



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic of Algeria

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministry of Higher Education and Scientific Research

جامعة محمد البشير الإبراهيمي - مستغانم

Abdelhamid Ibn Badis University of Mostaganem

كلية العلوم والتكنولوجيا

Faculty of Sciences and Technology

قسم الهندسة الميكانيكية

Department of Mechanical Engineering



N° d'ordre : M...../GM/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

**Prise en Compte de L'endommagement
Dans les Composites Unidirectionnelles
Alfa/Epoxy Pour des Températures et Humidités
Variables**

Présenté par :

- ❖ Benaissa Aicha
- ❖ Mebarki Ahmed

Soutenu le 30/06/2020 devant le jury composé de :

Président Pr. ZENASNI Ramdane Université de Mostaganem UMAB

Examineur Dr. SAHNOUN Med Université de Mostaganem UMAB

Encadreur Dr. KHIAT S.M. Amine Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2019 / 2020

Dédicaces

*Nous remercions Allah de nous avoir donné la force et la
volonté pour Pouvoir finir ce mémoire de fin d'études*

Je dédie ce modeste effort :

A tous ceux qui ont de loin ou de près contribués à ce travail

A tous ceux qui m'ont encouragé soutenus et aidés

A mes parents

A mon frère

A ma sœur

A mes proches

A mes amis

A mon binôme Sid Ahmed

A mes professeurs

A mes collègues

Merci à tous et à toutes

Aicha Benaissa

Remerciements

*Permettez-nous d'offrir aujourd'hui tous nos remerciements et notre respect à nos chers et honorables enseignants et professeurs, en particulier **M. Khiat M. Amine**, qui s'est toujours montré à l'écoute et être disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour le soutien, l'aide, et le temps qu'il a bien voulu nous consacrer, et pour la confiance, les encouragements, les précieux conseils*

*Nous aimerions également remercier le Professeur Mr **Zenasni Ramdane** Président du jury de soutenance de ce mémoire, ainsi qu'aux membres de ce jury : **Dr. SAHNOUN Med** qui m'ont fait l'honneur d'accepter d'être les modérateurs de ce travail.*

Nous exprimons nos profondes gratitudee et remerciements à tous les enseignants de département de Génie Mécanique.

Quant à nos parents, les mots même si par des milliers ne paient pas votre remerciement, et nous ne pourrons jamais redevoir la moindre partie de votre bienveillance Sur nous toute notre vie, car vous avez été plus heureux et plus triste pour nous que nous même dans nos succès et nos échecs. Vous êtes notre fierté et nos couronnes. On vous aiment très fort

Enfin, nous adressons nos plus sincères remerciements à tous nos proches et amis, qui nous ont toujours soutenus et encouragés au cours de la réalisation de ce mémoire.

Résumé

La présente étude traite la durabilité des matériaux composites unidirectionnels pour des fibres naturelles en Alfa dans un milieu environnementale variable. En fonction des caractéristiques mécanique de la fibre d'Alfa, des bio composites à arrangement hexagonale ont été élaborées pour améliorer les performances mécaniques du composite et son utilisation pour un cout très réduit. L'emploi de ce type de matériaux augmente nettement l'efficacité de telles structures. Afin de valoriser les causes et les conséquences de la défaillance des plaques à des renforts unidirectionnel, la compréhension complète des lois de comportement qui génèrent l'évolution du phénomène d'endommagement de ces matériaux sous des chargements critiques, doit être établie. De nos jours, la mécanique d'endommagement des matériaux composites aux interfaces matrice-fibre est un devenue un domaine de recherche d'un intérêt scientifique et technologique très prospère.

Le modèle utilisé suppose qu'un groupe de fibres cassées est entouré d'un nombre de fibres intactes sous forme d'un arrangement hexagonal. L'évolution thermomécanique des caractéristiques particulières de la fibre, la matrice, et l'interface fibre/matrice, sont les facteurs les plus importants pour évaluer la résistance du composite de point de vue micromécanique. Les conditions d'interfaces et d'adhérences sont prises en considération par ce modèle pour quantifier le taux de transfert des contraintes normales de cisaillement par l'intermédiaire de la matrice entre deux fibres voisines intacte et cassée.

Mots-clés : Micromécanique, Thermomécanique, Composite unidirectionnel, Interface Matrice époxyde -Fibre Alfa.

Abstract:

This study deals with the durability of unidirectional composite materials for natural Alfa fibres in a variable environmental environment. Depending on the mechanical characteristics of Alfa fibre, biocomposites with hexagonal arrangement have been developed to improve the mechanical performance of the composite and its use at a very reduced cost. The use of this type of material clearly increases the efficiency of such structures. In order to assess the causes and consequences of the failure of plates with unidirectional reinforcements, a complete understanding of the laws of behaviour which generate the evolution of the phenomenon of damage to these materials under critical loads must be established. Nowadays, the mechanics of damage to composite materials at the matrix-fibre interfaces has become a very prosperous area of research of scientific and technological interest.

The model used assumes that a group of broken fibres is surrounded by a number of intact fibres in the form of a hexagonal arrangement. The thermomechanical evolution of the particular characteristics of the fibre, the matrix, and the fibre/matrix interface, are the most important factors to assess the strength of the composite from a micromechanical point of view. The interface and adhesion conditions are taken into account by this model to quantify the transfer rate of normal shear stresses through the matrix between two intact and broken neighbouring fibres.

Keywords: Micromechanics, Thermomechanics, Unidirectional composite, Epoxy Matrix Interface - Alfa Fiber.

الملخص:

تتناول هذه الدراسة متانة المواد المركبة أحادية الاتجاه لألياف ألفا الطبيعية في وسط بيئي متغير. اعتمادًا على الخصائص الميكانيكية لألياف ألفا، تم تطوير المركبات الحيوية ذات الترتيب السداسي لتحسين الأداء الميكانيكي للمركب واستخدامه بتكلفة منخفضة جدًا. اعتمادًا على الخصائص الميكانيكية لألياف ألفا، تم تطوير المركبات الحيوية ذات الترتيب السداسي لتحسين الأداء الميكانيكي للمركب واستخدامه بتكلفة منخفضة جدًا. يؤدي استخدام هذا النوع من المواد بشكل واضح إلى زيادة الكفاءة مثل هذه الهياكل. من أجل تقييم أسباب وعواقب فشل اللوحات ذات التعزيزات أحادية الاتجاه، يجب إنشاء فهم كامل لقوانين السلوك التي تولد تطور ظاهرة التلف لهذه المواد تحت الأحمال الحرجة. في الوقت الحاضر، أصبحت ميكانيكا الضرر الذي لحق بالمواد المركبة في واجهات الألياف المصنوفة مجالًا مزدهرًا جدًا للبحث ذي الاهتمام العلمي والتكنولوجي.

النموذج المستعمل يفترض أن مجموعة من الألياف المتضررة محاطة بعدد من الألياف السليمة على شكل ترتيبات سداسية. التطور الميكانيكي الحراري لخصائص الليف، المصنوفة، و السطح البيئي ليف/مصنوفة أهم العوامل لتطوير مقاومة المركب من وجهة نظر ميكروميكانيكية. شروط الوسط البيئي و الالتصاقات مأخوذة بعين الاعتبار من طرف النموذج لتحديد معدل نقل القيود العادية للقص من خلال المصنوفة بين ألياف متجاورة سليمة ومتضررة.

كلمات مفتاحية: ميكروميكانيكية، الميكانيكي الحراري، مركب أحادي الإتجاه، واجهة مصنوفة ايبوكسي ، ليف ألفا .

SOMMAIR

Introduction.....	
Chapitre I	
Etude bibliographique sur les matériaux composites	
I.1 Introduction	3
I.2 Définition.....	3
I.3 CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES	3
➤ Matrices	5
• Les résines thermodurcissables	6
• Les résines thermoplastiques	6
• Résines thermostables	6
➤ Renfort.....	7
a) Différents types de renfort.....	7
b) Géométrie des renforts.....	8
• Les fibres longues	8
• Les fibres courtes	8
• Les particules	8
c) Architecture des renforts.....	9
• Les unidirectionnels (UD)	9
➤ L'interface.....	9
Chapitre II	
Etude bibliographique sur Les fibres naturelles.....	
II1 Les fibres naturelles.....	10
• Les fibres végétales.....	10
• Les fibres animales	10
• Les fibres minérales (amiante)	11
II2 L'utilisation de fibres naturelles.....	11
II3 Définition de la fibre végétal	11
II31 Classification des fibres végétales	12
II32 Présentations des différentes fibres végétales	12
➤ Lin.....	12

➤ Ramie	13
➤ Chanvre	14
➤ Sisal	14
➤ Jute	15
➤ Coco	15
II33 Composition chimique des fibres végétales	15
➤ Cellulose	16
➤ Les hémicelluloses	16
➤ Pectines	17
II34 Propriétés des fibres végétales	18
II4 Généralités sur les fibres d'Alfa	20
II.4.1.1 La morphologie de la plante :	21
II.4.1.2 Domaine d'utilisation des fibres d'alfa	22
II.4.1.3 Composition chimique	23
II.3.1.4 Les fibres d'alfa comparées à d'autres fibres naturelles aux points de vues propriétés mécaniques .	24
II.3.1.5 Applications actuelles	26
CHAPITRE III	
Modèle de Rupture Longitudinale	
III.1 INTRODUCTION	27
III.2 MODELE DE RUPTURE LONGITUDINALE AVEC EFFET HYGROTHERMIQUE	28
CHAPITRE IV	
Résultats et Discussions	
IV Analyse mécanique du composite Alfa/Epoxyde sous l'effet Hygrothermique	36
IV1 Longueur inefficace	36
IV.1.1 Evolution de la longueur inefficace en fonction de la concentration d'humidité avec des températures variables pour deux chargements définis	36
IV.1.2 Evolution de la longueur inefficace en fonction des températures variables pour des différentes concentrations d'humidités, pour $\sigma = 0.5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$	39
IV2 Evolution des concentrations de contraintes sous l'effet hygrothermique	41
IV.2.1 Evolution de concentration de contrainte en fonction du nombre de fibre cassée et une progression croissante du chargement extérieur, pour $V_f = 0,5$ et (T° et $C\%$ variable)	41
IV.2.2 Evolution de concentration de contrainte en fonction des concentrations d'humidités et du nombre des fibres cassées, pour un chargement de $0.5 \sigma_0$ et (Températures variable)	42
IV.2.3 Evolution de concentration de contrainte en fonction de la température et du nombre des fibres cassées, pour un chargement de $0.5 \sigma_0$ et (des concentrations d'humidités variable)	44

IV.2.4 Evolution de concentration de contrainte en fonction de deux fractions volumique 0.3 et 0.5 et dans des conditions hygrothermiques variables, pour un chargement de 0.5 σ_0 .45

Conclusion Générale.....

Références bibliographiques.....

Liste des figures

Chapitre I

<i>Figure I.1 : Constituants d'un matériau composite</i>	4
<i>Figure I.2 : Classification des différents types de composites (a) et (b)</i>	5
<i>Figure I.3 : Différentes familles de matrices [14]</i>	5
<i>Figure I.4: Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques [14]</i>	6
<i>Figure I.5 : Différents types de fibres de verre [18]</i>	7
<i>Figure I.6 : Différentes familles du renfort.[19]</i>	8
<i>Figure I.7 : Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules</i>	8

Chapitre II

<i>Figure II.1 : Production mondiale de fibres textiles [23]</i>	10
<i>Figure II.2 : Illustrations de quelques fibres animales, de gauche à droite : cocon de soie, fibres d'Angora et fibres d'Alpaga [25]</i>	11
<i>Figure II.3 : Structure d'une fibre végétale [27]</i>	12
<i>Figure II.4 : Le lin</i>	13
<i>Figure II. 5 : La Ramie</i>	13
<i>Figure II.6 : Le chanvre</i>	14
<i>Figure II.7 : Le sisal</i>	14
<i>Figure II. 8 : Le Jute</i>	15
<i>Figure II. 9 : Fibre de Coco</i>	15
<i>Figure II.10: structure de la cellulose [32]</i>	16
<i>Figure II.11 : Structure d'un type de xyloglucane [34]</i>	17
<i>Figure II.12 : structure de la pectine [35]</i>	17
<i>Figure II.13 : Structure de la lignine [32]</i>	18
<i>Figure II.14: Plante Alfa</i>	21
<i>Figure II.15 : Schémas de la plante alfa [41]</i>	22
<i>Figure II.16 : Utilisation de l'alfa a) Artisanales, b) Tapisseries, c) Pâturages [40]</i>	23
<i>Figure II.17 : La courbe de traction sur des faisceaux de fibres d'alfa [41]</i>	26

Chapitre III

<i>Figure III.1 : Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace</i>	30
<i>Figure III.2 : Arrangement des fibres intactes autours des fibres cassées</i>	31

Figure III-3 : Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes [50].....32

Chapitre IV

Figure IV.1 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité et de température, pour $\sigma = 0.5\sigma_0$37

Figure IV.2 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité et de température, pour un chargement complet $\sigma = \sigma_0$39

Figure IV.3 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la température et la concentration d'humidité, pour $\sigma = 0.5\sigma_0$39

Figure IV.4 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la température et la concentration d'humidité, pour $\sigma = \sigma_0$40

Figure IV.5 : Evolution de concentration de contrainte en fonction du nombre de fibre cassée et une progression du chargement extérieur, pour une fraction volumique $V_f=0,5$, cas (T° et $C\%$ variable).....42

Figure IV.6: Evolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation progressive de la concentration d'humidité pour différentes T° et $C\%$ et pour $\sigma = 0.5\sigma_0$44

Figure IV.7: Evolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation progressive de la température et pour $C=0, 20, 50$ et 100% , pour $\sigma = 0.5\sigma_0$45

Figure IV.8: Evolution de concentration de contrainte en fonction de deux fractions volumique 0.3 et 0.5 et dans des conditions hygrothermiques variables, pour un chargement de $0.5\sigma_0$46

Liste des Tableaux

Chapitre II

Tableau II.1 : Propriétés physiques de différentes fibres végétales [36,37]	19
Tableau II.2 : Propriétés mécaniques en traction de quelques fibres végétales [38]	19
Tableau II.3: La répartition territoriale de la plante alfa [40]	21
Tableau II.4 : La composition d'alfa [41]	24
Tableau II.5: Les propriétés mécaniques en traction des principales fibres naturelles et synthétiques [38]	25
Tableau II.6: Résultats des essais mécaniques sur des faisceaux de fibres d'alfa [41]	25

