

Un point intéressant de fibres naturelles parmi tant d'autres est leur grande variété [16]. La figure met à notre disposition les propriétés mécaniques de matériaux composites à base de polypropylène renforcés avec des fibres naturelles quid les unes d'entre elles sont l'objet principal de notre travail. Il est donc important et conseillé de choisir un bon type de fibres pour une application visée, afin d'avoir le meilleur matériau et de diminuer le coût de la production, de la consommation d'énergie, etc. En effet, le chanvre est l'un de type de fibres naturelles possédant les meilleures caractéristiques mécaniques, que ça soit en traction, en flexion et en module d'élongation. Et le chanvre se défend aussi plutôt bien aux impacts causés par les agressions extérieures.

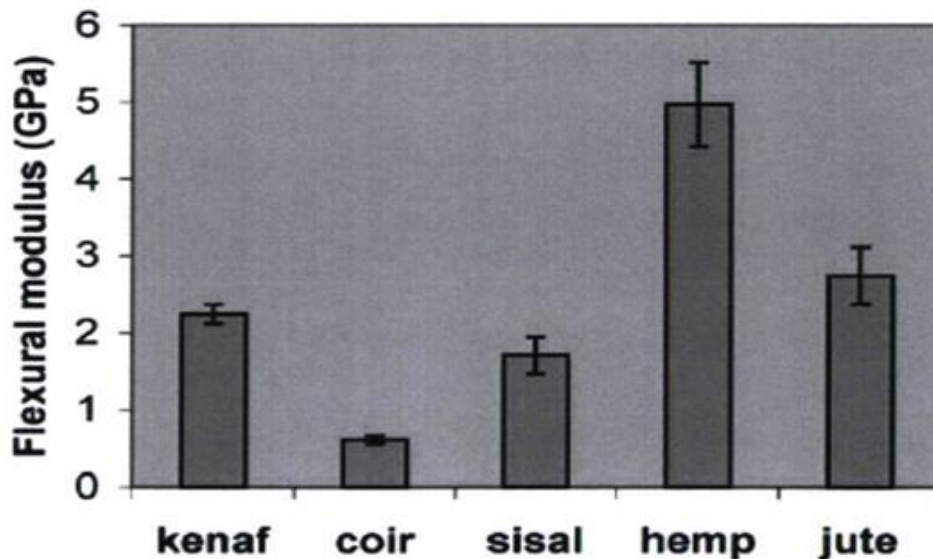


Figure II.2 : Comparaison de fibres naturelles en fonction de module de Young [16]

### II.4. Quelques fibres naturelles et leurs usages

Nous allons aborder dans ce paragraphe, quelques fibres naturelles qui sont les plus utilisées dans la science des matériaux pour les applications qui concernent notre domaine mécanique. Nous citons :

- Lin : une fibre végétale connue pour sa solidité. Il a été l'un des premiers à être récolté, filé et tissé pour la fabrication de textiles. La fibre de lin est également utilisée pour fabriquer de billets de banque et du papier à cigarette, de composants automobiles et elle est combinée avec du polypropylène et d'autres fibres synthétiques des géotextiles isolants et antiérosifs.
- Le Kéna (ou Hibiscus hemb) : il provient d'une plante, appelée aussi dah, cultivée aux Indes, en Afrique et dans l'île. Leurs fibres ont des qualités comparables à celles du jute.
- Le jute : il provient de la tige de la plante du même nom cultivée en zone tropicale, du genre Corchorus appartenant à la famille des Tiliacées. Il peut être utilisé pour des revêtements de sol.
- Le chanvre : une fibre vendue dans le monde entier pour fabriquer des vêtements, des cordes et du papier. Cette fibre extrêmement résistante est de plus en plus utilisée pour fabriquer des matériaux de construction et des bioplastiques pour l'industrie automobile.

La liste de cultures de plantes de fibres naturelles est non exhaustive. Nous n'avons pas établi une litanie complète de celles-ci dans l'optique de nous parler de l'essentiel et d'entrer vite dans les vifs de notre sujet sur le composite époxy/sisal dans les lignes suivantes.

### II.5. Les avantages et les impacts environnementaux des fibres naturelles comparées aux fibres artificielles

Les avantages indéniables des fibres naturelles sont leurs aspects économiques environnementaux [17], puisqu'elles sont réputées d'avoir une masse volumique petite et d'être facilement renouvelables et recyclables. Les fibres naturelles ont aussi l'avantage de pouvoir se dégrader naturellement, ainsi elles limitent l'impact environnemental du matériau composite sur la planète. Pour compléter nos argumentaires sur les avantages indéniables que présentent les fibres naturelles, les tableaux étalent les valeurs expérimentales et vérifiées des paramètres des matériaux composites ayant de l'influence sur l'environnement.

## Chapitre II : Généralités sur les fibres naturelles

Tableau II.4 : Comparaison sur les impacts environnementaux [17]

Impacts environnementaux	Matériaux composites	
	Copolymère ABS	Composite Chanvre-Epoxy
Energie totale (MJ)	132	73
Emission de CO <sub>2</sub> (Kg)	4,97	4,19
Méthane (g)	17,43	16,96
SO <sub>2</sub> (g)	17,54	10,7
NO <sub>x</sub> (g)	14,14	18,64
CO (g)	4,44	2,14
Emission de phosphate à l'eau (g)	0	0,09
Emission de nitrate à l'eau (g)	0,08	12,05

Tableau II.5 : Comparaison sur les impacts environnementaux [17]

Impacts environnementaux	Granule de fibre de verre	Granule de « reed » de chine
Utilisation d'énergie non-renouvelable (MJ)	1400	717
Emission de CO <sub>2</sub> (Kg)	73,1	42
Emission de CO (g)	74,3	54,6
Emission de NO <sub>x</sub> (g)	513	349
Emission de SO <sub>x</sub> (g)	289	163
DOB à l'eau (mg)	414	266
Emission de nitrure à l'eau (g)	1,72	153
Emission de phosphates à l'eau (g)	0,59	1,67
CML – toxicité humaine (Kg 1,4 dichlo <sub>eq</sub> )	21,2	9,04
CML – écotoxicité (kg 1,4 dichlo <sub>eq</sub> )	5250	4480
CML – effet de serre (kg CO <sub>2eq</sub> )	75,3	40,4
Indicateur Eco 95 – effet cancérigène	7,11	4,48
Indicateur Eco 95 – acidification	0,65	0,41

## Chapitre II : Généralités sur les fibres naturelles

Tableau II.6 : Comparaison sur les impacts environnementaux [17]

Impacts Environnementaux	Fibre de verre	Fibre de « reed »	Résine Epoxy	ABS	PP
Utilisation d'énergie (MJ/kg)	48,33	3,64	140,71	95,02	77,19
Emission CO <sub>2</sub> (kg/kg)	2,04	0,66	5,9	3,1	1,85
Emission CO (g/kg)	0,8	0,44	2,2	3,8	0,72
Emission SO <sub>x</sub> (g/kg)	8,79	1,23	19	10	12,94
Emission de NO <sub>x</sub> (g/kg)	2,93	1,07	35	11	9,57
Emission particulaire (g/kg)	1,04	0,24	15	2,9	1,48
DOB à l'eau (mg/kg)	1,75	0,36	1200	33	33,94
DOC à l'eau (mg/kg)	18,81	2,27	51000	2200	178,92
Nitrates à l'eau (mg/kg)	14	24481	1	71	18,78
Phosphates à l'eau (mg/kg)	43,06	233,6	220	120	3,39

Tableau II.7 : Comparaison de réduction de poids [17]

Pièce	Matériaux	Masse (g)	Composite à base de fibre naturelle	Masse du composite (g)	Réduction de poids (%)
Panneau latéral d'automobile	ABS	1125	Chanvre – Epoxy	820	27
Panneau isolant d'automobile	Fibre de verre – PP	3500	Chanvre – PP	2600	26
Panneau de transport	Fibre de verre – PP	15000	« reed » de Chine – PP	11770	22

### II.6. Développement du marché de fibres naturelles

Un de premiers buts de remplacer les fibres artificielles par les fibres naturelles ou encore d'équilibrer leur rivalité dans le marché n'est pas forcément d'avoir des propriétés mécaniques supérieures, mais d'avoir des propriétés mécaniques suffisantes qui peuvent répondre aux bonnes attentes techniques, commerciales et environnementales dans certaines applications. Voici quelques avantages à utiliser de fibres naturelles dans le domaine de transport [16, 19] :

- La plus faible densité des fibres conduit à une réduction du poids ;
- Des mécaniques plus ou moins similaires aux fibres artificielles ;
- Une meilleure isolation sonore ;
- Impact environnemental plus faible.

