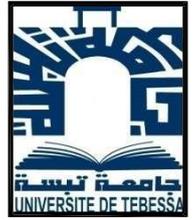




République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Larbi Tébessi-Tébessa Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Mécanique

**MEMOIRE DE MASTER**  
Option  
**Construction Mécanique**

Thème :

---

**Elaboration et Caractérisation Numérique de  
Biocomposite à Matrice Epoxyde et Renfort Fibres  
de Sisal**

---

Présenté par :  
BAKHOUCHE Hibat Erahmane

Dirigé par : DEGHBODJ Samir

Devant le jury

KHELIFA Hocine	M.A.A	Université Larbi Tébessi -Tébessa	Président
Hadjab Abdelhakim	M.A.A	Université Larbi Tébessi -Tébessa	Examineur
DEGHBODJ Samir	M.C.A	Université Larbi Tébessi -Tébessa	Encadreur
LEMITA Nour elhouda	Doctorante	Université Larbi Tébessi -Tébessa	Co-Encadreur

Date de soutenance : Juin 2020

*Success does not consist in never making mistakes but in never making the same one a second time*

*George Bernard Shaw*

*A beautiful confession...*

*I always think that my life is like a comic book because whenever I am in trouble, I am always saved by a hero called DAD My Strength in the case of weakness, Happiness in grief, Safety in fear...she is MOM*

*Thank You*

## ***Remerciements***

*Après avoir rendu grâce à dieu le tout puissant et le miséricordieux nous tenons à remercier vivement tout ce qui de près ou de loi ont participé à la rédaction de ce mémoire*

*Je remercie premièrement mon encadreur Docteur Samir DEGHBODJ qui m'a guidé pendant toute la durée de ce travail, ainsi que pour sa patience et ses précieux conseils tout au long de l'année académique. Je remercie également le co-encadreur Nour elhouda LEMITA qui m'a aidé et dirigé. Je remercie les membres du jury qui ont supervisé l'évaluation de ce travail*

*Monsieur Hocine KHELIFA et Monsieur Abdelhakim HADJAB*

*À mes chers parents, Aziz et Meriem qui m'a toujours soutenu, ma sœur Djihad et mes frères Islem et Mouadh merci pour votre encouragement et vos prières*

*Merci aussi à mes collègues tout au long de ma carrière universitaire*

# SOMMAIRE

Remerciement	i
Sommaire	ii
Liste des Figures	vi
Liste des Tableaux	ix
ملخص	xii
Abstract	xiii
Résumé	xvi
Introduction générale	1
Problématique	2
Articulation du mémoire	2
<b>Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites</b>	
1.1 Introduction	3
1.2 Définition	3
1.3 Classification des matériaux composites	3
1.3.1 Composite hautes performances (HP)	4
1.3.2 Composite grandes diffusions (GD)	4
1.4 Avantages des matériaux composites	4
1.5 Domaines d'utilisation	4
1.6 Constituants de base des matériaux composites	5
1.6.1 Matrice	6
1.6.1.1 Résines thermodurcissables (TD)	6
1.6.1.2 Résines thermoplastiques (TP)	7
1.6.2 Renfort	8
1.6.2.1 Fibres de verre	9
1.6.2.2 Fibres de carbone	10
1.6.2.3 Fibre d'aramide	11
1.6.2.4 Architecture des renforts	11
1.7 Matériaux composites structuraux	13
1.7.1 Monocouches	13
1.7.2 Stratifiés	14

1.7.3 Sandwichs	14
1.8 Mise en œuvre des matériaux composites	15
1.8.1 Moulage par injection	15
1.8.2 Moulage par compression	16
1.8.3 Moulage au contact	17
1.8.4 Moulage par projection	17
1.8.5 La pultrusion	18
1.8.6. Enroulement filamentaire	18
Références bibliographiques du chapitre 1	20

## **Chapitre 2 : Les fibres naturelles**

2.1 Introduction	21
2.2 Les fibres naturelles	21
2.2.1 Les fibres animales	22
2.2.2 Les fibres végétales	23
2.2 Morphologies des fibres végétales	27
2.3.1 La structure d'une fibre végétale	27
2.3.2 Composition chimique d'une fibre végétale	28
2.3.2.1 La cellulose	28
2.3.2.2 L'hémicellulose	29
2.3.2.3 Les pectines	30
2.3.2.4 Lignine	30
2.3.2.5 Les cires	30
2.3.2.6 Les protéines	31
2.4 Propriétés mécaniques, physiques et chimiques des fibres végétales	31
2.4.1 Propriétés mécaniques	31
2.4.2 Propriétés physiques	32
2.5 Extraction des fibres	33
2.5.1 Extraction mécanique	33
2.5.1.1. Laminage	33
2.5.1.2. Déflexion	33
2.5.1.3 Teillage	33
2.5.2 Extraction chimique	34
2.5.2.1 Procédé par les silanes	34

2.5.2.2 Mercerisation	34
2.5.2.3 Procédé Kraft	34
2.5.3 Extraction biologique	34
2.5.3.1 Rouissage à l'eau	35
2.5.3.2 Rouissage à terre	35
2.5.3.3 Rouissage microbien	35
Références bibliographiques du chapitre 2	36

### **Chapitre 3 : Elaboration de bio composites à matrice époxyde et renfort fibres de sisal**

3.1 Introduction	38
3.2 Fibres de sisal	38
3.2.1 Identification	39
3.2.2 Production mondiale	39
3.2.3 Extraction des fibres de sisal	40
3.2.4 La composition chimique des fibres de sisal	41
3.2.5 Modification de la surface des fibres	41
3.2.6 Traitement par la soude (Alcalinisations)	42
3.2.7 Caractérisation mécanique des fibres de sisal	43
3.3 Résines époxydes	43
3.3.1 Historique	43
3.3.2 Introduction	43
3.3.3 Définition	43
3.3.4 Caractéristiques des résines époxydiques	44
3.3.5 Réaction chimique de la préparation d'une résine époxy	45
3.4 Elaboration de bio composites époxydes/ fibres de sisal	46
Références bibliographiques du chapitre 3	48

### **Chapitre 4: Modélisation et caractérisation des biocomposites époxyde/fibres de sisal**

4.1 Homogénéisation et analyse micromécanique	49
4.1.1 Introduction	49
4.1.2 Constitution d'un pli unidirectionnel	49
4.1.3 Loi des mélanges	50
4.1.4 Calcul des caractéristiques mécaniques d'un pli unidirectionnel	50

4.1.4.1	Module d'élasticité longitudinal	50
4.1.4.2	Module d'élasticité transversal	53
4.1.4.3	Module de cisaillement longitudinal	54
4.1.4.4	Coefficient de Poisson longitudinal	56
4.2	Relation entre fractions volumiques et fractions massiques	57
4.3	Méthodes analytiques pour la détermination des modules d'élasticité du pli	59
4.4	Analyse du comportement micromécanique des biocomposites époxydes/ fibres de sisal	60
	Références bibliographiques du chapitre 4	67

## **Chapitre 5: Modélisation et simulation numérique du comportement mécanique des biocomposites époxyde/sisal**

5.1	Introduction	68
5.2	Essai de traction	68
5.3	Simulation des essais de traction des biocomposites (époxyde/sisal)	69
5.3.1	Code de calcul ABAQUS	69
5.3.2	Définition d'ABAQUS	69
5.3.3	Description des possibilités d'ABAQUS	69
5.3.4	Position du problème	71
5.3.5	Choix des matériaux utilisés pour les éprouvettes	71
5.3.6	Hypothèses de simulation	72
5.3.6.1	Système d'unités utilisé	72
5.3.6.2	Modélisation de l'éprouvette	72
5.3.6.3	Caractéristiques mécaniques de l'éprouvette	74
5.3.6.4	Assemblage	74
5.3.6.5	Conditions aux limites	74
5.3.6.6	Maillage	75
5.3.7	Résultats et discussion	75
5.3.7.1	Traction à 0°	75
5.3.7.2	Traction à 90°	78
	Références bibliographiques du chapitre 5	82
	Conclusion générale	83

# LISTE DES FIGURES

## Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites

<b>Fig. 1.1</b>	Domaines d'application des matériaux composites	5
<b>Fig. 1.2</b>	Constituants de base des matériaux composites	5
<b>Fig. 1.3</b>	Déférentes familles de matrices	6
<b>Fig. 1.4</b>	Les principales fibres: (a) fibres de verre, (b) fibres de carbone, (c) fibres d'aramide	9
<b>Fig. 1.5</b>	Différentes familles de renfort pour composites	10
<b>Fig. 1.6</b>	Processus d'élaboration des fibres de verre	11
<b>Fig. 1.8</b>	Fibre d'aramide	11
<b>Fig. 1.9</b>	Différentes architectures des renforts de composites : a) mats de verre, b) tissu unidirectionnel, c) tissu bidirectionnel	13
<b>Fig. 1.10</b>	Tissus bidirectionnels : a) Le taffetas, b) Le sergé, c) Le satin	13
<b>Fig. 1.11</b>	Composite monocouche	13
<b>Fig. 1.12</b>	Composite stratifiée	14
<b>Fig. 1.13</b>	Composite sandwich	15
<b>Fig.1.14</b>	Composite sandwich	15
<b>Fig. 1.15</b>	Moulage par injection	16
<b>Fig. 1.16</b>	Moulage par compression	16
<b>Fig. 1.17</b>	Moulage au contact	17
<b>Fig.1.18</b>	Moulage par projection	17
<b>Fig.1.19</b>	Moulage par pultrusion	18
<b>Fig.1.20</b>	Moulage par enroulement filamentaire	19

## Chapitre 2 : Les fibres naturelles

<b>Fig. 2.1</b>	Fibres naturelles d'origine animale	23
<b>Fig. 2.2</b>	Sisal	24
<b>Fig. 2.3</b>	Palmier	24
<b>Fig. 2.4</b>	Coton	25
<b>Fig. 2.5</b>	Kapok	25
<b>Fig. 2.6</b>	Le chanvre	26
<b>Fig. 2.7</b>	Ramie	26
<b>Fig. 2.8</b>	Alfa	27
<b>Fig. 2.9</b>	Structure de la paroi cellulaire des fibres végétales	28
<b>Fig. 2.10</b>	Structure chimique de la cellulose	29

<b>Fig. 2.11</b>	Les différentes structures de l'hémicellulose	29
<b>Fig. 2.12</b>	Structure de la pectine	30
<b>Fig. 2.13</b>	Structure de lignine	30

### **Chapitre 3 : Elaboration de biocomposites à matrice époxyde et renfort fibres de sisal**

<b>Fig. 3.1</b>	Plante de sisal	39
<b>Fig. 3.2</b>	Plante de sisal de la région de Tébessa	41
<b>Fig. 3.3</b>	Lames utilisées dans l'extraction des fibres de sisal	41
<b>Fig. 3.4</b>	Ecrasement des fibres lame de sisal	41
<b>Fig. 3.5</b>	Extraction des fibres de sisal	41
<b>Fig. 3.6</b>	fibres de sisal avant séchage	41
<b>Fig. 3.7</b>	fibres de sisal après séchage	41
<b>Fig. 3.8</b>	Préparation de la solution de soude (NaOH) à 2%	42
<b>Fig. 3.9</b>	Immersion des fibres de sisal dans la solution de soude	42
<b>Fig. 3.10</b>	Lavage des fibres de sisal traitées	42
<b>Fig. 3.11</b>	Immersion des fibres de sisal dans l'eau distillée pendant 15 min	42
<b>Fig. 3.12</b>	Séchage des fibres de sisal traitées	42
<b>Fig. 3.13</b>	Brossage des fibres de sisal traitées	42
<b>Fig. 3.14</b>	Applications industrielles de la résine époxyde	44
<b>Fig. 3.15</b>	Formule chimique du 1-chloro-2,3-époxypropane	45
<b>Fig. 3.16</b>	Première étape : condensation avec élimination de HCl	45
<b>Fig. 3.17</b>	Deuxième étape : addition utilisant le groupe époxy	46
<b>Fig. 3.18</b>	Formule chimique de la résine époxyde	46
<b>Fig. 3.19</b>	Eprouvette découpée selon la norme AFNOR 57-101	47
<b>Fig. 3.20</b>	Eprouvette élaborée (sisal/Epoxyde)	47

### **Chapitre 4 : Modélisation et simulation numérique du comportement mécanique des biocomposites (époxyde/sisal)**

<b>Fig.4.1</b>	Constituants d'un matériau composite	49
<b>Fig.4.2</b>	Propriétés d'un matériau composite dépendantes de celles de ses constituants	49
<b>Fig.4.3</b>	Schéma simplifié d'une traction longitudinale d'une CER	51
<b>Fig.4.4</b>	Section transversale du composite	52
<b>Fig.4.5</b>	Cellule élémentaire sollicitée transversalement	53
<b>Fig.4.6</b>	Cellule élémentaire sollicitée en cisaillement	54
<b>Fig.4.7</b>	Cellule élémentaire représentative sollicitée dans la direction des fibres	56

<b>Fig.4.8</b>	Variation des modules d'Young longitudinal $E_L$ et transversal $E_T$ en fonction du taux	65
<b>Fig.4.9</b>	Variation des modules de cisaillement $G_{LT}$ et $G_{TT}$ en fonction du taux de fibres	66
<b>Fig.4.10</b>	Variation modules du coefficient de Poisson en fonction du taux de fibres	66
<b>Chapitre 5 : Modélisation et simulation numérique du comportement mécanique des biocomposites (époxyde/sisal)</b>		
<b>Fig.5.1</b>	Exemples d'éléments intégrés dans la bibliothèque d'ABAQUS	70
<b>Fig.5.2</b>	Eprouvette normalisée utilisée pour les simulations	71
<b>Fig.5.3</b>	Eprouvette sollicitée en traction longitudinale	72
<b>Fig.5.4</b>	Eprouvette sollicitée en traction selon la direction transversale	72
<b>Fig.5.5</b>	Modélisation de l'éprouvette sur ABAQUS	73
<b>Fig.5.6</b>	Orientation des plis du matériau de l'éprouvette à $0^\circ$	73
<b>Fig.5.7</b>	Orientation des plis du matériau de l'éprouvette à $90^\circ$	73
<b>Fig.5.8</b>	Modélisation de l'éprouvette sur ABAQUS	74
<b>Fig.5.9</b>	Modélisation de l'éprouvette sur ABAQUS	74
<b>Fig.5.10</b>	conditions aux limites mécaniques appliquées dans le modèle de l'éprouvette	74
<b>Fig.5.11</b>	Maillage du modèle élément fini de l'éprouvette avec des éléments de type	75
<b>Fig.5.12</b>	Distribution des contraintes $\sigma_{11}$ dans l'éprouvette (traction à $0^\circ$ )	76
<b>Fig.5.13</b>	Distribution des contraintes $\sigma_{22}$ dans l'éprouvette (traction à $0^\circ$ )	76
<b>Fig.5.14</b>	Distribution des déformations $\epsilon_{11}$ dans l'éprouvette (traction à $0^\circ$ )	76
<b>Fig.5.15</b>	Distribution des déformations $\epsilon_{22}$ dans l'éprouvette (traction à $0^\circ$ )	77
<b>Fig.5.16</b>	Courbe contraintes déformations (traction à $0^\circ$ )	77
<b>Fig.5.17</b>	Valeur nodale de la déformation $\epsilon_{11}$ (traction à $0^\circ$ )	78
<b>Fig.5.18</b>	Valeur nodale de la déformation $\epsilon_{22}$ (traction à $0^\circ$ )	78
<b>Fig.5.19</b>	Distribution des contraintes $\sigma_{11}$ dans l'éprouvette (traction à $90^\circ$ )	79
<b>Fig.5.20</b>	Distribution des contraintes $\sigma_{22}$ dans l'éprouvette (traction à $90^\circ$ )	79
<b>Fig.5.21</b>	Distribution des contraintes $\epsilon_{11}$ dans l'éprouvette (traction à $90^\circ$ )	79
<b>Fig.5.22</b>	Distribution des contraintes $\epsilon_{22}$ dans l'éprouvette (traction à $90^\circ$ )	80
<b>Fig.5.23</b>	Courbe contraintes déformations : traction à $90^\circ$	80
<b>Fig.5.24</b>	Module de Young longitudinal $E_L$ pour différent taux de renfort	81
<b>Fig.5.25</b>	Module de Young transversal $E_T$ pour différent taux de renfort	81

# LISTE DES TABLEAUX

## Chapitre 1 : Généralités sur les matériaux composites

<b>Tableau 1.1</b>	Caractéristique mécaniques de résines TD thermodurcissables usuelles	7
<b>Tableau 1.2</b>	Caractéristique mécaniques de résines TP thermoplastiques usuelles	8
<b>Tableau 1.3</b>	Comparaison entre les caractéristiques des résines (TP) et (TD)	8

## Chapitre 2 : Les fibres naturelles

<b>Tableau 2.1</b>	Composition chimique des fibres naturelles les plus courantes	31
<b>Tableau 2.2</b>	Propriétés mécaniques des fibres naturelles les plus courantes	32
<b>Tableau 2.3</b>	Propriétés physiques des fibres naturelles	33

## Chapitre 3 : Elaboration de bio composites à matrice époxyde et renfort fibres de sisal

<b>Tableau 3.1</b>	Caractéristiques botaniques de la plante de sisal	39
--------------------	---	----

## Chapitre 4 : Modélisation et caractérisation des biocomposites (époxyde/sisal)

<b>Tableau 4.1</b>	Caractéristiques mécaniques des constituants des biocomposites	60
<b>Tableau 4.2</b>	Caractéristiques physiques des biocomposites époxyde/fibres de sisal	62
<b>Tableau 4.3</b>	Différents biocomposites élaborés avec des fractions volumiques de 0.1 à 0.9	65

## Chapitre 5 : Modélisation et simulation numérique du comportement mécanique des biocomposites (époxyde/sisal)

<b>Tableau 5.1</b>	Exemples de systèmes d'unité d'ABAQUS	70
<b>Tableau 5.2</b>	Dimensions des éprouvettes selon la norme AFNOR 57-101	71
<b>Tableau 5.3</b>	Caractéristiques mécaniques des éprouvettes	75
<b>Tableau 5.4</b>	Comparaison des résultats numériques et théoriques	81

## ملخص

يتم تشجيع تطوير مواد مركبة جديدة مدعمة بألياف نباتية بسبب إيجابياتها الاقتصادية و الإيكولوجية. و بالفعل، فإن التركيبة الطبيعية لهذه الألياف تسمح لها بالمساهمة في ترقية التنمية المستدامة. يتطلب استعمال الألياف النباتية معالجات ميكانيكية و كيميائية لاستخراجها و تحسين خصائص التصاقها و تشبثها بالمصفوفة. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تطوير مواد مركبة من ألياف السيسال الطبيعية ومصفوفة الإيبوكسي تم إجراء محاكاة لاختبار الشد باستخدام برنامج ABAQUS.

الكلمات المفتاحية: المواد المركبة ، ألياف السيسال ، راتنج إيبوكسيدي ، الاستخراج ، المجانسة

## *Abstract*

The development of new composite materials reinforced with vegetable fibers is encouraged because of its economic and ecological interest. Indeed, the natural character of these fibers allows it to promote a sustainable industry. The use of vegetable fibers requires mechanical and chemical treatments for the extraction and improvement of their adhesion and their dispersion in the matrix. The main objective of this work is the development and characterization of biobased composites made of sisal fibers and epoxy matrix. Subsequently, the tensile test simulations, essential in any characterization study, were conducted using the ABAQUS finite element software.

Keywords: Composite materials, sisal fibers, epoxy resin, extraction, homogenization

## *Résumé*

Le développement des matériaux composites renforcés par des fibres végétales est encouragé par son intérêt économique et écologique. En effet, le caractère naturel de ces fibres lui permet de promouvoir une industrie durable. L'utilisation des fibres végétales nécessite des traitements mécanique et chimique pour l'extraction et l'amélioration de leur adhésion et leur dispersion dans la matrice. L'objectif principal de ce travail est l'élaboration et à la caractérisation de composites biosourcés à base de fibres naturelles de sisal et d'une matrice époxyde. Par la suite des simulations du test traction, indispensable dans toute étude de caractérisation, ont été conduites grâce au code de calcul par éléments finis ABAQUS.

Mots Clés : Matériaux composites, fibres de sisal, résine époxyde, extraction, homogénéisation

## • Introduction générale

Depuis les deux dernières décennies, les fibres naturelles en général et les fibres végétales en particulier, ont réussi à acquérir un grand intérêt à l'échelle académique et industrielle. Ces fibres offrent des perspectives prometteuses grâce à leurs propriétés spécifiques intéressantes, en raison de leur faible densité, mais aussi à leur biodégradabilité et leur abondance du fait qu'elles proviennent de ressources renouvelables.

En effet, l'utilisation des matériaux composites renforcés par des fibres végétales a connu un grand essor dans plusieurs secteurs industriels. Plusieurs recherches ont été menées afin de caractériser les composites renforcés par des fibres naturelles de lin, jute, chanvre, sisal, bambou...etc. Parmi ces différents renforts utilisés, les fibres de sisal sont les plus répandues grâce à leurs performances mécaniques intéressantes ainsi que leur grande disponibilité en Algérie.

Les fibres végétales sont principalement composées de cellulose, hémicelluloses et lignine. Elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques en faibles proportions. Ces fibres trouvent beaucoup d'applications dans le domaine du textile (habillement, ameublement). Elles commencent à trouver des débouchés dans d'autres secteurs d'activité industrielle (emballage, automobile).

Par cette étude, nous nous impliquons à ce domaine de recherche, afin de s'initier et de contribuer à la compréhension des matériaux composites biosourcés.

### **Problématique**

L'objectif principal de ce mémoire est l'élaboration et à la caractérisation de composites biosourcés à base de fibres naturelles de sisal et d'une matrice époxyde. Nous nous sommes intéressés en particulier à la réalisation et l'élaboration de quelques éprouvettes pour d'éventuels essais de traction. Par la suite des simulations de ce test, indispensable dans étude de caractérisation, ont été conduites grâce au code de calcul par éléments finis ABAQUS.

### **Articulation du mémoire**

Après une introduction générale, ce mémoire est composé de cinq chapitres. Le premier chapitre a été consacré à une recherche bibliographique sur les matériaux composites, leur classification, avantages, ainsi que leur domaines d'application. Le second chapitre a été réservé à l'état de l'art sur les différents types des fibres naturelles, leurs morphologies, leurs compositions chimiques ainsi que leurs caractéristiques et propriétés mécaniques. Le troisième chapitre qui représente la partie pratique de ce mémoire, a été dédié à l'élaboration

de bio composites à matrice époxyde et renfort fibres de sisal. Le quatrième chapitre à été réservé à une étude et à une modélisation des propriétés micromécanique des biocomposites élaborés. Le dernier chapitre à été dédié à la modélisation et à simulation numérique du comportement mécanique en traction des biocomposites époxyde/sisal par le code de calcul ABAQUS. Les divers résultats obtenus sont repris enfin dans la conclusion qui constitue la clôture de ce travail.

# Chapitre 1

## Généralités sur les matériaux composites

### 1.1 Introduction

Depuis leur avènement dans les années trente et jusqu'à nos jours, les matériaux composites à matrices métalliques, élastomères, polymères ou même céramiques, offrent aux industriels et aux designers des possibilités nouvelles d'associer fonction, forme et matériaux pour la réalisation de systèmes de plus en plus performants. Des processus nouveaux de conception, d'industrialisation et de fabrication, permettent d'étendre les possibilités techniques et de mieux satisfaire aux besoins parfois contradictoires (poids, fonctions...) auxquels les matériaux homogènes classiques répondent difficilement. La compétition reste très dure entre les solutions composites et les matériaux classiques [1].

### 1.2 Définition

Un matériau composite est par définition, tout alliage ou matière première comportant un renfort sous forme filamentaire. Il nécessite l'association intime d'au moins deux composants : le renfort et la matrice qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser, ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, l'interface. Contrairement aux matières premières classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques, celles des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise en même temps le matériau et le produit. Actuellement, les composés à matrice organique représentent plus de 99% des matériaux composites ; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale [2].

### 1.3 Classification des matériaux composites

Les matériaux composites dits de "grande diffusion GD" dont les propriétés mécaniques sont plutôt faibles mais d'un coût compatible avec une production en grande série. Les matériaux composites dits "hautes performances HP", présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important. Ce sont les plus employés en aéronautique et dans le spatial.

#### 1.3.1 Composite hautes performances (HP)

Le terme « composites hautes performances » concerne les matériaux constitués d'un assemblage de couches ayant une matrice métallique ou plastique (élastomère) renforcés (partiellement ou totalement) par des fibres continues, dont les propriétés mécaniques spécifiques (résistance spécifique (R/d) et module spécifique (E/d) sont nettement supérieurs à celles des matériaux métalliques conventionnels. Ces propriétés dépendent du type de

renfort utilisé, du taux volumique de renfort dans la matrice, de l'orientation des fibres de renfort dans les différentes couches, du type de la matrice utilisé et de la direction dans laquelle ces propriétés sont caractérisées [3]. Les matériaux composites « hautes performances HP » présentant des propriétés mécaniques spécifiques élevées et un coût unitaire important. Ce sont les plus employés en aéronautique et dans le spatial.

### 1.3.2 Composite grandes diffusions (GD)

Les composites « grandes diffusions GD » sont caractérisés par des propriétés mécaniques plutôt faibles mais d'un coût compatible avec une production en grande série. Ils représentent 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort avoisinant 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters (95% des résines thermodurcissables) avec des fibres de verre (plus de 99% des renforts utilisés). Renforts et matrices sont à des coûts voisins [4].

### 1.4 Avantages des matériaux composites

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels à savoir [5]:

- légèreté
- résistance mécanique et chimique
- maintenance réduite
- liberté de formes
- tenue aux chocs et au feu
- isolation thermique et/ou phonique

### 1.5 Domaines d'utilisation

Le développement des composites modernes est dû essentiellement aux besoins de plus en plus poussés de l'industrie, surtout dans les secteurs (Figure 1.1) :

- Aérospatial
- Aéronautique
- Défense
- Sport
- Biomécanique

Dans tous ces secteurs les impératifs de légèreté, rigidité et résistance rendent les composites indispensables.



1. Militaire



2. Industrie navale



3. Aérospatiale



4. Energie



5. Sport

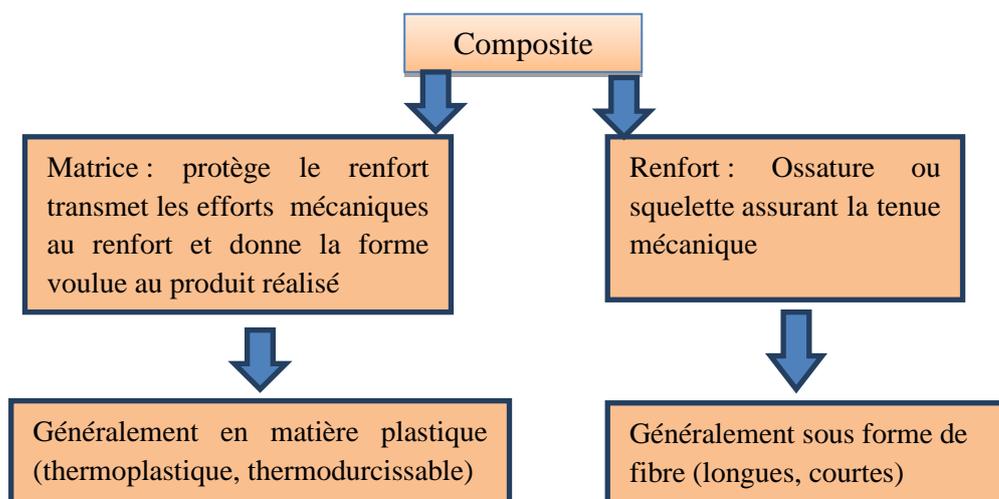


6. Aéronautique

**Fig. 1.1** Domaines d'application des matériaux composites

**1.6 Constituants de base des matériaux composites**

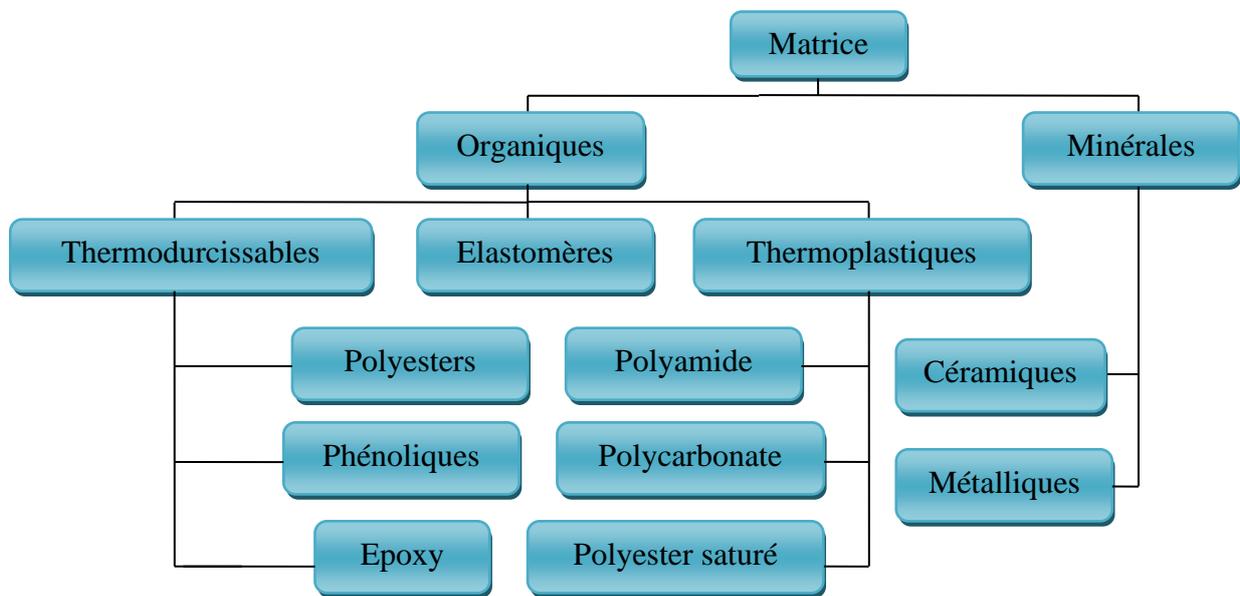
Un matériau composite est constitué d'un renfort (ossature du matériau) qui assure la tenue mécanique et d'une matrice (enveloppe ou peau du matériau) qui est généralement polymérique (résine thermoplastique ou thermodurcissable) ou métallique, son rôle est d'assurer la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers le renfort (Figure 1.2).