Chapitre III

Tableau III.1 : Paramètres de la variation de la température et de l'humidité [44]	29
--	----

LISTE DES SYMBOLES

a	Zone de décollement localement plastifiée
α	Coefficient d'indice de la matrice
A_m	Surface de la matrice
A_f	Surface de la fibre
β	Paramètre des modules de géométrie fibre-matrice
c	Indice du composite en bloc
c_c	Indice d'humidité absorbée
E_c	Module de Young du composite
E_f	Module de Young de la fibre
E_m	Module de Young de la matrice
E_l	Module des fibres adjacentes intactes
f	Coefficient d'indice de la fibre
g	Température Shift relatif par unité d'humidité absorbée
G_m	Module de cisaillement de la matrice
σ_c	Contrainte de traction du composite
σ_0	Contrainte de référence de la fibre
σ_{fu}	Contrainte à la rupture de la fibre
σ_m	Contrainte en traction de la matrice
σ_{mu}	Contrainte à la rupture de la matrice
τ_0	Contrainte de cisaillement
ρ	Masse volumique
η	Paramètre de cisaillement
L	Longueur de l'échantillon
L_0	Longueur de référence de l'échantillon
r_f	Rayon de la fibre
R_2	Quantité géométrique du composite
n_i	Nombre de fibres cassées
ν_m	Coefficient de poisson de la matrice
V_f	Fraction volumique de la fibre
t	Épaisseur de l'échantillon
W	Largeur de l'échantillon
U_i	Déplacements
j	L'accroissement de la charge

Introduction Générale :

Les matériaux composites sont de plus en plus utilisés dans les applications industrielles. Ils viennent souvent détrôner les matériaux métalliques dans de nombreux domaines. Deux facteurs essentiels ont poussé le développement et l'utilisation des composites. Le premier, le rapport résistance/masse très élevé qui trouve toute son utilité dans les applications nécessitant des gains de masse dans les applications d'aéronautiques et d'automobiles [1]. Le second facteur, ayant également poussé le développement des composites, est lié à la spécificité de ces matériaux donnent, que ce soit d'un point de vue mécanique, thermique,...etc. Une liberté supplémentaire au concepteur: celle de choisir le comportement du matériau [1,2] en fonction du type de fibres et de résine, du taux de renfort, de la disposition des fibres et du processus de réalisation.

Deux de ces propriétés sont essentielles dans le dimensionnement de structures composites, il s'agit de la caractérisation à l'échelle micromécanique et macro mécanique des modules élastiques et de la résistance mécanique. Une synthèse de ces propriétés peut être consultée dans les travaux de Christensen [3]. Ces travaux sont basés sur les modèles micromécaniques d'homogénéisation et ont recours à la définition d'un volume élémentaire représentatif afin d'effectuer une homogénéisation du composite.

Au cours des dernières années, l'utilisation des fibres naturelles dans les composites a suscité un grand engouement, et particulièrement dans le secteur des composites à matrice organique [4]. Du fait d'une demande croissante d'« éco-matériaux » et du coût de plus en plus élevé des fibres synthétiques (carbone ou verre), de nouveaux matériaux contenant des fibres naturelles ont été développés. Ils ont pour avantage d'être plus léger tout en ayant des propriétés mécaniques intéressantes [4]. De plus, les fibres naturelles ont un coût beaucoup moins élevées que les synthétiques et sont renouvelables. Les récentes avancées dans l'utilisation des fibres naturelles (lin, cellulose, jute, chanvre, sisal, Alfa...) dans les composites ont été étudiées par plusieurs équipes de recherche telles [5, 6, et 7], reportent que les fibres conventionnelles peuvent être produites avec des caractéristiques reproductibles, contrairement aux fibres végétales qui sont dépendantes de leur diamètre, de leur structure, de leur degré de polymérisation ou encore de leur origine dans la plante (partie périphérique ou interne de la tige, feuille). La composition chimique des fibres naturelles dépend également de la saison où elles ont été semées, récoltées, ou encore du type de sol sur lequel elles ont été plantées.

L'étude comparative du cycle de vie d'une pièce pour véhicule automobile ou autre en résine époxyde renforcée par des fibres de chanvre ou lin (étude déjà faite cette année 2020 par des Masters 2), et d'une pièce réalisée à partir de polystyrène-butadiène acrylonitrile (ABS) selon différentes méthodes,

Introduction Générale

a révélé que non seulement la pièce renforcée aux fibres de chanvre ou lin présentait un avantage du point de vue de l'environnement durant la phase de production, mais que le poids réduit grâce à l'application de la pièce à base de fibres naturelle permettait une économie d'énergie minimale, avec des avantages additionnels pour l'environnement au cours de la phase d'utilisation [8]. Finalement, l'utilisation des fibres naturelles en Alfa comme renfort peuvent permettre d'atteindre des propriétés mécaniques intéressantes, tout en réduisant de façon significative le coût des composites.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la continuité des travaux de recherches déjà effectués auparavant. Donc, nous comptons poursuivre le même travail en utilisons les fibres naturelles en Alfa, c'est l'objectif de ce travail ou on veut exploiter les fibres naturelles à cause d'une demande croissante et le coût beaucoup moins élevées que les synthétiques et sa disponibilité **en grand Sahara Algérienne**, en ayant toujours des propriétés mécaniques intéressantes. Une analyse du processus de la rupture longitudinale incluant les interactions micromécaniques entre les fibres naturelles et la matrice en tenant compte de l'effet des conditions d'environnement sur la dégradation des constituants du composite.

Le présent modèle qui est basé sur le modèle de Gao et Reifsnider [9] qui permet de prévoir la résistance et la durabilité d'un composite unidirectionnel en utilisant des techniques micromécaniques. Ce modèle suppose qu'un groupe de fibres cassées est entouré d'un nombre de fibres intactes. Si la contrainte est responsable de la rupture d'une fibre est suffisamment importante, elle peut être transmise à la fibre voisine adjacente par l'intermédiaire de la matrice, en créant tout d'abord une zone localement plastifiée puis une probable rupture. L'estimation de la longueur inefficace limitant la zone localement plastifiée ainsi que le facteur de concentration de contraintes permettent une évaluation de la résistance de notre composite unidirectionnel Alfa-époxyde [10].

Chapitre I

**étude bibliographique sur les matériaux
composites**

I.1/ Introduction :

Un des objectifs de ce premier chapitre est d'apporter une connaissance des matériaux composites par une description de leurs constitutions, de leurs propriétés et de leurs structures. Les matériaux composites disposent d'éventualités importantes par rapport aux matériaux traditionnels. Ils possèdent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite et liberté de forme. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Il offre une meilleure isolation thermique ou phonique, et pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique [11], et représentent une série importante de matériaux pour les différentes applications techniques. Ils sont un élément incontournable dans le processus de conception de nombreux secteurs, dont l'automobile, la marine et l'aéronautique

I.2/ Définition :

Une définition générale des matériaux composites est constitué de l'assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles et de nature différente, se complétant et permettant d'aboutir a un matériau dont l'ensemble des performances est supérieur a celui des composants pris séparément.

On appelle maintenant de façon courante matériaux composites des arrangements de renforts (appelés aussi charges) qui sont noyés dans une matrice. [12]

Un matériau composite est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase continue est appelée la matrice qui est généralement une matière polymère (résine thermoplastique ou thermodurcissable) qui assure la cohésion de la structure et la retransmission des efforts vers la phase discontinue qui présente usuellement des propriétés mécaniques (rigidités et résistances) supérieures a celle de la matrice et est notée renfort. Les propriétés des matériaux composites résultent des propriétés des matériaux le constituant, de la distribution géométrique des renforts, du taux volumique de renfort, de la nature des interfaces renforts/matrice, du procédé de fabrication

I.3/ CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES :

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- **D'une matrice**
- **D'un renfort.**
- **D'une interface**

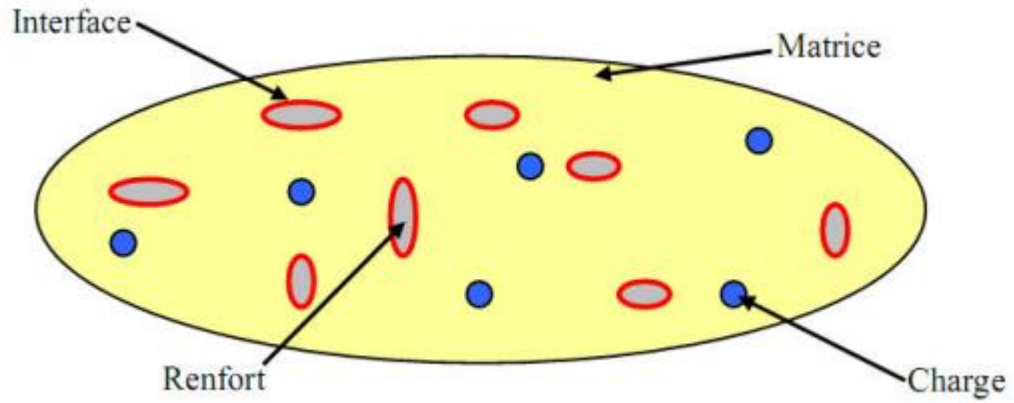
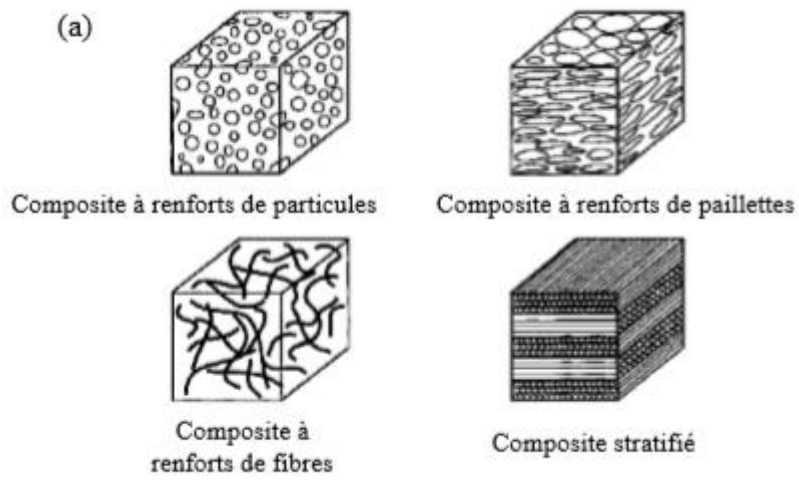


Figure I.1 : Constituants d'un matériau composite



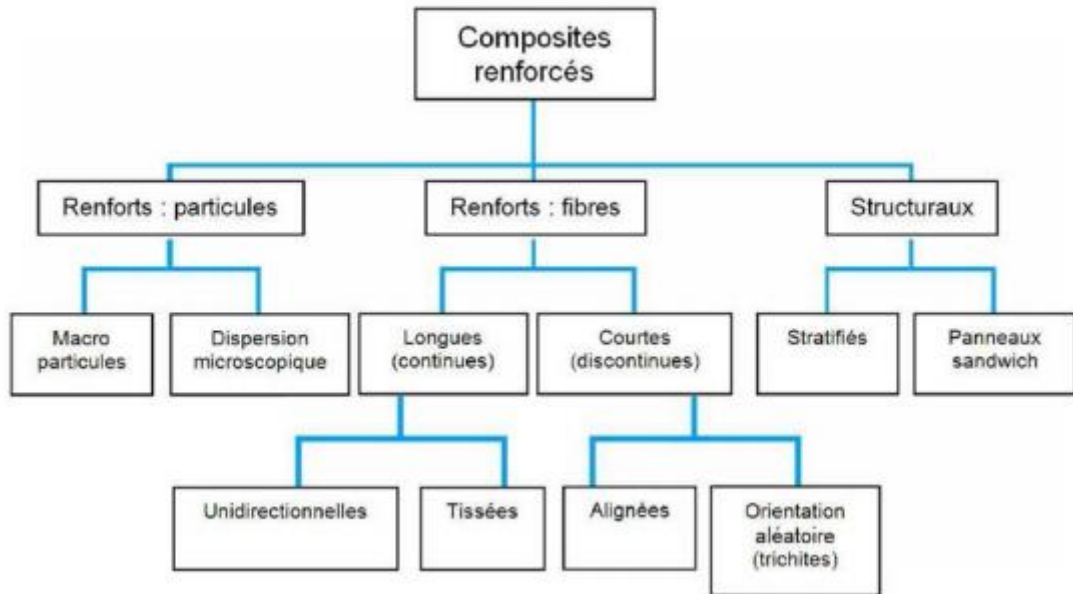


Figure I.2 : Classification des différents types de composites (a) et (b)

➤ **Matrices :**

La matrice est l'élément qui lie et maintient les fibres. Elle répartie les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres [13], peuvent être décomposées en quatre catégories en fonction du besoin industriel : les matrices thermodurcissables, les matrices thermoplastiques, les matrices thermostables, les matrices métalliques et céramiques

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices :

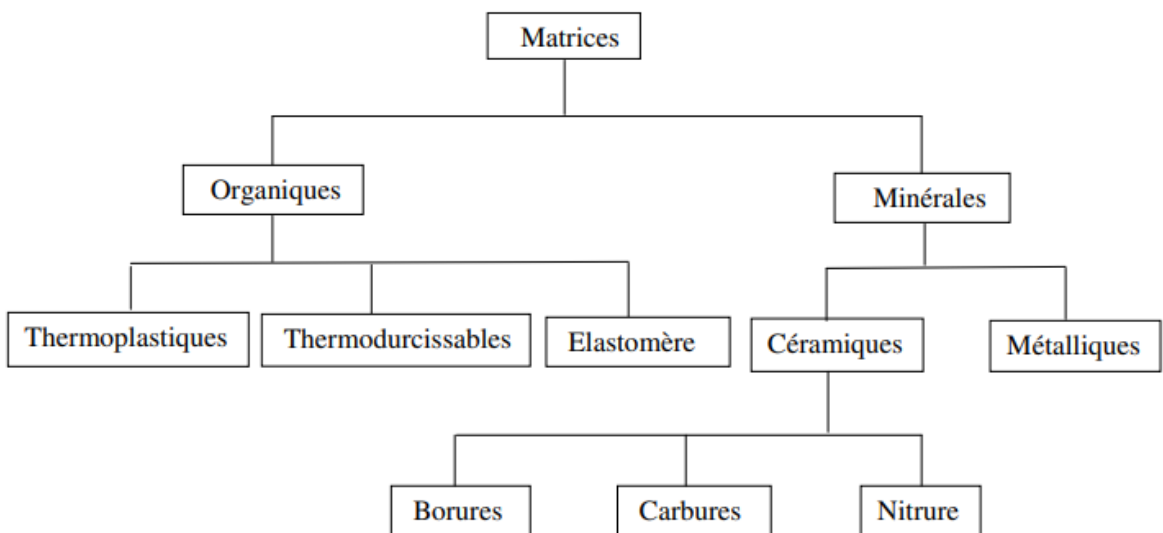


Figure I.3 : Différentes familles de matrices [14]

Remarque :

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

Les résines thermodurcissables : Les résines thermodurcissables sont des polymères, qui, après un traitement thermique ou physico-chimique (catalyseur, durcisseur), se transforment en des produits essentiellement infusibles et insolubles. Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois [15].