Tableau II.8 : Evolution de l'utilisation de fibres naturelles dans le secteur d'automobile [20]

Fibre	1996	1999	2000	2001	2002	2003
Lin (tonne)	2000	7000	9000	8500	9000	9400
Chanvre (tonne)	0	300	1200	1600	2200	2300
Fibres exotiques (jute, sisal...)	2000	2300	2000	5000	6000	6300
Total (tonne)	4000	9600	12200	15100	17200	18000

Tableau II.9 : Production et composition de fibres naturelles [21]

Fibre	Production mondiale ( $10^3$ T)	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Pectine
Coton	18450	92	6	-	< 1
Jute	2850	72	13	13	-
Lin	830	81	14	3	4
Sisal	378	73	13	11	2
Chanvre	214	74	18	4	1
Coir	650	43	< 1	45	4
Ramie	170	76	15	1	2
Paille	-	40	28	17	8
Kapok	123	13	-	-	-



### II.7. Les intérêts du sujet : Sisal/époxyde

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.). Les caractéristiques mécaniques qui approuvent que ces résines soient catégorisées parmi les matrices à hautes performances sont mentionnées dans le premier chapitre.

A ce qui concerne notre mémoire, il ne s'agit pas de composite époxy/chanvre, dont les plusieurs études expérimentales ont déjà été faites et approuvées par les ingénieurs, encore moins de composite époxy/carbone, qui d'ailleurs depuis qu'il a vu le jour, fait et continue à faire florès de composites à haute performance dans le secteur d'aéronautique. Il s'agit bien ici de l'époxy qui représente une partie du matériau composite que nous appelons communément « matrice » et du sisal, une autre partie de ce matériau qui se nomme communément « renfort ». C'est en espérant qu'un jour, on pourra employer ce composite époxy/sisal dans diverses applications industrielles, que nous osons à bien mener nos recherches pour nous permettre d'établir une norme de fabrication et d'utilisation de celui-ci, disons, des consignes à suivre et à respecter pendant sa fabrication et lors de son usage.

#### II.7.1. Description du sisal et cycle de vie [22]

Le sisal (*Agave sisalana*) est une espèce de plantes appartenant à la famille des Asparagaceae, et dont les fibres dérivées de feuilles sont considérées comme l'une des fibres végétales les plus importantes sur le plan commercial. Le sisal est une plante courte avec une hauteur d'environ 0,9 mètre et un diamètre de tige d'environ 38 centimètres. Les feuilles grises à vert foncé d'une longueur d'un mètre, charnues, en forme de lance, s'épanouissent sous forme de rosettes à partir de la tige principale. La plante commence à fleurir au cours 4 à 8 ans, et des fleurs jaunes à odeur désagréables poussent sur ses branches, provenant d'une longue tige centrale en forme de fleur. Les bourgeons de la plante se développent rapidement en bulbilles.

L'usine de sisal est originaire du Mexique et d'autres régions d'Amérique centrale. Les preuves impliquent que la plante a été utilisée par les civilisations aztèque et maya pour fabriquer des tissus bruts. Dans le monde, la culture de cette plante est devenue très populaire au XII<sup>e</sup> siècle, et au début du XII<sup>e</sup> siècle, la culture du sisal était devenue une pratique courante dans plusieurs pays d'Afrique, d'Amérique, d'Asie, etc.

### II.7.2. Culture et production [22]

Le sisal se multiplie à partir de bulbilles ou de rhizomes, et les jeunes plants sont d'abord cultivés dans des pépinières. Après cette période, ils sont plantés dans les grandes cultures, généralement vers le début de la saison des pluies. Les usines arrivent à maturité au cours des 3 à 5 années et restent durables et productives pour les prochaines 7 à 8 années.

La fibre est extraite des feuilles de sisal par un processus de décortication.

La fibre extraite est ensuite séchée, soit au soleil, soit séchée par des moyens artificiels. Ces fibres sont ensuite brossées et mises en balles et envoyées pour être traitées et exportées. La production de fibres de sisal représente 2 % de la production mondiale de fibres végétales.

Le sisal est cultivé pour sa fibre dans plusieurs pays : Afrique du Sud, Angola, Brésil, Chine, Cuba, Haïti, Indonésie, Kenya, Tanzanie, Mozambique, Madagascar, Mexique 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'un 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 Etats-Unis. Le Kenya exporte environ 20 000 tonnes et la Tanzanie 15 000 tonnes. La Chine est un producteur et un consommateur important. [23]

### II.7.3. Fibres

Fibre épaisse et solide, le sisal est de plus en plus souvent utilisé dans les matériaux composites pour l'industrie automobile, l'ameublement et la construction. On le retrouve également dans les plastiques et dans les produits de papier. [23]



*Figure II.3 : Fibres de sisal*

## Chapitre II : Généralités sur les fibres naturelles

---

Même si le degré d'humidité des feuilles de sisal est de quelque 90 pourcents, 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. [23]

Malgré son intolérance à l'eau, les fibres de sisal présentent une bonne résistance comme bien d'autres fibres naturelles et sont relativement robustes.

### II.7.4. Les usages du sisal [23]

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). [23]

Pour le 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. [23]

Composites à base de plastique et de caoutchouc, du fait de sa faible densité et de ses bonnes propriétés de soudage, le sisal recèle un intéressant potentiel pour le renforcement des composites polymères (thermoplastiques, thermodurcissables et caoutchoucs). L'utilisation des composites contenant du sisal gagne en popularité dans les composants d'automobiles et le mobilier. La fibre demeure par ailleurs le matériau de prédilection pour les cibles à fléchettes.

### Conclusion

En bref, les généralités sur les fibres naturelles ont été abordées dans l'optique d'avoir l'idée générale sur les différents types de fibres naturelles, afin d'établir également une étude comparative entre ces fibres et les fibres artificielles. Le penchant aux fibres naturelles est justifié à la suite de ce que celles-ci présentent comme avantage lorsqu'elles sont mises en œuvre avec d'autres constituants pour obtenir un matériau composite. Comme nous avons fait mention dans le paragraphe précédent : « tout se résume du fait que les fibres naturelles causent moins de dégâts dans l'environnement lors de leur usage.

### Chapitre III : Modèle de rupture longitudinale avec les résultats

#### Introduction

Le processus de rupture des composites renforcés de fibres longues naturelles est un phénomène complexe d'accumulation de dommages microstructuraux. A la différence des matériaux fragiles homogènes, les unidirectionnels ne contiennent pas une population de défauts pré existante pouvant conduire à une rupture brutale du matériau. Une accumulation de rupture de fibres naturelles et de matrice se développe quand le composite est chargé. Cela constitue des défauts critiques. La mécanique de la rupture serait apte à répondre aux préoccupations de la rupture d'une fibre unique. Cependant, étendre une telle approche aux unidirectionnels, ou le comportement du matériau est guidé par la probabilité de propagation des défauts dans les fibres due aux concentrations de contraintes des composites unidirectionnels doit être pris en considération. Lors d'un chargement mécanique ou thermique d'un matériau composite, des microfissures apparaissent dans la matrice, des fibres se rompent (rupture fragile ou ductile), des décohésions se créent aux interfaces, des plastifications apparaissent sans entrainer la ruine du matériau. Les processus de rupture des composites sont donc d'une grande différence et ne peuvent être décrits que si l'on connaît :

- Le critère de résistance de chaque matériau ;
- L'état des contraintes et des déformations dans le matériau ;
- Les phénomènes de propagation de fissure dans la microstructure ;
- La nature de l'interface entre la matrice et le renfort.
- Le chargement appliqué, ainsi que la fraction volumique du composite.

Les critères de rupture ont pour objectifs de permettre au concepteur d'avoir une évaluation de la résistance mécanique des matériaux composites. Le critère est une expression mathématique reliant les contraintes effectives régnant dans le matériau aux contraintes ultimes pouvant être supportées par ce dernier. Le procédé se résume à l'utilisation des divers critères existant dans la littérature, qui dépendent tous d'un certain nombre de paramètres qui sont précisément des résistances ultimes pour des sollicitations élémentaires

#### III.1. Modèle de rupture longitudinale avec effet hygrothermique

Le comportement hygrothermique des composites est largement déterminé par les propriétés de la matrice aux interfaces, par contre les fibres naturelles sont relativement sensibles à l'élévation d'humidité et de la température. L'effet d'humidité génère des contraintes résiduelles, la plasticité des polymères ainsi que la dégradation aux interfaces [24-25]. Pour introduire l'effet de la concentration d'humidité et la température sur les propriétés mécaniques, Tsai [26] a proposé la température non-dimensionnelle  $T^*$ , qui est le principal paramètre pour évaluer les caractéristiques hygrothermiques du composite.