**Fig. 1.2** Constituants de base des matériaux composites

### 1.6.1 Matrice

La matrice est une phase continue qui assure la cohésion, transfère et répartit les contraintes, protège des agressions extérieures les renforts et commande la mise en œuvre. C'est un liant qui maintient en place la dispersion des fibres, les protège physiquement et chimiquement et assure en plus la liaison mécanique entre les éléments de renfort. Selon le cas d'application et le type de composite, elle se présente sous plusieurs formes, organique, métallique et minérale. En général et pour les composites plastiques, la matrice est constituée d'une résine polymère. On distingue deux grandes familles [6] :



**Fig. 1.3** Différentes familles de matrices

#### 1.6.1.1 Résines thermodurcissables (TD)

Aujourd'hui, les secteurs aéronautique et automobile utilisent majoritairement des matériaux composites thermodurcissables. Les matériaux composites thermodurcissables sont mis en forme sous des conditions normales de température puis ils sont montés en température et pression (autoclave) pour permettre la polymérisation et obtenir de façon irréversible la forme définitive. Les liaisons entre macromolécules obtenues sont des liaisons chimiques fortes (liaison covalente) qui rendent la transformation irréversible : les composites à base de polymères thermodurcissables sont très difficilement recyclables. Une résine époxyde (EP) liquide (conservée à froid avant emploi à  $-18^{\circ}\text{C}$ ) est le plus souvent associée à des fibres de carbone pour ses bonnes caractéristiques mécaniques [7].

**Tableau 1.1** Caractéristique mécaniques de résines TD thermodurcissables usuelles [8]

Matrice TD	$\rho(\text{kg/m}^3)$	E (Mpa)	G (Mpa)	$\nu$	$\sigma_r(\text{Mpa})$	A%
Epoxydes	1200	4500	1600	0.4	130	2
Phénoliques	1300	3000	1100	0.4	70	2.5
Polyesters	1200	4000	1400	0.4	80	2.5
Vinylesters	1150	3300	–	–	75	4
Polycarbonates	1200	2400	–	0.35	60	–
Silicones	1100	2200	–	0.5	35	–
Uréthanes	1100	700 à 7000	–	–	30	100
Polyamides	1400	4000 à 19000	1100	0.35	70	1

### 1.6.1.2 Résines thermoplastiques (TP)

Les thermoplastiques (TP) présentent à l'état vierge de bonnes caractéristiques mécaniques. Un renforcement de fibres courtes leur confère une tenue mécanique et thermique améliorée et une bonne stabilité dimensionnelle. Les principales résines thermoplastiques utilisées dans la fabrication des composites sont :

- les polyamides (PA)
- les polytéréphtalates éthylénique (PET) et butylénique (PBT)
- le polycarbonate (PC)
- les polyoxides de phénylène (PPO ou PPE)
- les polyoxyméthylène (POM)
- le polypropylène (PP) est un polymère semi-technique, peu onéreux, assez stable en température, mais combustible.

D'autres résines TP commencent à être utilisées pour leurs propriétés de thermo-stabilité (tenue thermique supérieure à 200°C) et de bonne tenue mécanique :

- le polyamide-imide (PAI)
- le polyéther-imide (PEI)
- le polyéther-sulfone (PES)
- le polyéther-éther-cétone (PEEK)

**Tableau 1.2** Caractéristique mécaniques de résines TD thermoplastiques usuelles [8]

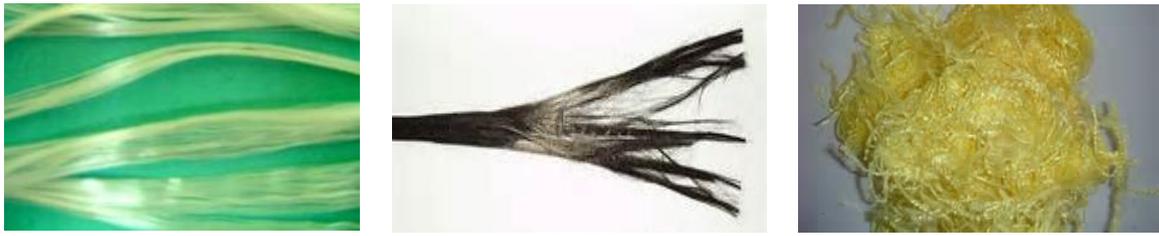
Matrice TP	$\rho(\text{kg/m}^3)$	E (Mpa)	G (Mpa)	$\nu$	$\sigma_r(\text{Mpa})$	A%
PP	900	1200	–	0.4	30	20 à 400
PPS	1300	4000	–	–	65	100
PA	1100	2000	–	0.35	70	200
PES	1350	3000	–	–	85	60
PEI	1250	3500	–	–	105	60
PEEK	1300	4000	–	–	90	50

**Tableau 1.3** Comparaison entre les caractéristiques des résines (TP) et (TD) [8]

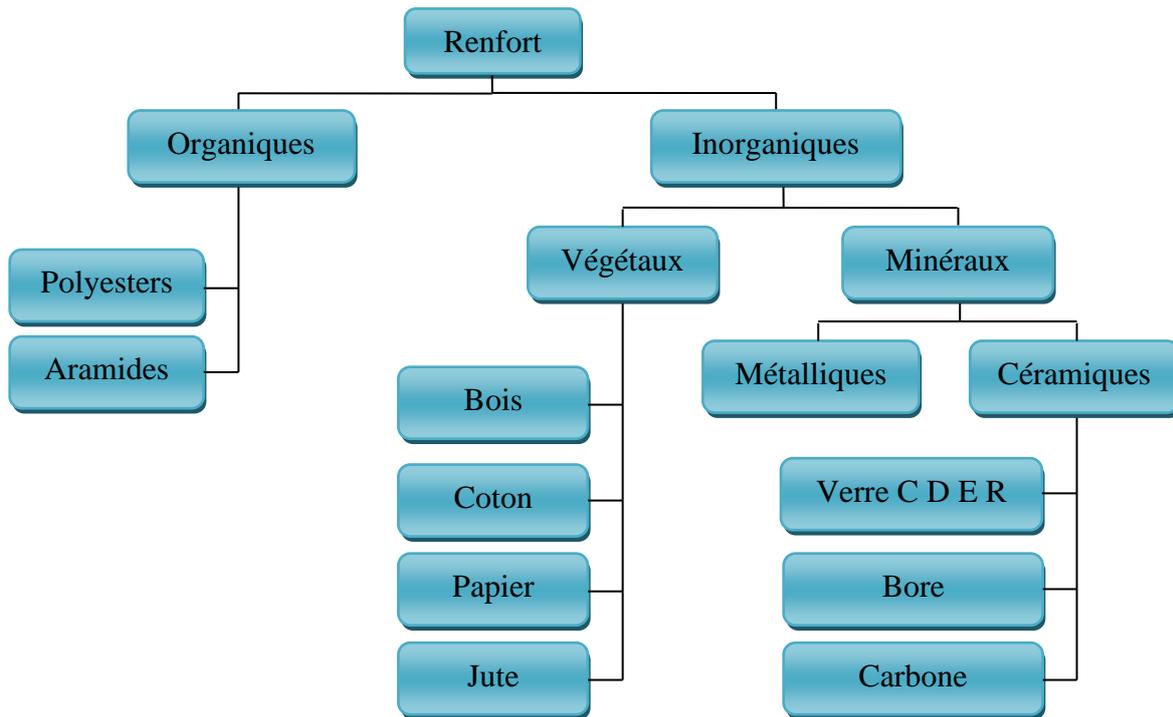
	Thermoplastique	Thermodurcissable
Etat de base	Solide – prête à l'emploi	Liquide visqueux
Stockage	Illimité	Réduit (précautions à prendre)
Mouillabilité des renforts	Difficile	Facile
Moulage	Chauffage+refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Court	Long(x2) (polymérisation)
Terme au choc	Assez bonne	Limitée
Terme thermique	Réduite (<130°)	Meilleure (>150°)
Chutes et déchets	Recyclable	Perdus ou utilisés comme
Condition de travail	propreté	Emanation de COV

### 1.6.2 Renfort

C'est une phase discontinue et souvent filamentaire à très hautes caractéristiques mécaniques, qui assure le principal des caractéristiques mécaniques du composite (résistance et rigidité, tenue aux chocs). Le renfort a pour rôle d'assurer la fonction mécanique. Il existe deux types de renforts : les particules qui sont principalement utilisées dans les matrices métalliques et les fibres employées surtout avec les composites plastiques. Ces renforts peuvent être inorganiques comme le verre, la silice, le carbone et les céramiques ou bien organiques comme les aramides, les polyesters, les polyamides, les fibres végétales et les fibres animales. En fonction des propriétés mécaniques recherchées, on rencontre plusieurs architectures de renfort pour composites, unidimensionnelle où les fibres sont orientées dans la même direction, bidimensionnelle comme pour le cas des surfaces tissées ou non tissées et tridimensionnelle constituée de fibres orientées suivant plusieurs directions dans l'espace [6]. les principaux matériaux de renforts utilisés pour les composites plastiques sont: les fibres de verre, de carbone et d'aramide (Figure 1.4).



(a) (b) (c)  
**Fig. 1.4** Les principales fibres: (a) fibres de verre, (b) fibres de carbone, (c) fibres d'aramide



**Fig. 1.5** Différentes familles de renfort pour composites

**1.6.2.1 Fibres de verre**

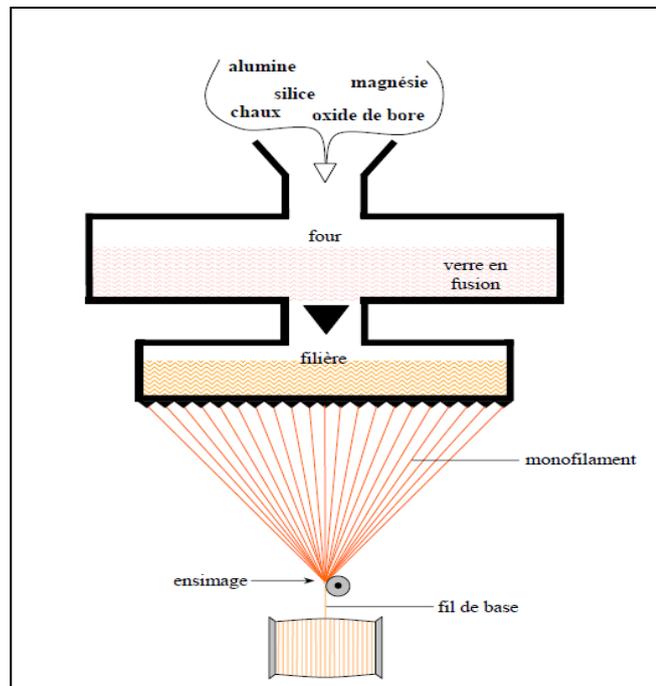
Sous forme massive, le verre est caractérisé par une grande fragilité et une forte sensibilité à la fissuration. Au contraire, le verre employé sous forme de fibres de faibles diamètres présente de très bonnes caractéristiques mécaniques. Ces fibres de verre sont obtenues par extrusion du verre à travers une filière percée de trous de 1 à 2 mm de diamètre. Les fibres de verre sont ensuite étirées jusqu'à obtenir des diamètres de 5 à 15 µm à la fin du processus elles sont enduites et bobinées (roving) (Figure 1.6). Les fibres de verre constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elles sont obtenues à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). Ils ont un excellent

rapport performance-prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction [9]. On distingue trois types de fibres:

**E** : pour les composites de grande Diffusion et les applications courantes

**R** : pour les composites hautes performances

**D** : pour la fabrication de circuits Imprimés (propriétés diélectriques).



**Fig. 1.6** Processus d'élaboration des fibres de verre

### 1.6.2.2 Fibres de carbone

Elles sont fabriquées à partir de fibres de polymère de base appelé précurseur qui se présente lui-même sous forme de fibres orientées préalablement tissées, et carbonisées sous tension en plusieurs étapes, oxydation (100 à 200 C°), puis pyrolyse (1500-2500 C°). Selon la température et le temps de cuisson, les fibres présentent une "haute résistance" (HR) ou un "haut module" (HM). Généralement on utilise comme précurseur des fibres acryliques élaborées à partir du poly acrylonitrile (PAN) (Figure 1.7). C'est la fibre la plus utilisées dans les applications hautes performances. Les fibres sont produites à partir de précurseurs chimiques comme le poly acrylonitrile ( $[CH_2-CH-CH]_n$ ). Elles servent notamment à renforcer certains matériaux composites [10]. Les fibres de carbone ont certains avantages :

- Elles sont rigides
- Elles résistent bien à la traction, tout comme à la compression.
- Elles sont près de 70 % plus légères que l'acier.
- Ces caractéristiques intéressent beaucoup l'industrie



**Fig. 1.7** Fibres acryliques élaborées à partir du poly acrylonitrile (PAN)

### 1.6.2.3 Fibre d'aramide

L'aramide est un polymère de la famille des aramides ou polyamides aromatiques, souvent appelé KEVLAR et dont le nom scientifique est le poly-para-phénylène-téréphtalamide. Les propriétés exceptionnelles de ce matériau proviennent de liaisons intermoléculaires fortes entre chaînes parallèles. Sa résistance à la traction est comparable à celle de l'acier mais pour une masse de trois à cinq fois moins. Les fibres d'aramide sont une classe de fibres de haute résistance à la chaleur et à haute performance mécanique (Figure 1.8). Il est fabriqué à partir de fibres de haute élasticité, mais ont une rupture ductile, plutôt que de rupture fragile qui caractérise les fibres de carbone. Sont employés dans les applications aéronautiques et militaires des applications telles que des gilets pare-balles et dans la fabrication de pièces composites [11], sur les roues de vélo ...etc.



**Fig. 1.8** Fibre d'aramide

### 1.6.2.4 Architecture des renforts

La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement. Il est donc impératif de jouer sur la texture et sur la géométrie des renforts pour créer une architecture améliorée. Les renforts sont assemblés dans le but de faciliter leur mise en forme. On peut distinguer plusieurs catégories de renforts :

- Les mats
- Les tissus UD (unidirectionnels)

- Les tissus bidirectionnels
- Les tissus multidirectionnels.

### Les mats

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus aléatoirement distribués dans un plan sans aucune orientation préférentielle (Figure 1.9.a). Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines, suivant la mise en œuvre. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan [9].

### 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 [8],[12] Taux de déséquilibre très grand (Figure 1.9.b).

### Les tissus

Le tissu destiné au renfort de composites est une surface souple (Figure 1.9.c), constituée par un assemblage régulier de fils tissés ou torsadés, obtenue par entrecroisement des mèches selon deux directions perpendiculaires, chaîne et trame. Les tissus sont réalisés sur des métiers à tisser, ils peuvent avoir différentes armures [13]. On distingue principalement : la toile ou le taffetas, le sergé et le satin (Figure 1.10).

#### *Taffetas (toile)*

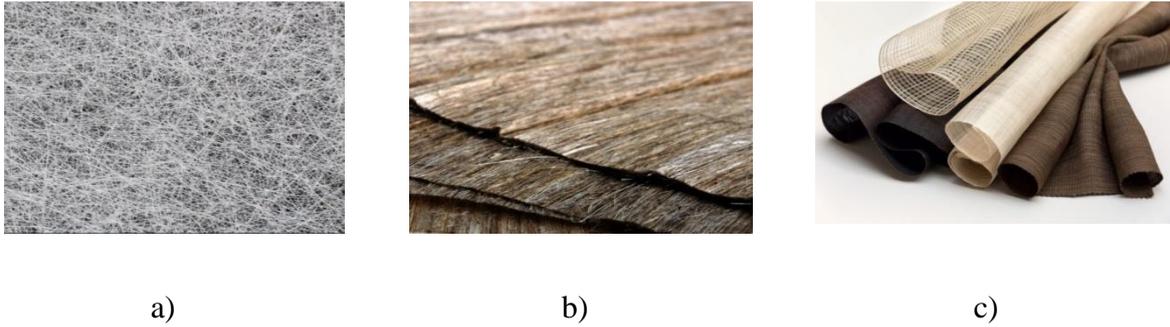
Chaque fil de chaîne passe dessus puis dessous chaque fil de trame, et réciproquement (Figure 1.10.a). Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais est peu déformable pour la mise en œuvre. Les nombreux entrecroisements successifs génèrent un embuvage important et réduisent les propriétés mécaniques [12].

#### *Sergé*

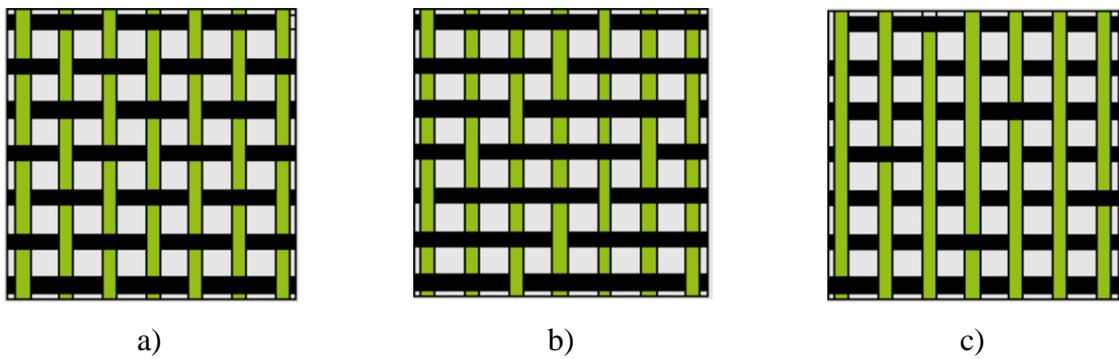
Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n) fils de trame et chaque fil de trame flotte au-dessus de (m) fils de chaîne (Figure 1.10 .b). Armure de plus grande souplesse que le taffetas ayant une bonne densité de fils [12].

#### *Satin*

Chaque fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs (n-1) fils de trame et réciproquement (Figure 1.10.c). Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté. Ces tissus sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ce type de tissu présente une forte masse spécifique [12].



**Fig. 1.9** Différentes architectures des renforts de composites : a) mats de verre, b) tissu unidirectionnel (UD), c) tissu bidirectionnel



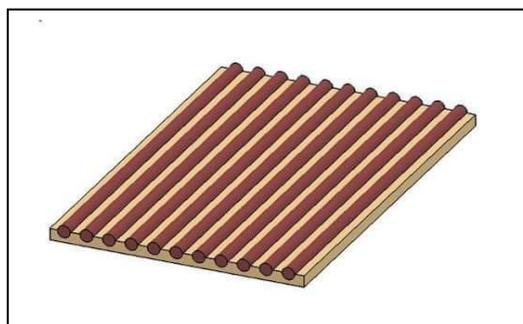
**Fig. 1.10** Tissus bidirectionnels : a) Le taffetas, b) Le sergé, c) Le satin

**1.7 Matériaux composites structuraux**

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types : les monocouches, les stratifiées et les sandwichs.

**1.7.1 Monocouches**

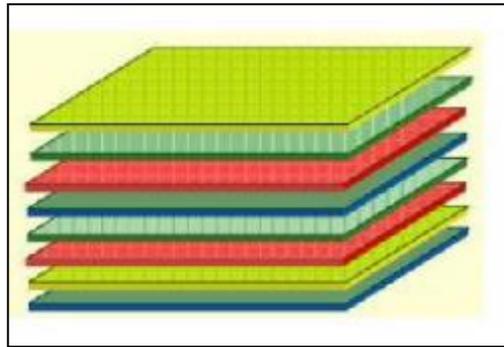
Représentent l'élément de base de la structure composite (Figure 1.11). Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes [14].



**Fig. 1.11** Composite monocouche

### 1.7.2 Stratifiés

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts imprégnés de résines (Figure 1.12). Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles. Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par de la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique [14].

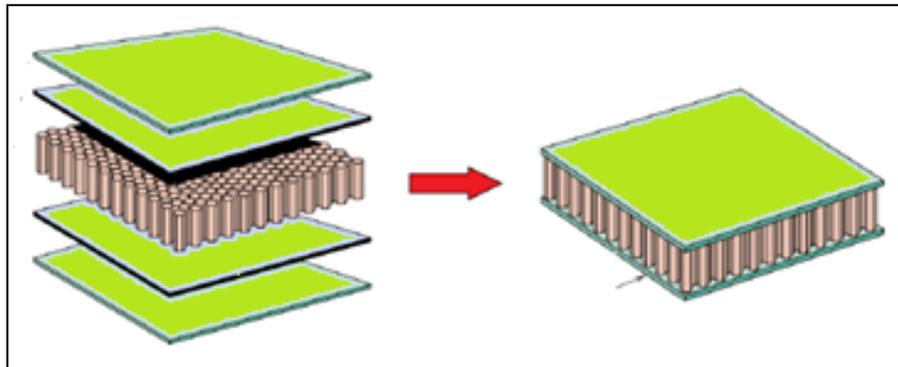
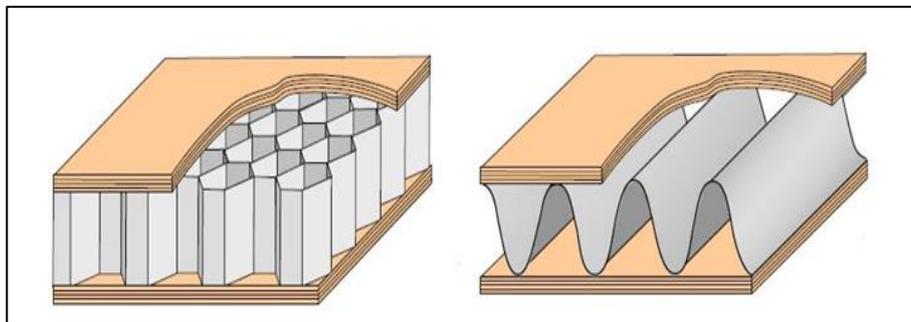


**Fig. 1.12** Composite stratifiée

### 1.7.3 Sandwichs

Ce sont des matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et de faible résistance (Figure 1.13). L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. L'assemblage des peaux avec l'âme se fait généralement par collage, par soudage ou par polymérisations dans les moules dans le cas des composites plastiques. Les âmes peuvent être pleines (bois, mousse, ...etc.) ou creuse (alliages métalliques légers, papier, ...etc.). Les peaux sont généralement des stratifiées ou des feuilles d'alliage légers. Les âmes les plus utilisées sont de type nid d'abeilles, âme ondulée (Figure 1.14) ou mousse [15]. Les matériaux les plus couramment utilisés sont :

- pour les âmes pleines
  - le balsa ou bois cellulaire
  - diverses mousses cellulaires
  - des résines chargées de microsphères creuses de verre, appelées mousses syntactiques
- pour les âmes creuses, essentiellement nid d'abeilles et profilés
  - des alliages métalliques légers
  - du papier kraft (enduit ou non de résine)
  - du papier polyamide, type papier Nomex

**Fig. 1.13** Composite sandwich**Fig. 1.14** Composite sandwich

## 1.8 Mise en œuvre des matériaux composites

### 1.8.1 Moulage par injection

Le moulage par injection est l'une des méthodes les plus importantes appliquées pour former des produits en plastique, surtout de coque mince. Parmi les avantages du moulage par injection on peut citer : le court cycle de fabrication, le faible coût, le bon état de surfaces et les bonnes propriétés mécaniques du produit final. Ce qui diffère entre ce procédé de fabrication et l'extrusion, c'est que la vis dans ce procédé de mise en forme joue un autre rôle très important qui est le rôle d'un piston. Une fois la matière arrivée à la troisième zone, la vis recule en dosant une quantité bien définie de matière qui sera ensuite injectée dans un moule pour la mise en forme. Ceci représente une autre différence par rapport à l'extrusion, au terme de laquelle le produit final est sous forme d'un profilé bien déterminé. Ce procédé nous permet donc de fabriquer des pièces de géométrie plus complexes et de meilleure qualité (Figure 1.15) présente les la procédé par injection [16].

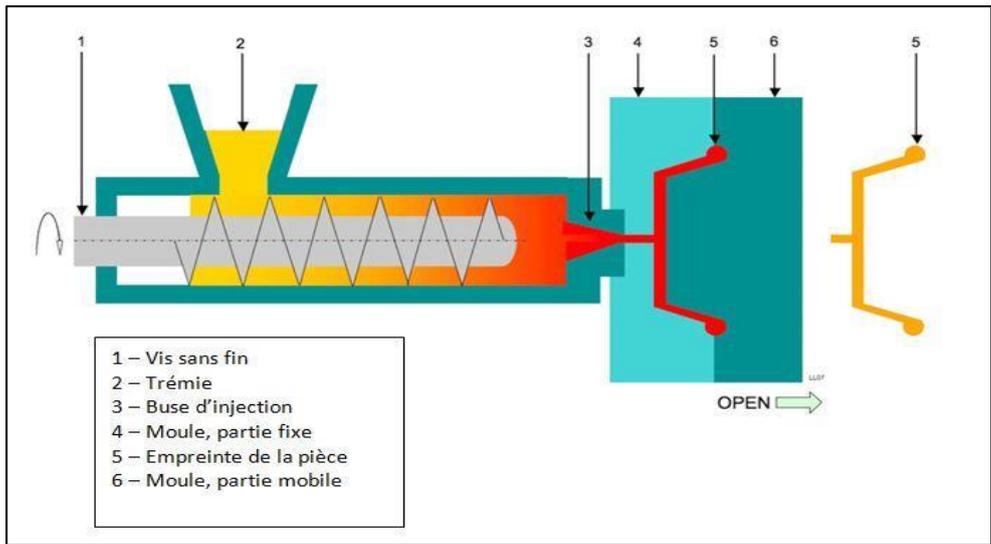


Fig. 1.15 Moulage par injection

**1.8.2 Moulage par compression**

Le moulage de matériaux composites avec la technique de compression basse pression est mis en place à l'aide d'une presse à compression, d'un moule et d'un contre-moule rigide (Figure 1.16). Dans un premier temps, le mat (renfort) est disposé sur le moule inférieur. La résine est ensuite versée sur le mat. La presse est alors fermée et mise sous pression. Le moule et le contre-moule pressent la résine et le mat, l'obligeant à former un matériau composite et à se répartir uniformément, en évacuant le surplus de matière via les orifices prévus à cet usage. Lorsque le matériau est dur, les moules peuvent être séparés pour procéder au démoulage. Dans certains cas, une étape d'ébavurage sera nécessaire [17].

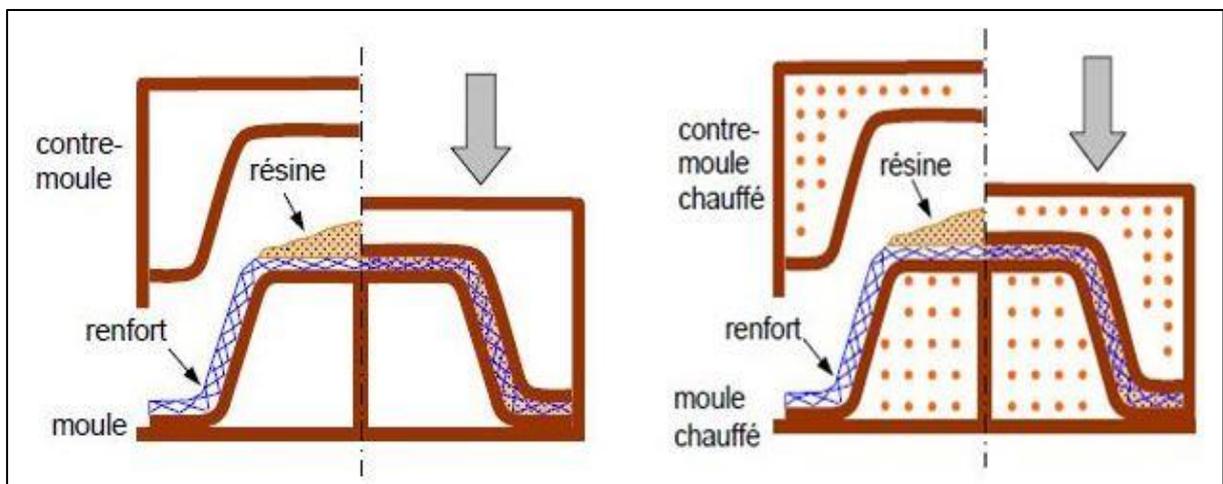


Fig. 1.16 Moulage par compression

### 1.8.3 Moulage au contact

Le moulage par contact (ou moulage au contact) (Figure 1.17), est une technique de moulage de matériaux composites relativement ancienne. Si elle est simple en théorie, elle demande en pratique un savoir-faire précis, et doit être mise en place par des personnes expérimentées. Idéal pour la fabrication de pièces lourdes ou volumineuses, le moulage par contact est principalement utilisé pour les petites séries [17].