Les résines thermoplastiques : Les résines thermoplastiques sont des solides généralement solubles, formés de chaînes distinctes bien compactées, liées entre elles par des seules liaisons secondaires (force de van der Waals, liaisons d'hydrogène) et mis en forme par chauffage et refroidissement [16]

Résines thermostables : Ce sont des polymères présentant des caractéristiques mécaniques stables sous des pressions et des températures élevées (>200°C) appliquées de façon continue. Cette propriété est mesurée en déterminant la température que peut supporter la résine durant 2000h sans perdre la moitié de ses caractéristiques mécaniques. [17]

Matrices	Thermoplastiques	Thermodurcissables
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière de base	illimité	Réduit
Mouillabilité des renforts	difficile	Aisée
Moulage	Chauffage+refroidissement	Chauffage continu
Cycle	long	Court
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	réduite	Meilleure
Chute et déchets	recyclables	Perdus

Figure I.4: Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques [14]

➤ **Renforts :**

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

a) **Différents types de renfort :**

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

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- Sous forme de roving (fils, mèches, etc. ...) : le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.

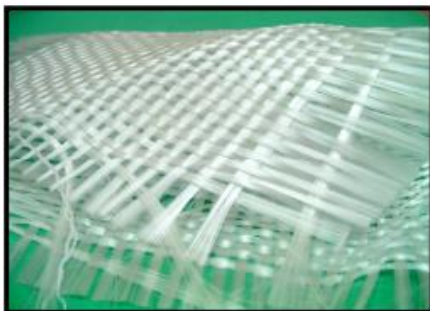
- Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc. ...) : le tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving.

Les tissus de roving peuvent peser jusqu'à 800 g/m². –

Sous forme de mat (à fil coupé, à fil continu) : le mat est un matelas de fils coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine.[18]



a – Roving de verre



b – Tissu de verre



c – Mat de verre

Figure I.5 : Différents types de fibres de verre [18]

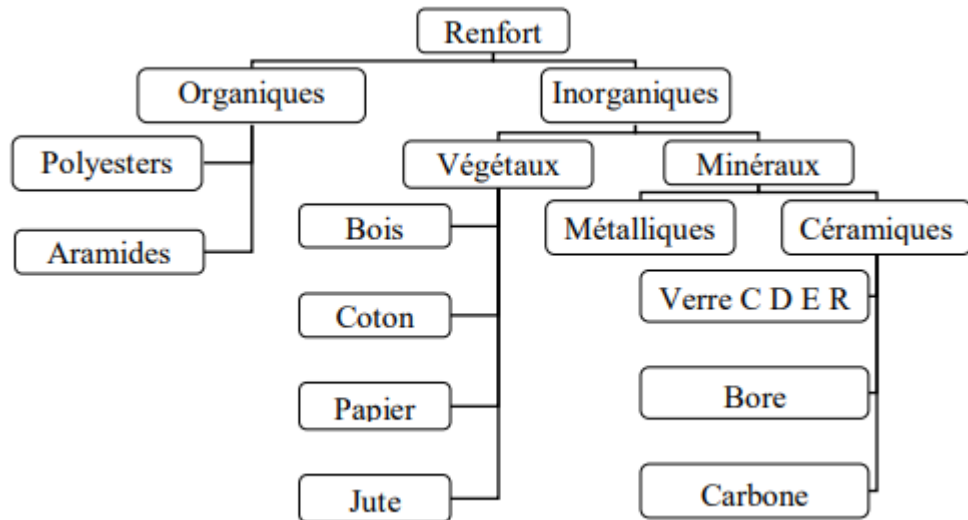


Figure I.6 : Différentes familles du renfort.[19]

b) Géométrie des renforts :

D'un point de vue géométrique, on peut distinguer trois grands types de renforts :

- Les fibres longues (longueur comparable aux dimensions de la pièce, figure I.7.a)
- Les fibres courtes (de longueur faible devant les dimensions de la pièce, figure I.7.b)
- Les particules, ou charges renforçantes (figure I.7.c)

Tous ces renforts sont inclus au sein d'une matrice qui répartit les efforts entre eux et les protège des agressions extérieures, comme indiqué ci-dessus. En outre, lorsque les renforts sont des fibres, celles-ci peuvent être soit orientées dans une direction précise, soit disposées aléatoirement.

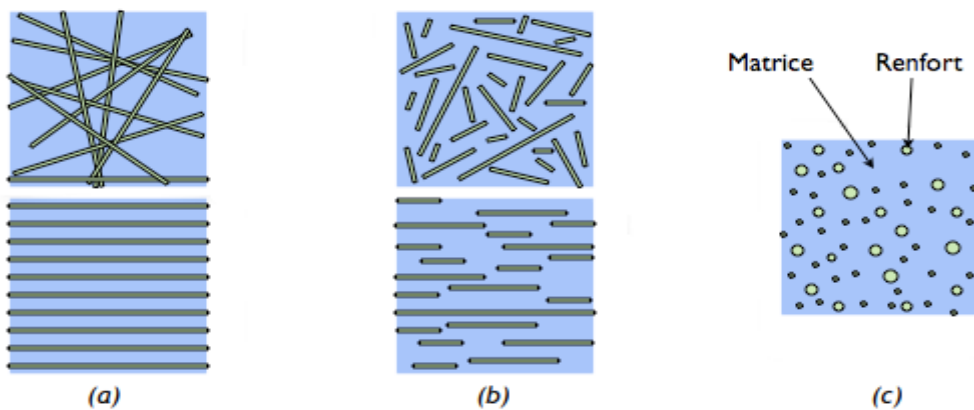
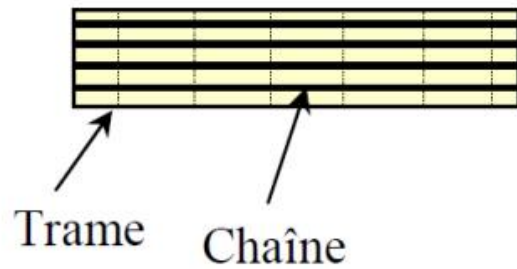
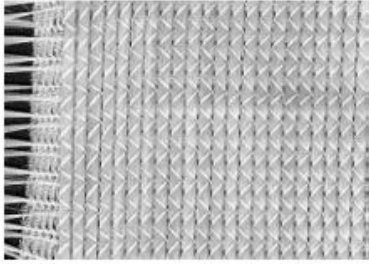


Figure I.7 : Les structures géométriques des composites : (a) fibres longues, (b) fibres courtes, (c) particules.

c) **Architecture des renforts : [20]**

Il existe différentes géométries et textures de renforts

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. Taux de déséquilibre très grand. Les tissus se composent de fils de chaîne et de trames perpendiculaires entre eux. Le mode d'entrecroisement ou armure les caractérise.



➤ **L'interface :**

En plus de ces fibres et la matrice, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine. Des produits chimiques entre aussi dans la composition du composite, l'interphase etc..., qui peut jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite.[18]

Chapitre II

*étude bibliographique sur Les fibres
naturelles*

II.1/ Les fibres naturelles :

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où paille et argile étaient mélangées pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant de la part du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges. [21,22]

Elles permettent une meilleure résistance mécanique, un plus grand gain de poids et de rentabilité et sur tout elles peuvent être recyclés.

De plus en plus de recherches ont été menées pour évaluer les propriétés mécaniques et les performances d'adhésion inter-faciales des composites de fibres naturelles et matrice ; les fibres naturelles représentent un tiers de la production mondiale

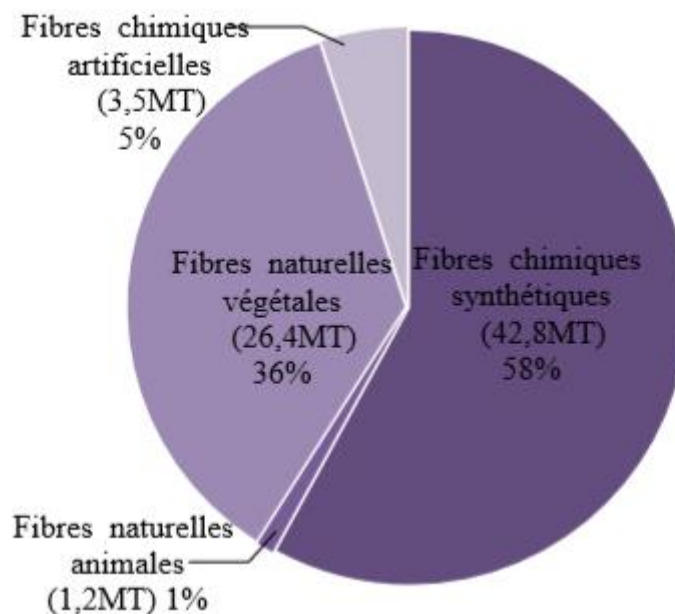


Figure II.1 : Production mondiale de fibres textiles [23]

Les fibres naturelles peuvent être classées selon leur origine. Il est donc possible de distinguer trois grandes familles : [24]

Les fibres végétales : elles se subdivisent elles-mêmes selon leur provenance. On peut donc citer les fibres libériennes qui sont extraites de tiges de plantes (chanvre, lin, ramie, jute), les fibres dures qui sont extraites de feuilles, de troncs ou d'écorces de fruits (sisal, chanvre de manille, noix de coco), et les fibres qui proviennent des poils séminaux de graines (coton, kapok).

Les fibres animales : elles peuvent émaner des poils (toison animale) ou encore des sécrétions soie (Bombyx Mori), soie sauvage, fils d'araignée

Ces fibres sont produites avec des faibles quantités et leurs prix sont relativement chers.

Les fibres minérales (amiante) :

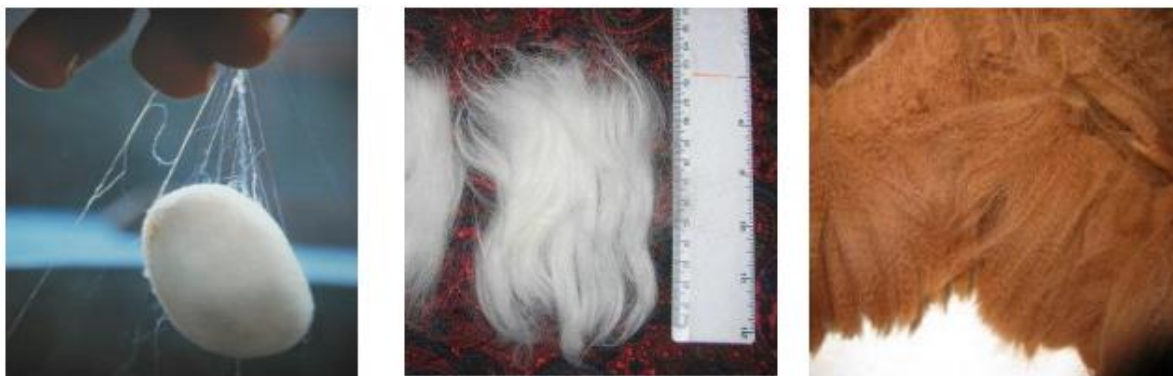


Figure II.2 : Illustrations de quelques fibres animales, de gauche à droite : cocon de soie, fibres d'Angora et fibres d'Alpaga [25]

II.2/L'utilisation de fibres naturelles :

L'utilisation de fibres naturelles, et en particulier de fibres végétales comme renfort de matériaux composites, présente deux principaux avantages. Tout d'abord, ces fibres sont largement disponibles à faible coût et leur utilisation en construction constitue de nouveaux débouchés pour les matières agricoles. D'autre part, la valorisation des fibres végétales permet la réduction des impacts environnementaux par rapport aux composites conventionnels puisque ce sont des matières premières renouvelables, biodégradables. [26]

II.3/ Définition de la fibre végétale :

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement

Faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante. [27,28]

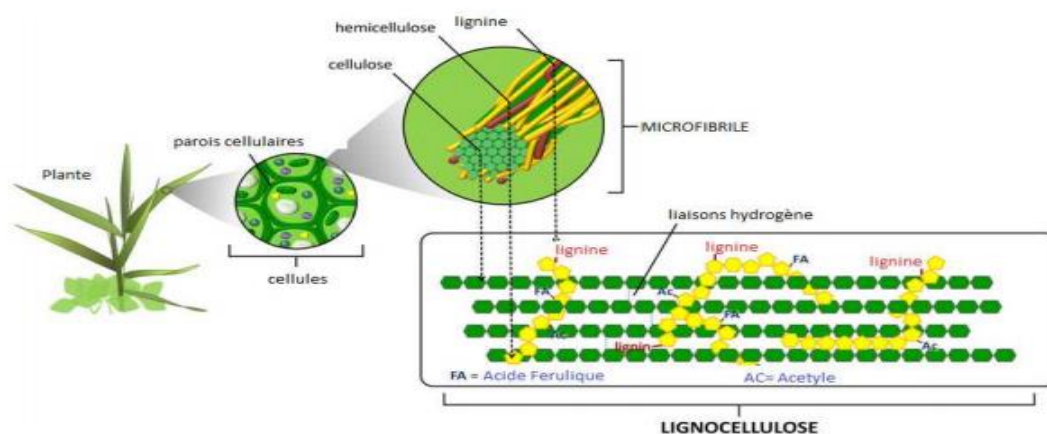


Figure II.3 : Structure d'une fibre végétale [27]

II.3.1/ Classification des fibres végétales :

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

- Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (Kénafe, jute, lin, ramie), et de feuilles (Sisal, abaca, paille de graminée). [29]
- Suivant leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigides provenant de matériaux ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces, souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kénafe, le chanvre, le sisal, le jute et le lin). [30]
- Suivant leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libériennes, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles. Elles sont douces, tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine. Et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues. [29]

II.3.2/ Présentations des différentes fibres végétales :

➤ Lin

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

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



Figure II.4 : Le lin

➤ **Ramie**

La ramie (*bochneria nivea*) est un arbuscule de la famille des urticasié (en anglais China grass). 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 dégomunage très poussé. La cellule élémentaire, ressemblant davantage à celle du coton qu'à celle du lin, peut atteindre 17cm de longueur elle présente une concentration en cellulose importante, une haute et un degré de polymérisation élevé. Sa blancheur et son aspect soyeux la destinent à l'habillement.