$$T^* = \frac{T_g - T_{opr}}{T_g - T_{rm}} \quad (1)$$

Si  $T_g$  est la température de transition vitreuse de la matrice,  $T_{opr}$  est la température de fonctionnement et  $T_{rm}$  est la température ambiante de référence, il est également supposé que l'humidité supprime la température de transition vitreuse dans un milieu sec  $T_g^0$  par un changement de température relative pour unité d'humidité absorbée « g »,

$$T_g = T_g^0 - g C \quad (2)$$

Nous pouvons utiliser la température non dimensionnelle  $T^*$  de manière empirique pour exprimer la rigidité de la matrice et de la fibre ( $E_m$ ,  $E_f$ ) de la forme :

$$E_m = E_m^0 (T^*)^a \quad (3)$$

$$\frac{E_f}{E_f^0} = \frac{G_f}{G_f^0} = (T^*)^f \quad (4)$$

L'indice « 0 » indique les valeurs initiales des rigidités de la matrice et des fibres a et f représentent les paramètres des caractéristiques hygrothermiques

Le modèle utilisé dans cette étude pour l'estimation de la résistance d'un composite unidirectionnel est celui de Gao et de Reifsnider [4]. Ce modèle permet d'introduire la variation des caractéristiques mécaniques de la matrice et des fibres en fonction de la température et de l'humidité en vue de prédire la résistance d'un composite unidirectionnel. Cette résistance varie le plus souvent en fonction, du changement des longueurs inefficaces dans la zone de la rupture de la fibre et des concentrations de contraintes correspondantes des fibres voisines intactes. 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 laquelle la fibre regagne sa capacité de supporter le chargement complet. La fissure à l'interface aura lieu lorsque la contrainte de cisaillement à l'interface atteint  $\tau_0$ . Cette supposition est soutenue en littérature citez ressèment en laquelle on l'a constaté que pour la température  $T_g$  élevée de la résine, la résistance de cisaillement à l'interface dans les composites est au voisinage de la résistance au cisaillement de la matrice en bloc [27].

Le modèle de Gao et de Reifsnider 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 et une plasticité. Dans cette région, la contrainte de cisaillement de la matrice et de l'interface est considérée comme constante avec une valeur  $\eta\tau_0$ . Où  $\eta$  est un

### Chapitre III : Modèle de rupture longitudinale avec les résultats

paramètre de cisaillement définissant la contrainte de cisaillement dans la région inélastique. Lorsque  $\eta$  égale à zéro, aucun transfert de cisaillement n'a eu lieu entre les fibres naturelles cassées et leurs voisins dans cette région. Ce serait donc le cas dans une région, complètement détachée ou d'une matrice fissurée. Contrairement lorsque  $\eta = 1$ , la contrainte de cisaillement dans la région inélastique est égale à  $\tau_0$ . Pour l'application de ce modèle dans cette étude, on prend  $\eta = 1$ . 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 :

$$E = \frac{i A_f E_f C c + \left[ i A_m - \pi (r_0^2 - (r_0 - d)^2) \right] E_m}{\pi (r_0 - d)^2} \quad (5)$$

Où  $A$  correspond à la surface, et  $E$  correspond au module de Young équivalent. Les propriétés substituées avec  $f$  se rapportent à des propriétés de la fibre tandis que celles qui sont substituées avec  $m$  se rapportent à des propriétés de matrice et  $c_c$  représente l'indice d'humidité absorbée. 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, où la contrainte de cisaillement de la matrice et de l'interface sont considérées comme constante pour la valeur  $\eta \tau_0$ .

Les équations d'équilibre dans cette zone ( $0 \leq x \leq a$ ) sont comme suite [28] :

$$i A_f E_f \beta C c \frac{d^2 U_0}{dx^2} - 2 \pi r_0 \eta \tau_0 = 0 \quad (6)$$

$$i A_f E_f C c \frac{d^2 U_1}{dx^2} + 2 \pi (r_0 + 2d + 2r_f) \frac{G_m}{2d} (U_2 - U_1) + 2 \pi r_0 \eta \tau_0 = 0 \quad (7)$$

$\beta$  est donnée en fonction des modules de la géométrie, de la fibre et de la matrice. Cependant la distance  $a$ , elle représente la demi longueur de la zone de décollement localement plastifiée.

$U_0$ ,  $U_1$  et  $U_2$  représente les contraintes de déplacements dans les trois régions (figure 3.1).

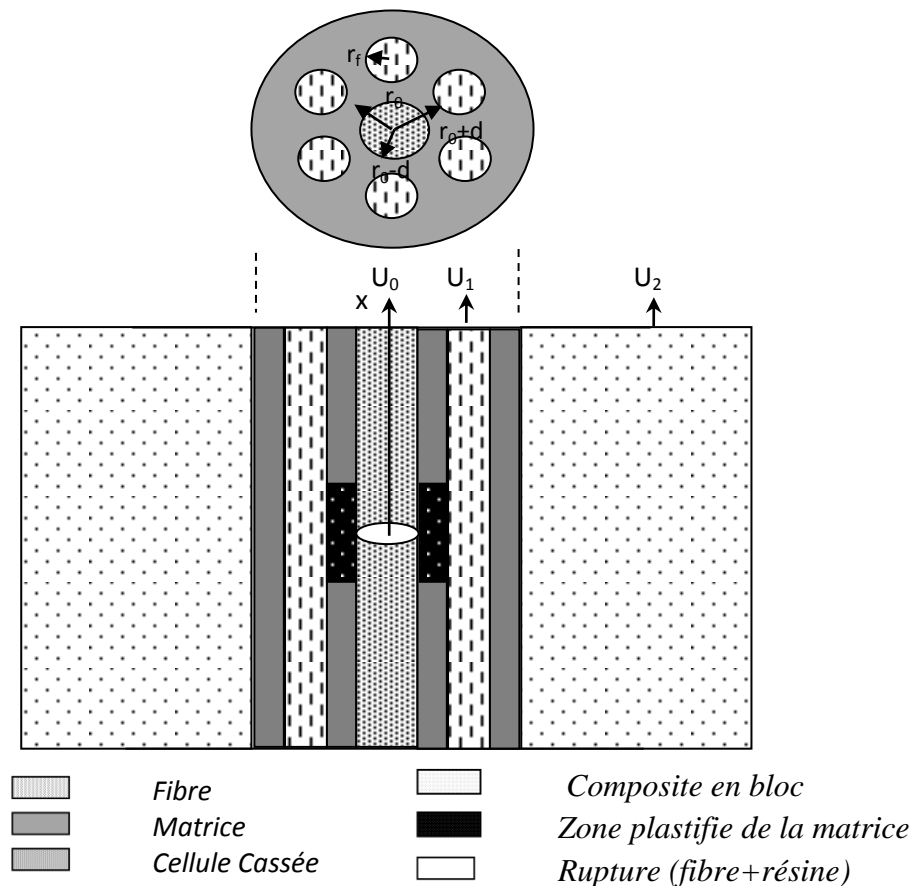


Figure III.1 : Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes.

Le module de cisaillement de la matrice est donné par :

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (8)$$

La solution de ces deux équations (6) et (7) avec les conditions aux limites est :

Pour  $x=0$ , la contrainte  $\sigma$  dans le noyau cassé, égale 0, donc  $\frac{dU_0}{dx} = 0$  tandis que, pour  $x=0$ , le déplacement  $U_1 = 0$  (par symétrie).

Et considérons que les fibres voisines du noyau cassé ne sont pas affectées par le noyau cassé, (c'est-à-dire que  $U_2 = \frac{\sigma_c}{E_c} x$ , où  $c$ 'est l'indice du composite en bloc), on peut obtenir des solutions pour  $U_0$  et  $U_1$ . Après introduction des conditions nécessaires, les deux équations (6) et (7) s'écrivent comme suite :

$$U_0(x) = \frac{\eta \tau_0}{r_0 E_1} x^2 + C_0 \quad (9)$$



$$U_1(x) = C_1 \left( e^{\lambda_1 x} - e^{-\lambda_1 x} \right) + \frac{2r_0 \eta \tau_0}{(R_2^2 - r_0^2) E} \frac{1}{\lambda_1^2} \left( 1 - e^{-\lambda_1 x} \right) + \frac{\sigma_c}{E_c} x \quad (10)$$

Où  $C_0$  et  $C_1$  sont les constantes d'intégration, et,  $R_2$  est une quantité géométrique donnée par :

$$R_2 = r_0 + 2 r_f + d \quad \text{Et} \quad \lambda = \lambda_1 = \sqrt{\frac{1}{R_2^2 - r_0^2} \frac{G_m}{E} \frac{1}{2d}}$$

$E_1$  est le module des fibres adjacentes intactes donnée par :

$$E_1 = \frac{E_f A_f + E_m A_m}{A_f + A_m} \quad (11)$$

De même, pour la région  $a \leq x \leq \infty$  où aucun écoulement n'aura lieu à l'interface, les équations d'équilibre sont [28] :

$$E\pi(r_0 - d)^2 \frac{d^2 U_0}{dx^2} + 2\pi r_0 \frac{G_m}{2d} (U_1 - U_0) = 0 \quad (12)$$

$$n_i A_f E_f \frac{d^2 U_1}{dx^2} + 2\pi(r_0 + 2d + 2r_f) \frac{G_m}{2d} (U_2 - U_1) - 2\pi r_0 \frac{G_m}{2d} (U_1 - U_0) = 0 \quad (13)$$