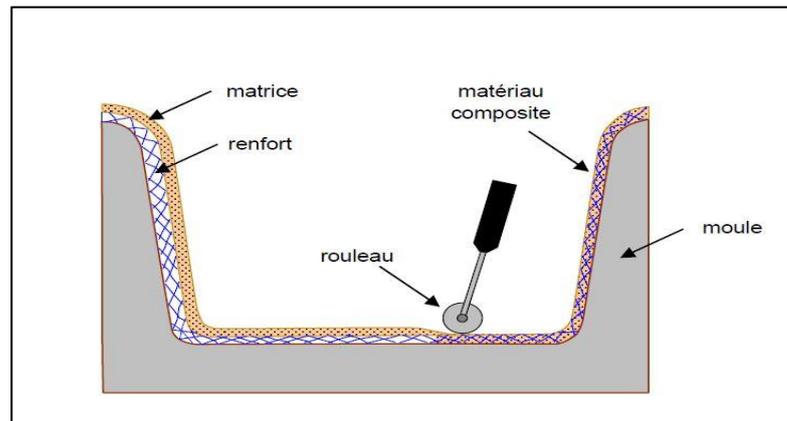


Fig. 1.17 Moulage au contact

### 1.8.4 Moulage par projection

Le principe consiste à projeter un jet de résine, dans lequel se dépose, à l'aide d'un coupeur, des fibres de verre de 3 à 4 cm de longueur qui vont se plaquer contre les surfaces du moule. Une opération de bullage est nécessaire pour homogénéiser la matière et retirer l'air emprisonné (Figure 1.18). Ce procédé a l'avantage d'utiliser un outillage assez simple, avec une certaine rapidité d'exécution [17].

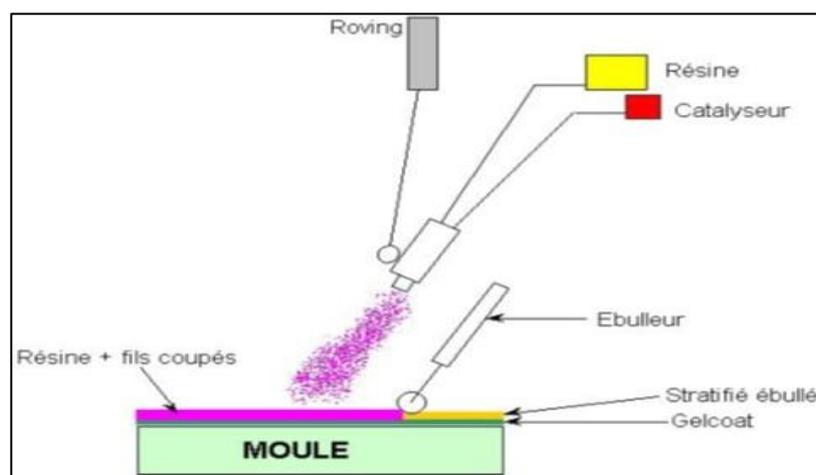


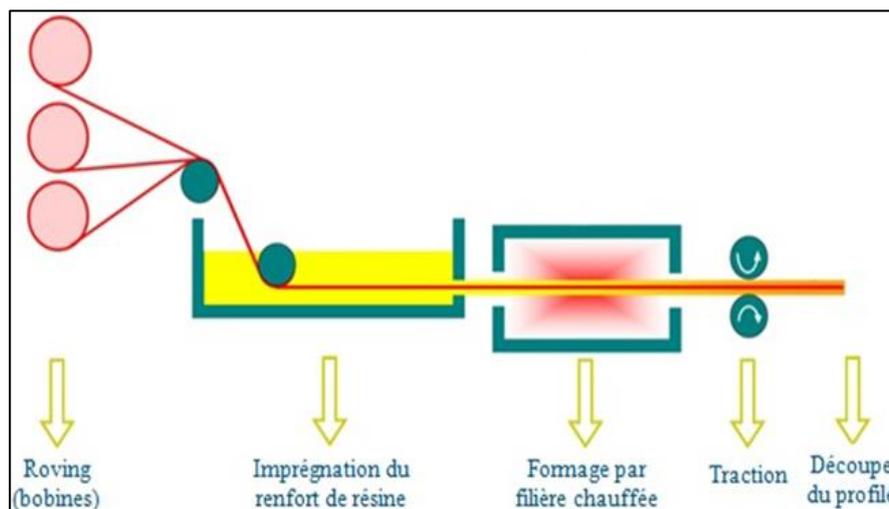
Fig. 1.18 Moulage par projection

### 1.8.5 La pultrusion

La pultrusion est un procédé industriel modulable de fabrication de matériaux composites à matrice organique (thermoplastique ou thermodurcissable), qui permet l'obtention en continu de profilés de section géométrique constante (Figure 1.19).

Comme exemples de produits pultrudés, citons :

- en génie électrique : chemins de câble, perches isolantes, échelles
- parmi les applications anticorrosion : conduites pour fluides, garde-corps, boulonnerie.
- en sports et loisirs : cannes de hockey, bâtons de ski, cannes de golf, flèches, lattes de voile ou de cerf-volant.
- dans le bâtiment : boulons d'ancrage, panneaux de façade, câbles de traction, poutres, signalisations, fenêtres, bancs de stade.
- dans les transports : assemblages de panneaux isolants [18].

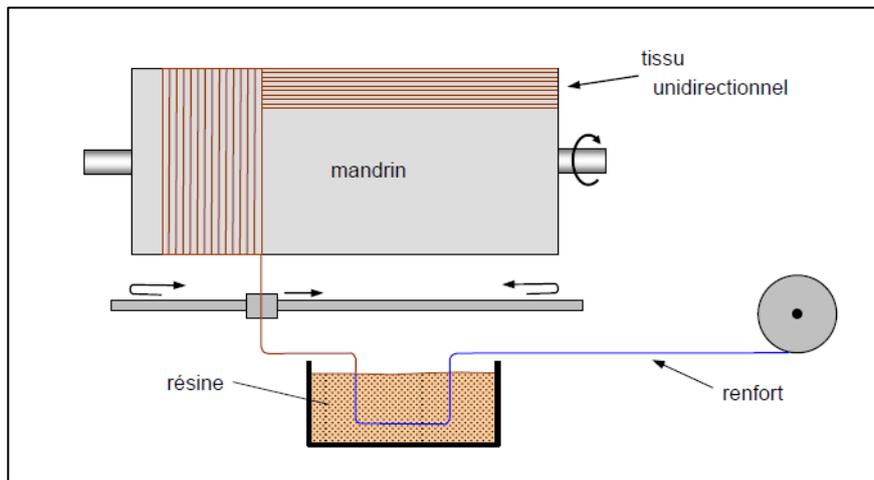


**Fig. 1.19** Moulage par pultrusion

### 1.8.6. Enroulement filamentaire

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation (Figure 1.20). Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80 % en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques mécaniques. L'investissement en matériel est très important. Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements (et par

conséquent de stratifications) sont obtenus. On distingue : l'enroulement circconférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire [15].



**Fig. 1.20** Moulage par enroulement filamentaire

**Références bibliographiques du chapitre 1**

- [1] Pascal Celle, Marc Marzano, Les matériaux composites, Meudon : ANFA (Association nationale pour la formation automobile), 2014.
- [2] Louis Berreur, Bertrand de Maillard, Stanislas Nösperger, Etude prospective stratégique sur les matériaux composites, Rapport final, Paris: la Direction Générale de l'Industrie et des Technologies, 2001-2002.
- [3] Senlis, Matériaux composite : Centre Technique des Industries mécaniques.
- [4] Bahlouli Nadia, Cours Matériaux Composites, DESS Mécanique avancée et Stratégie industrielle. 2004.
- [5] <https://grupfabregas.com/fr/les-avantages-des-materiaux-composites-pour-les-travaux-de-genie-civil/>
- [6] Marianne Le Troedec, Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulosiques, Thèse de doctorat, Limoges: Université De Limoges, Ecole Doctorale Sciences-Technologies-Santé, 2009.
- [7] Diana Martins, Nathalie Lopes, Mathilde Fournier, Marc Delage, Philippe Nadal, Colas Hennion, Etude de la filière des matériaux composites thermoplastiques, (DECI), Mai 2014.
- [8] <https://www.mecastyle.com/calcul-de-structure-materiau-composite>
- [9] Abdellah Houideg, Transfert de charge et frottement Fibre/ Matrice d'un Matériau Composite, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Mémoire de Magister, 2012.
- [10] <https://www.futura-sciences.com/sciences/definitions/physique-fibre-carbone-16081/>
- [11] <https://www.castrocompositesshop.com/fr/28-aramide-kevlar>
- [12] <http://aeromodelisme.forumactif.org/t113-les-differentes-fibres-utilise-pour-le-composite.>
- [13] Kamila Rouam, Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique, : Université M'hamed Bougara, Boumerdes , Mémoire de Magister 2014.
- [14] Tahar Masri, Contribution à la modélisation des phénomènes de rupture des matériaux composites, Université Mohamed Khider , Biskra, Mémoire de Magister 2006.
- [15] Jean-Marie Berthelot, Mécanique des Matériaux et Structures Composites, ISMANS Institut Supérieur des Matériaux et Mécanique Avancés, Le Mans ,2010.
- [16] Mokhles Benali, Effet du traitement thermique des fibres sur les propriétés des composites bois-polymère, Thèse de doctorat, : Université du Québec, 2016.
- [17] <https://www.rotteleur-composites.com/>
- [18] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-plastiques-et-composites-tiaam/archive-1/fabrication-de-profiles-en-composites-par-pultrusion-a3730/>

## Chapitre 2

### Les fibres naturelles

#### 2.1 Introduction

Les fibres naturelles ont récemment attiré l'attention des scientifiques et des ingénieurs en raison des avantages qu'elles fournissent par rapport aux fibres de renforcement classiques comme par exemple les fibres de verre. Le développement des composites comportant des fibres naturelles est donc un sujet d'intérêt depuis les deux dernières décennies. Ces fibres naturelles sont des fibres à faible coût et à faible densité et plus légères que les fibres synthétiques et les fibres artificielles, elles possèdent des propriétés spécifiques (mécaniques, physiques et chimiques). Elles sont biodégradables, légères et non corrosives. De nos jours, ces fibres connaissent un grand essor dans divers secteurs comme la construction des bâtiments, des systèmes mécaniques, la production textiles et dans la fabrication des composites plastiques destinés à la construction des véhicules [1].

#### 2.2 Les fibres naturelles

Les fibres naturelles sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et lignine. Elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques en faibles proportions. Les fibres végétales trouvent beaucoup d'applications dans le domaine du textile (habillement, ameublement). Vu leurs propriétés mécaniques spécifiques et leur caractère renouvelable, elles commencent à trouver des débouchés dans d'autres secteurs d'activité industrielle (emballage, automobile). Les fibres naturelles sont classées en fonction de leurs origines en :

**Les fibres minérales** : Elles sont de longueur limitée, à l'exception des types particuliers tels que ceux de l'amiante, qui sont maintenant connus par leur caractère toxique et nuisible pour la santé humaine (cancérogénicité). Aujourd'hui il est devenu strictement interdit de l'utiliser quelque soit la façon.

**Les fibres animales** : Ce sont les plus utilisées dans la fabrication des textiles par les filateurs à main, comme la laine de mouton et la de soie. Toutes les fibres animales n'ont pas les mêmes propriétés, et même au sein d'une même espèce, la fibre n'est pas homogène.

**Les fibres végétales**: Les fibres végétales sont des matériaux filamenteux issus de la biomasse. Elles peuvent être extraites du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante cultivée, des arbres et des herbes. Elles sont susceptibles d'être filées pour fabriquer des fils et des cordes. Elles sont tissées, tricotées ou tressées pour confectionner des textiles indispensables aux besoins quotidiens de la société. La fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de leur origine. En effet, les dimensions des filaments végétales dépendent de

l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante [2],[3]. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale [4]. L'utilisation de fibres végétales (bois, lin, chanvre) comme éléments de renfort dans les matériaux polymères, thermoplastiques ou thermodurcissables, en remplacement des fibres de verre, est un concept déjà industrialisé et commercialisé. On trouve ces composites dans les meubles de jardin, les plinthes et huisseries, les pièces d'habillage intérieur d'automobiles de toutes marques. Une partie du compartiment de roue de secours de la Mercedes classe A est constituée d'un composite mélangeant polypropylène et fibres d'abacca, une espèce de bananier. L'idée de remplacer les fibres de synthèse, comme les fibres de verre, le renfort dominant sur le marché, n'est pas nouvelle. Mais dans un contexte dit de développement durable où le recours à des ressources renouvelables est encouragé, ce remplacement est désormais considéré comme une voie sérieuse et prometteuse.

### 2.2.1 Les fibres animales

Comme montré sur la figure 2.1, les fibres animales les plus célèbres sont la soie, la laine et le poil d'animaux :

**La soie**: La soie est une fibre protéique «naturelle», dont certaines formes peuvent être tissées en textiles. Le type de soie le plus connu est obtenu à partir de cocons fabriqués par les larves du ver à soie « Bombyx mori » élevées en captivité. L'élevage des soies s'appelle la sériciculture. Les fibres dégommées de Bombyx mori ont un diamètre de 5-10  $\mu\text{m}$ . L'aspect chatoyant pour lequel la soie est appréciée provient de la structure transversale en forme de prisme triangulaire des fibres qui permet au tissu de soie de réfracter la lumière entrante sous différents angles [4].

**La laine** : La laine est la fibre dérivée de la fourrure des animaux de la famille « Caprinae », principalement des moutons. Les cheveux de certaines autres mammifères tels que les chèvres, les alpagas et les lapins peuvent également être appelés laine [4].

**Le poil** : est une fibre animale qui provient de quelques animaux. Le cachemire provient du poil très fin de la chèvre du Cachemire *Capra hircus laniger* qui est très douce au touché; bien que d'une grande légèreté, elle tient très chaud. Comme elle est rare, elle est considérée comme une fibre de luxe. Jusqu'à une période récente, la plupart des vêtements en cachemire étaient fabriqués en Europe, aux États-Unis et au Japon, mais de nos jours c'est la Chine qui est de loin le plus gros producteur de cachemire brut, de cachemire fin et de vêtements en cachemire. La production mondiale de fibre de cachemire brute est estimée à 15 000 tonnes par an [4]. L'angora ou la fibre angora fait référence au duvet produit par le lapin Angora. Il

existe de nombreux types de lapins angoras – anglais, français, allemand et géant. Angora est prisé pour sa douceur, ses fibres minces d’environ 12-16 micromètres. Le bison est le sous-poil doux du bison américain. Le pelage du bison contient deux types de fibres différents. La couche principale est composée de fibres grossières (59 micromètres en moyenne) appelées poils de garde et de sous-poil (moyenne de 18,5 micromètres). Ce sous-poil est versé chaque année et se compose de fibres fines et douces qui sont très chaudes et protègent l’animal contre les conditions hivernales rigoureuses [3].

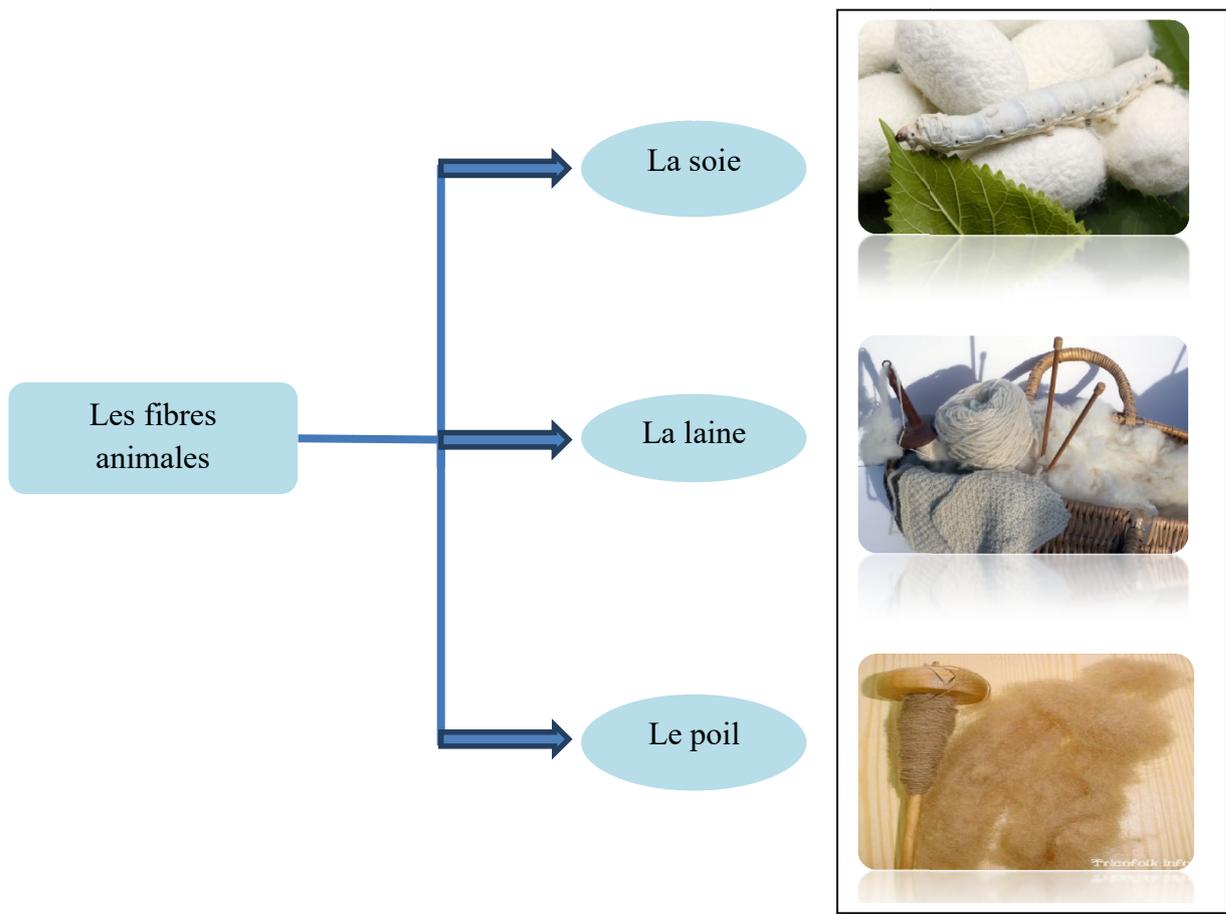


Fig. 2.1 Fibres naturelles d’origine animale

2.2.2 Les fibres végétales

Les fibres végétales sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et lignine. Elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques en faibles proportions. Les fibres végétales trouvent beaucoup d’applications dans le domaine du textile (habillement, ameublement). Vu leurs propriétés mécaniques spécifiques et leur caractère renouvelable, elles commencent à trouver des débouchés dans d’autres secteurs d’activité industrielle (emballage, automobile) [5]. Il existe

une grande variété de fibres végétales qui ont prouvé et justifié leur emploi de plus en plus croissant, les plus célèbres sont :

**Sisal** : Ses fibres très résistantes sont extraites des feuilles de la plante de sisal (agave sisalana) constituée par une rosette de grandes feuilles dont chacune peut contenir de 1000 à 1200 paquets de fibres à section triangulaire allant jusqu'à 2m de longueur. Cette plante est originaire de l'est du Mexique. Les méthodes de traitement pour l'extraction des fibres de sisal sont : rouissage, déflexion et laminage. Cette fibre sert à la fabrication de cordage, de tissus grossiers et de tapis. On l'utilise aussi pour fabriquer des disques de polissage [4],[6],[7].



**Fig. 2.2** Sisal

**Palmier** : Le palmier dattier est typiquement cultivé dans les oasis sahariennes. Il existe plus de 2600 espèces de palmiers. Son hauteur varie de 20 à 30m, avec un tronc cylindrique (le stipe), portant une couronne de feuilles (les palmes) qui sont divisées avec une longueur de 4 à 7m. Les feuilles âgées peuvent rester plusieurs années avant de tomber. Les palmes sont récoltées à la main en fin de maturité, dans la même saison, et séparées des rachis. La fibre peut être extraite des différentes parties du palmier [8], [4].



**Fig. 2.3** Palmier

**Le coton** : Fibre naturelle d'origine végétale, c'est la plante la plus utilisée dans le monde (50%). Les fibres de coton sont caractérisées par une bonne résistance avec une élasticité médiocre à cause du fort degré de cristallinité du micro fibrilles de la cellulose. Elles sont caractérisées par une grande légèreté qui permet de confectionner des textiles doux et confortables avec un coût raisonnable et faible [9]



**Fig. 2.4** Coton

**Le Kapok** : Fibre végétale extraite des fruits de plusieurs arbres tropicaux de la famille «Bombacaceae ». Cette fibre constituée par les poils fins et soyeux recouvrant les graines de kapokierou Ceibapentandra. Originnaire de Java, de l'Amérique du sud, d'Amérique centrale et d'Afrique. Le kapokier que l'on rencontre principalement en Indonésie et en Thaïlande peut atteindre 30 à 40 m de hauteur. Le fibre de kapok est très légère et non tissée, elle possède de bonnes qualités thermiques et une bonne imperméabilité Aujourd'hui, elle est principalement employée comme matériau de remplissage pour rembourrer les matelas, les oreillers et les coussins [9].



**Fig. 2.5** Kapok

**Le chanvre** : Le chanvre (*Cannabis Sativa*) est une plante annuelle herbacée à feuilles palmées contenant des vaisseaux dans le cœur ligneux (xylème) comme le bois dur. Il est cultivé pour sa tige qui contient les fibres longues (la filasse) sur les parties externes et qui est constituée d'une forte proportion de fibres intérieures plus courtes fortement lignifiées (son bois). La filasse qui représente environ 30% de la masse sèche de la tige est utilisée dans le textile, les textiles techniques, le papier et l'isolation. Le bois de chanvre quant à lui, représente environ 70% de la masse de la tige. Il est également utilisé dans les matériaux de construction (béton de chanvre), ainsi que pour le paillage des sols [10].



**Fig. 2.6** Le chanvre

**Ramie** : La ramie (*Boehmerianivea*) est un arbuscule de la famille des urticacées. Elle se présente sous la forme d'une touffe formée de tiges d'environ 1,5 à 3 m de hauteur avec de grandes feuilles. L'extraction de la fibre nécessite un décortiquage et un dégommeage très poussé. La cellule élémentaire ressemblant d'avantage à celle du coton qu'à celle du lin, peut atteindre 17 cm de longueur ; elle présente une concentration en cellulose importante, un degré de polymérisation élevé. Sa blancheur et son aspect soyeux la destinent à l'habillement [7].



**Fig. 2.7** Ramie

**Alfa** : Le nom latin d'alfa est *Stipa Tenacissima*. La plante est une graminée et est un membre de la famille des herbes. L'alfa est endémique dans la région méditerranéenne d'ouest, une région plutôt sèche grâce à la faible consommation d'eau. En général, la structure des fibres est hétérogène. Les plus petites parties dans les fibres sont les filaments cellulosiques ou les fibrilles ont des longueurs de 2 à 5 mm et des diamètres de 5 à 10  $\mu\text{m}$ . Aujourd'hui l'alfa est utilisée de deux façons, d'un côté la plante elle-même est utilisée tels que paniers, tapis et cordes (applications artisanales) aussi comme nourriture par les animaux sauvages comme la gazelle, le lièvre... etc. D'autre côté les fibres courtes sont utilisées pour des applications papetières dans la fabrication de papier de qualité supérieure, de papier pour cigarettes et pour billets de banque et pour des applications techniques comme des non-tissés et le renforcement des composites [12].



**Fig. 2.8** Alfa

## 2.3 Morphologies des fibres végétales

### 2.3.1 La structure d'une fibre végétale

Selon le cas, les fibres végétales à usage technique peuvent être extraites de différentes parties de la plante comme la tige, la graine, la racine. Quelle que soit leur provenance, les fibres végétales présentent toutes une structure formée d'hydrates de carbone ou glucose telle que la cellulose ou l'hémicellulose. Chacun de ces éléments a un rôle dans le comportement thermomécanique du matériau [13]. La paroi végétale a longtemps été considérée comme une structure statique mais suite aux premiers modèles décrivant son architecture, celle-ci est définie comme une structure extra cellulaire organisée, dynamique délimitant le contour d'une cellule. [10] Grâce à sa composition et son architecture, la paroi assure de nombreuses fonctions vitales, mécaniques et morphologiques pour la plante entière, on peut distinguer deux types de parois : La paroi primaire des cellules jeunes en croissance qui par sa nature a forcément des propriétés d'extension. La paroi secondaire qui est celle des cellules

différenciées a une épaisseur d'environ 10µm [14] Elle est constituée majoritairement de cellulose, donnant aux fibres une excellente rigidité et une bonne tenue. Le caractère microfibrillaire de la paroi secondaire (Figure 2.9), est comparable à un composite renforcé par des fibres avec une orientation particulière. L'angle d'enroulement microfibrillaire est compris (entre 6°et 45°) pour la paroi S2. Cet angle joue un rôle important sur le comportement mécanique et plus précisément sur la déformation à faible charge. Les constituants généraux de toutes les parois de spermaphytes sont des polysaccharidiques (cellulose, hémicelluloses, pectines), protéiques et phénoliques (lignine et acides phénoliques) et généralement de type polymérique [15].

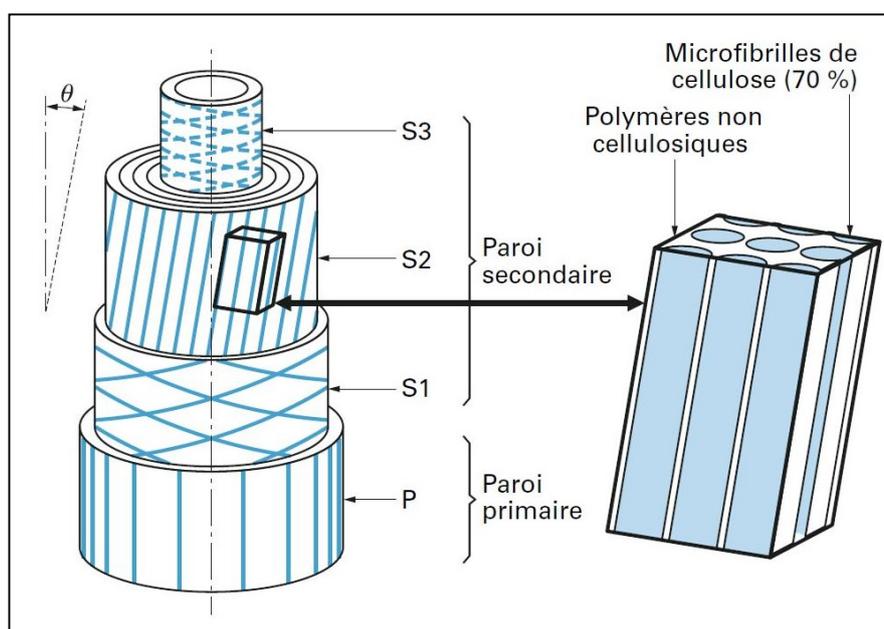


Fig. 2.9 Structure de la paroi cellulaire des fibres végétales

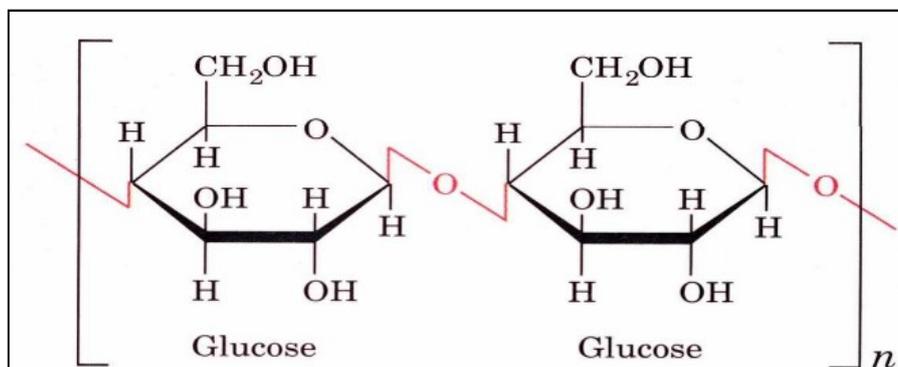
### 2.3.2 Composition chimique d'une fibre végétale

Dans une échelle microscopique, la fibre végétale se compose de couches concentriques avec variation de la composition chimique d'une couche à l'autre. La fibre végétale se compose principalement des éléments suivants : la cellulose, l'hémicellulose, les pectines, la lignine, les cires et les protéines.