Figure II. 5 : La Ramie

➤ Chanvre

Le chanvre (*canabis sativa*) est une plante annuelle dont la hauteur varie de 1 m à 2 m. Cultivé dans les pays à climat tempéré, on en trouve dans l'est de l'Europe en France et en Belgique. Le processus d'obtention de la fibre du chanvre est identique à celui du lin. La fibre ultime est moins régulière, plus aplatie et légèrement plus lignifiée que celle du lin.



Figure II.6 : Le chanvre

➤ Sisal

Ses fibres sont extraites des feuilles de la plante sisal (*agave sisalana*). Originaires de Yucatan, elles sont produites en Amérique du sud, en Afrique, aux Antilles et en Extrême Orient. Les fibres mécaniques sont surtout extraites de la périphérie de la feuille. Un plant de sisal produit environ 200 à 250 feuilles et chaque feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres. Les méthodes de traitement pour l'extraction des fibres de sisal sont le rouissage et le teillage. Les fibres sont ensuite lavées à grande eau pour enlever les déchets en surplus.



Figure II.7 : Le sisal

➤ **Jute**

Le jute est une plante des régions tropicales (genre *Corchorus*) appartenant à la famille liliacées. La tige atteint une hauteur de 4 à 6m avec un diamètre d'environ 3 cm. Le jute pousse essentiellement au Bangladesh qui détient un quasi-monopole de son commerce en existe deux (une blanche et une rouge), ce qui exige un triage préalable avant l'utilisation. La fibre est très courte et très lignifiée. L'extraction de la fibre technique est obtenue par rouissage et décorticage. Après le rouissage, on détache la fibre, on nettoie la filasse et on rince à l'eau 3 m. [31]



Figure II. 8 : Le Jute

➤ **Coco :**

Une fibre ligno-cellulosique qui entoure la noix de coco. Elle fait partie des fibres dures en raison de sa teneur élevée en lignine, un polymère naturel. Plus résistante mais moins souple que le coton, elle sert à fabriquer des rembourrages pour les meubles et les matelas, des brosses, des cordes et des ficelles. Ces fibres courtes et brutes qui entourent la noix de coco servent à fabriquer cordages, matelas, brosses, géotextiles et sièges automobiles.



Figure II. 9 : Fibre de Coco

II.3.3/ Composition chimique des fibres végétales :

La constitution chimique des fibres végétales peut varier en fonction du type des fibres. Ces fibres sont composées essentiellement de cellulose, d'hémicellulose, de pectine et de lignine. Les

caractéristiques de chaque composant contribuent aux performances globales de la fibre. L'hémicellulose est responsable de la biodégradation, de l'absorption d'humidité et de la dégradation thermique de la fibre. La lignine est thermostable tout en étant responsable de la dégradation ultraviolette. La composition en pourcentage de chacun de ces composants diffère selon la fibre. Globalement, les fibres contiennent 60 à 80% de cellulose, 5 à 20% de lignine et jusqu'à 20% d'humidité. [31]

➤ Cellulose :

La cellulose est le constituant qui assure la protection et le soutien dans les organismes végétaux. Elle se situe dans la paroi des fibres et constitue la substance organique la plus abondante dans la nature puisqu'on estime sa production mondiale à environ $1.3 \cdot 10^{10}$ Tonnes par an. A l'échelle d'un arbre cela correspond à la formation de 10 g de cellulose par jour. La cellulose est un homopolysaccharide composé d'unités β -Dglucopyranose liées entre elles par une liaison glycosidique β . [32]

D'un point de vue chimique, la cellulose est une molécule formée de longues chaînes dont le motif de base est le glucose (Figure II.10). Les molécules cycliques de glucose adoptent la conformation « chaise », qui est plus stable que la conformation « bateau ». [33]

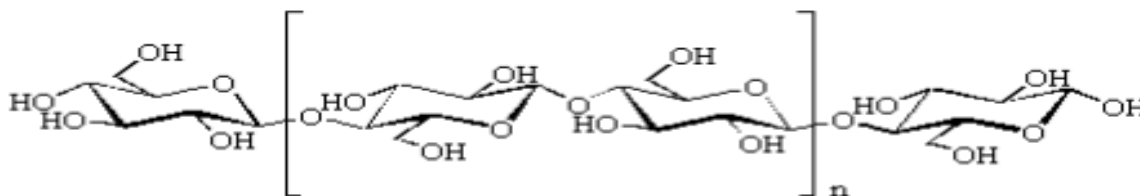


Figure II.10: structure de la cellulose [32]

➤ Les hémicelluloses :

Les hémicelluloses sont des polysaccharides, qui se trouvent dans tous les végétaux caractérisés par des masses molaires beaucoup plus faibles que celle de la cellulose et par des structures moins régulières à la fois par la présence de différentes unités dans leurs chaînes et/ou de ramifications. Si l'on considère que le bois est un matériau composite dans lequel la cellulose est la fibre de renfort et la lignine est la matrice, les hémicelluloses jouent le rôle de comptabilisant à l'interface entre ces deux éléments. [34]

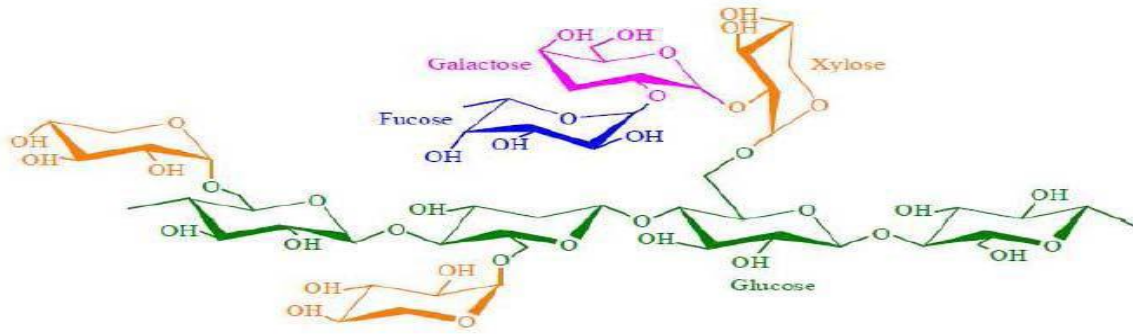


Figure II.11 : Structure d'un type de xyloglucane [34]

➤ Pectines :

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

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

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

Physicochimiques des pectines particulièrement sur la formation de gel. [35]

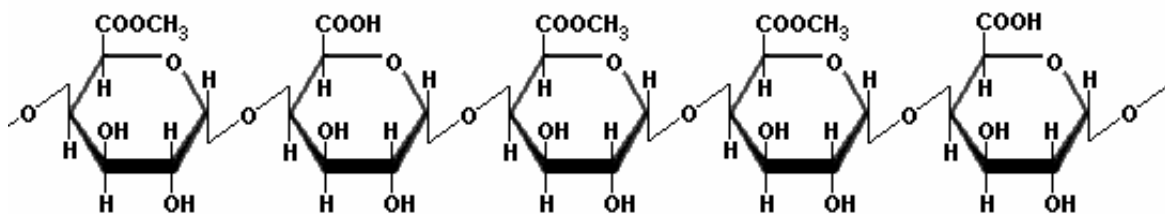


Figure II.12 : structure de la pectine [35]

➤ Lignine :

La lignine est après la cellulose, la matière organique renouvelable et la plus abondante à la surface terrestre. La lignine originelle ou "protolignine" constitue la plus importante fraction non saccharique des fibres végétales. C'est la matière "incrustante" de la cellulose. La lignine est

constituée de polymères phénoliques tridimensionnels, amorphes possédant trois unités différentes de type pénylopropane :

Les alcools p-coumarylique, coniférylique et sinapylique.

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

Résineux). Figure II.13 présentes les motifs élémentaires de la lignine. [32]

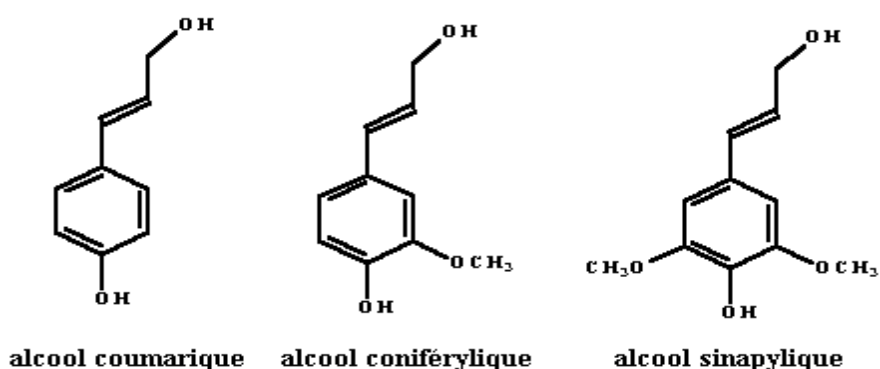


Figure II.13 : Structure de la lignine [32]

II.2.4/ Propriétés des fibres végétales :

L'attrait des fibres végétales et leur retour comme matériaux potentiels dans le secteur du textile et des composites sont dus aux différents avantages qu'elles présentent. Bien entendu, l'effet de ces avantages varie d'une fibre à une autre et dépende de la composition chimique et physique, la structure, le pourcentage de cellulose, l'angle micro fibrillaire, la section et le degré de polymérisation [36,37]

Fibres	Cellulose (%)	Angle microfibrillaire (°)	Diamètre (μm)	Longueur (mm)	Rapport L / d
Coton	85 - 90	33	19	35	1842
Lin	71	10	5 - 76	4 - 77	1687
Chanvre	70 - 74	6.2	10 - 51	5 - 55	960
Jute	61.1 - 71.5	8	25 - 200	9 - 70	110
Ramie	68.6 - 76.2	7.5	16 - 126	40 - 250	3500
Sisal	66 - 78	20	7 - 47	0.8 - 8	100
Coco	32 - 43	45	12 - 24	0.3 - 1	35
Alfa	45	-	5 - 95	5 - 50	1964

Tableau II.1 : Propriétés physiques de différentes fibres végétales [36,37]

Fibres	E (GPa)	All (%)	σ(MPa)	Densité
Coton	5,5 - 12,6	7 - 8	287 - 597	1,5 - 1,6
Lin	58	3,27	1339	1,53
Chanvre	35	1,6	389	1,07
Jute	26,5	1,5 - 1,8	393 - 773	1,44
Ramie	61,4 - 128	1,2 - 3,8	400 - 938	1,56
Sisal	9 - 21	3 - 7	350 - 700	1,45
Coco	4 - 6	15 - 40	131 - 175	1,15
Alfa	12.7	1.6	75 - 154	1.51

Tableau II.2 : Propriétés mécaniques en traction de quelques fibres végétales [38]

Parmi ces avantages, on peut citer [39] :

- Leur biodégradabilité
- Leur faible densité (allègement)
- Leur renouvelable
- Leurs bonnes propriétés mécaniques spécifiques (Tableau II.2)
- Leurs bonnes propriétés d'isolation acoustique et d'inertie thermique
- L'absence de résidus après incinération
- Un bilan carbone faible

- Un faible comportement abrasif

Cependant, malgré ces nombreux avantages, les fibres végétales présentent certaines limites à leur utilisation, telles que [39] :

- Une faible stabilité dimensionnelle
- Une faible tenue thermique (dégradation à 200° - 230°C)
- Une variabilité de propriétés assez importante selon l'âge, le lieu de croissance, le climat, la direction (anisotropie) et même d'une fibre à une autre appartenant au même lot
- Pour certaines applications, l'hydrophile et la biodégradabilité peuvent être des freins
- Une dépendance de la récolte (point de vue qualitatif et quantitatif)

II.4.1/ Généralités sur les fibres d'Alfa :

Le nom latin d'alfa est *Stipa Tenacissima L.*, le nom anglais est *Esparto grass* ou *Esparto*. La plante est une graminée et est un membre de la famille des herbes. C'est une plante permanente qui ne disparaît pas pendant l'hiver et qui pousse indépendamment formant des nappes. Grâce à la faible consommation d'eau, l'alfa est endémique dans la région méditerranée d'ouest, une région plutôt sèche. La répartition territoriale est montrée dans le Tableau II.3. Chaque année la quantité d'alfa poussant diminue à cause d'actions humaines telles que l'exploitation irrationnelle, le surpâturage, les incendies, etc. La plante a un intérêt écologique, économique et social. L'alfa n'a en effet pas besoin d'insecticides ni de pesticides nuisibles à l'environnement et elle consomme très peu d'eau. La récolte et la transformation actuelle pour applications papetières offrent des emplois aux habitants de la région, ainsi diminuant le taux de chômage et améliorant le niveau de vie. Le jour où des applications textiles deviendront disponibles, de nouveaux marchés pourront se développer, comme c'était le cas lors de l'industrialisation des fibres de bambou dans les

Années 2000. Selon plusieurs études menées afin de déterminer la composition chimique de l'alfa, cette dernière est constituée particulièrement de 45% de

Cellulose, 23% de lignine, 25% hémicellulose et pectine et 5% de cire [40].