Où  $n_i$  représente le nombre de fibres adjacentes cassées, Pour satisfaire de telles équations, les expressions des déplacements sont données par :

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= \bar{U}_0 e^{-\gamma x} \\ U_1 &= \bar{U}_1 e^{-\gamma x} \\ U_2 &= \frac{\sigma_c}{E_c} x \end{aligned} \right\} \quad (14)$$

Substituant l'équation (14) dans les équations (12 et 13), on obtient les deux équations différentielles suivantes :

$$U_0(x) = C_2 e^{-\sqrt{\gamma_1} x} + C_3 e^{-\sqrt{\gamma_2} x} + \frac{\sigma_c}{E_c} x \quad (15)$$

$$U_1(x) = C_2 \left( 1 - \frac{\gamma_1}{A} \right) e^{-\sqrt{\gamma_1} x} + C_3 \left( 1 - \frac{\gamma_1}{A} \right) e^{-\sqrt{\gamma_2} x} + \frac{\sigma_c}{E_c} x \quad (16)$$

Où  $\gamma_1, \gamma_2, A, B$  and  $D$  sont des équations algébriques :

$$\gamma_1 = \frac{(A + B + D) - \sqrt{(-A - B - D)^2 - 4AB}}{2}$$

$$\gamma_1 = \frac{(A + B + D) + \sqrt{(-A - B - D)^2 - 4AB}}{2}$$

$$A = \frac{G_m}{r_0 E_1 d} ; \quad B = \frac{r_0 G_m}{(R_2^2 - r_0^2) E_2 d} ; \quad D = \frac{R_2 G_m}{(R_2^2 - r_0^2) E_2 d}$$

Où  $C_2$  and  $C_3$  sont des constantes d'intégration, déterminées par les conditions de continuité au niveau  $x=a$  :

$$\frac{dU_0}{dx} \Big|_{(0 \leq x < a)} = \frac{dU_0}{dx} \Big|_{(a \leq x < \infty)}$$

$$\frac{dU_1}{dx} \Big|_{(0 \leq x < a)} = \frac{dU_1}{dx} \Big|_{(a \leq x < \infty)}$$

Ce concept est illustré sur la figure 3.2, où  $\sigma_f$  dans la figure est la contrainte de la fibre.

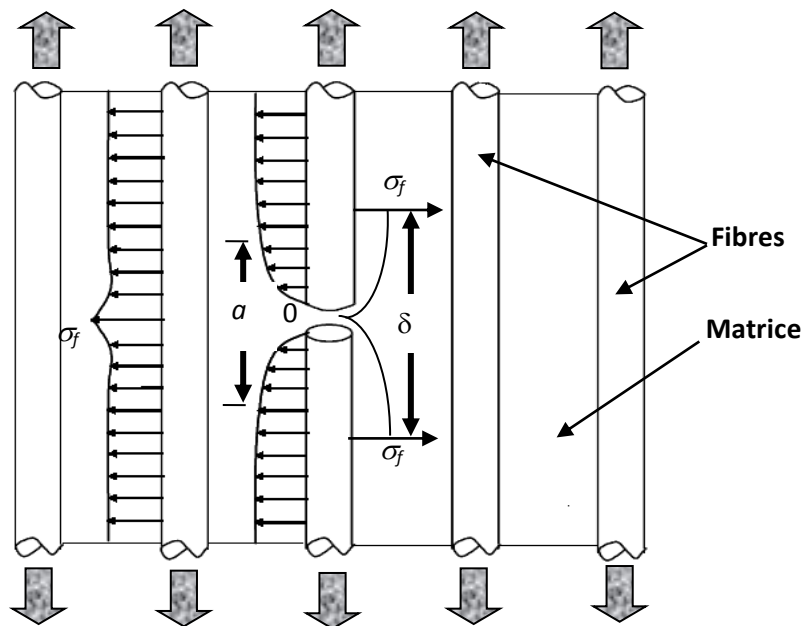


Figure III.2 : Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace

### Chapitre III : Modèle de rupture longitudinale avec les résultats

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  $\tau_0$  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 :

$$\tau(x) = (U_0(x) - U_1(x)) \frac{G_m}{2d} \quad (17)$$

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

$$\tau_0 = (U_0(a) - U_1(a)) \frac{G_m}{2d} \quad (18)$$

Pour mettre en valeur le modèle analytique présenté, nous avons effectué des applications sur un échantillon. Les caractéristiques mécaniques et géométriques sont regroupées respectivement aux tableaux III.1 et III. 2 [29]. 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 regain à 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.

Tableau III.1 : Caractéristiques mécaniques d'un échantillon en composite Sisal/époxyde

Module de Young de la fibre $E_f$	15,1 Gpa
Module de Young de matrice $E_m$	2,73 Gpa
Résistance de la fibre $\sigma_0$	3,15 Gpa
Contrainte de cisaillement $\tau_0$	16,5 Mpa
Coefficient de Poisson de la matrice $\nu$	0,43
Fraction Volumique des fibres $V_f$	0,53
Paramètre de cisaillement $\eta$	1,0
Température de transition vitreuse dans un milieu sec $T_g^0$	160 °C
Humidité absorbée $c$	0,20
Température d'utilisation, $T_{opr}$	20 °C à 120 °C
Température de référence $T_{rm}$	20 °C à 24 °C

## Chapitre III : Modèle de rupture longitudinale avec les résultats

Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques d'un échantillon en composite Sisal/époxyde

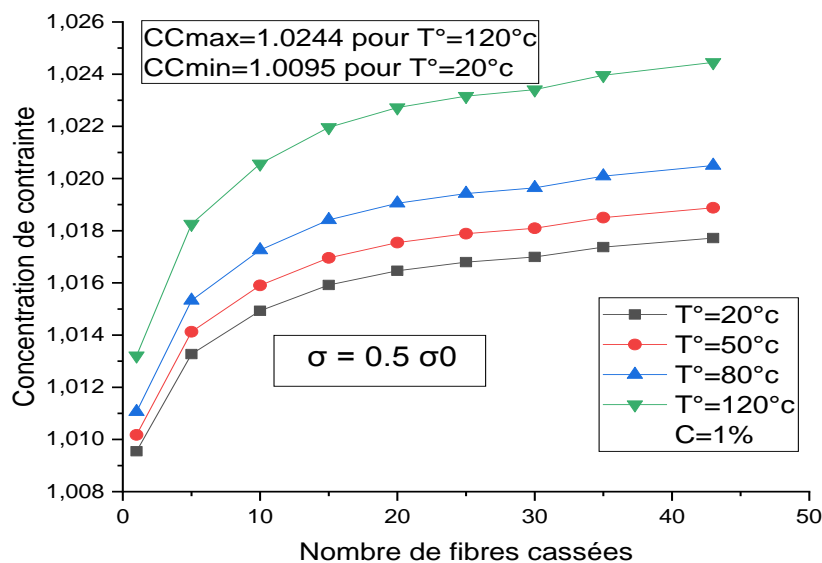
Longueur de l'échantillon L	150 mm
Largeur de l'échantillon W	15 mm
Epaisseur de l'échantillon t	4 mm
Rayon de la fibre $r_f$	0,015 mm
Nombre maximal de fibres cassées $n_i$	43

### III.2. Analyse mécanique

Par le présent paragraphe, une analyse du processus de la rupture longitudinale incluant les interactions micromécaniques entre les fibres naturelles et la matrice est effectuée. Puisque la contrainte responsable de la cassure 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.

#### III.2.1. Evaluation de la concentration de contrainte

Le facteur de concentration de contraintes est d'une grande importance parce qu'il nous offre le rapport entre la contrainte déterminée au point de rupture des fibres et la contrainte extérieure appliquée. Ce qui nous permettra de déterminer la concentration de la contrainte à l'endroit des fibres cassées, et de prévoir une rupture probable des fibres naturelles voisines adjacentes dans des conditions humides. Dans ce contexte, nous avons présenté les figures 3.3. Ces figures illustrent la variation du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation de température croissante de 20° à 120° et pour trois cas de concentration d'humidité (C=1%, 50% et 100%) à l'endroit de rupture des fibres pour une fraction volumique  $V_f=0.53$ .