#### 2.3.2.1 La cellulose

La cellulose est une molécule glucidique formée de longues chaînes dont le motif de base est le glucose dont la formule chimique est  $(C_6H_{10}O_5)_n$ , (n) étant compris entre 200 et 3000. Des liaisons hydrogènes au sein des chaînes ou entre les chaînes relient plusieurs molécules de cellulose et permettent la formation de feuillets ou microfibrilles rigides et résistants. Toutes les propriétés de la cellulose sont étroitement corrélées à la forte densité des liaisons

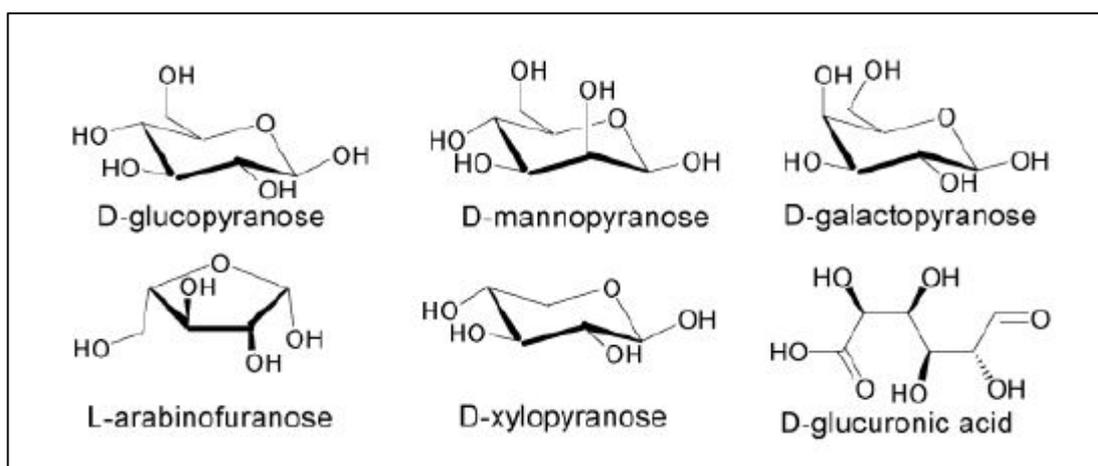
hydrogène qui se développent entre les chaînes. La cellulose n'est pas hydrosoluble, mais est fortement hydrophile. Afin d'augmenter la capacité de la cellulose à réagir chimiquement, divers traitements sont employés. En particulier, l'utilisation de certaines bases organiques, comme l'hydroxyde de sodium à forte concentration qui mène à une ouverture des régions amorphes liant les cristallites [16].



**Fig. 2.10** Structure chimique de la cellulose

### 2.3.2.2 L'hémicellulose

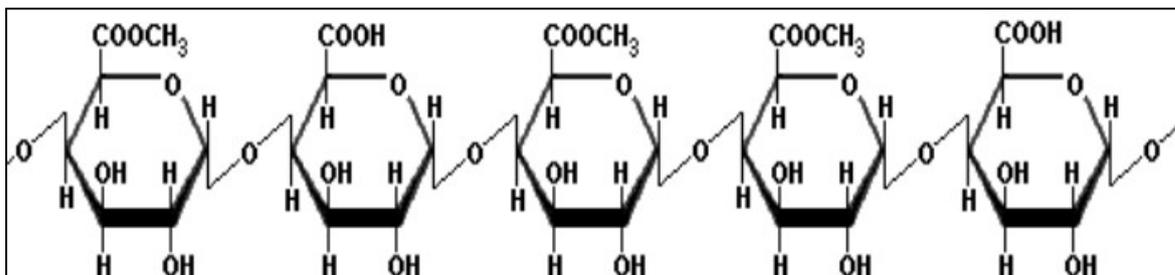
L'hémicellulose est présente avec la cellulose dans les parois des cellules des plantes. Sa structure correspond fortement à celle de la cellulose. Néanmoins quelques différences importantes existent, la cellulose a une structure cristalline mais l'hémicellulose est amorphe et donc moins forte. De plus la cellulose est faite de  $\beta$ -glucose comme seul monomère, mais pour la polymérisation d'hémicellulose plusieurs monomères glucidiques, comme la xylose, le mannose, le galactose, le rhamnose et l'arabinose sont possibles. Donc tout comme la lignine, l'hémicellulose existe également sous différentes formes, parmi les quelles le xylane est la molécule la plus abondante [12].



**Fig. 2.11** Les différentes structures de l'hémicellulose

**2.3.2.3 Les pectines**

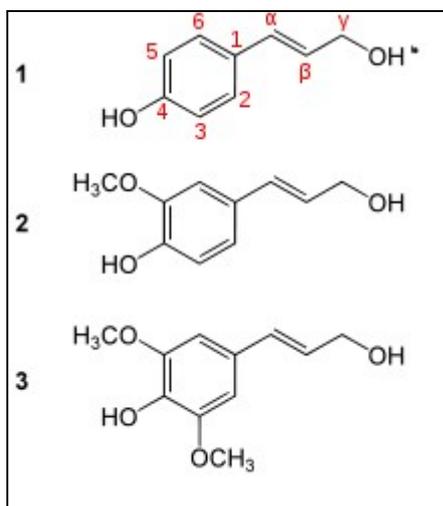
Les pectines sont des polysaccharides complexes présents dans la lamelle moyenne et la paroi primaire des Dicotylédones. Ce sont des hétéro-polysaccharides caractérisés par la présence d'acide  $\alpha$ -D-galacturonique [17].



**Fig. 2.12** Structure de la pectine

**2.3.2.4 Lignine**

La lignine est un copolymère tridimensionnel, composé de 3 monomères phénoliques s'assemblant en structure complexe. Les proportions ainsi que l'organisation des différents monomères ne sont pas bien définies car ces données sont difficiles à obtenir sans endommager la structure [18].



**Fig. 2.13** Structure de lignine

**2.3.2.5 Les cires**

Les cires sont des constituants des fibres naturelles qui peuvent être extraits avec des solutions organiques. Ces matériaux se composent de différents types d'alcools insolubles dans l'eau et de plusieurs acides tels que l'acide palmitique, l'acide oléagineux et l'acide stéarique [1].

### 2.3.2.6 Les protéines

De nombreuses études existent sur les protéines de la paroi, compte tenu de leur forme complexe et de leur rôle encore inconnu dans la paroi. Cependant, ils sont classés en quatre classes selon leur composition en acides aminés et de leur schéma de glycosylation :

- Protéines riches en hydroxyproline (HRGP),
- Protéines riches en glycine (GRP),
- Protéines riches en proline (PRP) et les arabinogalactan
- Protéines (AGP) (Girault et al. 2000)

**Tableau 2.1** Composition chimique des fibres naturelles les plus courantes [19]

%	Cellulose	Hémicellulose	Lignine	Pectine	Cires
Chanvre	57.0 à 92.0 (70)	6.0 à 22.0 (16)	2.8 à 13.0 (6)	0.8 à 2.5 (1)	0.7 à 0.8 (0.7)
Lin	60.0 à 81.0 (70)	10.0 à 21.0 (17)	1.0 à 5.0 (2.5)	0.9 à 3.8 (2)	1.3 à 3.0 (1.5)
Jute	51.0 à 84.0 (65)	12.0 à 24.0 (15)	5.0 à 14.0 (10)	0.2 à 4.5 (1.5)	0.4 à 0.8 (0.5)
Ramie	68.0 à 85.0 (72)	3.0 à 17.0 (14)	0.5 à 1.0 (0.7)	1.9 à 2.1 (2)	0.3 (0.3)
Kénafe	36.0 à 72.0 (44)	20.0 à 21.0 (21)	9.0 à 19 (18)	2.0 (2)	–
Noix de coco	32.0 à 53.0 (40)	0.2 à 0.3 (0.2)	40.0 à 45.0 (43)	3.0 à 4.0 (3)	–
Sisal	43.0 à 88.0 (66)	10.0 à 15.0 (12)	4.0 à 14.0 (10)	0.5 à 10.0 (2)	0.2 à 2.0 (1)
Abaca	56.0 à 68.0 (60)	19.0 à 25.0 (21)	5.0 à 13.0 (10)	0.5 à 1.0 (0.8)	0.2 à 3.0 (1.4)

## 2.4 Propriétés mécaniques, physiques des fibres végétales

### 2.4.1 Propriétés mécaniques

Les fibres végétales présentent globalement de bonnes performances mécaniques. Pour les plus performantes fibres végétales, le module de Young en traction peut atteindre les 70 GPa, soit l'équivalent en rigidité de la fibre de verre E, pour une densité deux fois moindre (matériau ligno-cellulosique  $1.5\text{g/cm}^3$ , fibre de verre  $2.6\text{g/cm}^3$ ), ce qui permet de les utiliser efficacement tant que renfort pour des composites dont la résistance spécifique (résistance rapportée à la densité) sera plus élevée (Tableau 2.2) [19].

**Tableau 2.2** Propriétés mécaniques des fibres naturelles les plus courantes [18]

Type de fibre	Ténacité à sec (cN/tex)	Ténacité au mouillé (cN/tex)	Contrainte de rupture (MPa)	Module d'élasticité (GPa)	Elongation de rupture (%)	Densité (g/cm <sup>3</sup> )	Angle de fibrillation (°)
Chanvre	–	–	310-1110 (700)	3-90	1.3-6.0 (3)	1.4-1.6	2-6
Lin	20 à 33	29 à 33	343-1500 (700)	8-100	1.2-4.0	1.4-1.5	5-10
Jute	26 à 35	28 à 48	187-800 (500)	3-90 (65)	1.3-6.0 (3)	1.3-1.5	7-10
Ramie	59	66	290-1060 (800)	5-128 (65)	0.2-6.0 (3)	1.5-1.5	7-12
Kénaf	–	–	180-1191 (700)	22-128 (55)	1.6-6.9 (3)	1.2-1.4	–
Noix de coco	–	–	95-270 (200)	2.8-6 (5)	15.0-51.4 (30)	1.15-1.5	30-49
Sisal	–	–	80-855 (600)	9-38 (12)	1.9-14.0 (3)	1.0-1.5	10-25
Abaca	–	–	12-980 (600)	12-72 (50)	1.0-12.0 (4)	1.4-1.5	–

### 2.4.2 Propriétés physiques

Les fibres végétales de qualité présentent de grands intérêts dans de nombreux domaines d'application. Même si leurs propriétés font qu'elles ne peuvent pas concurrencer certaines fibres synthétiques pour des utilisations spécifiques, dans de larges domaines, elles peuvent être employées avec succès, voire même avec un gain de performance [19]. Les propriétés mécaniques des fibres cellulosiques dépendent également des propriétés physiques de ces fibres telles que le diamètre de la fibre, la longueur, la densité, le gain d'humidité et l'angle de micro fibrille. Certains éléments physiques importants doivent être connus sur chaque fibre végétale avant qu'elle soit utilisée pour atteindre le potentiel maximal, tel que la forme, taille, l'angle fibrillaire, épaisseur des parois cellulaires, le taux de cristallinité[3].

**Tableau 2.3** Propriétés physiques des fibres naturelles [20]

Fibre	Contrainte à la rupture (MPa)	Module d'élastique (GPa)	Déformation (%)	Densité
Chanvre	350-800	30-60	1.6-4.0	1.48
Lin	500-900	50-70	1.5-4.0	1.45
Jute	300-700	20-50	1.2-3.0	1.3
Bambou	500-740	30-50	~2	1.4
Kénaf	400-700	25-50	1.7-2.1	1.3
Noix de coco	150-180	4-6	20-40	1.2
Sisal	300-500	10-30	2-5	1.5

## 2.5 Extraction des fibres

Pour utiliser les fibres comme renforts, il est nécessaire de les extraire pour cela, il existe plusieurs procédés d'extraction mécanique, chimique ou biologique.

### 2.5.1 Extraction mécanique

#### 2.5.1.1. Laminage

Ce type d'extraction se fait en ramenant les tiges puis en les écrasant sous une presse ou par laminage ou encore par les deux opérations en même temps. Ce processus est répété plusieurs fois jusqu'à l'obtention des fibres séparées. [8].

#### 2.5.1.2. Déflexion

Cette technique se fait par deux actions combinées de grattage et de battage. Les machines appelées raspadors (grattoir en langue espagnole) râpent les feuilles et libèrent les fibres. Ces machines principalement constituées par un axe rotatif entraîné par un moteur, sur lequel des supports maintiennent des batteurs en acier ont été fixés. Les tiges insérées en amont de la machines, sont prises entre ces batteurs et une table à ciseaux, râpées et guidées vers le côté opposé. La poudre et le bois passent à travers des cribles [8].

#### 2.5.1.3 Teillage

Il consiste à séparer les fibres par un acte mécanique. Comme le Broyage et le battage, les tiges sont étalées, égrenées, débarrassées des débris autres que les fibres, étirées entre des rouleaux, broyées entre des rouleaux cannelés, battues pour éliminer les débris ligneux (bois et écorce) qui sont nommés les "anas" et pour mettre à part les graines. La fin de l'opération ou teillage proprement dit a pour but de séparer les fibres longues et les fibres courtes. Les

fibres longues constituent la filasse ou longs brins qui partent vers les filatures pour la filière textile. Les fibres courtes ou étoupes de teillage seront transformées en "non-tissés" ou mélangées à d'autres fibres [21].

### 2.5.2 Extraction chimique

#### 2.5.2.1 Procédé par les silanes

La modification par les silanes est une des techniques beaucoup étudiées dans la bibliographie que ce soit la modification directe des fibres lignocellulosiques ou de leurs fibres cellulosiques. Grâce à leurs réactivités, les silanes peuvent se coupler chimiquement avec les groupements de la matrice polymère, la modification chimique des fibres par les silanes se fait par réaction des alcoxy-silanes avec les groupes hydroxyle de la cellulose en milieu aqueux acide ou basique [8].

#### 2.5.2.2 Mercerisation

La mercerisation est un traitement chimique consistant à immerger la fibre végétale dans une solution basique, généralement de la soude (NaOH). Ce traitement permet d'éliminer en partie les composants tels que l'hémicellulose, la lignine et les pectines. Ces modifications au niveau de la structure, de la dimension, de la morphologie des fibres, s'accompagnent d'une optimisation des propriétés mécaniques. Cependant, il est nécessaire de modérer le traitement afin de ne pas modifier la cristallinité des fibres ni dégrader leurs propriétés. De plus, ce traitement permet de modifier la rugosité de surface et donc l'adhérence mécanique, mais surtout de libérer des groupements hydroxyle qui constituent des sites réactifs pour les agents de couplages [18].

#### 2.5.2.3 Procédé Kraft

Le procédé Kraft ou procédé au sulfate est le procédé chimique papetier prédominant, il représente environ 90 % de la production mondiale de pâte à papier, en raison des meilleures propriétés de résistance de la pâte obtenue par rapport au procédé au bisulfite, de son application à toutes les espèces de bois et des systèmes efficaces de récupération des produits chimiques développés et mis en œuvre. L'amélioration des procédés de blanchiment a également participé à l'essor du procédé Kraft sur le procédé au bisulfite. Le terme "sulfate" provient du nom du produit chimique d'appoint, le sulfate de sodium ( $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ), que l'on ajoute au cours du cycle de régénération pour compenser les pertes de produits chimiques. Les produits chimiques actifs composant la liqueur de cuisson, dite « liqueur blanche », sont l'hydroxyde de sodium (NaOH) et le sulfure de sodium ( $\text{Na}_2\text{S}$ ) [22].

### 2.5.3 Extraction biologique

#### Le rouissage

Le procédé de rouissage utilisé pour l'extraction des fibres longues résulte de la séparation des massifs de fibres des autres types cellulaires non fibreux grâce à la digestion des cellules vivantes par les microorganismes. Le rouissage consiste en une dégradation des composés hydrosolubles de paroi cellulaire [17]. Il existe beaucoup des procédés de rouissage à savoir :

#### 2.5.3.1 Rouissage à l'eau

Le rouissage à l'eau sert à provoquer la décomposition de ce qui tient les fibres à la paille. Il repose sur le principe que les tiges sont plongées dans l'eau pendant plusieurs jours. Les tiges sont soumises à l'action de bactéries anaérobies. Dès que les fibres se détachent sur toute la longueur, la plante est sortie de l'eau pour être séchée. Cette technique donne de bonnes résultats mais elle présente un handicap majeur : la pollution de l'eau. Le rouissage à l'eau est effectué en général en cuve, dans de l'eau tempérée (37°C) jusqu'à ce que les fibres soient délignifiées et non adhérentes [23].

#### 2.5.3.2 Rouissage à terre

Le rouissage à terre qui consiste à laisser sur terre, après fauchage ou arrachage, les tiges des plantes libériennes afin de provoquer l'action bactérienne développée par la microflore du sol grâce à l'alternance de périodes de pluies et de chaleur humide [24].

#### 2.5.3.3 Rouissage microbien

C'est un procédé naturel, rapide et semi-contrôlé durant lequel les parois végétales sont partiellement dégradées par les micro-organismes afin de faciliter l'extraction des fibres pour différents usages [25]. Cette technique, directement liée aux conditions atmosphériques et hydrographiques, nécessite une durée d'action de l'ordre de 2 à 5 semaines. [24]

## Références bibliographiques du chapitre 2

- [1] Thi, Vi Vi Do. «Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non. Alimentation et Nutrition.» thèse de doctorat, Grenoble, L'université de Grenoble, 2011.
- [2] <https://www.nrgaia.eu/fibre-animale.htm>.
- [3] Mabrouk MAACHE. «Elaboration et caractérisation des composites à renfort en fibres naturelles des plantes sauvages.» thèse de doctorat, Guelma, L'université du 8 MAI 1945, 2018.
- [4] DJEBLOUN Youcef, Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales, Thèse de Doctorat, Université Mohamed Khider – Biskra, (2018).
- [5] RAGOUBI Mohamed. «Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne.» thèse de doctorat, nancy, L'université Henry Poincaré nancy1, 2010.
- [6] [https://fleurs-fruits-feuilles-de.com/agave\\_sisalana.php](https://fleurs-fruits-feuilles-de.com/agave_sisalana.php).
- [7] Kamilia ROUAM. «Elaboration, caractérisation mécanique et hygrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles.» Mémoire de Magister, Boumerdes, M'hamed Bougara, 2013.
- [8] Adil SBIAI. «Matériaux composites à matrice epoxyde chargée par des fibres de palmier dattier :effet de l'oxydation au tempo sur les fibres.» thèse de doctorat ,Lyon, L'institut national des sciences appliquées de Lyon, 2011.
- [9] Audrey. *Gralon*. 2010. <https://www.gralon.net/articles/materiel-et-consommables/materiels-industriels/article-le-kapok---une-fibre-naturelle-3618.htm>.
- [10] BAG Rahime. « Solvants pariétaux et aptitude à la transformation des fibres de chanvre ». thèse de doctorat ,Université de Reims Champagne-ardenne, 2010.
- [11] ROGGE Eva. «Extraction et étude des propriétés physiques et mécaniques des fibres d'alfa (Esparto grass) en vue d'applications textiles.» thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace (UHA), 2010.
- [12] FREUND Ludovic. «Etude du vieillissement hygrothermique des composites renforcés de fibres naturelles:Approche expérimentale et modélisation.» thèse de doctorat, Lorraine, L'université de Lorraine, 2018.
- [13] <http://www.fsm.rnu.tn/useruploads/cours/ulpcsm/biologie/module1/apprendre/chapitre3/paroi/paroi1det.htm> .
- [14] ILCZYSZYN Florent. «Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre .» thèse de doctorat L'université de technologie de Troyes, 2013.

- [15] Marianne LE TROEDEC. «Caractérisation des interactions physico-chimiques dans un matériau composite à base de phyllosilicates, de chaux et de fibres cellulosiques .» thèse de doctorat, L'université de Limoges (Ecole Doctorale Sciences-Technologies-Santé), 2009.
- [16] ABOT Audrey. « Caractérisation des fibres longues de chanvre (*Cannabis sativa*) en vue de leurs utilisations dans des matériaux composites.» thèse de doctorat École Doctorale : Sciences pour l'Environnement Gay Lussac, 2010.
- [17] Haddou Geoffrey. «structure et propriétés physiques de composites à matrice biosourcée/fibres naturelles continues pour application aéronautiques.» thèse de doctorat, Toulouse, L'université Toulouse 3 Paul Sabatier, 2017.
- [18] KUENY Raphaël. «Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles.» thèse de doctorat ,Lorraine, L'université de Lorraine(Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources Procédés Produits et Environnement), 2013.
- [19] NICOLLIN Arnaud. «Développement de matériaux composites écologiques à base de résine de tannins et de renforts de fibres végétales.» thèse de doctorat Université de Lorraine(Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources Procédés Produits et Environnement), 2014.
- [20] <http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/textiles/14-chanvre-transfo.html>.
- [21] BOIRON Lucie. « Etude de l'impact de l'extraction des hémicelluloses du bois sur les procédés d'obtention de cellulose et d'éthanol dans le cadre d'une bioraffinerie lignocellulosique.» thèse de doctorat, L'université de Grenoble, 2006.
- [22] <https://www.lelin-cotenature.fr/FR/Le-rouissage-du-lin-une-operation-delicate166.html>.
- [23] <https://patents.google.com/patent/WO1987002390A1> .
- [24] <http://ori.univ-lille1.fr/notice/view/univ-lille1-ori-461851>.

## **Chapitre 3**

### **Elaboration de biocomposites à matrice époxyde et renfort fibres de sisal**

#### **3.1 Introduction**

Les fibres végétales attirent de plus en plus l'attention des scientifiques et des chercheurs dans l'industrie des matériaux composites plastiques. Cela est dû essentiellement aux avantages qu'elles fournissent par rapport aux fibres synthétiques utilisées pour le renforcement des composites plastiques, comme par exemple les fibres de verre et de carbone. Ces fibres qui sont à faible coût et à faible densité et plus légères que les fibres synthétiques et les fibres artificielles, possèdent des propriétés spécifiques (mécaniques, physiques et chimiques). Elles sont biodégradables, légères et non corrosives et connaissent un usage grandissant dans divers secteurs comme la construction des bâtiments, des systèmes mécaniques et dans la fabrication des composites plastiques destinés à la construction des véhicules [1]. De nos jours, le développement de nouveaux bio composites à base de fibres de sisal connaît un grand essor.

Le sisal est une fibre naturelle qui a une longueur d'environ 1 m ou plus et un diamètre de 0,2-0,4 mm [2], extraite des feuilles de l'agave sisalana et n'est utilisée que depuis le XIX<sup>e</sup> siècle. Son nom provient du premier port de Sisal à Yucatan, au Mexique. C'est l'une des fibres naturelles les plus recherchées qui est traitée pour fabriquer des tapis, des cordages, des cordes et des fils. Puisque les fibres courtes et épaisses ne peuvent pas être filées, des faisceaux de fibres sont utilisés comme matière première [3].

#### **3.2 Fibres de sisal**

Le sisal est une plante xérophyte qui tolère la sécheresse prolongée et les températures élevées. Le sisal donne des fibres qui peuvent atteindre une longueur de 1 m et caractérisé par leur dureté. De nos jours et grâce aux avantages présentés par les fibres naturelles, il est de plus en plus employé comme renfort pour les matériaux composites, en particulier dans les composites automobiles. Les fibres de sisal peuvent être utilisées au tant que fibres distribuées aléatoirement (mats), longues (unidirectionnels) ou même (tissus). Les fibres du sisal objet de cette étude, sont issues de l'Agave sisalana, originaire du Mexique (Figure 3.1). Cette plante résistante pousse toute l'année dans des climats chauds et arides souvent impropres aux autres cultures. Elle s'accommode de la plupart des types de sols sauf ceux les sols argileux, très salins et humides. Sa culture est relativement simple car elle résiste bien aux maladies. Le sisal peut être récolté deux ans après avoir été planté et sa vie productive peut atteindre 12

ans. Chaque plante peut produire de 180 à 240 feuilles selon la situation géographique, l'altitude, la pluviométrie et la variété considérée [1].



Fig. 3.1 Plante de sisal

### 3.2.1 Identification

Le sisal est une plante herbacée vivace, monocarpique, vigoureuse, de 3–9 m de haut à la floraison, à nombreuses feuilles groupées en rosette dense ; racines fibreuses, s'étendant horizontalement jusqu'à (3–5) m, et verticalement jusqu'à 150 cm, mais concentrées dans les premiers 30–40 cm du sol, base charnue, bulbeuse, triangulaire en coupe transversale, limbe s'élargissant progressivement vers le milieu, puis se rétrécissant en une épine terminale piquante, brun foncé, atteignant 3 cm de long, concave au-dessus et convexe au-dessous, bord généralement sans épines, surface vert foncé mais couverte d'une couche cireuse blanche (Figure 3.1). [4],[5] Les caractéristiques botaniques de cette plante sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 3.1 Caractéristiques botaniques de la plante de sisal

Noms communs	Sisal, sisal vert, chanvre du Yucatan
Nom latin	Agave sisalana
Famille	Amaryllidacées (amaryllidaceae)
Type	Succulente
Origine	Amérique centrale, Mexique
Couleur de la fleur	Jaune-vert
Plantation	Printemps
Floraison	Été

### 3.2.2 Production mondiale

Les principaux producteurs des fibres de sisal sont :

- le Brésil avec une production annuelle de 120 000 t, dont une exportation de près de 100 000 t de fibres brutes et de produits manufacturés
- la Tanzanie qui produit 30 000 t par an dont la moitié est dédiée à l'exportation

- le Kenya produit environ 25 000 t/an et exporte 20 000 t/an
- Madagascar qui atteint à peine les 10 000 t/an [6]

### **3.2.3 Extraction des fibres de sisal**

Un des objectifs primordiaux des chercheurs est de trouver comment réaliser l'extraction des fibres à partir de ressources naturelles et par des moyens et techniques rentables du point de vue économique. Il existe plusieurs méthodes et techniques d'extraction des fibres de sisal comme par exemple les méthodes basées sur l'immersion de la plante dans l'eau et celles qui utilisent des solutions chimiques tel que les alcalins. La première technique consiste à plonger les lames issues de la plante de sisal dans un fût fermé pendant 15 à 21 jours à une température ambiante d'environ 25 °C, dans le but d'accélérer la biodégradation pour rendre par la suite l'extraction facile. Ensuite les fibres sont rincées et lavées à l'eau puis séchées à l'air libre et brossées. La deuxième méthode est basée sur l'utilisation d'un moyen mécanique pour l'extraction des fibres par une machine à découper ou bien par l'utilisation d'un grattoir. Il existe aussi une autre technique relativement nouvelle et qui consiste à l'enfouissement des lames de sisal dans la terre sous une profondeur de 30 cm pendant 90 à 100 jours, ce qui favorise la biodégradation de la lame. L'extraction des fibres devient ainsi facile, les fibres sont ensuite rincées et lavées à l'eau puis séchées à l'air libre [7]. Dans notre étude nous avons utilisé les lames de sisal (Figure 3.2) et (Figure 3.3). Afin de séparer les fibres du reste de la lame et donc obtenir leur extraction nous avons utilisé une méthode qui consiste à écraser les lames par un cube de bois pour retirer l'enveloppe extérieure de la plante et libérer les fibres (Figure 3.4) et (Figure 3.5). Ensuite les fibres sont immergées dans l'eau pendant 2 jours à une température ambiante comme le montre la (Figure 3.6). Finalement les fibres ont été séchées à 60 C° dans une étuve pendant 5 heures, au laboratoire du département science de la matière de l'université Laarbi Tébéssi de Tébessa (Figure 3.7).



Fig. 3.2 Plante de sisal de la région de Tébessa



Fig. 3.3 Lames utilisées dans l'extraction des fibres de sisal



Fig. 3.4 Ecrasement des fibres lame de sisal



Fig. 3.5 Extraction des fibres de sisal



Fig. 3.6 fibres de sisal avant séchage



Fig. 3.7 fibres de sisal après séchage

### 3.2.4 La composition chimique des fibres de sisal

En général, la composition chimique des fibres de sisal est approximativement comme suit: (70%) cellulose, (12%), d'hémicellulose, (10%) de lignine et une petite quantité de pectine, cires et de graisse (2%). [8]

### 3.2.5 Modification de la surface des fibres

Dans le but d'améliorer les propriétés physiques et mécaniques des systèmes de composites constitués de fibres de sisal et de la matrice, les fibres de sisal doivent subir plusieurs de traitement chimique et thermique.

### 3.2.6 Traitement par la soude (Alcalinisations)

Les fibres sont immergées dans une solution de soude (NaOH) à 2% (Figure 3.9), pendant une durée de 48 heures à température ambiante. Cette solution a été préparée à partir de l'eau de déminéralisée (eau distillée) et portée préalablement à ébullition. Les fibres sont ensuite rincées plusieurs fois avec de l'eau distillée contenant  $10^{-2}$  mol/l d'acide acétique ( $\text{CH}_3\text{COOH}$ ) afin de neutraliser l'excès de soude (Figure 3.10). Elles sont enfin lavées avec de l'eau distillée et immergée pendant 15 minutes dans de l'eau distillée jusqu'à pH neutre (Figure 3.11). A la fin les fibres ont été brossées (Figure 3.13) après un séchage à l'air dans une température ambiante pendant une durée de 24 heures (Figure 3.12).