Pays	Superficie (ha)
Algérie	4.000.000
Maroc	3.186.000
Tunisie	600.000
Libye	350.000
Espagne	300.000
Portugal	Peu

Tableau II.3: La répartition territoriale de la plante alfa [40]



Figure II.14: Plante Alfa

II.4.1.2/ La morphologie de la plante :

La plante est plutôt une grande herbe dure au lieu d'une plante « normale » avec une grande tige avec des ramifications et des feuilles. Par contre, beaucoup de tiges poussent en forme de cercle (de la vue d'en haut) en se partageant la même racine. Les tiges peuvent atteindre une hauteur d'un mètre, et les racines une profondeur de plus d'un mètre. Entre les deux se trouve le rhizome. Les racines sont très ramifiées avec beaucoup de nœuds où de nouvelles racines secondaires commencent. De cette façon, l'alfa est bien ancrée dans le sol, ce qui est nécessaire dans les régions où elle pousse. Ces régions se trouvent à la frontière du désert où le sol de sable n'est pas un sol dur. Donc des racines ramifiées sont nécessaires pour pouvoir y tenir et croître. En même temps, le fait que l'alfa stabilise bien le sable et le sol avec ses racines, donne une fonction importante de cette plante, c'est-à-dire elle sert à

arrêter la désertification et à éviter l'érosion éolienne. Grâce à sa présence, le vent déplace peu le sable. De plus, les tiges ou bien les feuilles proches du sol sont velues et cireuses. Quand le vent souffle et transporte le sable et la poussière de sable, ces parties velues peuvent capter ces particules et ainsi arrêter la désertification d'une deuxième façon. [41]

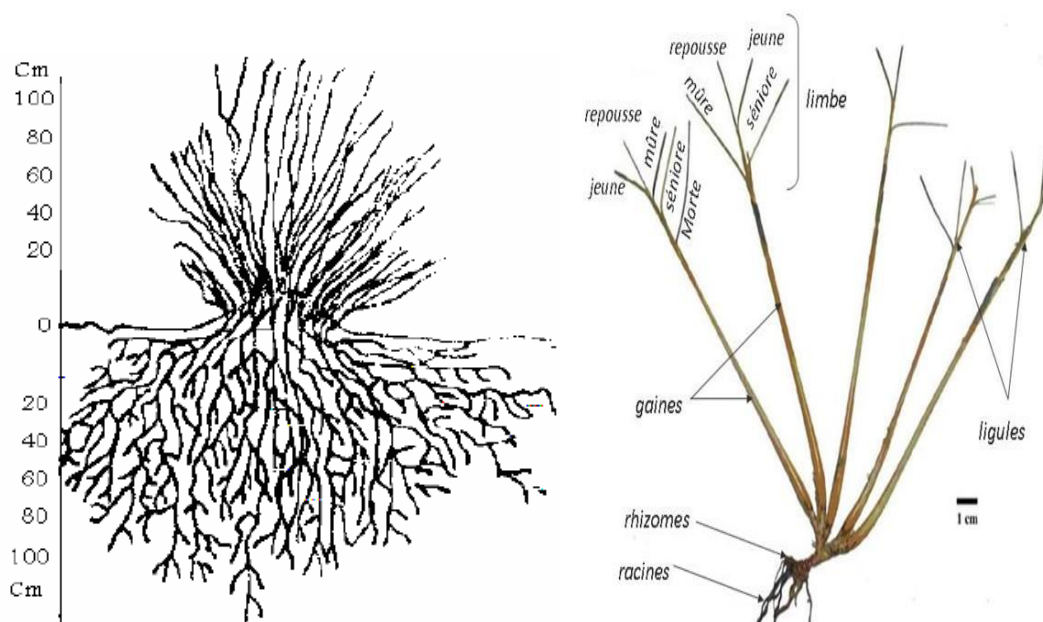


Figure II.15 : Schémas de la plante alfa [41]

Les cires limitent l'évaporation et cela est la raison pour laquelle l'alfa peut résister à des températures élevées et consomme peu d'eau. L'alfa fleurit normalement de début mai jusqu'à fin juin. L'alfa « mûre » est récoltée

Manuellement de juillet jusqu'à novembre. Elle est capable de résister à une grande variation de température. P.e. la nuit des températures de -20°C ont été mesurées, mais pendant la journée en été la température

Peut atteindre les 40°C .

II.4.1.3/ Domaine d'utilisation des fibres d'alfa :

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

le pâturage des chevaux, chameaux mais il est trop riche en lignine pour d'autres herbivores. Elle constitue également un facteur essentiel de l'équilibre pastoral et de la lutte contre la désertification. Les fibres naturelles sont généralement traitées pour être utilisées comme matière première dans l'industrie papetière ou comme combustible pour l'énergie production. Par contre, des utilisations nouvelles et de plus grande valeur pour les fibres naturelles sont en voie de développement, en particulier en tant que matériaux de renforcement permettant la production de composants dans de nombreuses industries. Plusieurs recherches menées ont permis d'étudier les performances des fibres extraites des tiges d'alfa et qui ont été testé en tant que renfort dans les composites, pour obtenir de nombreux et propriétés mécaniques souhaitables tout en respectant l'environnement lorsqu'il est utilisé comme renfort dans les composites polymères. [40]



Figure II.16 : Utilisation de l'alfa a) Artisanales, b) Tapisseries, c) Pâturages [40]

II.4.1.4/ Composition chimique :

Tout d'abord il est intéressant de connaître la répartition des différents composants de l'alfa. O. Akchiche, A.B. Marchak et Y.G. Butko ont publié en 1987 des résultats d'analyses chimiques. Ils ont trouvé 74.5% d'hydrocarbures, parmi lesquelles la cellulose, l'hémicellulose et les pectines, et 18.5% de lignine. Les taux des composants varient selon la source : [41]

Matière	[8] (%)	[6] (%)	[7] (%)	[9] (%)
Cellulose	43.81	45	45	47.63
Lignine	18.76	23	24	17.71
Cendres	4.66	2	2	5.12
Silica	1.76			
Hémicellulose/Pectines	28.4	25	24	22.15
Cires		5	5	

Extraction et autres	2.61			7.39
Somme (%)	100	100	100	100

Tableau II.4 : La composition d'alfa [41]

II.4.1.5/ Les fibres d'alfa comparées à d'autres fibres naturelles aux points de vues propriétés mécaniques :

Le tableau II.5 donne les propriétés mécaniques en traction des principales fibres naturelles et synthétiques. En ce qui concerne l'alfa, il s'agit des propriétés de l'alfa technique, c'est-à-dire les faisceaux de fibres. Pour les fibres (ultimes), il faut donc se contenter de valeurs moyennes estimées, la densité étant 0.89 g/cm^3 , l'élongation de rupture 5.8% , la tension de rupture 565 MPa et le module d'Young 22 GPa . Chaque des ces propriétés a des valeurs magnifiques, indiquant les fibres élastiques, mais également fortes et très légères. Mais en comparant ces valeurs avec celles de faisceaux d'alfa ou de fibres de coton, il semble qu'elles sont surestimées. En ce qui concerne l'élongation de rupture (angl. strain at break), la valeur d'alfa technique ($1.5\text{-}2.4\%$) est proche de celle du jute ($1.5\text{-}1.8\%$), du chanvre (1.6%) et du sisal ($2\text{-}2.5\%$). En ce qui concerne la tension de rupture (angl. specific stress at break) les $134\text{-}220 \text{ MPa}$ de l'alfa technique sont proches des $191\text{-}398 \text{ MPa}$ du coton. Quant au module d'Young (angl. specific Young modulus), qui est une indication pour la rigidité, la valeur d'alfa technique ($13\text{-}17.8 \text{ GPa}$) est proche de celle du lin (18 GPa) et de la ramie (17 GPa) et est supérieure à celle du coton ($3.6\text{-}8.4 \text{ GPa}$) et l'agave (4.2 GPa). La ramie est la fibre végétale la plus forte avec un module d'Young de $42\text{-}86 \text{ GPa}$. En général les propriétés mécaniques en traction de l'alfa technique approchent celles du jute, du lin, du chanvre et du sisal.

Summary of the specific mechanical performance in traction of the principal natural and synthetic fibers used in the reinforcement of composite materials [11]

Fibre	Density (g/cm ³)	Strain at break(%)	Specific stress at break (MPa)	Specific Young modulus (GPa)
Alfa	1.4	1.5-2.4	134-220	13-17.8
Agave	1.4	20	350	4.2
Cotton	1.5	7-8	191-398	3.6-8.4
Jute	1.3	1.5-1.8	300-600	20
Flax	1.5	2.7-3.2	230-690	18
Hemp	1.5	1.6	460	17
Ramie	1.5	3.6-3.8	266-630	42-86
Sisal	1.5	2-2.5	340-423	6-14
Wood	1.5	-	666	26
E Glass	2.6	2.5	770-1345	27
S Glass	2.6	2.8	1750	33
Kevlar	1.4	3.3-3.7	2140-2250	45-48
Carbon	1.7	1.4-1.8	2350	140

Tableau II.5: Les propriétés mécaniques en traction des principales fibres naturelles et synthétiques [38]

Tableau II.6 donne les résultats des essais de traction sur des faisceaux de fibres d'alfa. Les caractéristiques mécaniques varient beaucoup, ce qui est normal parce qu'il s'agit de fibres naturelles. Figure donne la courbe moyenne obtenue lors de ces essais. Pour une tension de 200 MPa environ, une chute de tension due à des ruptures ou fissures des fibres

Ultimes dans les fibres techniques a été constatée.

Tensile properties of the long Alfa fibers

	Average value	Variation ratio (%)
Young Modulus (GPa)	21.5	18
Stress at break (MPa)	247	29
Strain at break (%)	1.96	27

Tableau II.6: Résultats des essais mécaniques sur des faisceaux de fibres d'alfa [41]

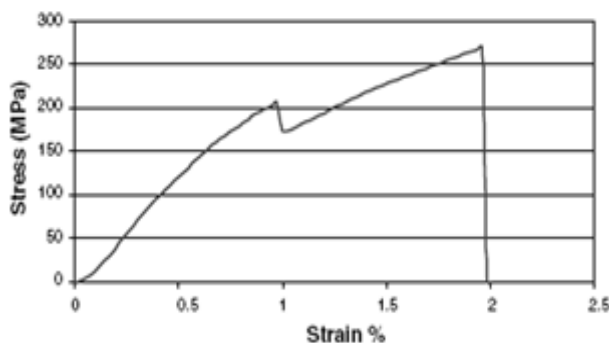


Figure II.14 : La courbe de traction sur des faisceaux de fibres d'alfa [41]

II.4.1.6/ Applications actuelles :

Aujourd'hui l'alfa est utilisée de deux façons.

D'un côté la plante elle-même est utilisée

- pour produire des objets tels que paniers, tapis et cordes (applications artisanales)
- comme nourriture par les animaux sauvages comme la gazelle, le lièvre, etc.
- comme nourriture pour le bétail. Dans les régions où l'alfa pousse, les paysans ne peuvent pas toujours acheter toute la nourriture requise pour le bétail. Dans le cas échéant, le bétail mange comme alternative les plantes d'alfa qui ont une faible valeur alimentaire. Comme l'exploitation de l'alfa est trop intensive par rapport à la capacité de celle-ci pour se régénérer, le risque de surpâturage est réellement présent. 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
- pour des applications techniques comme des non-tissés et le renforcement des composites. Pour obtenir des fibres d'une telle courte longueur, des procédés agressifs sont appliqués. A présent, des applications textiles, c'est-à-dire des fils, des tissus, des tricotés, etc.,

N'existent pas encore sur le marché. [40]

Chapitre III

Modèle de Rupture longitudinale

III.1/ INTRODUCTION

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

- ✓ Le critère de résistance de chaque pièce ;
- ✓ L'état des contraintes et des déformations dans le matériau ;
- ✓ Les phénomènes de propagation de fissure dans la microstructure ;
- ✓ La nature de l'interface entre la matrice et le renfort.

Les critères de rupture ont pour objectifs de permettre au concepteur d'avoir une évaluation de la résistance mécanique des matériaux composites. Le critère est une expression mathématique reliant les contraintes effectives régnant dans le matériau aux contraintes ultimes pouvant être supportées par ce dernier. Lorsque le critère n'est pas vérifié, la propriété d'intégrité du matériau n'existe plus et il y a dégradation locale. Le procédé se résume à l'utilisation des divers critères existant dans la littérature, qui dépendent tous d'un certain nombre de paramètres qui sont précisément des résistances ultimes pour des sollicitations élémentaires [42].

Enfin à la différence du critère, la loi met en évidence certains aspects du mécanisme de rupture. La seconde voie consiste à tenir en compte les caractéristiques de résistance des divers composants du matériau sous une approche probabiliste afin de cerner la grande dispersion des résultats trouvés. On propose dans ce qui suit, de décrire les différents modèles de rupture longitudinale des modèles simplifiés permettent alors d'estimer les caractéristique de résistance du composite.

III.2/ MODELE DE RUPTURE LONGITUDINALE AVEC EFFET HYGROTHERMIQUE

Le comportement hygrothermique des composites Alfa / polymère est largement déterminée par les propriétés de la matrice aux interfaces, par contre les fibres naturelles sont relativement sensibles à l'élévation d'humidité et de la température. L'effet d'humidité génère des contraintes résiduelles, la plasticité des polymères ainsi que la dégradation aux interfaces [43-44].

En outre, la plasticité peut entraîner la diminution de la température de transition vitreuse [45], qui peut affecter le comportement du composite dans des environnements à température élevée. Pour introduire l'effet de la température et la variation de la concentration d'humidité sur les propriétés mécaniques, Tsai [45] a proposé la température non-dimensionnelle T^* , qui est le principal paramètre pour évaluer les caractéristiques hygrothermiques du composite.

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

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

$$T_g = T_g^0 - g C \quad (\text{III-.2})$$

Nous pouvons utiliser la température non dimensionnelle T^* de manière empirique pour exprimer la rigidité de la matrice et de la fibre (E_m , E_f) ainsi que les résistances de traction de compression et de flexion (X , X' , Y , Y') de la forme :

$$E_m = E_m^0 (T^*)^a \quad (\text{III-.3})$$

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

$$X = \frac{v_f}{v_f^0} = (T^*)^h \quad (\text{III-.5})$$

$$X' = \frac{v_f}{v_f^0} = \left(T^*\right)^h \frac{E_f}{E_f^0} \quad (\text{III-.6})$$

$$Y = Y' = \left(T^*\right)^c \quad (\text{III-.7})$$

L'indice «0» indique les valeurs initiales des rigidités de la matrice et des fibres qui représentent. a et f représentent les paramètres des caractéristiques hygrothermiques donnés dans le tableau III.1.