### Chapitre III : Modèle de rupture longitudinale avec les résultats

On peut clairement voir que la concentration de contraintes devient plus importante avec l'augmentation du nombre de fibres cassées. Par la suite, cette concentration devient relativement stable si le nombre de fibres cassées est très grand. D'autre part il croît sensiblement en fonction de l'augmentation des températures de 20 à 120°. Le facteur de concentration de contraintes maximal est localisé à  $C=100\%$  pour 43 fibres cassées ( $C_{\max}= 1,0279$ ). Tandis que la valeur minimale de ce facteur ( $C_{\min}= 1,0095$ ) est obtenue pour une fibre cassée pour les cas de concentration d'humidité ( $C=1\%$ , 50% et 100%).

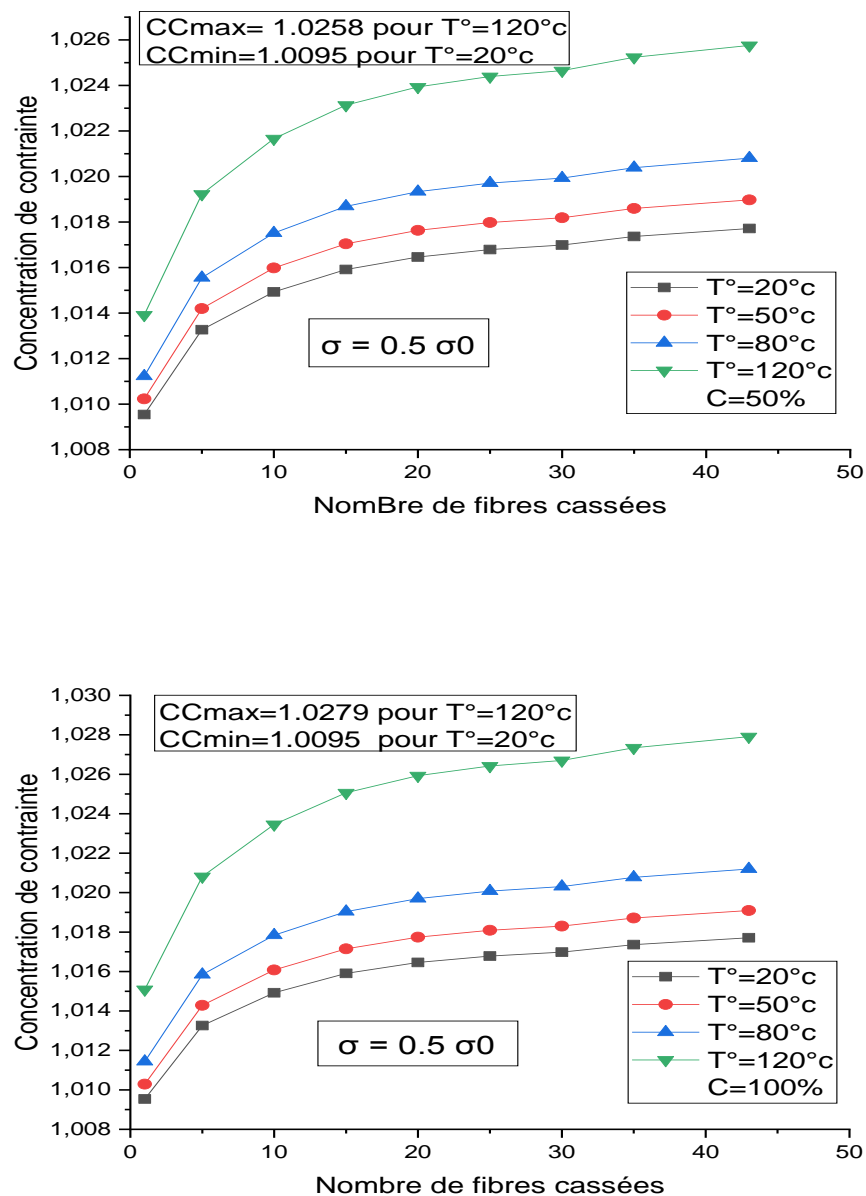
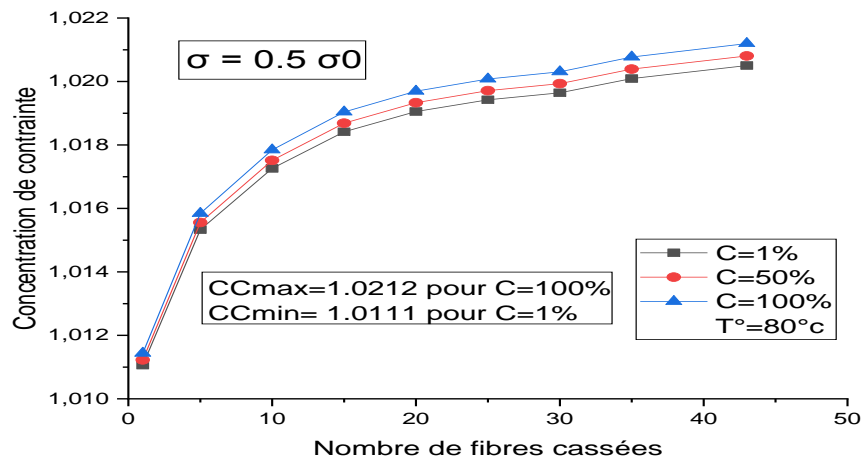
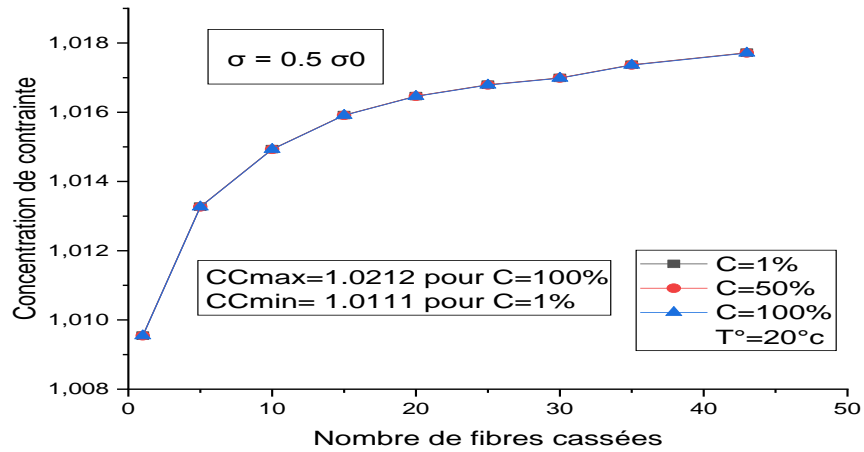


Figure III.3 : Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation de  $T^\circ$ , et pour trois cas de concentration d'humidité ( $C=1\%$ , 50% et 100%).

### Chapitre III : Modèle de rupture longitudinale avec les résultats

Contrairement aux figures précédentes les figures 3.4 montrent que pour les basses températures, l'effet de la concentration d'humidité sur la concentration de contrainte est presque négligeable. Par la suite l'effet de la concentration d'humidité devient de plus en plus important avec l'augmentation de la température de 60 ° C à 120 ° C. À T = 120 ° C, une distinction claire apparaît entre toutes les courbes. Ceci pour une fraction volumique de 0.53 et un chargement moyen de  $\sigma = 0.5 \sigma_0$