**Fig. 3.8** Préparation de la solution de soude (NaOH) à 2%



**Fig. 3.9** Immersion des fibres de sisal dans la solution de soude



**Fig. 3.10** Lavage des fibres de sisal traitées



**Fig. 3.11** Immersion des fibres de sisal dans L'eau distillée pendant 15 min



**Fig. 3.12** Séchage des fibres de sisal traitées



**Fig. 3.13** Brossage des fibres de sisal traitées

### **3.2.7 Caractérisation mécanique des fibres de sisal**

Bien qu'il existe de nombreux types de sisal, tous ne peuvent pas servir de renfort dans les polymères. Les fibres de sisal choisies doivent avoir de bonnes propriétés mécaniques (par exemple, module d'Young et contrainte élevés).

## **3.3 Résines époxydes**

### **3.3.1 Historique**

Les résines époxydes furent découvertes presque simultanément par le Suisse Castan en 1936 et par l'Américain Greenlee vers 1939. Ces produits sont désignés sous le nom epoxy resins en anglais et résine époxyde en français, pour bien souligner que le groupe époxydique (un oxygène branché sur deux carbones consécutifs) constitue leur point commun. La notation abrégée, universellement adoptée, est EP.

### **3.3.2 Introduction**

Lors de la réalisation des pièces composites où la résistance aux fortes contraintes mécaniques est indispensable, ou dans des environnements agressifs, on fait généralement recours à une résine époxyde. Ainsi la résine époxyde trouve une large application dans la conception des pièces aéronautiques, la construction navale haute performance. Les fibres techniques telles que carbone, aramide, verres, sont principalement utilisées avec les résines époxydes. Les résines époxydes sont aussi employées avec succès avec les fibres végétales. Les principales caractéristiques de l'époxyde sont : le pouvoir d'adhésion, la résistance mécanique et la tenue à l'hydrolyse et aux agressions chimiques. Néanmoins les résines époxydes ont une mauvaise tenue aux ultraviolets (UV).

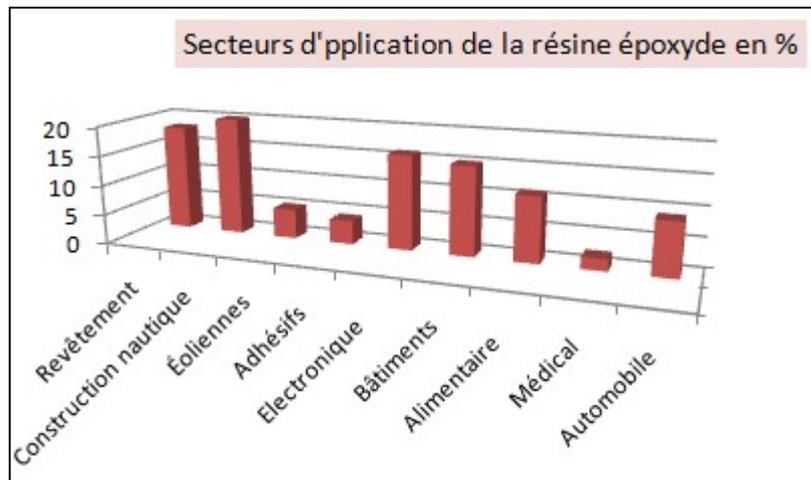
### **3.3.3 Définition**

Le terme époxyde désigne une grande variété de pré-polymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques qui, après polycondensation avec un durcisseur, conduisant à des produits thermodurcissables dont les principales applications concernent le collage et les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibre de verre ou de carbone). Il s'agit de produits performants qui rentrent dans un très grand nombre d'applications, dont certaines sont d'un niveau technique incontestablement élevé :

- industrie aéronautique et automobile (collages de structures et de panneaux) ;
- industrie électrique moyenne et haute tension (appareillage électrique) ;
- électronique (enrobages de condensateurs, confection de circuits imprimés, etc.) ;
- sport (skis, raquettes, arcs et flèches de compétition, cadres de vélos en carbone, roues lenticulaires...) ;

- stratifiés et composites (nids d'abeilles, structures triangulaires, arbres de transmission, carrosseries de voitures de sport...);
- revêtements résistant aux agents chimiques, réparation de fissures de barrages, etc.

Les résines époxy sont des polymères thermodurcissables ayant la particularité de durcir irréversiblement sous l'effet de la température ou par adjonction d'un réactif (durcisseur). Parmi les matières plastiques utilisés dans la fabrication des composites, elles occupent une place particulière à cause de leur polyvalence dans les applications industrielles (Figure 3.14). Leur production mondiale est estimée à 1,6 million de tonnes par an, 85% des résines époxy sont produites aux Etats-Unis, en Europe et au Japon [9]. Beaucoup d'applications font appel aux propriétés particulières de ces résines comme leur bonne résistance à la corrosion ou leur caractère adhésif. Elles sont employées dans les composites à grande diffusion (GD) ou bien hautes performances (HP).



**Fig. 3.14** Applications industrielles de la résine époxyde

### **3.3.4 Caractéristiques des résines époxydiques**

Les résines époxydes sont caractérisés par une structure physico-chimique très particulière qui leur confèrent une aptitude réactionnelle variée leur permettent de se combiner et de s'associer à un très grand nombre de composés chimiques notamment les durcisseurs, en donnant naissance à une gamme de produits qu'on peut utiliser et employer dans divers domaines de l'industrie. Les principales caractéristiques des résines époxydes sont :

- une forte adhérence avec tous les matériaux usuels
- une grande souplesse lors des opérations de mise en forme (emboutissage)
- une excellente résistance chimique
- une bonne résistance aux chocs et abrasion
- mauvaise résistance aux rayons ultra-violets (UV)

- inaltérabilité en présence d'hydrocarbures et de divers solvants
- bonne tenue à la chaleur
- Haute stabilité dimensionnelle et faible retrait au durcissement

### 3.3.5 Réaction chimique de la préparation d'une résine époxy

La synthèse d'une résine époxy est réalisée à partir d'un composé chimique appelé épichlorhydrine ou 1-chloro-2,3-époxypropane, qui est un composé organochloré de formule semi-développée  $\text{CH}_2\text{CHOCH}_2\text{Cl}$  (Figure 3.15), il est liquide, volatil et toxique, incolore à forte odeur d'ail. C'est un produit chimique d'usage industriel, utilisé souvent dans la fabrication de résines plastiques. L'atome de chlore permet des réactions fermées par la répétition alternée de deux étapes [9] : la première est une condensation avec élimination de HCl et dans laquelle le groupe époxy n'intervient pas (Figure 3.16). La seconde étape est addition utilisant le groupe époxy (Figure 3.17). La réaction avec les phénols s'effectue en présence de base alcaline, le plus souvent NaOH et une température de  $100\text{ }^\circ\text{C}$ . La synthèse a lieu en plusieurs étapes :

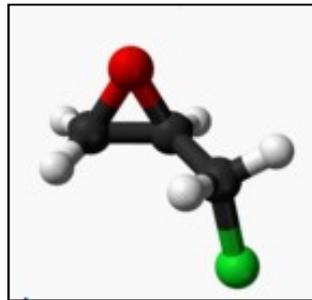


Fig. 3.15 Formule chimique du 1-chloro-2,3-époxypropane

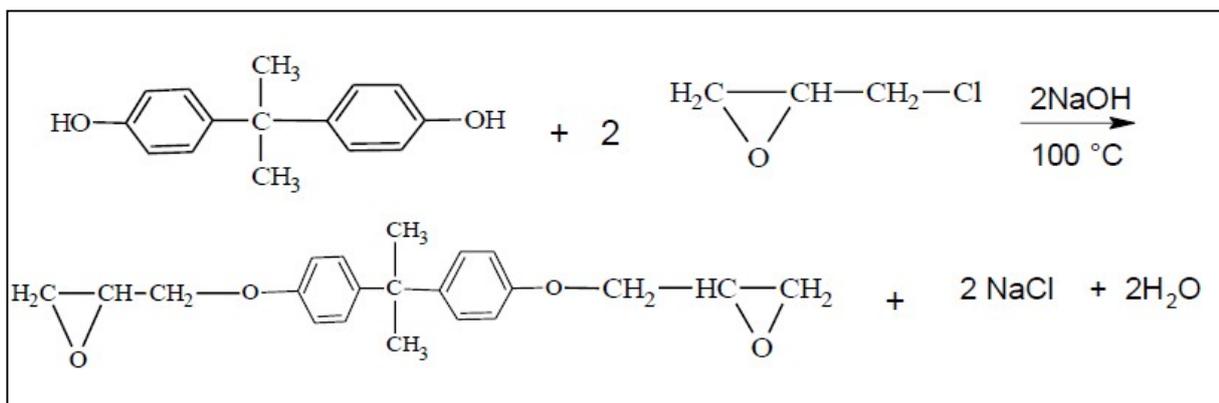
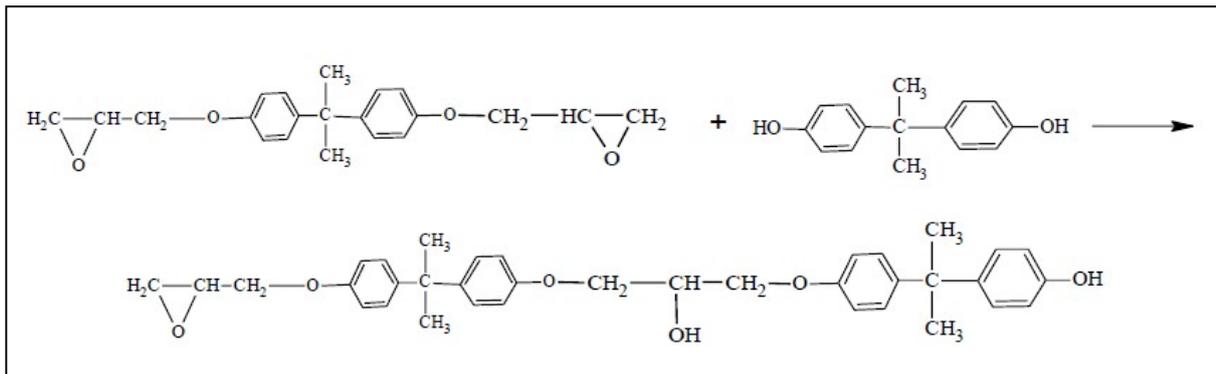


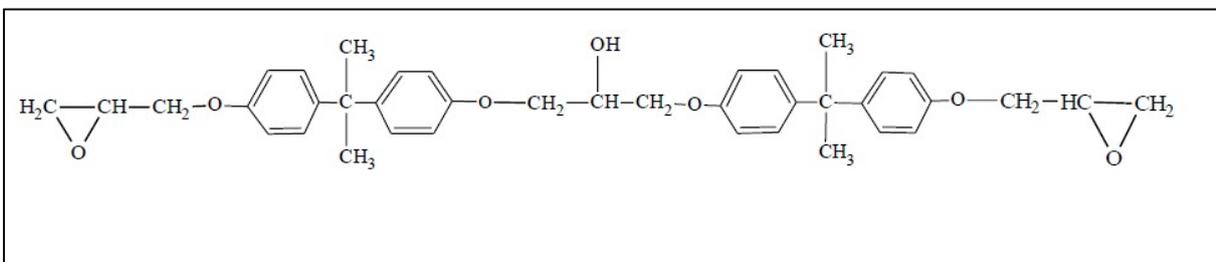
Fig. 3.16 Première étape : condensation avec élimination de HCl

Cette réaction de double condensation (Figure 3.16) est suivie de l'addition d'une molécule de diphénol par l'une des fonctions époxy, voir ci-dessous (Figure 3.17) :



**Fig. 3.17** Deuxième étape : addition utilisant le groupe époxy

Il y a alors à nouveau condensation d'épichlorohydrine. On obtient des macromolécules de formule générale montrée ci-dessous (Figure 3.19).



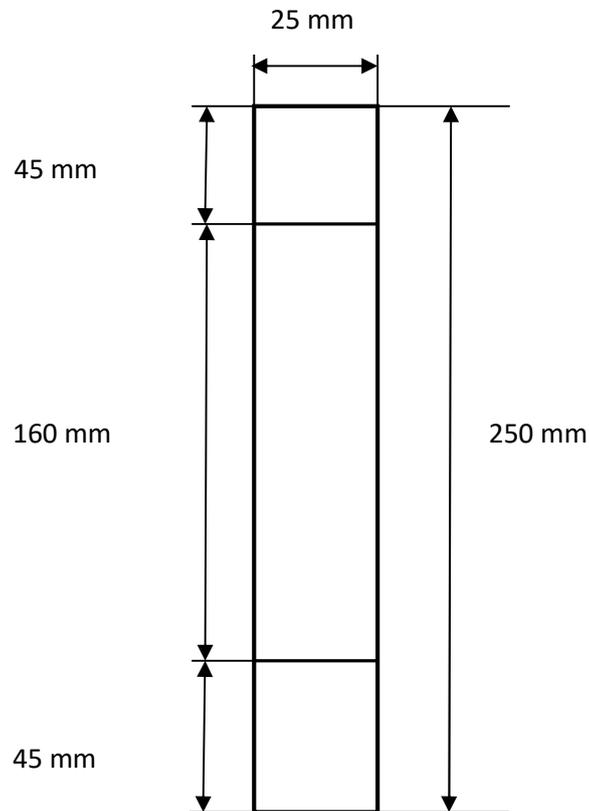
**Fig. 3.18** Formule chimique de la résine époxyde

### 3.4 Elaboration de bio composites époxydes/ fibres de sisal

Le travail présenté s'intéresse à l'élaboration de biocomposites à matrice époxyde et renfort fibres de sisal. Les principales étapes d'élaboration des plaques stratifiées sont :

- Le découpage des couches de fibres unidirectionnelles, initialement cousues avec une légère trame pour assurer l'assemblage et la continuité des fibres.
- Les fibres sont ensuite pesées pour avoir différentes fractions massiques des composites élaborées.
- Les éprouvettes sont fabriquées par moulage à séquences d'empilement de  $0/90^\circ$  et  $\pm 45^\circ$  pour les essais de traction uniaxiale et cisaillement plan respectivement.
- Les composites sont imprégnés à température ambiante dans des moules de forme rectangulaires (en forme d'éprouvettes normalisées selon la norme AFNOR 57-101)
- La résine est catalysée et durcie par ajout d'un durcisseur. Une fois les plaques réticulées elles subissent une polymérisation pendant 24 heures avant le démoulage.
- Pour avoir une polymérisation complète les plaques sont laissées à l'air libre pendant une durée supplémentaire de 10 jours

Les dimensions des éprouvettes sont préparées selon la Norme AFNOR 57-101 où  $L = 250$  mm,  $b = 25$  mm et  $h = 2,5$  mm sont respectivement la longueur, la largeur et l'épaisseur des éprouvettes testées. Alors que la longueur entre les mors  $l$  choisi pour ces essais est de 160 mm et la longueur des étalons est égale à 45 mm.



**Fig. 3.19** Eprouvette découpée selon la norme AFNOR 57-101



**Fig. 3.20** Eprouvette élaborée sisal/Epoxyde

**Références bibliographiques du chapitre 3**

- [1] <http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/en/>.
- [2] <https://jardinage.lemonde.fr/dossier-496-agave-americana-plante-tequila-mezcal.html>.
- [3] <https://www.complements-alimentaires.co/sisal/>.
- [4] <https://www.wgc.de/fr/produkte/sisal>.
- [5] <https://www.benuta.fr/blog/materiau-autres-fibres-naturelles-sisal-jute-bambou-coco.html>.
- [6] <https://sisal.ooreka.fr/comprendre/fibre-sisal>.
- [7] Belaadi Ahmed, Elaboration et caractérisation des matériaux composites à renfort en fibres naturelles (fibre de sisal), Mémoire de Magister, Université 08 Mai 1945-Guelma, (2011).
- [8] Djebbloun Youcef, « Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales », Thèse de Doctorat en Génie mécanique de l'université de Biskra (2018).
- [9] Kessouri Noura, Kenane Fatima Zohra, Développement et application d'une peinture époxydique monocouche anticorrosion à faible teneur en COV, Mémoire de Master 2, Université A. M. OULHADJ - Bouira, (2016).

## Chapitre 4 Modélisation et caractérisation des biocomposites (époxyde/sisal)

### 4.1 Homogénéisation et analyse micromécanique

#### 4.1.1 Introduction

Il est indispensable pour un concepteur de prévoir et de connaître avec précision les caractéristiques géométriques et mécaniques d'un mélange composé d'un renfort et d'une matrice qui constitue la structure de base des pièces composites [1] (Figure 4.1). Puisque le renfort est responsable de la tenue mécanique du composite, son ajout augmente et influence les propriétés et les caractéristiques mécaniques de la matrice renforcée.

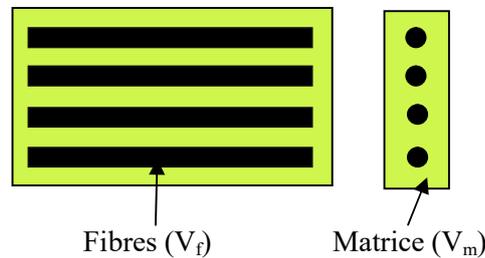


Fig.4.1 Constituants d'un matériau composite

#### 4.1.2 Constitution d'un pli unidirectionnel

Un composite unidirectionnel est constitué de fibres parallèles disposées dans une matrice. Ce type de matériau constitue la configuration de base des matériaux composites à fibres. D'où l'importance de son étude. La cellule élémentaire représentative (CER), peut être considérée comme constituée d'une fibre entourée d'un cylindre de matrice. Un pli unidirectionnel est par sa nature hétérogène, ces propriétés dépendent de celles de ces composants (fibres et matrice) (Figure 4.2). Pour étudier les propriétés de ce composite, on suppose qu'il est homogène et on considère ses propriétés moyennes vis-à-vis aux chargements externes appliqués.

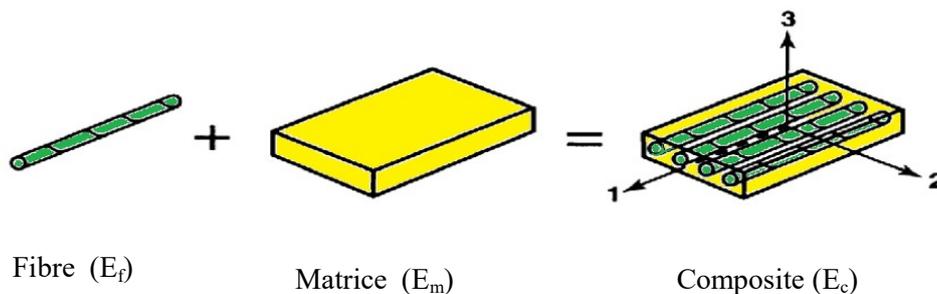


Fig.4.2 Propriétés d'un matériau composite dépendantes de celles de ses constituants

### 4.1.3 Loi des mélanges

Un volume ( $v_c$ ) d'un matériau composite est constitué d'un volume ( $v_f$ ) de fibres et d'un volume ( $v_m$ ) de matrice. La fraction volumique de fibres est définie comme suit :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (4.1)$$

La fraction volumique de matrice est définie par:

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (4.2)$$

Avec :

$v_f$  : volume des fibres

$v_m$  : volume de la matrice

$v_c$  : volume du composite

Sachant que :

$$v_c = v_m + v_f \quad (4.3)$$

Alors :

$$V_f + V_m = 1 \quad (4.4)$$

De la même manière on peut exprimer la fraction massique en fonction des masses ( $w_c$ ,  $w_f$  et  $w_m$ ) respectivement du composite, des fibres et de la matrice. La fraction massique de fibres est définie comme suit :

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} \quad (4.5)$$

La fraction volumique de matrice est définie par:

$$W_m = \frac{w_m}{w_c} \quad (4.6)$$

Avec :

$w_f$  : masse des fibres

$w_m$  : masse de la matrice

$w_c$  : masse du composite

Sachant que :

$$w_c = w_m + w_f \quad (4.7)$$

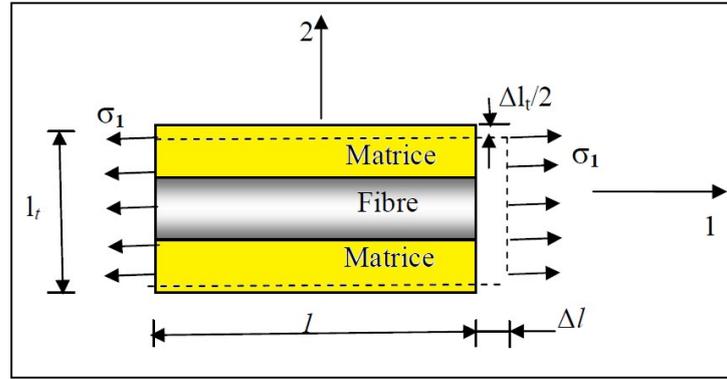
Alors :

$$W_f + W_m = 1 \quad (4.8)$$

#### 4.1.4 Calcul des caractéristiques mécaniques d'un pli unidirectionnel

##### 4.1.4.1 Module d'élasticité longitudinal

Le module d'Young longitudinal noté ( $E_L$ ) est déterminé à partir d'un essai de traction longitudinale (Figure 4.3).



**Fig.4.3** Schéma simplifié d'une traction longitudinale d'une CER

Sous l'action d'une force de traction dans la direction longitudinale (L) ou bien (1), le composite s'allonge d'une quantité ( $\Delta L$ ). La déformation dans ce cas est définie par la relation :

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.9)$$

Cette déformation est identique dans la fibre et dans la matrice (iso strain) :

$$\varepsilon_f = \varepsilon_m = \varepsilon_c = \varepsilon_L \quad (4.10)$$

Si les matériaux de la fibre et de la matrice sont supposés isotropes, la loi de Hooke stipule que :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_f = E_f \varepsilon_L \quad (4.11)$$

Et :

$$\sigma_m = E_m \varepsilon_m = E_m \varepsilon_L \quad (4.12)$$

La force F dans les fibres et dans la matrice peut être exprimée par :

$$F_f = \sigma_f S_f = E_f \varepsilon_L S_f \quad (4.13)$$

Et :

$$F_m = \sigma_m S_m = E_m \varepsilon_L S_m \quad (4.14)$$

$S_f$  et  $S_m$  représentent respectivement les sections transversales des fibres et de la matrice (Figure 4.4). La force totale appliquée dans le sens longitudinal est :

$$F_1 = F_L = F_f + F_m = \sigma_f S_f + \sigma_m S_m \quad (4.15)$$

Si (S) est la section transversale du composite, nous avons :

$$\sigma_1 = \sigma_L = \frac{F_1}{S} \quad (4.16)$$

Si on substitue la relation (4.15) dans (4.16) on obtient :

$$\sigma_L = \frac{F_1}{S} = \frac{\sigma_f S_f + \sigma_m S_m}{S} = \sigma_f \frac{S_f}{S} + \sigma_m \frac{S_m}{S} \quad (4.17)$$

Si on considère la section transversale du composite (Figure 4.4), nous avons :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} = \frac{S_f \cdot dx}{S_c \cdot dx} = \frac{S_f}{S_c} \quad (4.18)$$

Et :

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} = \frac{S_m \cdot dx}{S_c \cdot dx} = \frac{S_m}{S_c} \quad (4.19)$$

La relation (4.17) devient :

$$\sigma_L = \sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m V_m \quad (4.20)$$

Ou encore :

$$\sigma_L = \sigma_1 = \sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f) \quad (4.21)$$

Cette contrainte moyenne est liée à la déformation de la cellule élémentaire représentative par le module d'élasticité longitudinal dans le sens longitudinal :

$$\sigma_L = \sigma_1 = E_L \varepsilon_L \quad (4.22)$$

La combinaison des relations (4.21) et (4.22) conduit à l'expression du module de Young longitudinal :

$$E_L = \frac{\sigma_L}{\varepsilon_L} = \frac{\sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)}{\varepsilon_L} \quad (4.23)$$

Sachant que :

$$\varepsilon_L = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (4.24)$$

Alors :

$$E_L = \frac{\sigma_f V_f + \sigma_m (1 - V_f)}{\varepsilon_L} = \frac{\sigma_f}{\varepsilon_f} V_f + \frac{\sigma_m}{\varepsilon_m} (1 - V_f) = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (4.25)$$

Finalelement :

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (4.26)$$

Cette expression est connue sous le nom de loi de mélanges qui permet de calculer le module de Young dans la direction des fibres.

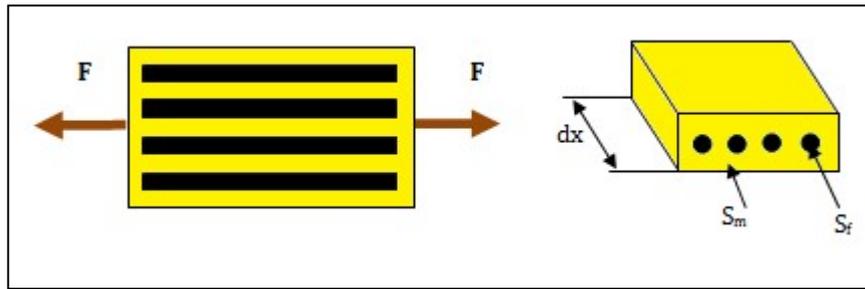


Fig.4.4 Section transversale du composite

4.1.4.2 Module d'élasticité transversal

Le module d'élasticité transversal ou module d'Young transverse peut être déterminé par un essai de traction transverse dans lequel le composite est sollicité en traction par rapport à une direction perpendiculaire aux fibres (Figure.4.4). On considère une cellule élémentaire représentative (CER) constituée de fibre de hauteur ( $h_f$ ) entourée de matrice de hauteur ( $h_m$ ) sollicitée en traction ( $\sigma_2$  ou  $\sigma_T$ ) par rapport à la direction transverse (2 ou T).

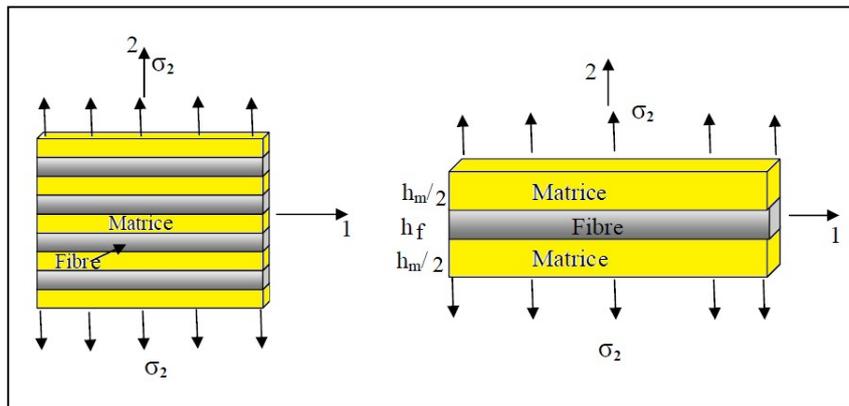


Fig.4.5 Cellule élémentaire sollicitée transversalement

Comme montré sur la (Figure.4.5), les fractions volumiques des fibres et de la matrice en peuvent être exprimées en fonction des hauteurs des couches (matrice+fibre).

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} = \frac{S_f \cdot e}{S_c \cdot e} = \frac{h_f \cdot L \cdot e}{(h_f + h_m) \cdot L \cdot e} = \frac{h_f}{(h_f + h_m)} \tag{4.27}$$

L : longueur de la CER  
 e : épaisseur de la CER  
 De même :

$$V_m = 1 - V_f = \frac{h_m}{(h_f + h_m)} \tag{4.28}$$

La force  $F_2$  imposée selon la direction transverse est complètement transmise dans la fibre et dans la matrice conduisant à des contraintes égales (iso stress).

$$\sigma_m = \sigma_f = \sigma_2 \tag{4.29}$$

Les déformations résultantes dans la fibre et dans la matrice dans la direction transverse sont données grâce aux relations :

$$\varepsilon_f = \frac{\sigma_2}{E_f} \quad (4.30)$$

Et :

$$\varepsilon_m = \frac{\sigma_2}{E_m} \quad (4.31)$$

L'allongement transverse dans la cellule élémentaire représentative (CER), résultant des allongements dans la fibre et dans la matrice est donnée par la relation suivante:

$$\Delta L_2 = \varepsilon_f h_f + \varepsilon_m h_m \quad (4.32)$$

Et la déformation transverse :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta L_2}{h_f + h_m} = \varepsilon_f \frac{h_f}{(h_f + h_m)} + \varepsilon_m \frac{h_m}{(h_f + h_m)} \quad (4.33)$$

Si on substitue (4.27) et (4.28) dans (4.33) on aboutit à :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m V_m = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m (1 - V_f) \quad (4.34)$$

La combinaison des relations (4.30), (4.31) et (4.34) conduit à :

$$\varepsilon_2 = \frac{\sigma_2}{E_T} = \varepsilon_f V_f + \varepsilon_m (1 - V_f) = \frac{\sigma_2}{E_f} V_f + \frac{\sigma_2}{E_m} (1 - V_f) \quad (4.35)$$

Dans cette relation ( $E_T$ ) représente le module d'Young transversal. Ceci conduit après simplification à:

$$\frac{1}{E_T} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{(1 - V_f)}{E_m} \quad (4.36)$$

Cette expression est connue sous le nom de loi de mélanges inverse et permet de calculer le module de Young transversal dans la direction perpendiculaire à celle des fibres.