T_g^0 (°C)	T_{rm} (°C)	g (°c/c)	a	f
160	22	2000	0.5	0.04

Tableau III.1 : Paramètres de la variation de la température et de l'humidité[44]

Le modèle utilisé dans cette étude pour l'estimation de la résistance d'un composite unidirectionnel est celui de Gao et de Reifsnider [46]

Ce modèle permet d'introduire la variation des caractéristiques mécaniques de la matrice et des fibres en fonction de la température et de l'humidité en vue de prédire la résistance d'un composite unidirectionnel. Cette résistance varie le plus souvent en fonction, du changement des les déplacements longitudinales dans la zone de la rupture de la fibre et des concentrations de contraintes correspondantes des fibres voisines intactes. La longueur inefficace est généralement définie comme étant la longueur comprise entre l'endroit de la rupture de la fibre jusqu'à la longueur pour la laquelle la fibre regain à sa capacité de supporter le chargement complet. Ce concept est illustré sur la figure III.1, où σ_f dans la figure est la contrainte de la fibre et δ est la longueur inefficace. Les changements des longueurs inefficaces peuvent être en fonction de la température et de l'humidité suite au changement des propriétés de la matrice et des fibres. L'approche du modèle consiste à employer la condition de la contrainte de cisaillement à l'interface pour calculer les longueurs inefficaces et la concentration de contraintes autour des fibres cassées. Les valeurs calculées sont par la suite introduites dans le model de la probabilité de Batdorf [46]

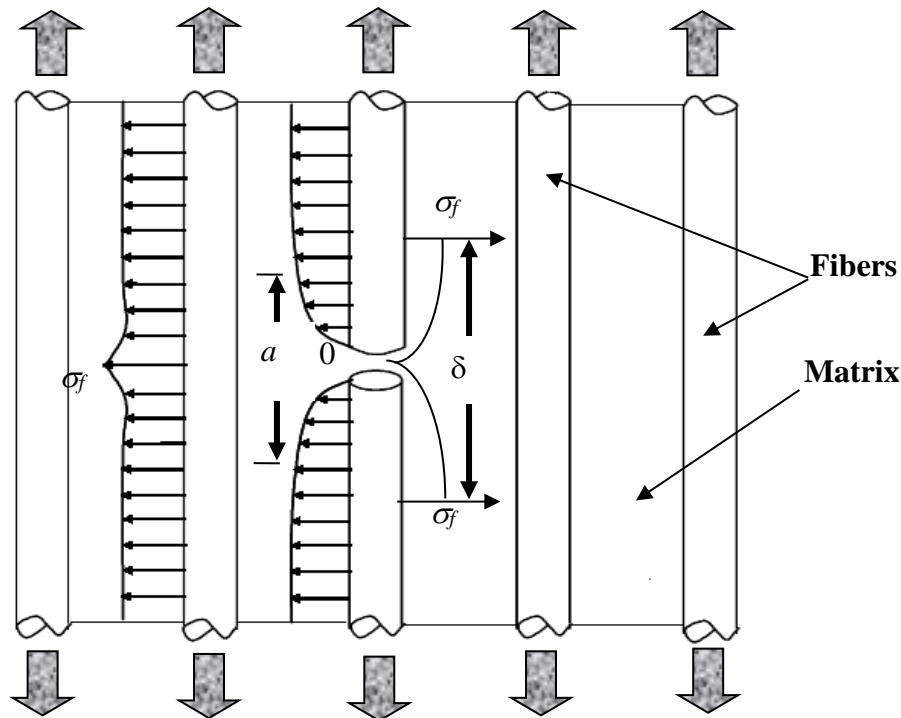


Figure III.1 : Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace.

Selon Gao et Reifsnider [46], les propriétés dues à la traction d'un composite renforcé par des fibres, dépendent de la résistance, des modules d'élasticité de la fibre, de la résistance et la stabilité chimique de la matrice et aussi de l'efficacité de l'adhérence à l'interface fibre/matrice au cours du transfert de charge. Dans le cas des fibres d'Alfa, les modules d'élasticité et la résistance mécanique de la fibre demeurent presque inchangés avec la variation de la température [0° et 120°]. Contrairement pour la matrice époxyde qui reçoit des changements des propriétés. Ces changements sont pris en considération dans cette étude. Cependant, à cause de la difficulté trouvée lors de la détermination des propriétés aux interfaces, la résistance d'adhérence aux interfaces est considérée comme étant liée à la contrainte d'écoulement de la matrice et de l'interface τ_0 . La fissure à l'interface aura lieu lorsque la contrainte de cisaillement à l'interface atteint τ_0 . Cette supposition est soutenue en littérature c'est-à-dire dans laquelle on l'a constaté que pour la température T_g élevée de la résine, la résistance de cisaillement à l'interface dans les composites est au voisinage de la résistance au cisaillement de la matrice en bloc [47]. Cependant, pour des basses températures T_g pour une résine renforcée par les fibres volumineuse, les études indiquent qu'une telle approximation peut être conservée [48]

Le modèle de Gao et de Reifsnider se distingue des autres modèles semblables par la présence de l'effet du cisaillement et la prise en considération des endommagements locaux sous forme d'un décollement à l'interface et une plasticité. Dans cette région, la contrainte de cisaillement de la matrice et de l'interface est considérée comme constante avec une valeur $\eta\tau_0$. Où η est un paramètre de cisaillement définissant la contrainte de cisaillement dans la région inélastique. Lorsque η égale à zéro, aucun transfert de cisaillement n'a eu lieu entre les fibres cassées et leurs voisins dans cette région. Ce serait donc le cas dans une région, complètement détachée ou d'une matrice fissurée. Contrairement lorsque $\eta = 1$, la contrainte de cisaillement dans la région inélastique est égal à τ_0 . Pour l'application de ce modèle dans cette étude, on prend $\eta = 1$.

Un schéma représentatif de ce problème est donné par la figure III-.2. Ce modèle suppose qu'il existe un noyau central de i fibres cassées qui sont entourées de fibres aléatoires non cassées exposées à des concentrations de contraintes dues aux fibres cassées[49]. Les fibres non cassées sont à leur tour entourées d'un matériau homogène 'efficace' qui se déforme uniformément (Figure III.3).

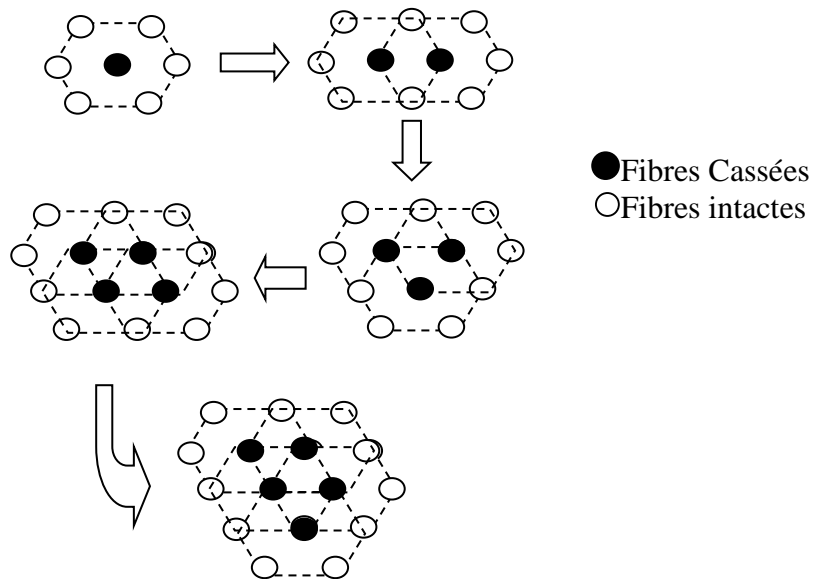


Figure III -.2 : Arrangement des fibres intactes autours des fibres cassées

On suppose encore que le noyau cassé peut être assimilé à un matériel homogène avec une section transversale circulaire dont le module de Young peut être obtenu par la règle de mélanges :

$$E = \frac{i A_f E_f + \left[i A_m - \pi (r_0^2 - (r_0 - d)^2) \right] E_m}{\pi (r_0 - d)^2} \tag{III-.8}$$

Où A correspond à la surface, et E correspond au module de Young équivalent. Les propriétés substituées avec f se rapportent à des propriétés de la fibre tandis que celles qui son substituées avec m se rapportent à des propriétés de matrice. Les paramètres A_f , A_m , rayon r_0 et le diamètre d sont donnés par les équations suivantes :

$$A_f = \pi r_f^2 \tag{III-.9}$$

$$A_m = \pi (r_f + d)^2 - \pi r_f^2 \tag{III-.10}$$

$$r_0 = \sqrt{i (r_f + d)^2} \tag{III-.11}$$

$$d = \frac{r_f}{\sqrt{V_f}} - r_f \tag{III-.12}$$

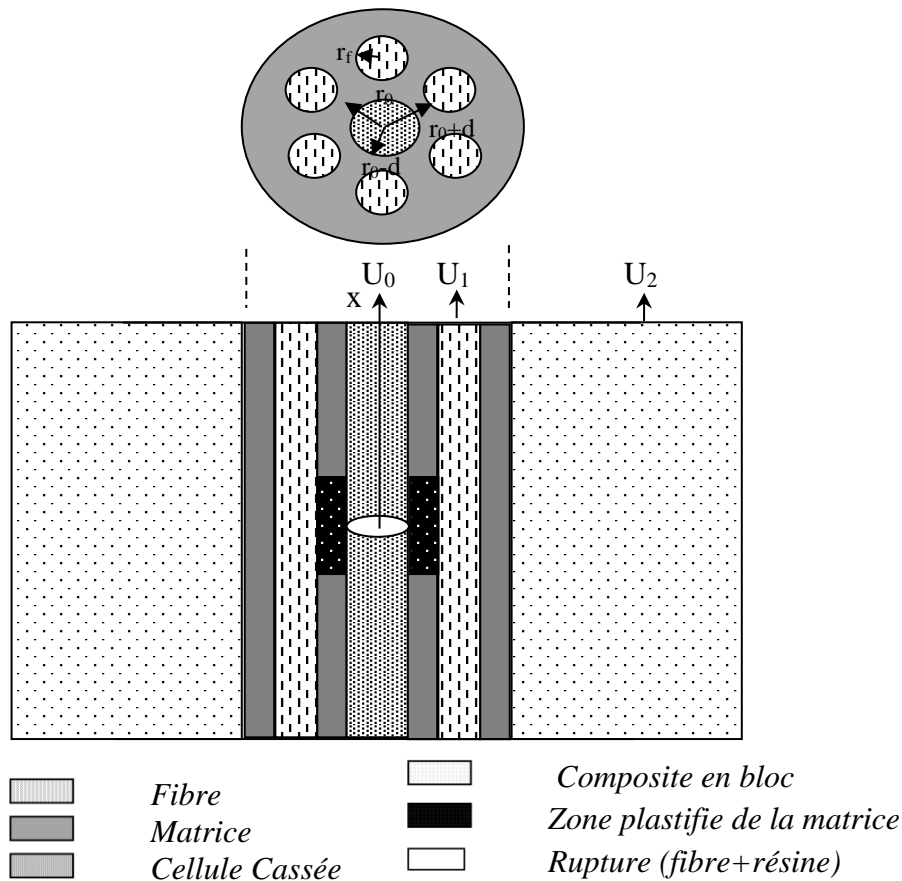


Figure III-3 : Composite unidirectionnel avec rupture transversale d’une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes [50].

Comme il vient d'être cité auparavant, des endommagements locaux sont inclus dans le modèle par l'introduction d'une zone de décollement et de plasticité locale (Figure III.3), où la contrainte de cisaillement de la matrice et de l'interface est considérées comme constante pour la valeur $\eta\tau_0$.

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

$$iA_f E_f \beta \frac{d^2 U_0}{dx^2} - 2\pi r_0 \eta \tau_0 = 0 \quad (\text{III-13})$$

$$iA_f E_f \frac{d^2 U_1}{dx^2} + 2\pi(r_0 + 2d + 2r_f) \frac{G_m}{2d} (U_2 - U_1) + 2\pi r_0 \eta \tau_0 = 0 \quad (\text{III-14})$$

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

U_0 , U_1 et U_2 représente les contraintes de déplacements dans les trois régions (figure III.3).

Le module de cisaillement de la matrice est donné par:

$$G_m = \frac{E_m}{2(1 + \nu_m)} \quad (\text{III-15})$$

La solution de ces deux équations (III-13) et (III-14) avec les conditions aux limites est :

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

Et considérons que les fibres voisines du noyau cassé ne sont pas affectées par le noyau cassé, (c'est-à-dire que $U_2 = \frac{\sigma_c}{E_c} x$, où c est l'indice du composite en bloc), on peut obtenir des solutions pour U_0

et U_1 . Après introduction des conditions nécessaires, les deux équations (III-13) et (III-14) s'écrivent comme suite :

$$U_0(x) = \frac{\eta\tau_0}{r_0 E_1} x^2 + C_0 \quad (\text{III-16})$$

$$U_1(x) = C_1 (e^{\lambda_1 x} - e^{-\lambda_1 x}) + \frac{2r_0 \eta \tau_0}{(R_2^2 - r_0^2) E} \frac{1}{\lambda_1^2} (1 - e^{-\lambda_1 x}) + \frac{\sigma_c}{E_c} x \quad (\text{III-17})$$

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

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

E_l est le module des fibres adjacentes intactes donnée par :

$$E_l = \frac{E_f A_f + E_m A_m}{A_f + A_m} \quad (\text{III-18})$$

Sous la contrainte de traction σ_c le module du composite en bloc E_c et donné par la règle du mélange suivante:

$$E_c = E_f V_f + (1 - V_f) E_m \quad (\text{III-19})$$

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

$$E\pi(r_0 - d)^2 \frac{d^2 U_0}{dx^2} + 2\pi r_0 \frac{G_m}{2d} (U_1 - U_0) = 0 \quad (\text{III-20})$$

$$n_i A_f E_f \frac{d^2 U_1}{dx^2} + 2\pi(r_0 + 2d + 2r_f) \frac{G_m}{2d} (U_2 - U_1) - 2\pi r_0 \frac{G_m}{2d} (U_1 - U_0) = 0 \quad (\text{III-21})$$

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

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= \bar{U}_0 e^{-\gamma_1 x} \\ U_1 &= \bar{U}_1 e^{-\gamma_2 x} \\ U_2 &= \frac{\sigma_c}{E_c} x \end{aligned} \right\} \quad (\text{III-22})$$

Substituant l'équation (III-22) dans les équations (III-20 et III-21), on obtient les deux équations différentielles suivantes :

$$U_0(x) = C_2 e^{-\sqrt{\gamma_1} x} + C_3 e^{-\sqrt{\gamma_2} x} + \frac{\sigma_c}{E_c} x \quad (\text{III-23})$$

$$U_1(x) = C_2 \left(1 - \frac{\gamma_1}{A}\right) e^{-\sqrt{\gamma_1} x} + C_3 \left(1 - \frac{\gamma_1}{A}\right) e^{-\sqrt{\gamma_2} x} + \frac{\sigma_c}{E_c} x \quad (\text{III-24})$$

Ou γ_1, γ_2, A, B and D sont des équations algébriques:

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

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

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

Ou C_2 and C_3 sont des constants d'intégration, déterminez par les conditions de continuité au niveau $x=a$:

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

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

La longueur a peut être elle même trouvée en imposant la condition de continuité de la contrainte de cisaillement à $x = a$. Sachant que la contrainte de cisaillement est considérée comme constante τ_0 dans la région $0 \leq x \leq a$ (région de plasticité) par contre en dehors de la région plastique $a \leq x \leq \infty$, cette contrainte est donnée par :

$$\tau(x) = (U_0(x) - U_1(x)) \frac{G_m}{2d} \quad (\text{III-25})$$

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

$$\tau_0 = (U_0(a) - U_1(a)) \frac{G_m}{2d} \quad (\text{III-26})$$

Une fois que la valeur de a est connue, on peut alors obtenir $U_0(x)$ et $U_1(x)$ en termes de quantités connues.