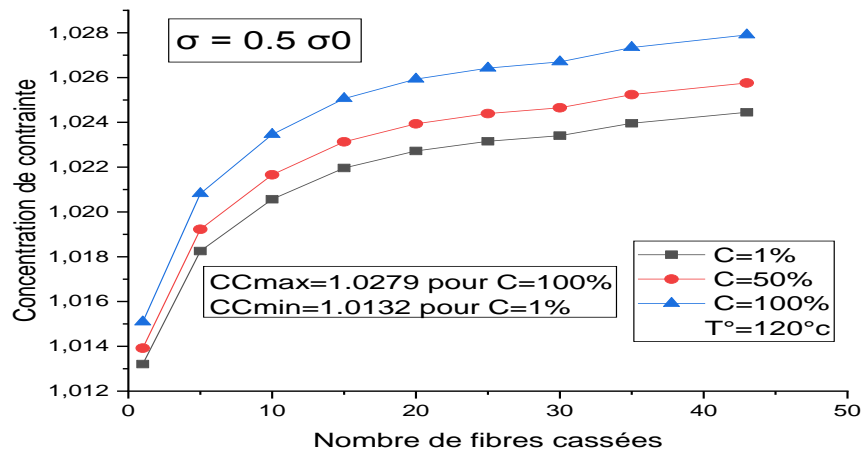
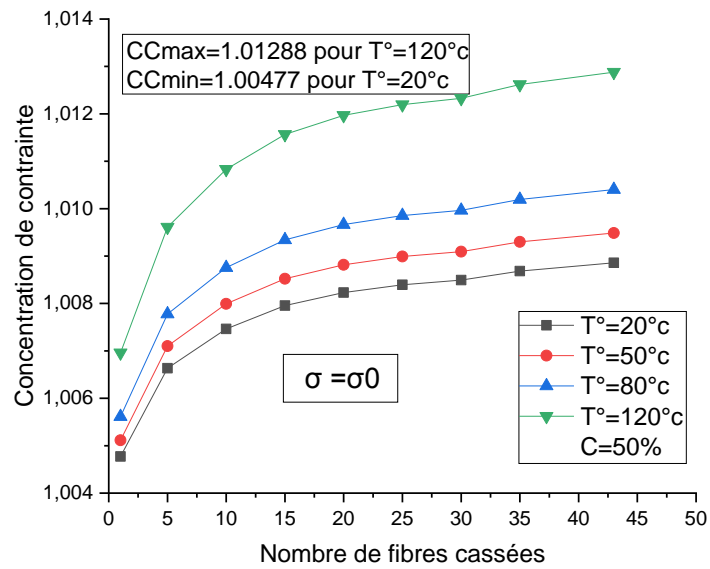
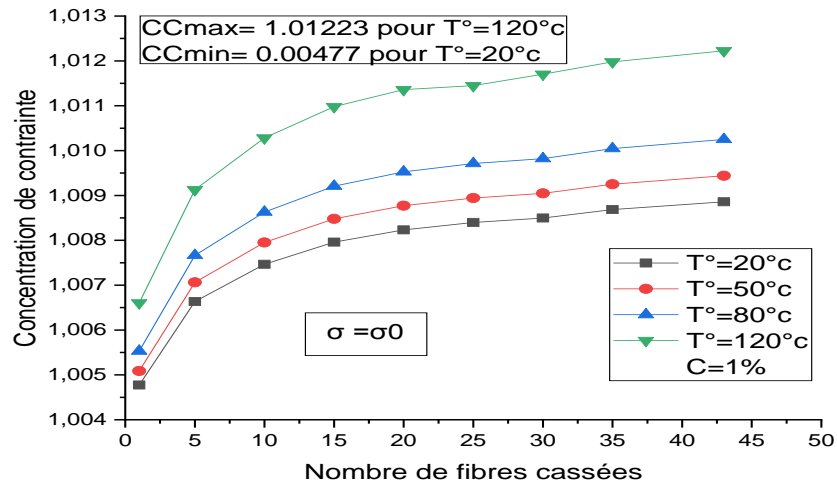


Figure III.4 : Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation de concentration d'humidité de 1%, 50%, et 100% pour des températures de 20° à 120° et pour un chargement  $\sigma = 0.5 \sigma_0$

D'après les résultats ci-dessus, nous pouvons déduire que lorsque le nombre de fibres cassées est limité, la concentration des contraintes à la région cassée est moins importante. D'autre part, dans la région des fibres voisines intactes, la concentration de contrainte est très élevée. Mais, lorsque le nombre de fibres cassées est très important, la concentration des contraintes la région inefficace est plus importante et la longueur inefficace est grande et cela pour un chargement moyen de  $0.5 \sigma_0$ . La région voisine devient moins rigide, et la fibre cassée réagit plus facilement et peuvent communiquer ensemble pour provoquer une rupture complète.

Pour un chargement complet ( $\sigma = \sigma_0$ ) représentés par les figures 3.5, On peut nettement voir que la concentration de contraintes devient de plus en plus importante avec l'augmentation du nombre de fibres cassées. Par conséquent, cette concentration devient relativement stable si le nombre de fibres cassées est très grand





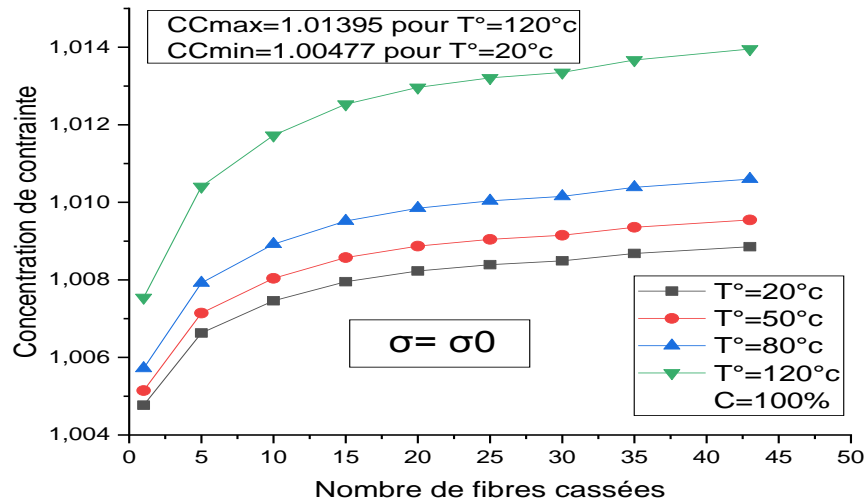
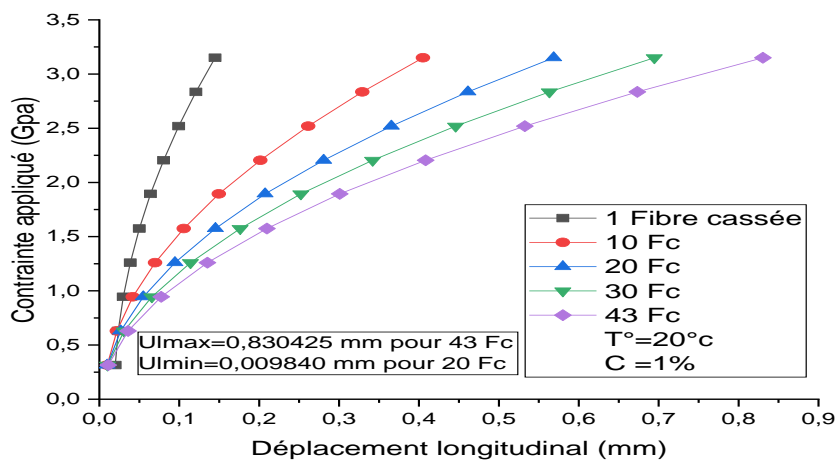


Figure III.5 : Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation de concentration d'humidité de 1%, 50%, et 100% pour des températures de 20° à 120° et pour un chargement complet  $\sigma = \sigma_0$

### III.2.2. Evolution du Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée

Les quatre figures 3.6 représentent la variation du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée. De ces figures, on peut dire que le déplacement augmente sous une forme exponentielle 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.