#### 4.1.4.3 Module de cisaillement longitudinal

Le module de cisaillement  $G_{LT}$  est déterminé à partir de l'essai de cisaillement schématisé sur la (Figure 4.6) Si on considère une cellule élémentaire représentative (CER) d'un composite unidirectionnel, constituée de fibre et de matrice. Les contraintes de cisaillement dans la fibre et dans la matrice sont égales (iso contraintes) car la contrainte  $\tau$  est supposée imposée sur la cellule entière composée de fibre et de matrice.

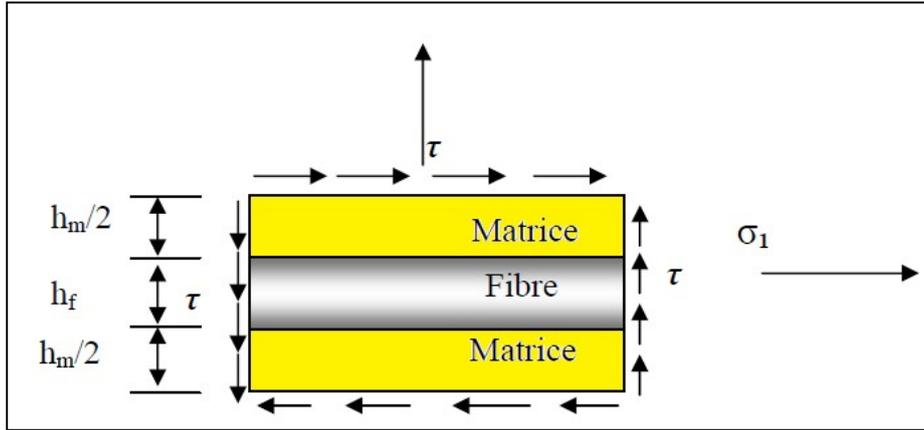


Fig.4.6 Cellule élémentaire sollicitée en cisaillement

Les déformations de cisaillement (distorsions) dans la fibre et dans la matrice (Figure 4.6) et s'expriment par les relations suivantes :

$$\gamma_f = \frac{\tau}{G_f} \quad (4.37)$$

Et :

$$\gamma_m = \frac{\tau}{G_m} \quad (4.38)$$

Les déformations engendrées dans la fibre et dans la matrice sont données par les relations suivantes :

$$\delta_f = h_f \cdot \gamma_f \quad (4.39)$$

Et :

$$\delta_m = h_m \cdot \gamma_m \quad (4.40)$$

La déformation totale dans la cellule (CER) est :

$$\delta = \delta_f + \delta_m \quad (4.41)$$

Ou bien :

$$\delta = h_f \cdot \gamma_f + h_m \cdot \gamma_m \quad (4.42)$$

L'angle de cisaillement global dans la cellule est :

$$\gamma = \frac{\delta}{h_f + h_m} \quad (4.43)$$

Si on remplace (4.42) dans (4.43) on obtient :

$$\gamma = \frac{h_f \cdot \gamma_f + h_m \cdot \gamma_m}{h_f + h_m} = \left( \frac{h_f}{h_f + h_m} \right) \gamma_f + \left( \frac{h_m}{h_f + h_m} \right) \gamma_m \quad (4.44)$$

Sachant que :

$$V_f = \frac{h_f}{(h_f + h_m)}$$

Et :

$$V_m = 1 - V_f = \frac{h_m}{(h_f + h_m)}$$

Alors :

$$\gamma = \gamma_f V_f + \gamma_m (1 - V_f) \tag{4.45}$$

Cet angle est lié à la contrainte de cisaillement par le module de cisaillement  $G_{LT}$  par la relation :

$$\gamma = \frac{\tau}{G_{LT}} \tag{4.46}$$

En combinant les relations (4.37),(4.38), (4.45) et (4.46), on aboutit à :

$$\gamma = \gamma_f V_f + \gamma_m (1 - V_f) = \frac{\tau}{G_{LT}} = \frac{\tau}{G_f} V_f + \frac{\tau}{G_m} (1 - V_f) \tag{4.47}$$

Ce qui conduit à :

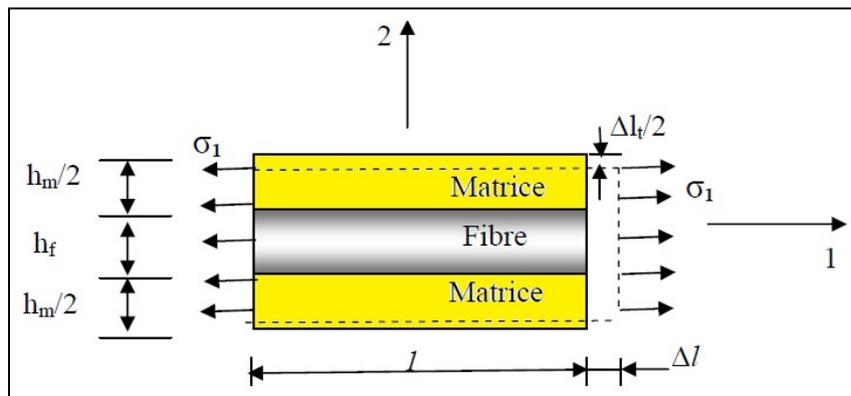
$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{V_f}{G_f} + \frac{1 - V_f}{G_m} \tag{4.48}$$

**4.1.4.4 Coefficient de Poisson longitudinal**

Le coefficient de Poisson caractérise l’aptitude d’un matériau à se comprimer (Figure 4.7). Il traduit le rapport entre l’allongement relatif transversal  $\epsilon_T$  et l’allongement relatif longitudinal  $\epsilon_L$  :

$$\epsilon_T = -\nu \cdot \epsilon_L \tag{4.49}$$

Pour déterminer le coefficient de Poisson pour le cas d’un matériau composite, considérons une (CER) de ce matériau (Figure 4.7).



**Fig.4.7** Cellule élémentaire représentative sollicitée dans la direction des fibres

Pour un essai de traction l’allongement relatif du composite dans le sens transverse est défini par :

$$\varepsilon_2 = \varepsilon_T = \frac{\Delta l_T}{l_T} \quad (4.50)$$

L'allongement relatif du composite dans le sens longitudinal est défini par :

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_L = \varepsilon_f = \varepsilon_m \quad (4.51)$$

Les déformations dans la matrice et dans les fibres sont données par les relations :

$$\varepsilon_{2,m} = -\nu_m \cdot \varepsilon_1 \quad (4.52)$$

Et :

$$\varepsilon_{2,f} = -\nu_f \cdot \varepsilon_1 \quad (4.53)$$

D'un autre coté l'allongement relatif transversal de la CER est :

$$\Delta h = \Delta h_f + \Delta h_m \quad (4.54)$$

Sachant que d'une façon générale la déformation relative est définie par le rapport de l'allongement à la longueur initiale:

$$\varepsilon = \frac{\Delta L}{L} \quad (4.55)$$

Alors :

$$\varepsilon_{2,f} = \frac{\Delta h_f}{h_f} \quad (4.56)$$

Et :

$$\varepsilon_{2,m} = \frac{\Delta h_m}{h_m} \quad (4.57)$$

Ainsi la relation (4.76) devient :

$$\Delta h = \varepsilon_{2,f} \cdot h_f + \varepsilon_{2,m} \cdot h_m \quad (4.58)$$

Si on substitue (4.74) et (4.75) dans (4.80), on obtient :

$$\Delta h = -\nu_f \cdot \varepsilon_1 \cdot h_f - \nu_m \cdot \varepsilon_1 \cdot h_m \quad (4.59)$$

D'autre part la déformation totale de la CER dans le sens transversal est donnée par la relation :

$$\varepsilon_2 = \frac{\Delta h}{h_f + h_m} \quad (4.60)$$

Ou bien :

$$\varepsilon_2 = \frac{-\nu_f \cdot \varepsilon_1 \cdot h_f - \nu_m \cdot \varepsilon_1 \cdot h_m}{h_f + h_m} = \left( -\nu_f \frac{h_f}{h_f + h_m} - \nu_m \frac{h_m}{h_f + h_m} \right) \varepsilon_1 \quad (4.61)$$

Or :

$$V_f = \frac{h_f}{h_f + h_m} \quad (4.62)$$

Et :

$$V_m = (1 - V_f) = \frac{h_m}{h_f + h_m} \quad (4.63)$$

Alors :

$$\varepsilon_2 = (-\nu_f V_f - \nu_m (1 - V_f)) \varepsilon_1 \quad (4.64)$$

En combinant les relations (4.49) et (4.64), on aboutit à l'expression du coefficient de Poisson transversal  $\nu_{LT}$ :

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1} = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} = -(-\nu_f V_f - \nu_m (1 - V_f)) \quad (4.65)$$

Finalement :

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad (4.66)$$

#### 4.2 Relation entre fractions volumiques et fractions massiques

La masse volumique d'un matériau est la masse de ce matériau par unité de volume. Elle est notée ( $\rho$ ) et est déterminée par la relation :

$$\rho = \frac{W}{V} \quad (4.67)$$

D'après la relation (4.67), les masses des fibres, de la matrice et du composite sont données par les relations suivantes :

$$W_f = \rho_f \cdot V_f \quad (4.68)$$

$$W_m = \rho_m \cdot V_m \quad (4.69)$$

$$W_c = \rho_c \cdot V_c \quad (4.70)$$

La masse totale du composite est donnée grâce à la relation (4.7):

$$\rho_c \cdot V_c = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \quad (4.71)$$

Si on divise cette relation par le volume du composite, on obtient l'expression de la masse volumique du composite en fonction des fractions volumiques.

$$\rho_c = \rho_m \cdot \frac{V_m}{V_c} + \rho_f \cdot \frac{V_f}{V_c} = \rho_m \cdot V_m + \rho_f \cdot V_f \quad (4.72)$$

Ou bien :

$$\rho_c = \rho_m \cdot (1 - V_f) + \rho_f \cdot V_f \quad (4.73)$$

Si on combine les relations (4.3), (4.68), (4.69) et (4.70), on obtient :

$$\frac{W_c}{\rho_c} = \frac{W_m}{\rho_m} + \frac{W_f}{\rho_f} \quad (4.74)$$

Si on divise cette relation par la masse du composite, on obtient :

$$\frac{1}{w_c} \left( \frac{w_c}{\rho_c} \right) = \frac{1}{w_c} \left( \frac{w_m}{\rho_m} + \frac{w_f}{\rho_f} \right) = \frac{w_m}{w_c} \left( \frac{1}{\rho_m} \right) + \frac{w_f}{w_c} \left( \frac{1}{\rho_f} \right) = W_m \left( \frac{1}{\rho_m} \right) + W_f \left( \frac{1}{\rho_f} \right) \quad (4.75)$$

L'expression finale de la masse volumique du composite en fonction des fractions massiques est donnée par la relation suivante :

$$\frac{1}{\rho_c} = \left( \frac{W_m}{\rho_m} + \frac{W_f}{\rho_f} \right) \quad (4.76)$$

Alors :

$$\rho_c = \frac{1}{\left( \frac{W_m}{\rho_m} + \frac{W_f}{\rho_f} \right)} \quad (4.77)$$

On peut ainsi établir une relation entre les fractions massiques et les fractions volumiques en partant des définitions suivantes :

La masse des fibres est donnée par la relation :

$$W_f = \frac{w_f}{w_c}$$

Donc :

$$W_f = \frac{w_f}{w_c} = \frac{\rho_f \cdot V_f}{\rho_c \cdot V_c} = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f$$

Finalement :

$$W_f = \frac{\rho_f}{\rho_c} V_f \quad (4.78)$$

De la même manière on aboutit à :

$$W_m = \frac{\rho_m}{\rho_c} V_m \quad (4.79)$$

### 4.3 Méthodes analytiques pour la détermination des modules d'élasticité du pli

La comparaison entre les valeurs des modules déterminées expérimentalement sur des unidirectionnels et évaluées par la loi des mélanges a montré que seules les formules (4.26) et (4.66) donnent des valeurs proches de celles obtenues expérimentalement. De plus, cette méthode ne permet pas d'évaluer le module de cisaillement  $G_{TT'}$ . Une approche plus précise consiste à développer des modèles qui prennent en considération la géométrie des fibres et leur arrangement à l'intérieur de la matrice. En considérant un arrangement cylindrique (cellule élémentaire constituée d'une fibre entourée d'un cylindre de résine, la résolution du problème d'élasticité correspondant permet d'aboutir à des solutions analytiques exactes représentant le comportement du composite constitué d'une répartition uniforme de cette cellule. Les modules indépendants obtenus par cette approche sont :

#### a) Module de cisaillement $G_{LT}$

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f(1 + V_f) + G_m(1 - V_f)}{G_f(1 - V_f) + G_m(1 + V_f)} \quad (4.80)$$

**b) Module de compressibilité (matrice)**

$$k_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} \quad (4.81)$$

**c) Module de compressibilité (fibre)**

$$k_f = \frac{E_f}{3(1 - 2\nu_f)} \quad (4.82)$$

**d) Module de compression latéral (matrice)**

$$K_m = k_m + \frac{G_m}{3} \quad (4.83)$$

**e) Module de compression latéral (fibre)**

$$K_f = k_f + \frac{G_f}{3} \quad (4.84)$$

**f) Module de compression latéral  $K_L$**

$$K_L = k_m + \frac{V_f}{k_f - k_m + \frac{(G_f - G_m)}{3} + \frac{1 - V_f}{k_m + \frac{4}{3}G_m}} \quad (4.85)$$

**g) Module de cisaillement transversal  $G_{TT'}$**

$$G_{TT'} = G_m \left[ 1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + \frac{7}{3}G_m}{2k_m + \frac{8}{3}G_m} (1 - V_f)} \right] \quad (4.86)$$

**h) Module d'élasticité transversal**

Le module de Young transversal est calculé à partir des modules précédents grâce à la relation d'élasticité :

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT'}} + 2 \frac{\nu^2_{LT}}{E_L}} \quad (4.87)$$

**4.4 Analyse du comportement micromécanique des biocomposites époxydes/ fibres de sisal**

Le présent travail s'intéresse à la caractérisation et à la détermination des propriétés mécaniques des biocomposites stratifiés unidirectionnels élaborés en époxydes/fibres de sisal avec plusieurs proportions de masse de fibres. La fraction massique est facile à mesurer lors de l'élaboration d'un composite, la fraction volumique quant à elle, est plutôt utilisée dans les modèles théoriques qui décrivent le comportement mécanique de ces matériaux. Dans cette étude, nous allons conduire une analyse du comportement micromécanique des biocomposites

époxydes/fibres de sisal. Les caractéristiques mécaniques des constituants de base de ces matériaux sont présentées dans le Tableau 4.1.

**Tableau 4.1** Caractéristiques mécaniques des constituants des biocomposites

	Module de Young E [MPa]	Coefficient de Poisson $\nu$	Module de cisaillement G [MPa]	Masse volumique [Kg/m <sup>3</sup> ]
Matrice époxyde	$E_m=3\ 400$ [2]	$\nu_m=0.4$ [2]	$G_m=5\ 680$ [2]	1 100 [2]
Fibres de sisal	$E_f=15\ 000$ [3]	$\nu_f=0.32$ [3]	$G_f=1\ 210$ [3]	800 [3]

Le module de cisaillement G est calculé d'après la relation suivante :

$$G = \frac{E}{2(1 + \nu)} \quad (4.87)$$

Pour les fibres de sisal :

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} \quad (4.87)$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1 + \nu_f)} = \frac{15\ 000}{2(1 + 0.32)} = 5681.81 \text{ MPa}$$

Pour la résine époxyde :

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (4.87)$$

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} = \frac{3400}{2(1 + 0.4)} = 1214.28 \text{ MPa}$$

Les éprouvettes sont fabriquées par thermo compression avec des séquences d'empilement de  $0/90^\circ$  et  $\pm 45^\circ$  pour effectuer des essais de traction uniaxiale et de cisaillement plan respectivement. Les fractions massiques choisies correspondent à des fractions volumiques qui varient de 0.1 à 0.9 comme montré sur la Tableau 4.2. Les masses volumiques des composites élaborés sont déterminés par la loi de mélange, grâce à la relation (4.73) :

$$\rho_c = \rho_m \cdot (1 - V_f) + \rho_f \cdot V_f$$

Pour une fraction volumique des fibres  $V_f = 0.1$ , la masse volumique du composite  $\rho_c$  est :

$$\rho_c = 1100(0.9) + 800(0.1) = 1070 \text{ Kg/m}^3$$

De la même manière on calcule les masses volumiques des différents biocomposites qui correspondent aux différentes fractions volumiques des fibres de sisal. Les résultats sont portés sur le Tableau 4.2. Le comportement élastique d'un composite unidirectionnel

(isotrope transverse) est complètement défini par cinq coefficients indépendants appelés modules de l'ingénieur qui sont respectivement : le module de Young longitudinal noté  $E_L$ , le module de Young transversal noté  $E_T$ , le module de cisaillement longitudinal  $G_{LT}$  ou  $G_{LT'}$  ( $G_{LT}=G_{LT'}$ ), le module de cisaillement transverse  $G_{TT'}$ , et le coefficient de Poisson longitudinal  $\nu_{LT}$ . Ces grandeurs caractéristiques homogénéisées sont déterminées par les lois de mélange pour les différents biocomposites élaborés.

**Tableau 4.2** Caractéristiques physiques des biocomposites (époxyde/fibres de sisal)

N°	Désignation	Fraction massique des fibres	Fraction Massique de la matrice	Fraction volumique des fibres	Fraction volumique de la matrice	Masse volumique du composite (Kg/m <sup>3</sup> )
1	EP 01	0.0748	0.9252	0.1	0.9	1070
2	EP 02	0.1538	0.8462	0.2	0.8	1040
3	EP 03	0.2376	0.7623	0.3	0.7	1010
4	EP 04	0.3265	0.6735	0.4	0.6	980
5	EP 05	0.4210	0.5790	0.5	0.5	950
6	EP 06	0.5218	0.4782	0.6	0.4	920
7	EP 07	0.6292	0.3708	0.7	0.3	890
8	EP 08	0.7442	0.2558	0.8	0.2	860
9	EP 09	0.8674	0.1325	0.9	0.1	830

**Composite EP 01 :**  $V_f = 0.1$

Le module de Young longitudinal  $E_L$  est déterminé d'après la relation (4.26) :

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f)$$

Le module de Young transversal noté  $E_T$  est déterminé d'après la relation (4.87) :

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT'}} + 2 \frac{\nu_{LT}^2}{E_L}}$$

Avec  $K_L$  est le module de compression latéral déterminé grâce à la relation (4.85) :

$$K_L = K_m + \frac{V_f}{k_f - k_m + \frac{(G_f - G_m)}{3} + \frac{1 - V_f}{k_m + \frac{4}{3}G_m}}$$

$K_f$  et  $K_m$  sont respectivement les modules, de compression latéral (fibre) et module compression latéral (matrice) qui sont calculés par les relations (4.83) et (4.84) :

$$K_m = k_m + \frac{G_m}{3}$$

Et :

$$K_f = k_f + \frac{G_f}{3}$$

$k_f$  et  $k_m$  représentent respectivement les modules de compressibilité (fibre) et (matrice), déterminés à partir des relations (4.81) et (4.82) :

$$k_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)}$$

Et :

$$k_f = \frac{E_f}{3(1 - 2\nu_f)}$$

Le module de cisaillement transverse  $G_{TT'}$  est déterminé d'après la relation (4.86) :

$$G_{TT'} = G_m \left[ 1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + \frac{7}{3}G_m}{2k_m + \frac{8}{3}G_m} (1 - V_f)} \right]$$

Le coefficient de Poisson longitudinal  $\nu_{LT}$  est déterminé d'après la relation (4.66) :

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f)$$

Donc :

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) = 15\,000(0.1) + 3\,400(0.9) = 4\,560 \text{ MPa}$$

$$k_m = \frac{E_m}{3(1 - 2\nu_m)} = \frac{3400}{3(1 - 2(0.4))} = 5\,666.66 \text{ MPa}$$

$$k_f = \frac{E_f}{3(1 - 2\nu_f)} = \frac{15000}{3(1 - 2(0.32))} = 13\,888.88 \text{ MPa}$$

$$K_f = k_f + \frac{G_f}{3} = 13\,888.88 + \frac{5681.81}{3} = 15\,782.81 \text{ MPa}$$

$$K_m = k_m + \frac{G_m}{3} = 5\,666.66 + \frac{1214.28}{3} = 6\,071.42 \text{ MPa}$$

$$G_{TT'} = G_m \left[ 1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + \frac{7}{3}G_m}{2k_m + \frac{8}{3}G_m} (1 - V_f)} \right]$$

$$= 1214.28 \left( 1 + \frac{0.1}{\frac{1214.28}{5681.81 - 1214.28} + \frac{5666.66 + \frac{7}{3}(1214.28)}{2(5666.66) + \frac{8}{3}(1214.28)} (1 - (0.1))} \right)$$

$$= 1366.67 \text{ MPa}$$

$$K_L = K_m + \frac{V_f}{k_f - k_m + \frac{(G_f - G_m)}{3} + \frac{1 - V_f}{k_m + \frac{4}{3}G_m}}$$

$$= 6071.4 + \frac{0.1}{(13888.88 - 5666.66) + \frac{(5681.81 - 1214.28)}{3} + \frac{1 - (0.1)}{5666.66 + \frac{4}{3}(1214.28)}}$$

$$= 6071.42 \text{ MPa}$$

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) = 0.32(0.1) + 0.4(0.9) = 0.392$$

Et en fin :

$$E_T = \frac{2}{\frac{1}{2K_L} + \frac{1}{2G_{TT'}} + 2\frac{\nu_{LT}^2}{E_L}} = \frac{2}{\frac{1}{2(6071.42)} + \frac{1}{2(1366.67)} + 2\frac{(0.392)^2}{4560}} = 3878.95 \text{ MPa}$$

Le module de cisaillement longitudinal  $G_{LT}$  est déterminé d'après la relation (4.80) :

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f(1 + V_f) + G_m(1 - V_f)}{G_f(1 - V_f) + G_m(1 + V_f)}$$

$$= (1214.28) \frac{5681.81(1 + 0.1) + 1214.28(1 - 0.1)}{5681.81(1 - 0.1) + 1214.28(1 + 0.1)}$$

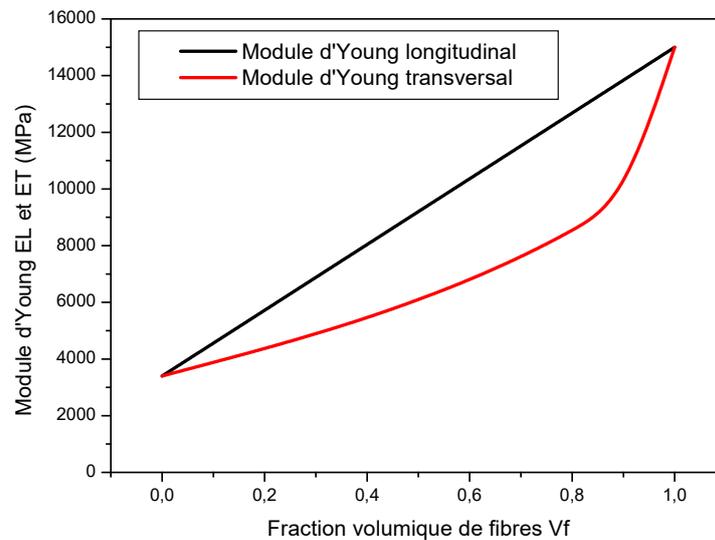
$$= 1382.50 \text{ MPa}$$

Pour vérifier la validité du calcul manuel et éviter les répétitions de calcul, nous avons élaboré un programme de calcul en langage MATLAB. Ce programme de calcul a permis de déterminer les modules de l'ingénieur des différents biocomposites élaborés avec des fractions volumiques de 0.1 à 0.9. Les résultats sont portés sur le (Tableau 4.3). La variation des différents modules d'élasticité des biocomposites en fonction de la fraction volumique de fibres ( $V_f=0$  à  $V_f=1$ ) est présentée sur les Figures (4.8),(4.9) et (4.10) .On peut remarquer que conformément à la littérature, les modules d'Young longitudinal  $E_L$  et transversal  $E_T$  varient entre deux bornes supérieure appelée borne de Reuss et inférieure de Voigt (Figure 4.8). La valeur des modules de cisaillement  $G_{TL}$  et  $G_{TT'}$  croit avec l'augmentation du taux de fibres

(Figure 4.9). La valeur du coefficient  $\nu_{LT}$  décroît avec l'augmentation du taux de fibres (Figure 4.10).

**Tableau 4.3** Différents biocomposites élaborés avec des fractions volumiques de 0.1 à 0.9

N°	$V_f$	$E_L (E_1)$ MPa	$E_T (E_2)$ MPa	$G_{LT}=G_{LT'}$ ( $G_{12}=G_{13}$ ) MPa	$G_{TT'}$ MPa	$\nu_{LT}$
EP 01	0.1	4560	3878.95	1382.50	1366.67	0.392
EP 02	0.2	5720	4367.53	1575.78	1543.15	0.384
EP 03	0.3	6880	4887.79	1800.14	1749.89	0.376
EP 04	0.4	8040	5455.32	2063.73	1995.42	0.368
EP 05	0.5	9200	6084.63	2377.83	2291.79	0.360
EP 06	0.6	10360	6791.58	2758.51	2656.61	0.352
EP 07	0.7	11520	7595.20	3229.44	3116.69	0.344
EP 08	0.8	12680	8519.64	3827.04	3714.94	0.336
EP 09	0.9	13840	9596.63	4610.33	4524.61	0.328



**Fig.4.8** Variation des modules d'Young longitudinal  $E_L$  et transversal  $E_T$  en fonction du taux de fibres

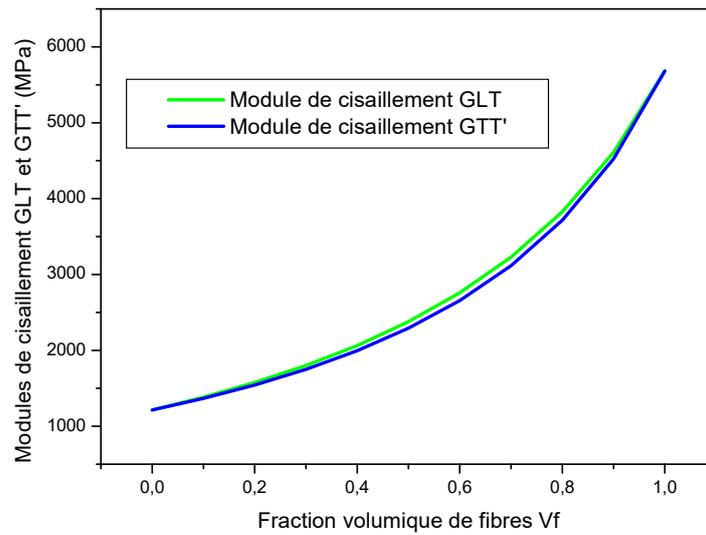


Fig.4.9 Variation des modules de cisaillement  $G_{LT}$  et  $G_{TT}$  en fonction du taux de fibres

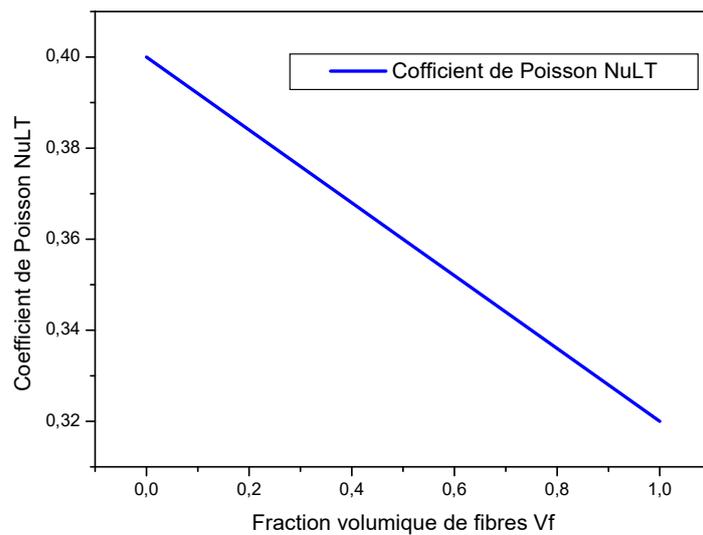


Fig.4.10 Variation module du coefficient de Poisson en fonction du taux de fibres

**Références bibliographiques du chapitre 4**

- [1] Bayarassou Mokhtar, Développement d'un logiciel de calcul d'homogénéisation des plaques stratifiées composites, Mémoire de Magister, Université Hadj Lakhdar de Batna, (2008).
- [2] R. Nouri, A. Bahlaoui, M. Sammouda, S. Belhouideg, Comportement mécanique d'un composite verre epoxy utilisés dans les pales éoliennes: comparaison de modèles théoriques, 13ème Congrès de Mécanique 11 - 14 Avril 2017 (Meknès, Maroc).
- [3] D. Chandramohana, K. Marimuthub, Characterization of natural fibers and their application in bone grafting substitutes, Acta of Bioengineering and Biomechanics, Vol. 13, No. 1, (2011).