Chapitre IV

Résultats et Discussions

IV/ Analyse mécanique du composite Alfa/Epoxyde sous l'effet hygrothermique.

Comme nous l'avons cité dans le chapitre précédent (Caractérisation micromécanique) le comportement hygrothermique des composites Alfa / polymère est largement déterminée par les propriétés de la matrice aux interfaces, par contre les fibres naturelles Alfa sont relativement peu sensibles à l'élévation d'humidité et de la température. Pour cela plusieurs auteurs ont remarqué que l'effet d'humidité génère la sensibilité des composites à des contraintes résiduelles une plastification des polymères ainsi que la dégradation aux interfaces. En outre, la plasticité peut entraîner la diminution de la température de transition vitreuse [45], qui peut affecter le comportement du composite dans des environnements à température élevée. Afin de suivre l'effet des conditions d'environnements sur le comportement des composites unidirectionnels présentant une rupture des fibres, on a tracé les figures ci-dessous.

IV.1/ Longueur inefficace.

IV.1.1/ Evolution de la longueur inefficace en fonction de la concentration d'humidité avec des températures variables pour deux chargements définis.

Avant de définir les différentes concentrations de contraintes du composite qui est le facteur primordial de l'endommagement, nous allons évaluer la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées, pour une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et une température de $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, à $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ pour deux chargements extérieurs moyenne et extrême.

Comme le montre les figures IV.1, nous avons tracé l'évolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées, pour une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et une température de $T = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$, à $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ et cela pour une contrainte extérieure moyenne $\sigma = 0.5\sigma$, nous pouvons clairement voir une superposition de toutes les courbes représentatives de la longueur inefficace. Nous pouvons en déduire que pour les basses températures 20° à 60° , la variation de la concentration d'humidité n'a pas d'effet sur la longueur inefficace. Avec l'augmentation de la température de $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ à $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, la sensibilité de la longueur inefficace pour une variation de la concentration d'humidité commence à se distinguer et devenir importante. Nous pouvons donc en déduire que la température est un facteur très important pour la valorisation de la longueur inefficace pour le composite Alfa/Epoxyde.

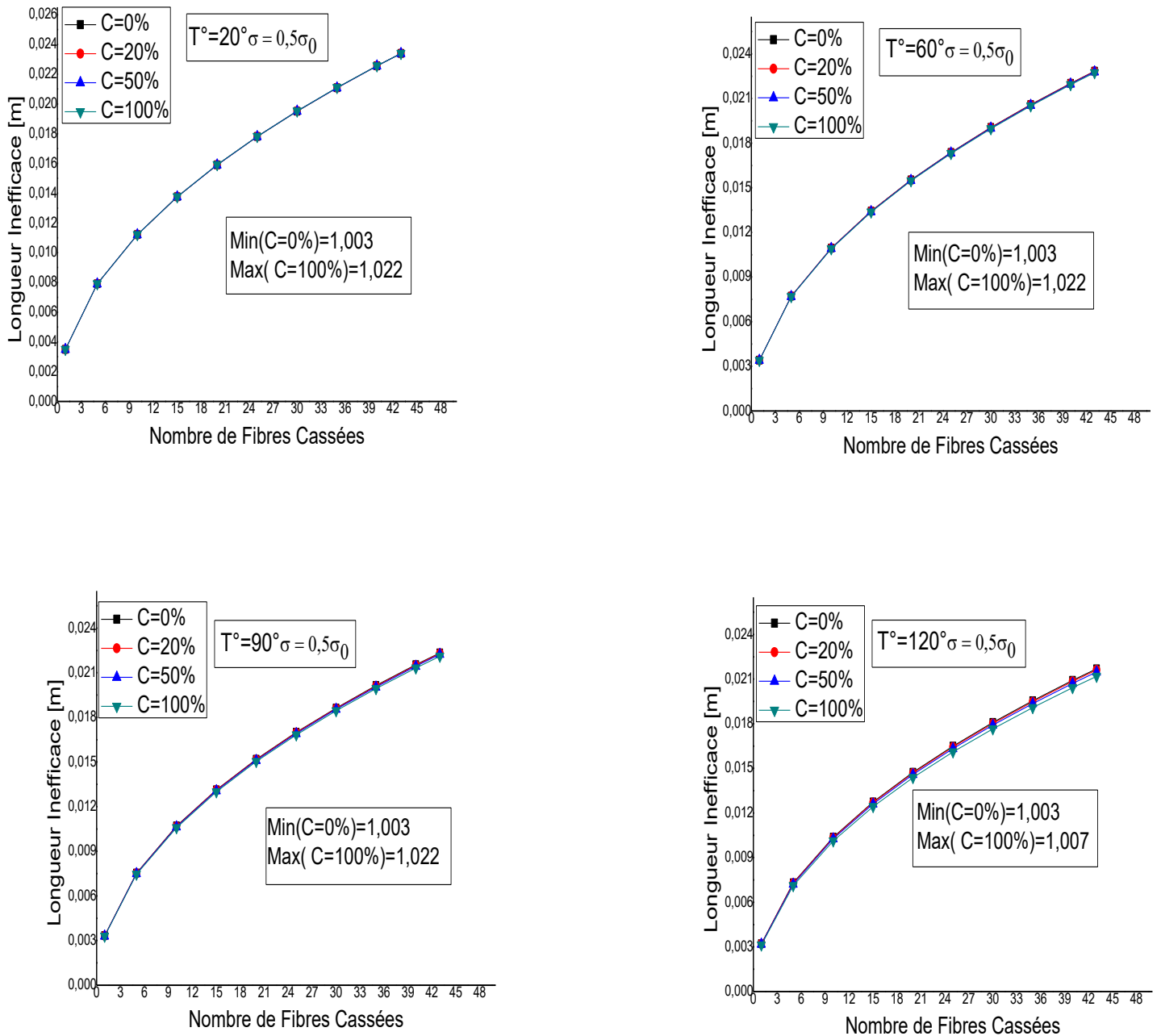


Figure IV.1 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité et de température, pour $\sigma = 0.5\sigma_0$.

Par la suite nous avons tracé l'évolution de la longueur inefficace mais cette fois-ci pour une contrainte extérieure complète $\sigma = \sigma_0$. Ce qui est logique c'est que la longueur inefficace devient plus importante par rapport à celle $\sigma = 0.5\sigma_0$ comme le montre la Figure IV.2.

D'autre part on remarque toujours une superposition de toutes les courbes de la longueur inefficace. Nous pouvons en déduire que pour des basses températures 20° à 60°, la variation de la concentration

d'humidité n'a pas d'effet sur la longueur inefficace soit pour un chargement moyen ou complet, cela et du aux caractéristiques mécanique du composite Alfa/Époxyde, et les caractéristiques géométriques de la fibre Alfa.

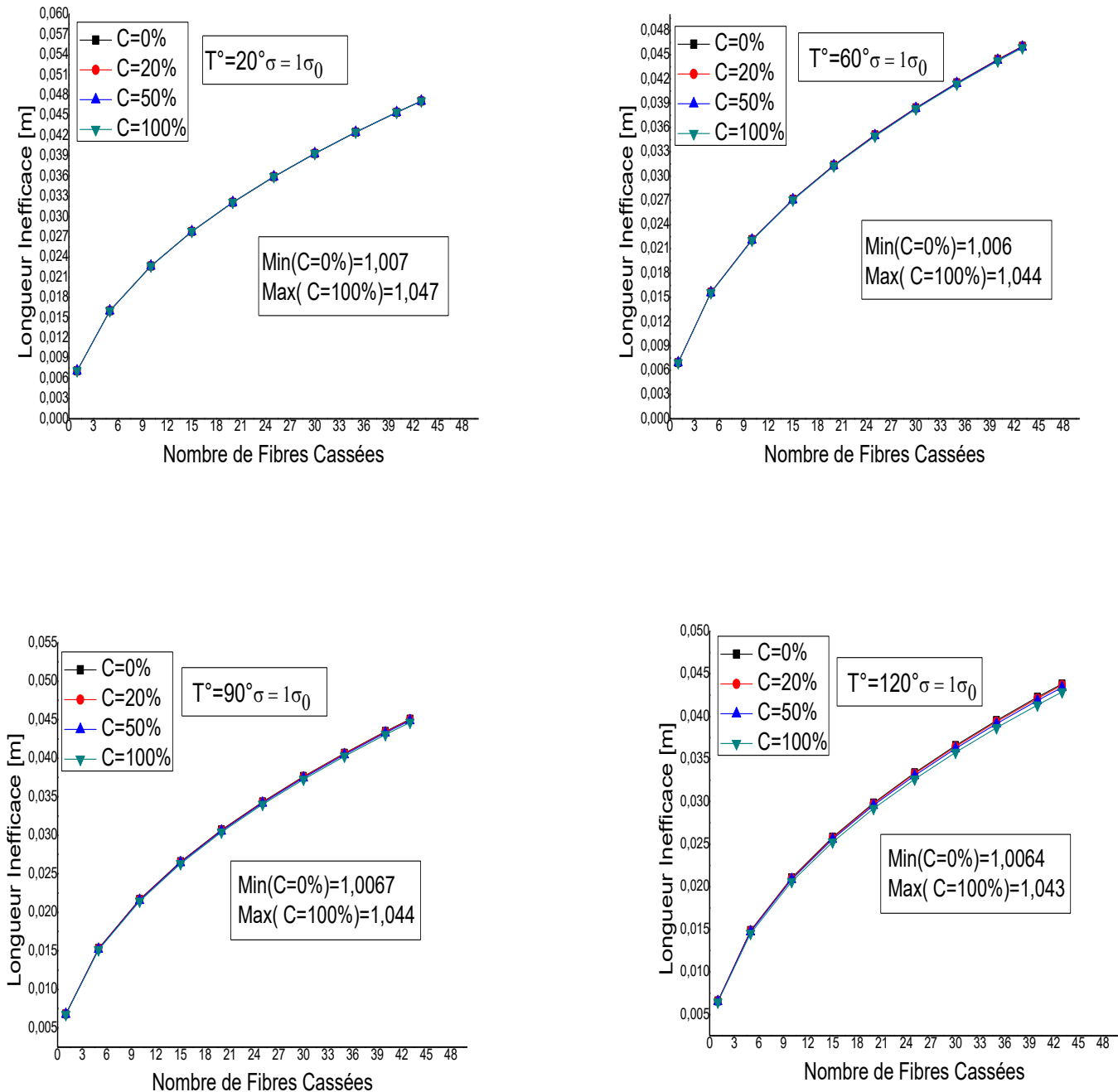


Figure IV.2 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité et de température, pour un chargement complet

$$\sigma = \sigma_0.$$

IV.1.2 / Evolution de la longueur inefficace en fonction des températures variables pour des différentes concentrations d'humidités, pour $\sigma = 0.5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$.