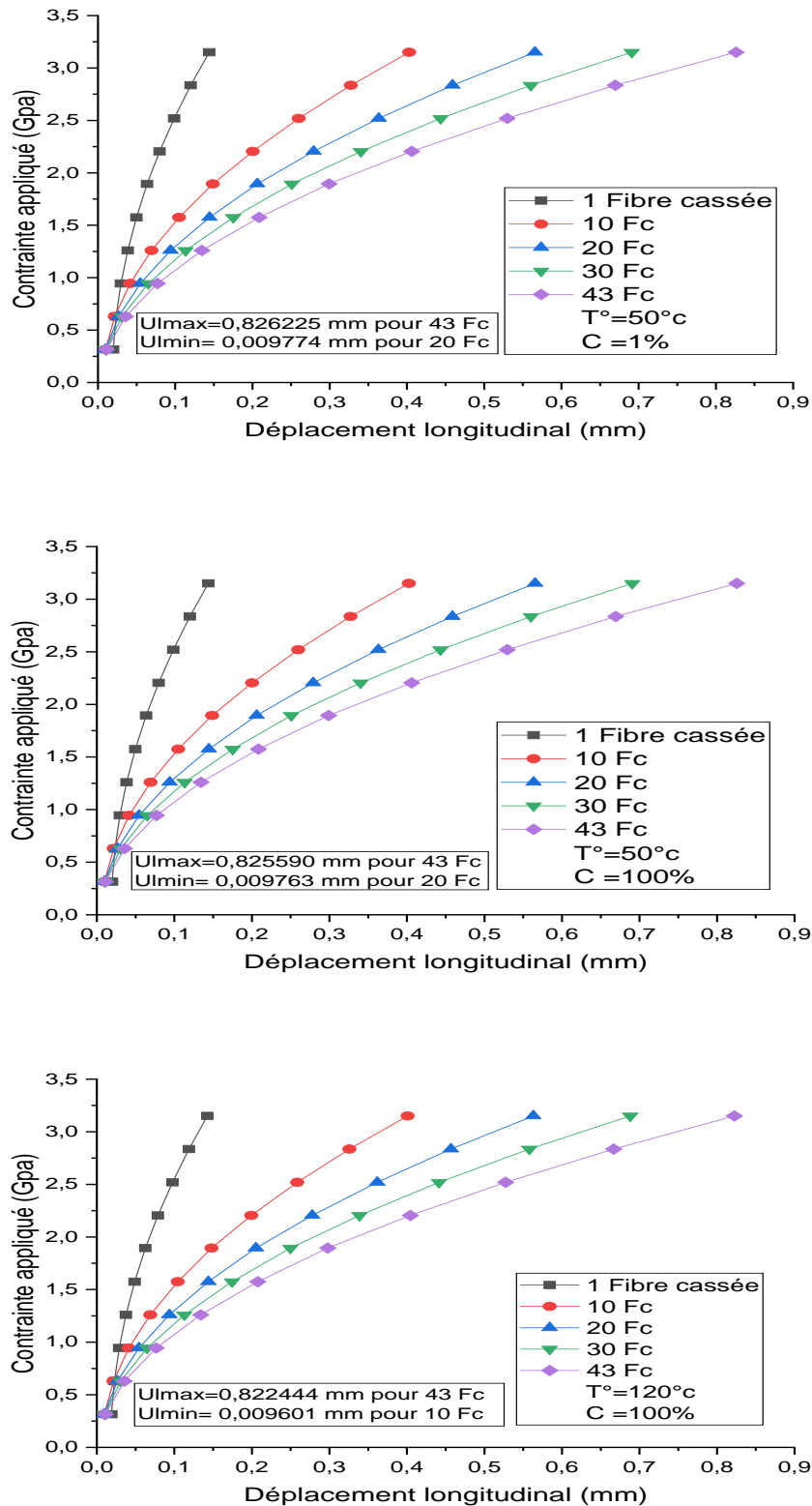


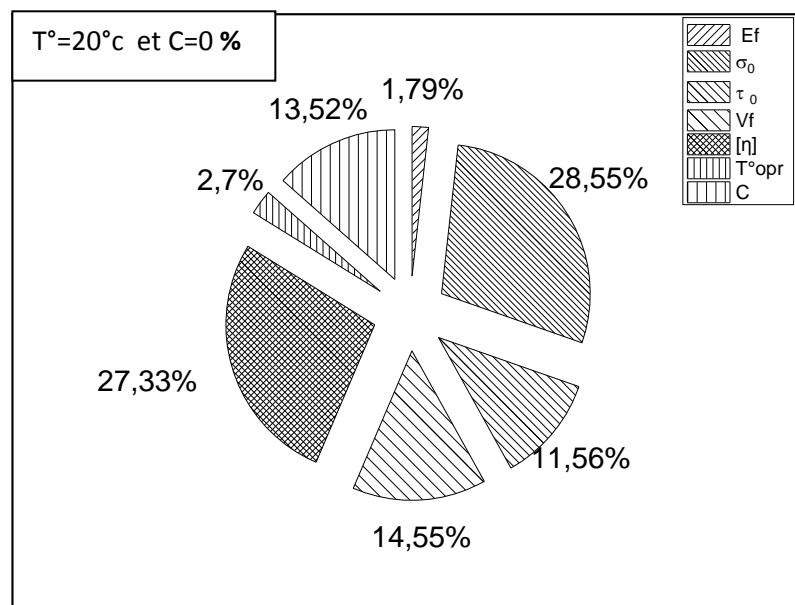
Figure III.6 : Evaluations du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée et pour de différentes conditions hygrothermiques

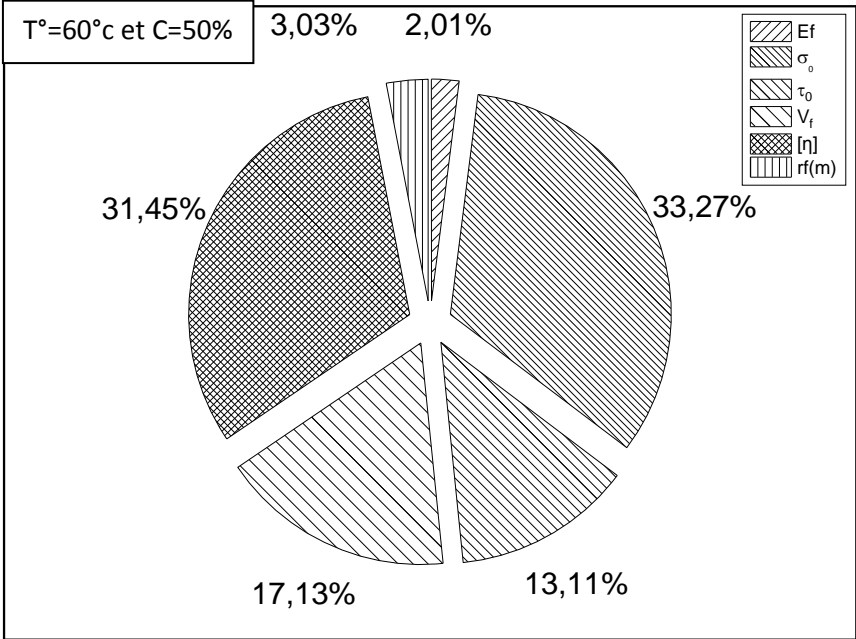
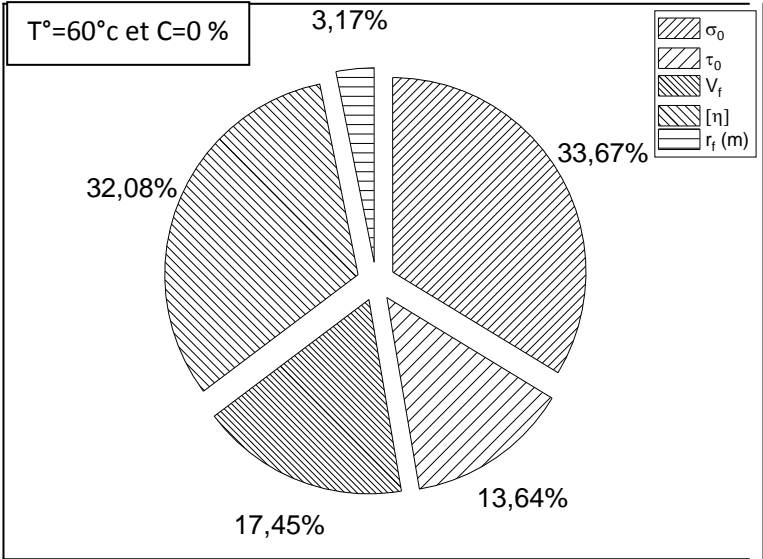
D'autre part on remarque aussi que l'effet hygrothermique n'a aucune influence sur le déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres, ce que nous voyons sur les résultats donnés sur les quatre cas de figures 3.6

#### III.3. Analyse de sensibilité

##### III.3.1. Influence de différents facteurs de sensibilité sur la concentration de contrainte

L'influence des différents facteurs sur la concentration de contrainte sont calculées en effectuant des simulations de Monte-Carlo sur le modèle mécanique, et de mesurer l'effet de sensibilité de ces facteurs. Pour un composite unidirectionnel en Sisal/époxyde soumis à une charge de traction  $\sigma_0$ , les figures 3.7 montrent l'importance des facteurs des variables de conception à différentes conditions environnementales. Dans ces figures, on peut observer que les variables les plus importantes pour le cas de notre modèle sont le chargement  $\sigma_0$  qui passe de 28.55% pour ( $T^{\circ}=20^{\circ}\text{c}$  et  $C=0\%$ ) à 33.1% pour ( $T^{\circ}=120^{\circ}\text{c}$  et  $C=100\%$ ) qui représente le facteur le plus important pour les résultats de la concentration de contrainte, suivi du paramètre de cisaillement, du fraction volumique de fibre, de la concentration d'humidité, de la contrainte de cisaillement, de la température de référence et enfin du module de Young de fibre.





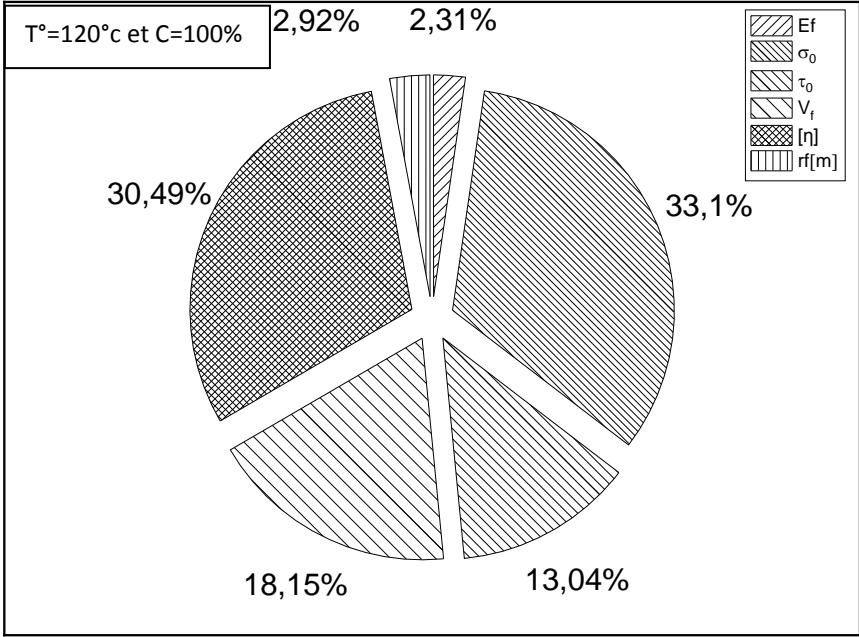


Figure III.7 : Facteurs d'importance de la Concentrations de Contraintes pour quatre cas de conditions hygrothermiques.