## Chapitre 5

### Modélisation et simulation numérique du comportement mécanique des biocomposites (époxyde/sisal)

#### 5.1 Introduction

Les essais mécaniques représentent une étape indispensable pour accéder aux grandeurs caractéristiques des matériaux, tel que le module d'Young, la limite d'élasticité, la ténacité et la résistance à la fatigue. L'étude présentée dans ce chapitre s'intéresse à la détermination de quelques grandeurs caractéristiques des biocomposites élaborés à partir de matrice époxyde et de renfort fibres de sisal, par des simulations numériques de l'essai de traction uniaxiale par une approche numérique basée sur la méthode des éléments finis en utilisant le code industriel ABAQUS.

#### 5.2 Essai de traction

L'essai de traction est parmi les essais mécaniques les plus utilisés pour la caractérisation mécanique et la détermination des principales caractéristiques mécaniques tels que le module d'élasticité, le coefficient de Poisson, la limite d'élasticité, la résistance à la rupture, l'allongement après rupture et le coefficient de striction. Son exécution est facile et les résultats obtenus servent à dimensionner toutes sortes de pièces conçues en composites ou autres types de matériaux. Pour les matériaux élastiques, le diagramme de l'essai de traction est généralement composé d'une partie linéaire et réversible appelée zone élastique. Dans cette zone élastique la loi de proportionnalité, entre la contrainte de traction (5.1) et la déformation longitudinale (5.2) est la loi de Hooke en traction (5,3) :

$$\sigma = \frac{F}{S_0} \quad (5.1)$$

$$\varepsilon_L = \frac{\Delta L}{L_0} \quad (5.2)$$

$$\sigma = E\varepsilon_L \quad (5.3)$$

E est le module d'élasticité longitudinale ou module de Young du matériau. Il s'exprime en MPa ou en GPa. C'est une caractéristique principale du matériau. Dans la zone élastique la loi de proportionnalité entre la déformation longitudinale  $\varepsilon_L$  et la déformation transversale  $\varepsilon_T$  est la loi de Poisson qui s'écrit:

$$\nu = -\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L} \quad (5.4)$$

$\nu$  est le coefficient de Poisson (sans dimension) du matériau. C'est, comme le module de Young, une caractéristique essentielle du matériau.

### **5.3 Simulation des essais de traction des biocomposites (époxyde/sisal)**

#### **5.3.1 Code de calcul ABAQUS**

Fondé en 1978, ABAQUS, est l'un des premiers fournisseurs mondiaux de logiciels et services pour l'analyse par éléments finis. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommée mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour analyse par éléments fini, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples [1].

#### **5.3.2 Définition d'ABAQUS**

ABAQUS est un logiciel de calcul en éléments finis développé par DASSAULT. Il est composé de trois produits qui sont : ABAQUS/Standard, ABAQUS/Explicit et ABAQUS/CAE. La gamme de logiciels d'ABAQUS est particulièrement réputée pour sa technologie, sa qualité et sa fiabilité. Elle s'est imposée comme partie intégrante des processus de conception de sociétés de renommée mondiale dans tous les secteurs industriels. ABAQUS offre les meilleures solutions pour des problèmes linéaires, non linéaires, explicites et dynamiques. Le logiciel fournit un environnement inégalé pour analyse par éléments fini, proposant un grand nombre d'alternatives aux opérations impliquant des fournisseurs et des produits multiples [2].

#### **5.3.3 Description des possibilités d'ABAQUS**

ABAQUS est un solveur (Standard, Explicit, Implicit, etc.) qui effectue la résolution d'un problème décrit par un fichier « entrée » (ou fichier de données) et dont il écrit la solution vers un fichier « de sortie » (ou fichier de résultats).

- *Le fichier (« texte ») de données :*

Extension : **inp**

Contenu : mots clés qui décrivent les géométries, les matériaux, les conditions aux limites.

- *Le fichier de résultats :*

Extension : **odb**

Contenu : contours et courbes résultats.

La réalisation d'une simulation numérique se fait en créant son propre fichier d'entrée grâce à un éditeur texte en connaissant les divers mots clés ou bien en utilisant l'interface graphique

d'ABAQUS CAE. ABAQUS couvre presque tout les domaines de la physique et tous les types de problèmes.

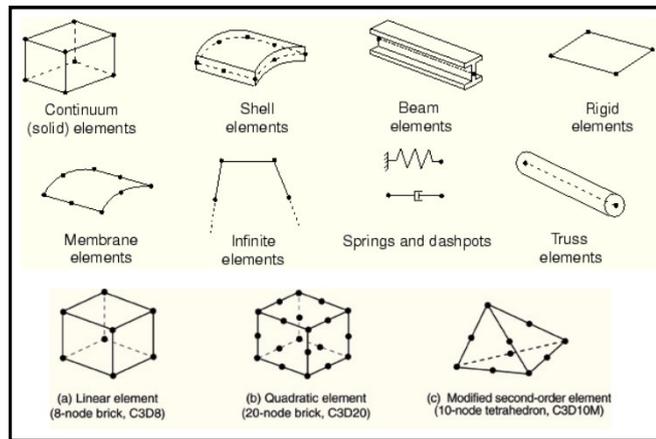
Domaines physiques:

- Mécanique
- Thermique
- Electrique (piézo et thermique)
- Problèmes couplés

Problèmes:

- Statique et dynamique
- Linéaires et non linéaires

ABAQUS offre un très large choix d'éléments (plus d'une centaine d'éléments) avec la possibilité de programmer de nouveaux éléments (en FORTRAN, sur ABAQUS/Standard) (Fig.4.1).



**Fig.5.1** Exemples d'éléments intégrés dans la bibliothèque d'ABAQUS

Les unités

Avant de commencer de définir n'importe quel modèle sous ABAQUS, on doit décider quel système d'unités on emploie. ABAQUS n'a aucun système d'unités intégré. Toutes les données doivent être spécifiées dans un système d'unités conforme.

**Tableau 5.1** Exemples de systèmes d'unité d'ABAQUS

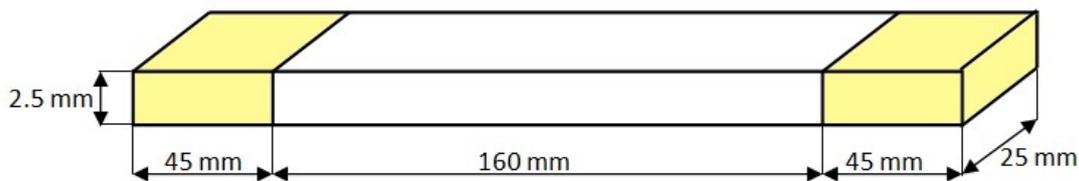
Longueur	SI (m)	SI (mm)
Force	Newton	Newton
Pression/contrainte	Pascal	MPa
Densité	Kg/m3	Tonnes/mm <sup>3</sup>
Masse	Kg	Tonnes
température	Kelvin	Kelvin

### 5.3.4 Position du problème

Dans cette étude, nous allons mener une analyse numérique du comportement mécanique des biocomposites élaborés à partir de matrice époxyde et de renfort fibres de sisal) avec différentes fractions de volume des fibres. Pour prédire le comportement de ces composites élaborés, un calcul numérique a été effectué avec le code de calcul ABAQUS standard. Généralement on fait recours à des simulations numériques des essais mécaniques lorsque les essais expérimentaux ne sont pas accessibles ou bien pour éviter une campagne d'essais par erreur. Ainsi, des simulations numériques d'essais de traction uniaxiale sont conduites sur des éprouvettes normalisées et préparées selon la norme AFNOR 57-101. Les dimensions des éprouvettes sont présentées dans le (Tableau 5.2) :

**Tableau 5.2** Dimensions des éprouvettes selon la norme AFNOR 57-101

Longueur (L) [mm]	Largeur(b) [mm]	Épaisseur(h) [mm]	longueur entre les mors (l) [mm]	longueur des talons (c) [mm]
250	25	2.5	160	45



**Fig. 5.2** Eprouvette normalisée utilisée pour les simulations

### 5.3.5 Choix des matériaux utilisés pour les éprouvettes

La teneur en fibres a un grand effet de sur les propriétés mécaniques en traction des composites. En théorie, lorsque la teneur en fibres augmente, le module d'Young du composite devient plus élevée, cette augmentation du module d'élasticité longitudinal avec le taux de fibres provient du renforcement apporté par les fibres, ce qui permet un bon transfert des contraintes de la matrice aux fibres. A faible teneur en fibres, la quantité réduite de fibres conduit à une faible capacité de transfert de charge entre les fibres. Ce qui engendre une accumulation de contrainte en certains points du composite, favorisant de moins bonnes propriétés mécaniques des composites ayant un faible taux de fibres. Quand le taux de fibres est élevé, la capacité de transfert de contrainte diminue en raison de l'agglomération des fibres et des vides éventuels dans le composite. De plus, une trop grande quantité de fibres peut favoriser la formation de microfissures dans l'interface. En pratique on choisit selon le cas des taux de renfort de 0,4 à 0,7. Les matériaux étudiés dans ce travail sont des biocomposites stratifiés constitués de fibres continues de sisal d'une résine époxyde avec des taux

volumiques de renfort respectivement :  $V_f = 0.4, 0.5, 0.6$  et  $0.7$ . Les éprouvettes testées sont formées d'un empilement de 5 couches, d'épaisseur 0.5 mm chacune, avec deux orientations de fibres ( $0^\circ$  et  $90^\circ$ ) (Figure 5.3 et Figure 5.4). Les propriétés élastiques des plis UD qui constituent les éprouvettes sont déterminées en utilisant la loi des mélanges et portées sur le (Tableau 4.1) Le module d'élasticité longitudinal  $E_L$  et le coefficient de poisson  $\nu_{12}$  sont déterminés à partir des essais sur des éprouvettes unidirectionnelles découpées dans la direction des fibres à  $0^\circ$ . Le module transversal  $E_T$  est déterminé à partir des essais sur des éprouvettes unidirectionnelles découpées à  $90^\circ$  par rapport à la direction des fibres.

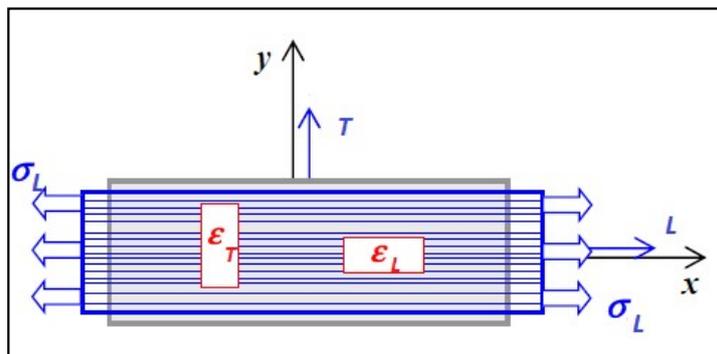


Fig. 5.3 Eprouvette sollicitée en traction longitudinale

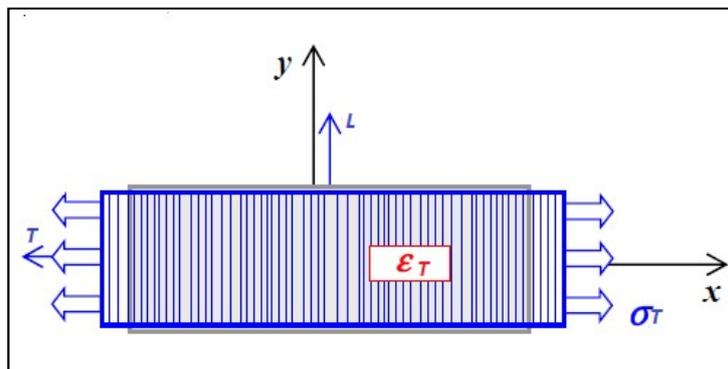


Fig. 5.4 Eprouvette sollicitée en traction selon la direction transversale

### 5.3.6 Hypothèses de simulation

#### 5.3.6.1 Système d'unités utilisé

Pour cette étude nous avons choisis le système d'unités : (MPa, N, mm, °C)

#### 5.3.6.2 Modélisation de l'éprouvette

Nous avons choisis pour cette étude une modélisation de type 3D/Deformable/Shell/Planar, pour s'approcher au mieux de la réalité. La géométrie et les dessins de l'éprouvette ont été faits directement sur ABAQUS (Figure 5.5). Sur les figures (5.6) et (5.7), sont présentées les

différentes couches qui constitue le matériau de l'éprouvette pour les cas des fibres orientées respectivement à  $0^\circ$  et à  $90^\circ$ .

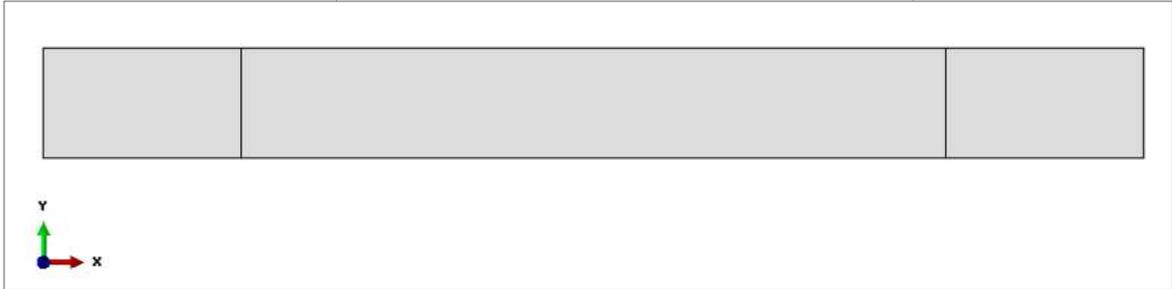


Fig. 5.5 Modélisation de l'éprouvette sur ABAQUS

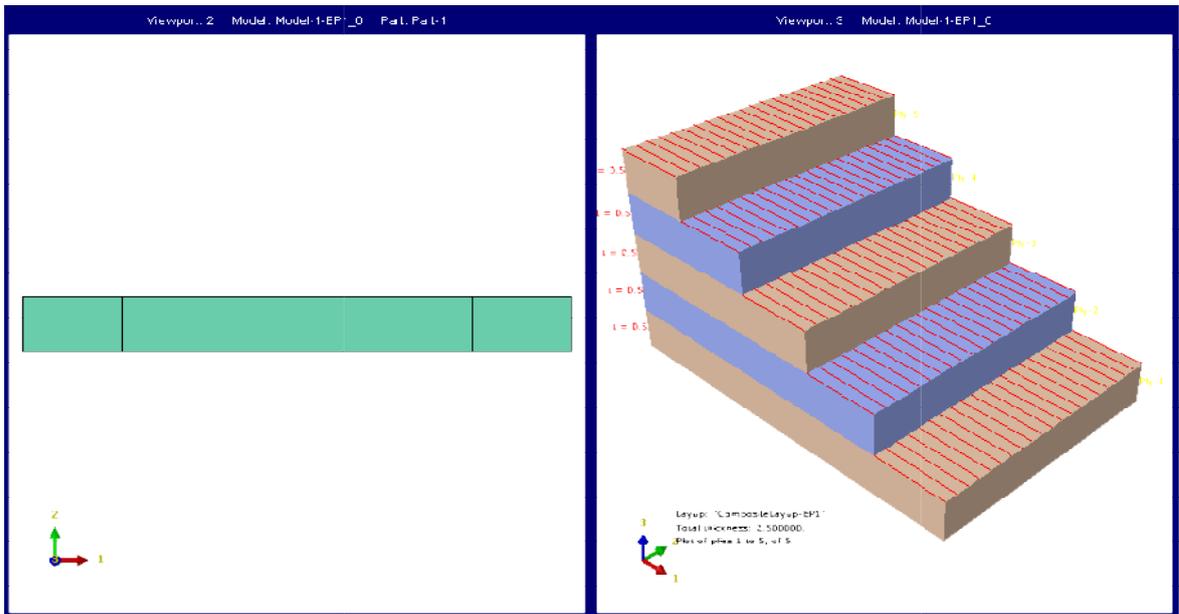


Fig. 5.6 Orientation des plis du matériau de l'éprouvette à  $0^\circ$

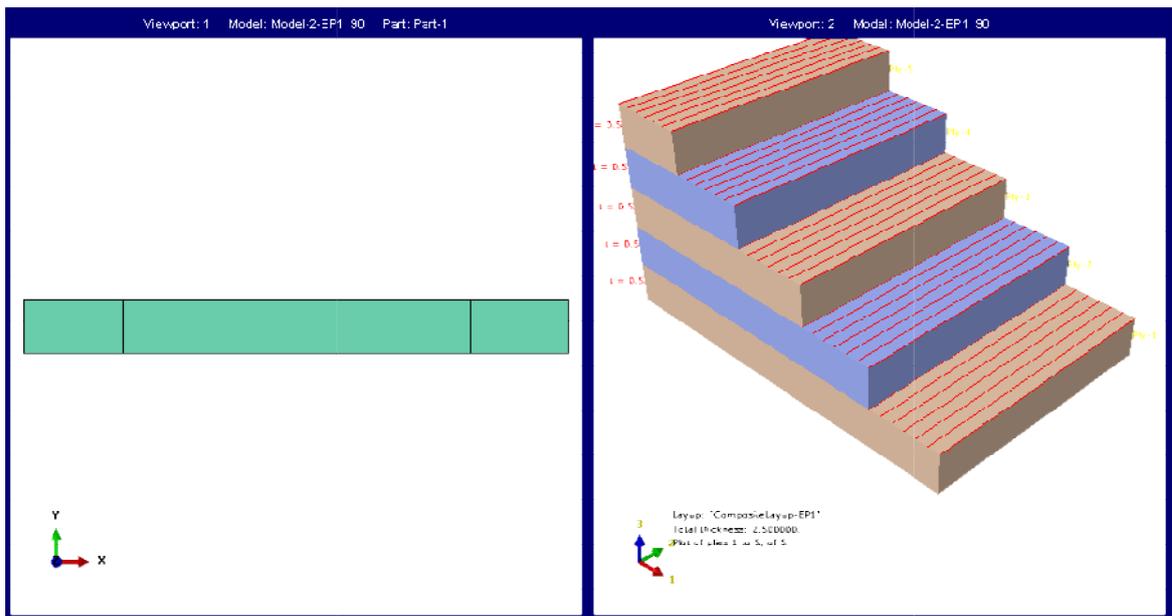


Fig. 5.7 Orientation des plis du matériau de l'éprouvette à  $90^\circ$

### 5.3.6.3 Caractéristiques mécaniques de l'éprouvette

Les caractéristiques mécaniques de l'éprouvette, utilisées dans les simulations sont résumées dans le (Tableau 4.1).

### 5.3.6.4 Assemblage

Sur les figures (5.8) et (5.9), nous présentons l'assemblage constitué de l'éprouvette modélisée et associée au repère d'axes choisi ainsi que les différents points et zones réservés à l'application des conditions aux limites.

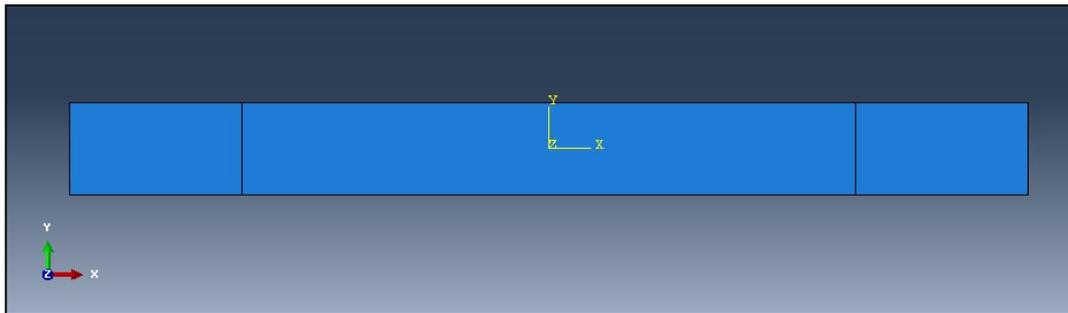


Fig. 5.8 Modélisation de l'éprouvette sur ABAQUS

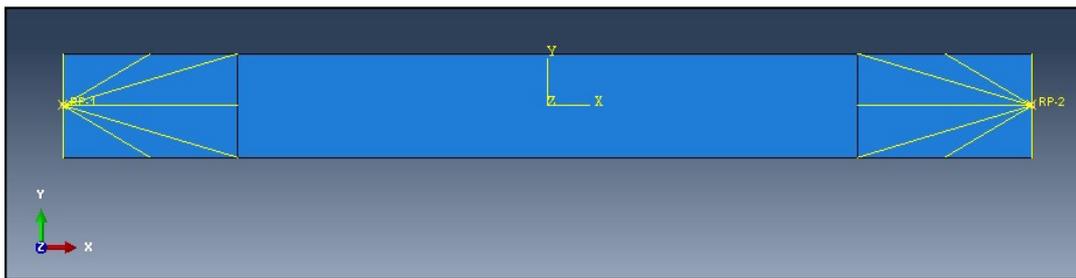


Fig. 5.9 Modélisation de l'éprouvette sur ABAQUS

### 5.3.6.5 Conditions aux limites

Les conditions aux limites ont été définies de manière à reproduire de la meilleure façon les conditions réelles de l'essai. En somme il y a trois conditions aux limites appliquées au modèle, les surfaces en contact avec les mors lors de l'essai sont bloquées en translation suivant x, y et z d'un côté. De l'autre côté, les déplacements sont bloqués suivant y et z avec application d'un déplacement de 10 mm dans la direction x, afin de simuler le chargement comme montré sur la (Figure 5.10.)

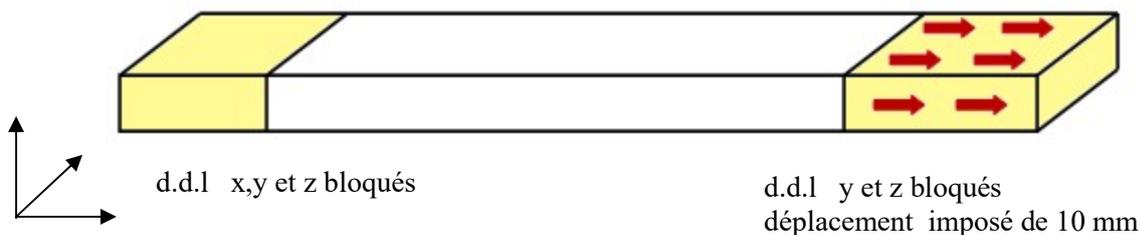
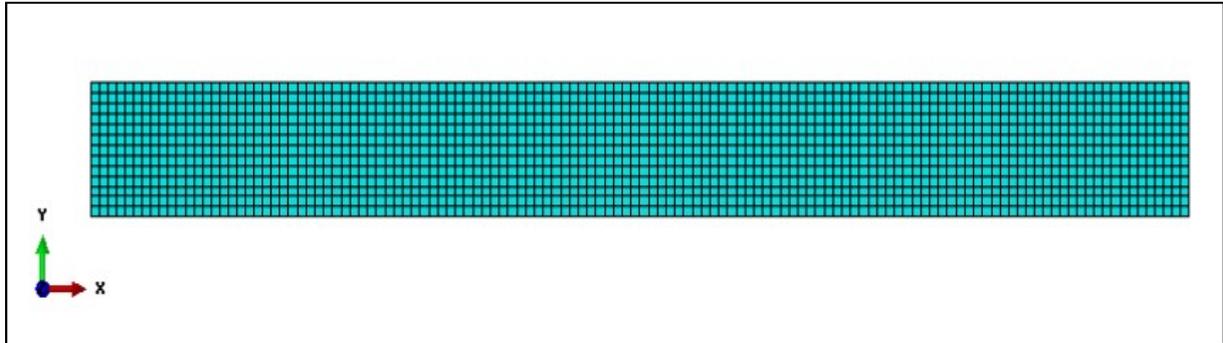


Fig. 5.10 conditions aux limites mécanique appliquées dans le modèle de l'éprouvette

### 5.3.6.6 Maillage

Dans ce modèle nous avons utilisé 1638 éléments finis de type : coque à 4 nœuds avec intégration réduite, dénommés S4R (Figure 5.11). Le manuel d'utilisation d'ABAQUS propose l'utilisation de l'élément S4R pour modéliser les structures minces de formes régulières, (car sa validité est assurée) [3].



**Fig. 5.11** Maillage du modèle élément fini de l'éprouvette avec des éléments de type SR4

### 5.3.7 Résultats et discussion

Le but principal de la simulation de cet essai est l'exploitation des résultats pour valider et déterminer quelques grandeurs caractéristiques des biocomposites élaborés dans cette étude, principalement les modules d'élasticité longitudinal ( $E_L$ ), transversal ( $E_T$ ) et le coefficient de Poisson longitudinal ( $\nu_{LT}$ ). Les éprouvettes testées sont constitués de fibres longues, continues et disposées dans la matrice. Les caractéristiques mécaniques des quatre éprouvettes choisis pour cette étude sont portées sur le (Tableau 5.3)

**Tableau 5.3** Caractéristiques mécaniques des éprouvettes

Désignation	$V_f$	$E_L$ (MPa)	$E_T$ (MPa)	$G_{LT}=G_{LT'}$ (MPa)	$G_{TT'}$ (MPa)	$\nu_{LT}$ ( $\nu_{12}$ )
EP1	0.4	8 040	5 455.32	2 063.73	1 995.42	0.368
EP2	0.5	9 200	6 084.63	2 377.83	2 291.79	0.360
EP3	0.6	10 360	6 791.58	2 758.51	2 656.61	0.352
EP4	0.7	11 520	7 595.20	3 229.44	3 116.69	0.344

#### 5.3.7.1 Traction à 0°

Dans un premier temps les éprouvettes sont testées à 0° (l'effort de traction est appliqué dans la direction longitudinale des fibres).

#### Eprouvette (EP1-0°) :

Les distributions des contraintes et des déformations ( $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ) et ( $\varepsilon_{11}$ ,  $\varepsilon_{22}$ ) dans l'éprouvette (EP1-0°) sollicitée en traction selon la direction longitudinale (L) sont représentées sur les

figures (5.12), (5.13), (5.14) et (5.15). L'exploitation des résultats fournis par Abaqus puis transférés vers le tableur Excel a permis de tracer la courbe contraintes-déformations. A partir l'équation de la pente de cette courbe on peut déduire la valeur du module de Young longitudinal ( $E_L$ ) (Figure 5.16). La valeur trouvée,  $E_L = 8\ 040$  MPa, correspond exactement à la valeur théorique obtenue par le calcul d'homogénéisation  $E_L = 8\ 040$  MPa.

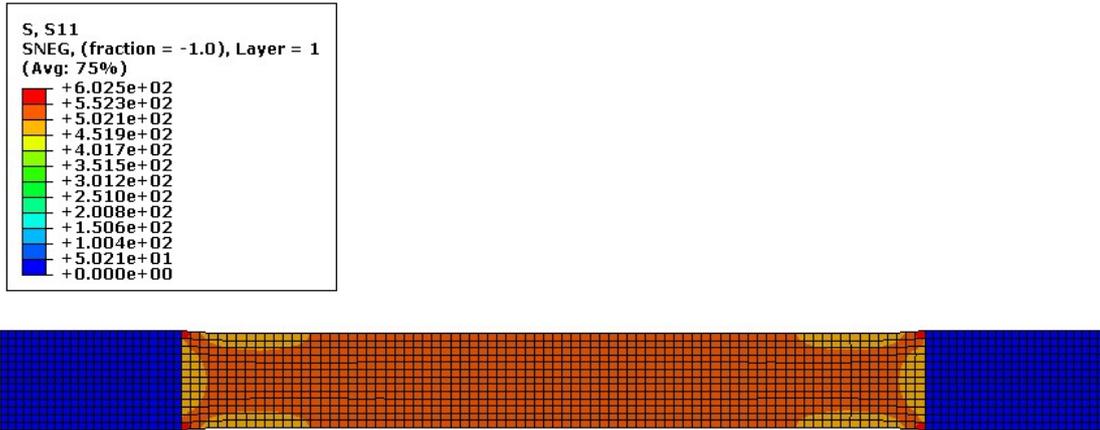


Fig. 5.12 Distribution des contraintes  $\sigma_{11}$  dans l'éprouvette (traction à  $0^\circ$ )

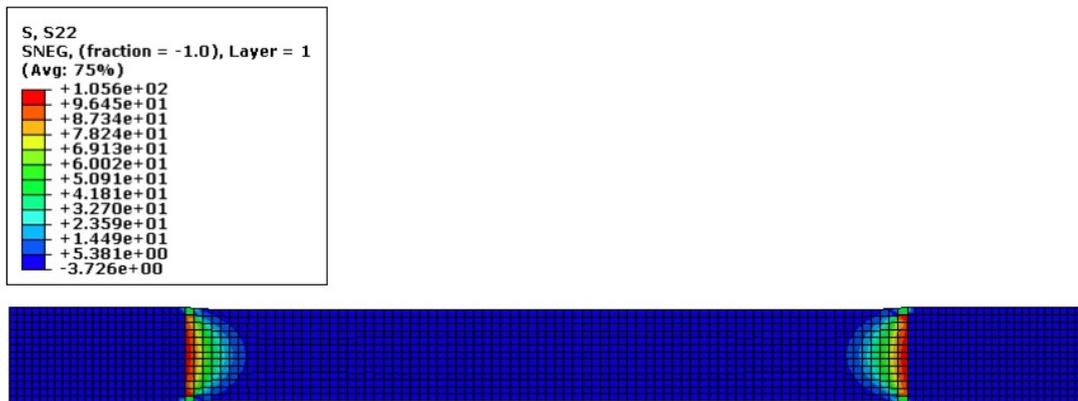


Fig. 5.13 Distribution des contraintes  $\sigma_{22}$  dans l'éprouvette (traction à  $0^\circ$ )

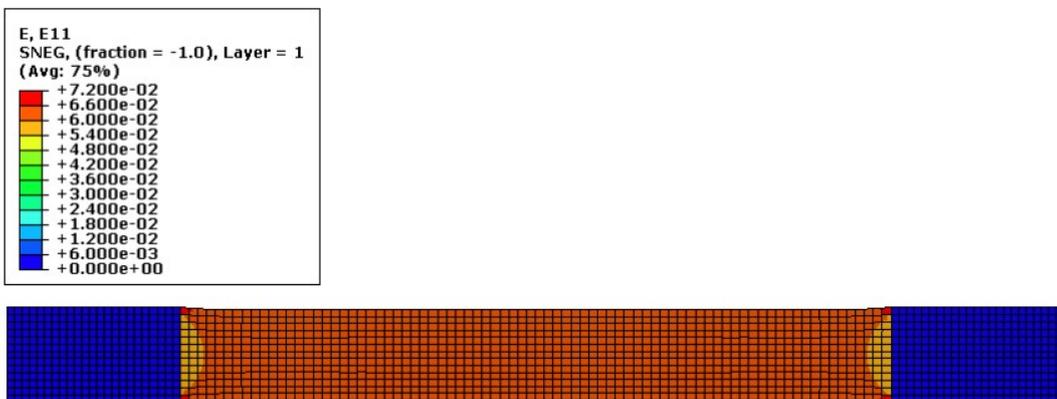


Fig. 5.14 Distribution des déformations  $\epsilon_{11}$  dans l'éprouvette (traction à  $0^\circ$ )

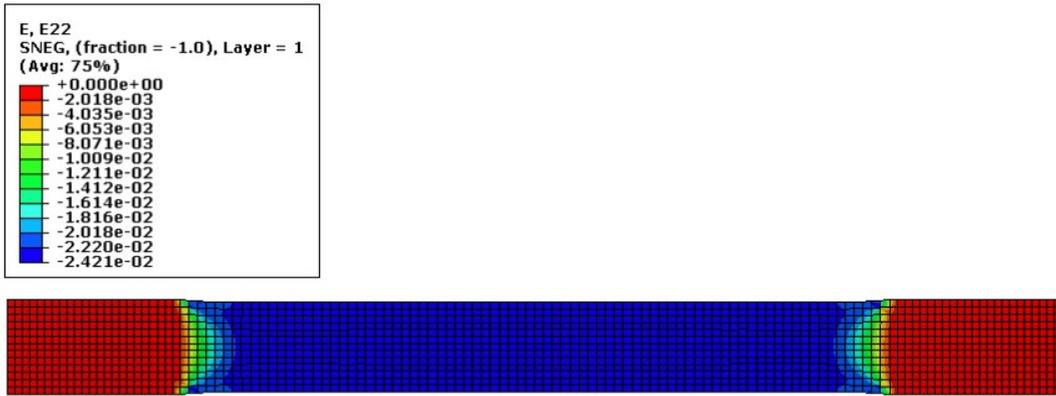


Fig. 5.15 Distribution des déformations  $\epsilon_{22}$  dans l'éprouvette (traction à  $0^\circ$ )

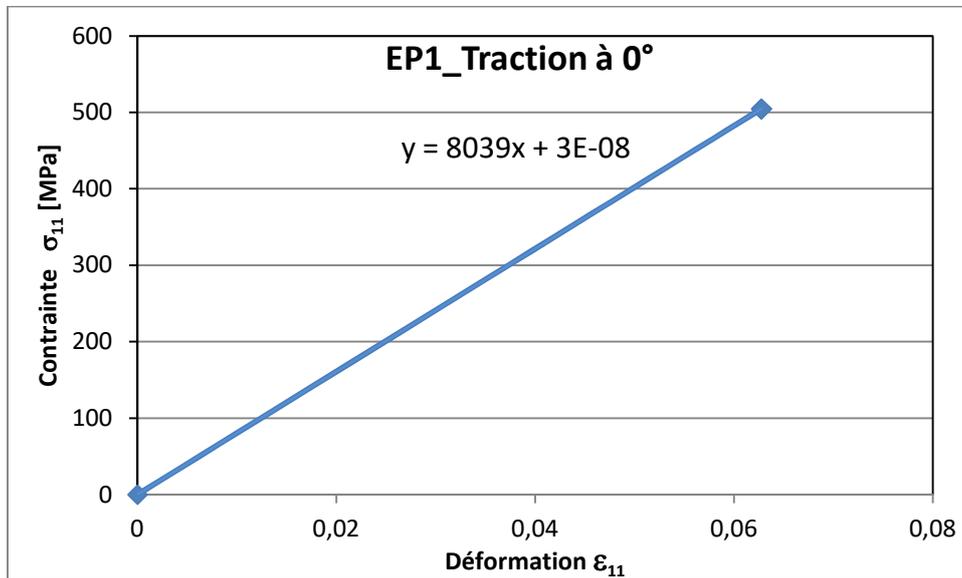


Fig. 5.16 Courbe contraintes déformations (traction à  $0^\circ$ )

Le coefficient de Poisson est calculé à partir de la relation (5.4), il est défini comme étant le rapport de la déformation transversale à la déformation longitudinale :

$$\nu = -\frac{\epsilon_T}{\epsilon_L}$$

Pour calculer sa valeur à partir des données fournies par ABAQUS durant la simulation sur l'éprouvette (EP1- $0^\circ$ ), on extrait les valeurs nodales des variables  $\epsilon_{11}$  et  $\epsilon_{22}$  depuis un nœud quelconque de la partie centrale de l'éprouvette, comme montré sur les figures (5.17) et

( 5.18) :

$$\nu_{LT} = -\frac{(-0.0230929)}{0.0627529} = 0.36799$$

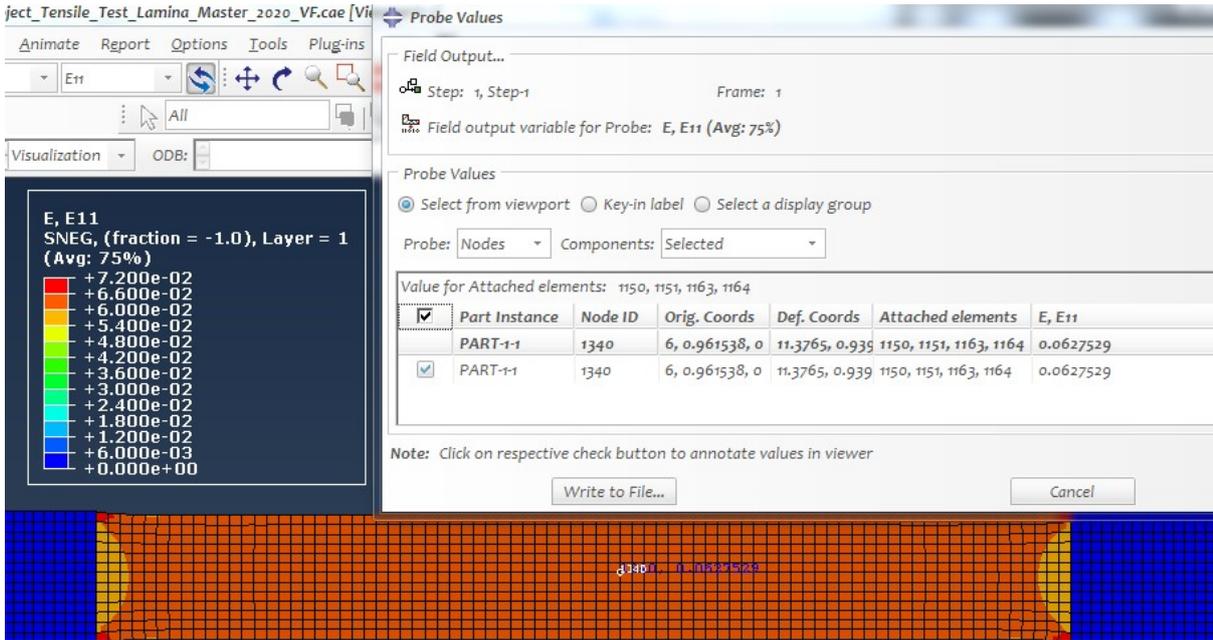


Fig. 5.17 Valeur nodale de la déformation  $\epsilon_{11}$  (traction à  $0^\circ$ )

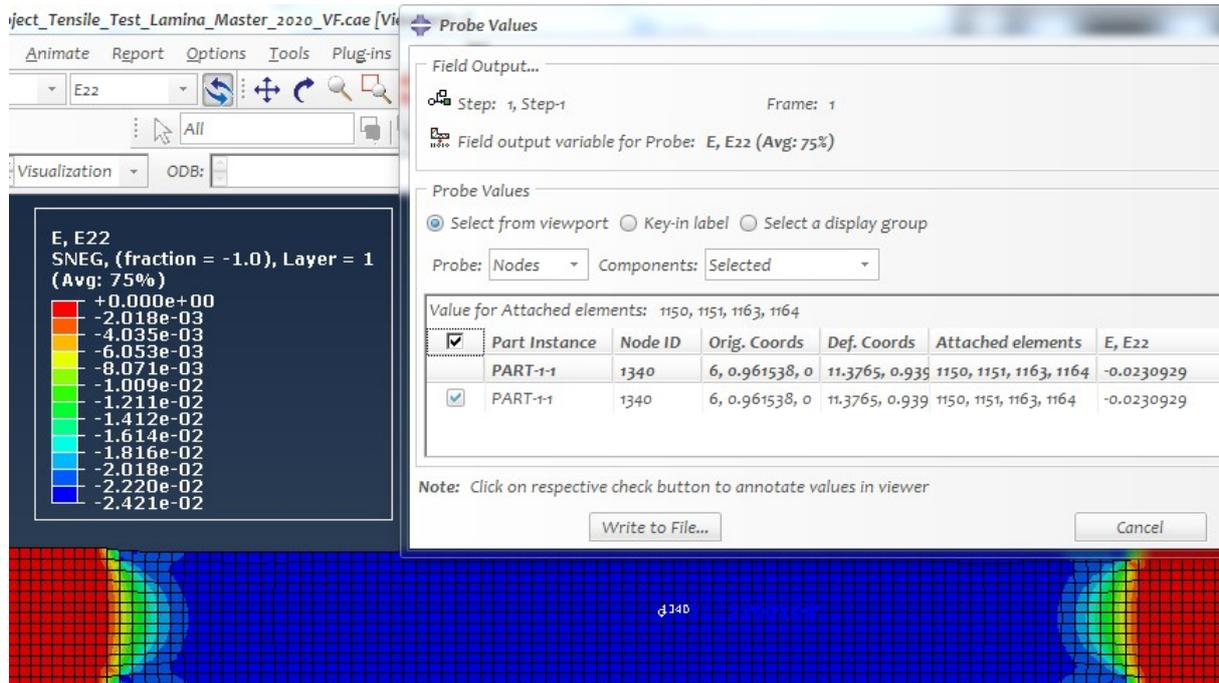


Fig. 5.18 Valeur nodale de la déformation  $\epsilon_{22}$  (traction à  $0^\circ$ )

### 5.3.7.2 Traction à $90^\circ$

Comme pour le cas précédant, les distributions des contraintes et des déformations ( $\sigma_{11}$ ,  $\sigma_{22}$ ) et ( $\epsilon_{11}$ ,  $\epsilon_{22}$ ) dans l'éprouvette (EP1- $90^\circ$ ), sollicitée en traction selon la direction transversale (T) sont représentée sur les figures (5.19), (5.20), (5.21) et (5.22). La courbe contraintes-

déformations fournie par le code de calcul ABAQUS est transférée vers le tableur Excel ce qui a permis de déduire la valeur du module de Young transversal ( $E_T$ ) à partir l'équation de la pente (Figure 5.23). La valeur trouvée  $E_T= 5455$  MPa, correspond exactement à la valeur théorique obtenue par le calcul d'homogénéisation  $E_T=5 455.32$  MPa.

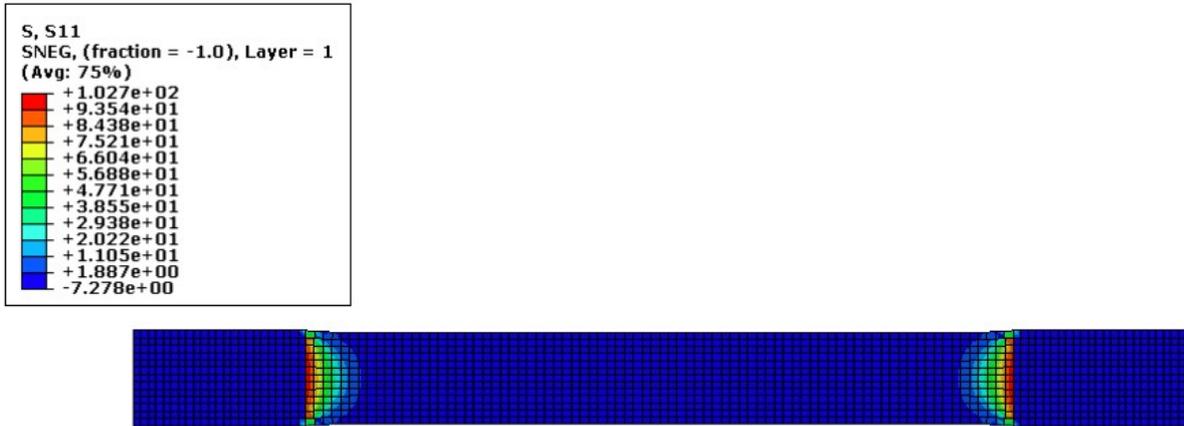


Fig. 5.19 Distribution des contraintes  $\sigma_{11}$  dans l'éprouvette (traction à  $90^\circ$ )

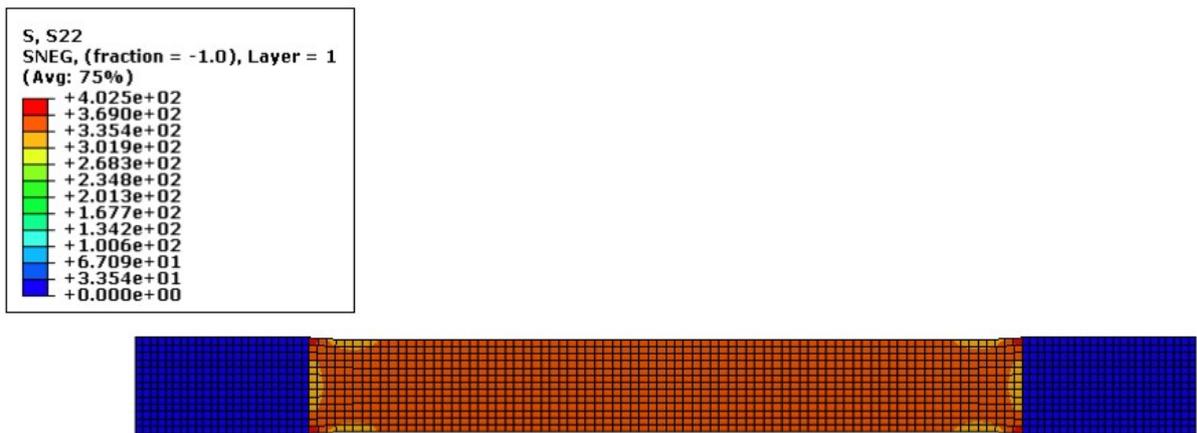


Fig. 5.20 Distribution des contraintes  $\sigma_{22}$  dans l'éprouvette (traction à  $90^\circ$ )

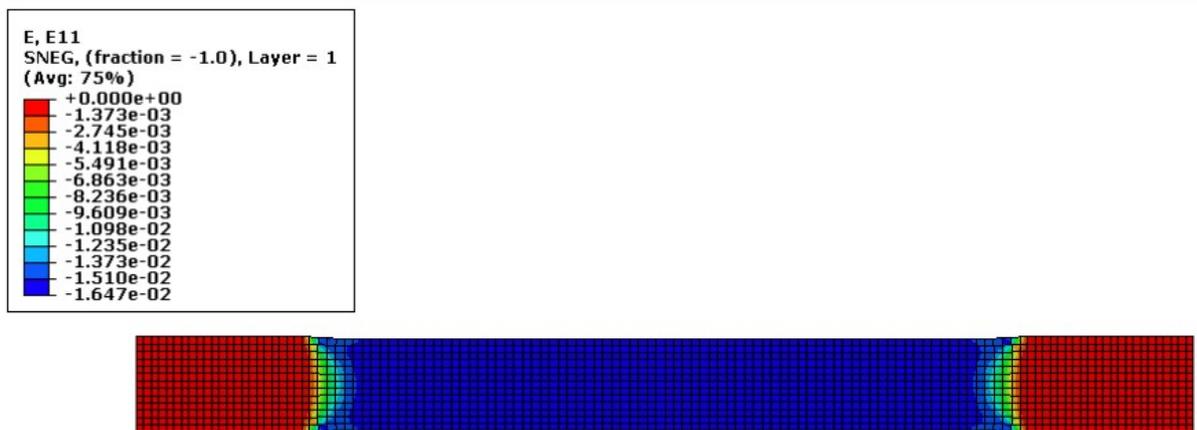


Fig. 5.21 Distribution des contraintes  $\epsilon_{11}$  dans l'éprouvette (traction à  $90^\circ$ )

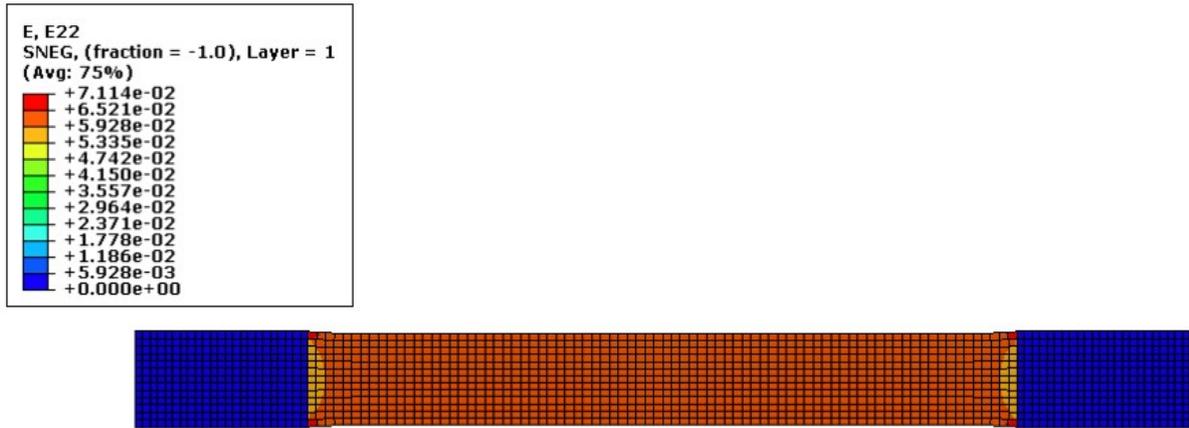


Fig. 5.22 Distribution des contraintes  $\epsilon_{22}$  dans l'éprouvette (traction à  $90^\circ$ )

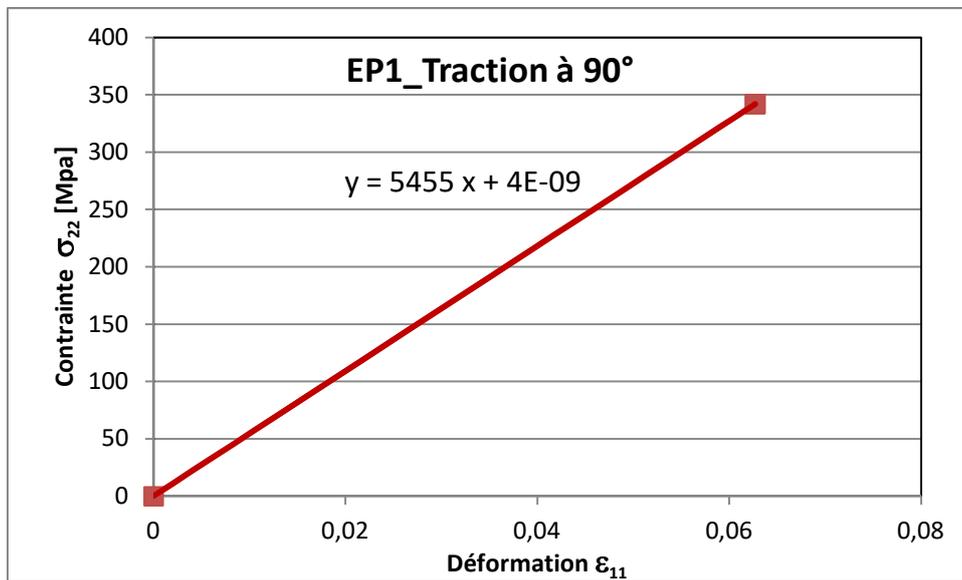


Fig. 5.23 Courbe contraintes déformations : traction à  $90^\circ$

De la même manière on conduit des simulations du test de traction pour toutes les éprouvettes (EP-2 à EP-4). Les résultats obtenus de l'étude numériques (ABAQUS) et ceux de l'étude théorique (loi de mélanges) ainsi que l'erreur relative déterminée et calculée d'après la relation (5,5) sont représentés sur le Tableau 5.4.

Tableau 5.4 Comparaison des résultats numériques et théoriques

	$E_L$ (ABQ)	$E_L$ (THEO)	Erreur %	$E_T$ (ABQ)	$E_T$ (THEO)	Erreur %	$\nu_{LT}$ (ABQ)	$\nu_{LT}$ (THEO)	Erreur %
EP1	8 040	8 040	0	5 455	5 455.32	0.0058	0.36799	0.368	0.0027
EP2	9200	9 200	0	6 084	6 084.63	0.0103	0.360	0.360	0
EP3	10360	10 360	0	6 791	6 791.58	0.0085	0.35199	0.352	0.0028
EP4	11520	11 520	0	7 595	7 595.20	0.0026	0.34399	0.344	0.0029

Comme montré sur les figures (5.24) et (5.25) la superposition des courbes des modules de Young longitudinal  $E_L$  et transversal  $E_T$ , la rigidité en traction des éprouvettes augmente avec l'augmentation du taux volumique de fibres dans la composite.

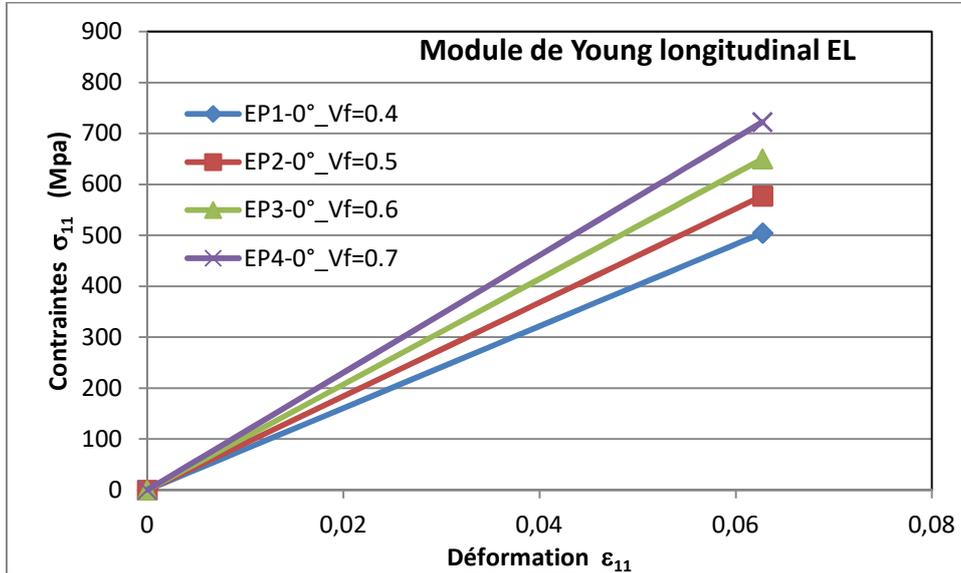


Fig. 5.24 Module de Young longitudinal  $E_L$  pour différent taux de renfort

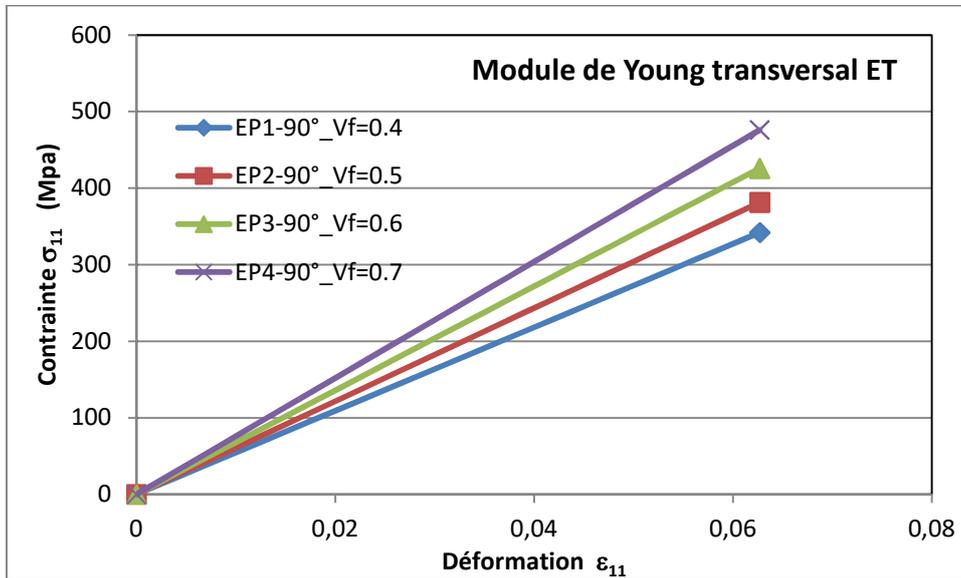


Fig. 5.25 Module de Young transversal  $E_T$  pour différent taux de renfort

### **Références bibliographiques du chapitre 5**

- [1] Mellab Younes, Deghboudj Samir, Investigation Numérique du Comportement Thermomécanique d'une Plaque Carrée Isotrope, Mémoire de Master 2, Université Larbi Tébessi de Tébessa, (2017-2018).
- [2] ELVILLALY Mohamed Ahmed, Djedili Rabeh, Deghboudj Samir, Analyse du comportement vibratoire d'une plaque rectangulaire isotrope simplement appuyée, Mémoire de Master 2, Université Larbi Tébessi de Tébessa, (2018-2019).
- [3] ABAQUS Documentation User Manual 6.14.

## • Conclusion générale

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à l'étude et à l'élaboration de composites biosourcés à base de fibres de sisal et de matrice polymérique en époxyde. L'étude a été réalisée expérimentalement et numériquement avec le code de calcul ABAQUS. Suite à cette étude nous sommes parvenus aux résultats suivants :

- Les fibres végétales de sisal sont parmi les sources naturelles et non polluantes de l'environnement.
- Pour l'extraction des fibres nous avons opté pour la technique du rouissage à l'eau qui a permis de conserver les propriétés physiques et mécaniques des fibres.
- Pour se débarrasser des constituants non désirés comme la lignine, la pectine, les cires et la graisse, nous avons effectué un traitement par la soude (alcalinisation) des fibres de sisal. Ceci a permis d'améliorer considérablement l'état de surface des fibres.
- Le calcul d'homogénéisation par la loi de mélange, à partir des caractéristiques mécaniques des constituants des biocomposites (sisal) et (époxyde) nous a permis de déterminer les propriétés mécaniques des biocomposites stratifiés unidirectionnels élaborés en avec plusieurs proportions de masse de fibres.
- Les modules d'Young longitudinal  $E_L$  et transversal  $E_T$  varient entre deux bornes supérieure appelée borne de Reuss et inférieure de Voigt. La valeur des modules de cisaillement  $G_{TL}$  et  $G_{TT'}$  croît avec l'augmentation du taux de fibres. La valeur du coefficient  $\nu_{LT}$  décroît avec l'augmentation du taux de fibres.
- Les résultats obtenus par les simulations numériques avec le code de calcul ABAQUS, du test de traction avec orientations des fibres à  $0^\circ$  et  $90^\circ$ , pour plusieurs éprouvettes, avec différents taux de fibres, étaient en bon accord avec le calcul d'homogénéisation par la loi de mélange.
- En plus des résultats trouvés nous avons pu grâce à cette étude compléter les lacunes de notre formation et nous sommes parvenus à apprendre et voir même maîtriser quelques logiciels (ABAQUS, MATLAB et autres,...).