### Conclusion générale

Pour conclure, nous disons : le premier chapitre nous a permis de bien comprendre et de saisir tous les aspects liés au matériau composite auquel nous avons abordé tout au long de ce travail. Car nous ne pouvions pas entrer dans les vifs du sujet de notre thème sans avoir les idées claires sur les caractéristiques, l'importance, l'élaboration et les usages de ce matériau dans tous les domaines d'application qu'il est employé. Quant au chapitre 2 consacré aux différentes fibres naturelles, cela nous a permis d'établir une étude comparative entre les fibres d'origine différente et de soulever l'importance d'utiliser celles qui sont naturellement élaborées grâce à leurs avantages qu'elles présentent. Comme fait mention ci-dessus : « tout se résume du fait que les fibres naturelles causent moins de dégâts dans l'environnement lors de leur usage ». Et elles tirent cela par leur nature d'obtention qui leur confère des qualités permettant de répondre aux exigences liées aux enjeux actuels de l'environnement. Ainsi, nous disons, produire en très grande quantité de fibres naturelles adéquates et utilisables pour la mise en œuvre des matériaux composites contribuera à améliorer l'état de notre environnement qui ne cesse de se dégrader au jour le jour, vu que les impacts environnementaux (émission de CO<sub>2</sub>) vont être amoindris à la suite de la réduction de la consommation de l'énergie dans de différentes applications. Mais un problème s'impose, il s'agit des attentes d'un point de vue mécanique. Déjà, l'élaboration et la mise en œuvre du matériau composite avec de fibres naturelles sont très compliquées. Et une fois nous obtenons le produit fini, il ne présente pas de caractéristiques mécaniques élevées comme celles de fibres artificielles, mais elles sont quand-même intéressantes dans certaines applications. C'est pour cela dans le dernier chapitre, nous avons mis en place une conception du modèle de rupture pour nous permettre de prédire les impacts négatifs que peuvent générer les sollicitations extérieures dans le matériau, tout en évaluant sa capacité de résistance jusqu'à sa ruine totale. L'importance du choix de ce modèle est basée sur sa lucidité qu'elle présente pour l'interprétation des résultats par l'entremise de certains facteurs du grand prestige que seul ce modèle peut prendre en compte pour évaluer la résistance du matériau composite. Les fibres naturelles étant très sensibles à l'humidité, cette partie du travail était consacré à soumettre le matériau composite Sisal/Epoxy aux sollicitations mécaniques avec effet hygrothermique pour ensuite prédire les dégâts. Traiter un cas d'échantillon soumis à de sollicitations hygrothermiques variées, nous a aussi permis d'appréhender la façon dont le matériau réagit dans le cas le moins extrême et dans le cas le plus extrême. Et cela, pour apprécier le cas où le matériau est le mieux adapté et qui nous arrangera le plus lors de sa mise en œuvre et de son utilisation. Voilà, l'un des objectifs principaux de la continuité de séries d'études d'élaboration de nouveaux matériaux composites qui pourront répondre aux attentes intéressantes et importantes des besoins techniques, commerciaux et environnementaux (c'est-à-dire satisfaire le cahier de charges qui est à l'ordre du jour).

### **Chapitre III : Modèle de rupture longitudinale avec les résultats**

---

Enfin, nous pouvons dire que le présent travail constitue pour nous et pour les futurs chercheurs une base pour développer l'axe de l'endommagement des matériaux composites unidirectionnels et plus précisément l'effet de l'humidité et de la température sur les dégradations des composites unidirectionnels aux interfaces matrice-fibres naturelles.

Pour les futures recommandations, nous comptons poursuivre cet axe de recherche pour toucher d'autres phénomènes tel que le comportement non linéaire caractérisé par la viscoélasticité (matrice viscoélastique) pour les fibres naturelles.

### Références bibliographiques et webographiques

- [1] R. M. Christensen. Mechanics of composite materials. Krieger publishing company, Malabar, Florida, 1991.
- [2] Rosen, B.W., 1964. Tensile failure of fibrous composites. AIAA J. 2, 1985–1991.
- [3] Zweben, C., 1968. Tensile failure of fiber composites. AIAA J. 6, 2325–2331.
- [4] 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.
- [5] Mécanique des composites à hautes performances, version 3, février 2019, S. Drapier
- [6] Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures, 5<sup>e</sup> édition, Jean Marie Berthelot, Ed. Tec & Doc, 2012
- [7] Précis des matériaux de la conception aux contrôles, Edition DUNOD, Michel Dequatremare et Thierry Devers
- [8]. Pietak, A., Korte, S., Tan, E., Downard, A., Staiger, M.P. (2007). Atomic force microscopy characterization of the surface wettability of natural fibres, Appl. Surf. Sci., 253, 3627-3635.
- [9]. Wambua, P., Vangrimde, B., Lomov, S., Verpoest, I. (2007). The response of natural fibre composites to ballistic impact by fragment simulating projectiles, Comp. Struc, 77, 232-340.
- [10] Matériaux composites, 4<sup>e</sup> édition revue et augmentée, auteur Daniel Gay.
- [11] Arc. Dans Wikipedia/ [http://fr.wikipedia.org/wiki/Arc\\_\(arme\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/Arc_(arme))
- [12] Charles Macintosh. Dans Wikipedia : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Charles\\_Macintosh](http://fr.wikipedia.org/wiki/Charles_Macintosh)
- [13] François Hennebique. Dans Wikipedia : [http://fr.wikipedia.org/wiki/Fran%C3%A7ois\\_Hennebique](http://fr.wikipedia.org/wiki/Fran%C3%A7ois_Hennebique)
- [14] Mémoire : influence de diverses modifications du Genêt d’Espagne sur les propriétés mécaniques rhéologiques et thermiques de composites à matrice thermoplastique présenté par Fadel Ahlem
- [15] Baley, C. (2005). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Récupéré de : <http://www.techniques-ingenieur.fr/book/n2220/fibres-naturelles-de-renfort-pour-materiaux-composites.html>
- [16] Wambua, P., Ivens, J., Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? Comp. Sci. Tech., 63, 1259-1264.
- [17] Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K., Arora, S. (2003). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites ? Composites Part A : Appl. Sci. Manuf, 35, 371-376.
- [18] Robert, R. F. (2005). Bast and other plant fibres. Cambridge, Angleterre : Woodhead Publishing Limited in association with The Textile Institute.
- [19] Leonard, Y.M., Ansell, M.P. (2001). Chemical modification of hemp, sisal, jute and kapok fibers by alkalization. J. Appl. Polym. Sci., 84, 2222-2234.
- [20] Mwaikambo, L.Y., Ansell, M. P. (2006). Mechanical properties of alkali treated plant fibres and their potential as reinforcement materials. J. Mater. Sci., 41, 2483-2496.



- [21] Grishanov, S.A., Harwood, R.J., Booth, I. (2006). A method of estimating the single flax fibre fineness using data from the LaserScan system, *Ind. Crops Prod.*, 23, 273-287.
- [22] <https://fr.ripleybelieves.com>
- [23] Sisal <http://www.fao.org>
- [24] Roy, S., Xu, W., Patel, S., Case, S.: Modeling of moisture diffusion in the presence of bi-axial damage in polymer matrix composite laminates. *Int. J. Solids Struct.* 38, 7627–7641 (2001)
- [25] Sereir Z., Boualem N., Effect of long term hygrothermal loadings and stacking sequences on the damage of hybrid composites, *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, Vol47. (2), P 147-163, 2007.
- [26] Tsai, S.W.: *Composite Design, Think Composites*, 4th edn. Dayton (1988)
- [27] DiBeneditto, A.T. “ Measurement of thermomechanical stability of interphases by the embedded single fiber test, ” *Composites Science and Technology*, Vol.42 (1992), pp.103-123.
- [28] Khiat M.A, Sereir Z, Chateauneuf A, “Uncertainties of unidirectional composite strength under tensile loading and variation of environmental conditio,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 56 (2011) 169–179
- [29] Curtin, W. A. and Takeda, N. “Tensile strength of fiber-reinforced composites: II. Application to polymer matrix composites,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 32 (1998) pp. 2060-2081.