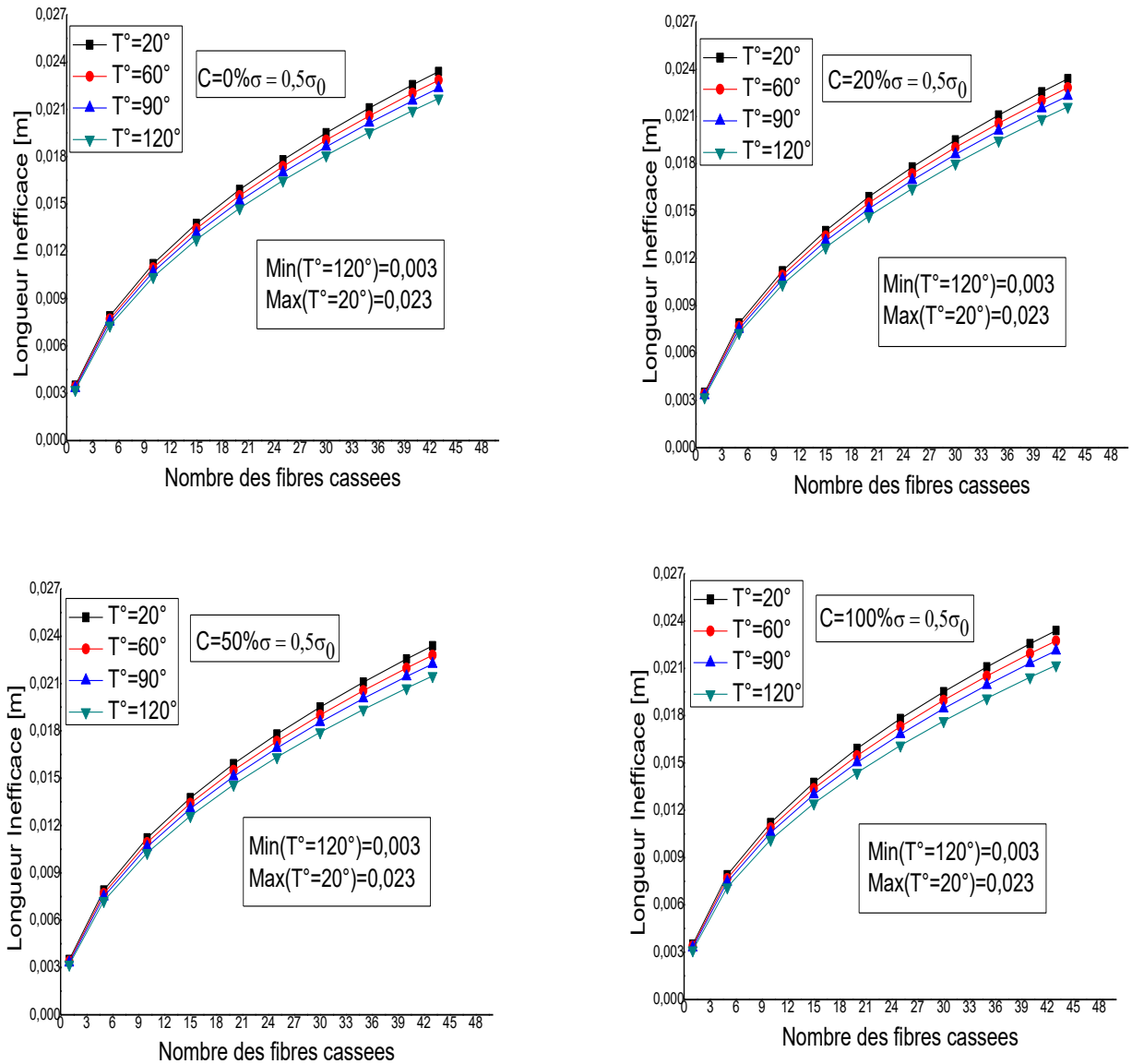


Figure IV.3 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la température et la concentration d'humidité, pour $\sigma = 0.5\sigma_0$.

Nous rappelons que la longueur inefficace $[\delta]$ est définie comme étant la longueur comprise entre l'endroit de la rupture de la fibre jusqu'à la longueur pour laquelle la fibre regain à sa capacité de supporter le chargement complet, donc elle doit inclure la zone localement plastifiée « a ». Selon les lois du comportement et à partir de l'endroit de la rupture, la fibre en Alfa cassée doit passer par une zone localement plastifiée « a », puis par une zone transitoire avant d'atteindre la zone parfaitement élastique délimitée par une longueur appelée inefficace $a \leq [\delta]$ et cela sous l'effet de la température

comme le montrent Les figures IV.3 l'évolution de la longueur inefficace elle est plus importante en fonction du nombre de fibres cassées sous une charge moyenne de traction, par contre elle décroît lorsque ont augment la température de 20 à 120°C, et que les courbes sont plus distinctives contrairement à celle de concentration d'humidité.

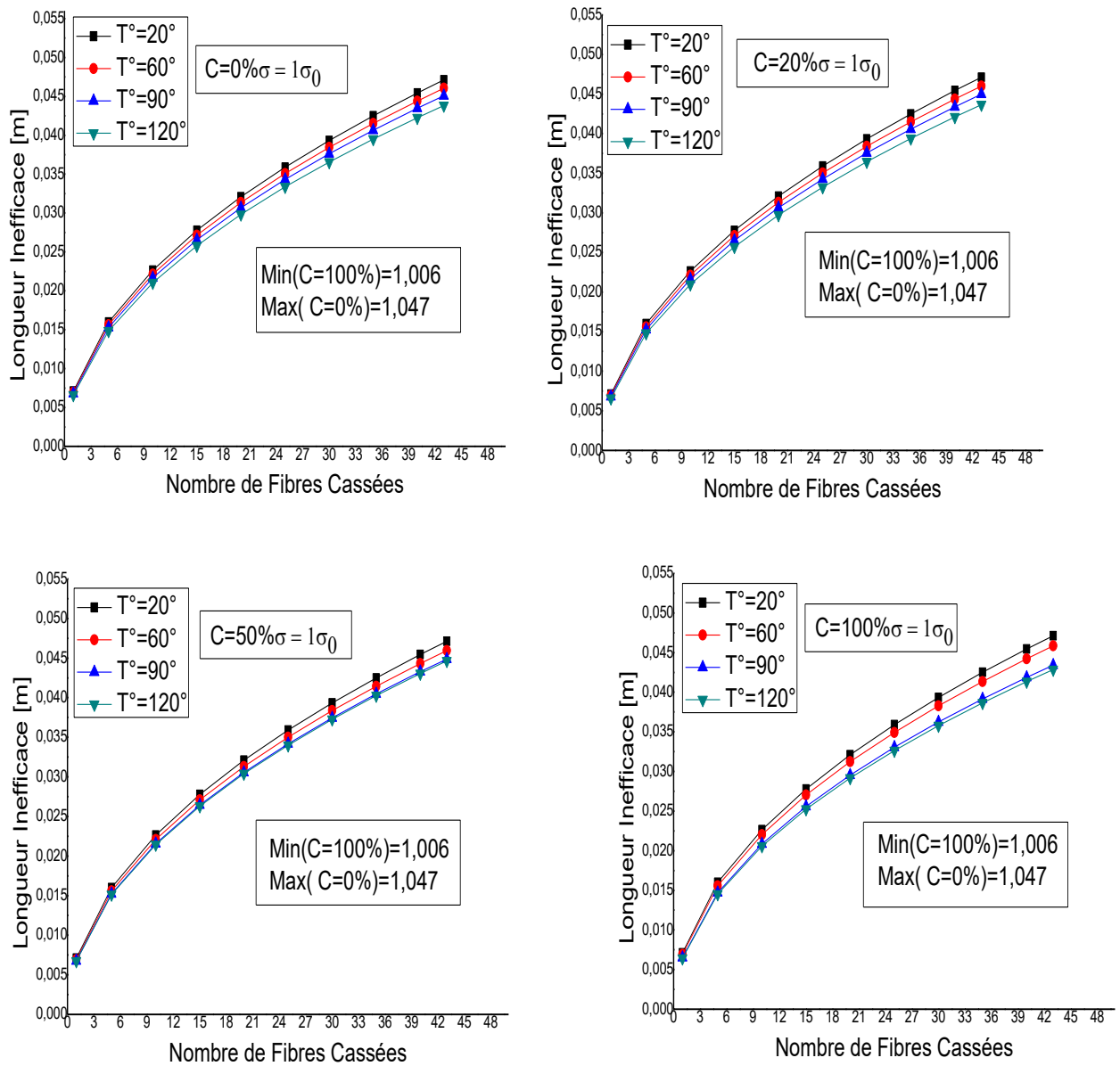


Figure IV.4 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la température et la concentration d'humidité, pour $\sigma = \sigma_0$.

D'autre part la variation de la concentration d'humidité n'a aucun effet sur la longueur inefficace peut importe la variation des températures comme nous le remarquons sur les valeurs des quatre figures IV.3 soit pour un chargement moyen ou complet cela est du aux propriétés mécanique de la fibre Alfa qui résiste beaucoup mieux aux variations d'humidité

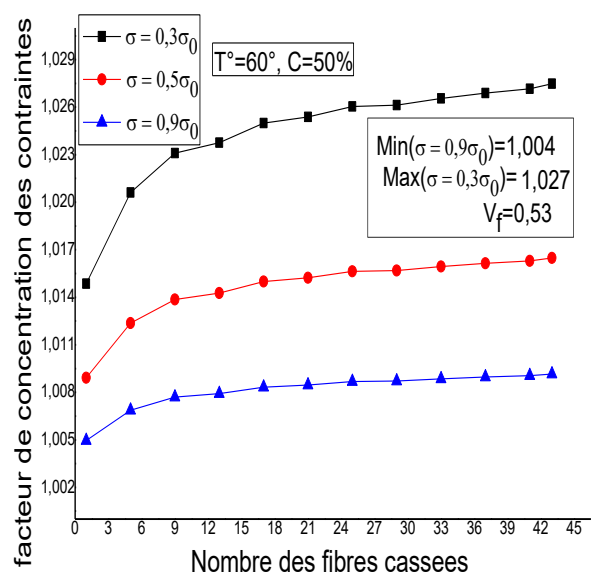
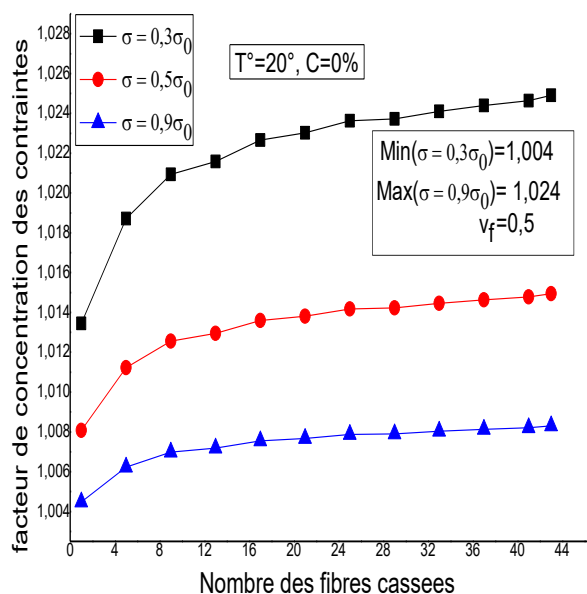
On peut aussi voir sur les figures IV.4 que la longueur inefficace devient plus grande avec l'augmentation de la charge de traction et le nombre de fibres cassées pour les conditions environnementales.

IV.2/ Evolution des concentrations de contraintes sous l'effet hygrothermique.

L'estimation de la longueur de la zone localement plastifiée, permet la détermination du facteur de concentration de contraintes. Ce facteur est d'une grande importance parce qu'il nous offre le rapport entre la contrainte déterminée au point de rupture des fibres Alfas et la contrainte extérieure appliquée. Ce qui nous permettra de déterminer la concentration de la contrainte à l'endroit des fibres cassées, et de prévoir une rupture probable des fibres voisines adjacentes et cela sous l'effet simultané de l'humidité et de la température.

IV.2.1/ Evolution de concentration de contrainte en fonction du nombre de fibre cassée et une progression croissante du chargement extérieur, pour $V_f=0,5$ et (T° et $C\%$ variable)

Pour illustrer l'effet des conditions environnementaux sur la dégradation de la région inefficace entourant par les fibres Alfas casées, nous avons présenté les figures IV.5 l'évolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et un chargement croissant avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100 % pour $T = 20^\circ C$, à $120^\circ C$.



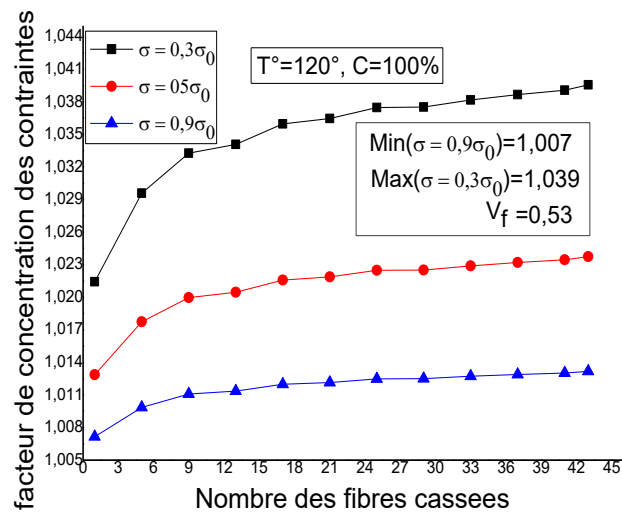


Fig IV.5 : Evolution de concentration de contrainte en fonction du nombre de fibre cassée et une progression du chargement extérieur, pour une fraction volumique $V_f=0,5$, cas (T° et $C\%$ variable)

Ces figures illustres la variation du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante, à l'endroit de rupture des fibres. On peut clairement voir que ce facteur augmente progressivement en fonction du nombre fibres casses et aussi par l'augmentation de la température de 20° à 120° . Par contre, il décroît en fonction en de la contrainte extérieure appliquée. Le facteur de concentration de contraintes maximal est localisé à $\sigma = 0.3\sigma_0$ pour 43 fibres cassées ($C_{\max} = 1.039$) et cela pour des conditions hygrothermique extrême ($T^\circ = 120^\circ$ et $C = 100\%$). Tandis que la valeur minimale de ce facteur ($C_{\min} = 1.004$) est obtenue pour une fibre cassée sous une contrainte extérieure $\sigma = 0.9\sigma_0$ et pour des conditions hygrothermiques basses ($T^\circ = 20^\circ$ et $C = 0\%$).

IV.2.2/ Evolution de concentration de contrainte en fonction des concentrations d'humidités et du nombre des fibres cassées, pour un chargement de $0.5\sigma_0$ et (Températures variable).

Pour illustrer l'effet des conditions environnementales sur la dégradation de la région inefficace entourant par les fibres casées, nous avons présenté aux figures IV.6 l'évolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100 % pour $T = 20^\circ\text{C}$, 60°C , 90°C et 120°C , sous l'effet d'une contrainte extérieure appliquée égale à 0.5. Dans ces figures, la concentration de contraintes devient plus importante avec l'augmentation du nombre de fibres cassées. Par la suite, cette concentration devient relativement stable si le nombre de fibres est très grand. Pour les basses températures, l'effet de la concentration d'humidité sur la concentration de contrainte est presque négligeable comme le montre

la deux premières figures IV.6. Par la suite l'effet de la concentration d'humidité devient de plus en plus important avec l'augmentation de la température de 90 ° C à 120 ° C. À T = 120 ° C, une distinction claire apparaît entre toutes les courbes. D'après les résultats ci-dessus, nous pouvons déduire que lorsque le nombre de fibres cassées est limité, la concentration des contraintes à la région cassée est moins importante. D'autre part, dans la région des fibres voisines intactes, la concentration de contrainte est très élevée. Mais, lorsque le nombre de fibres cassées est très important, la concentration des contraintes à la région inefficace est plus importante et la longueur inefficace est grande. La région voisine devient moins rigide, et la fibre Alfa cassée réagis plus facilement et

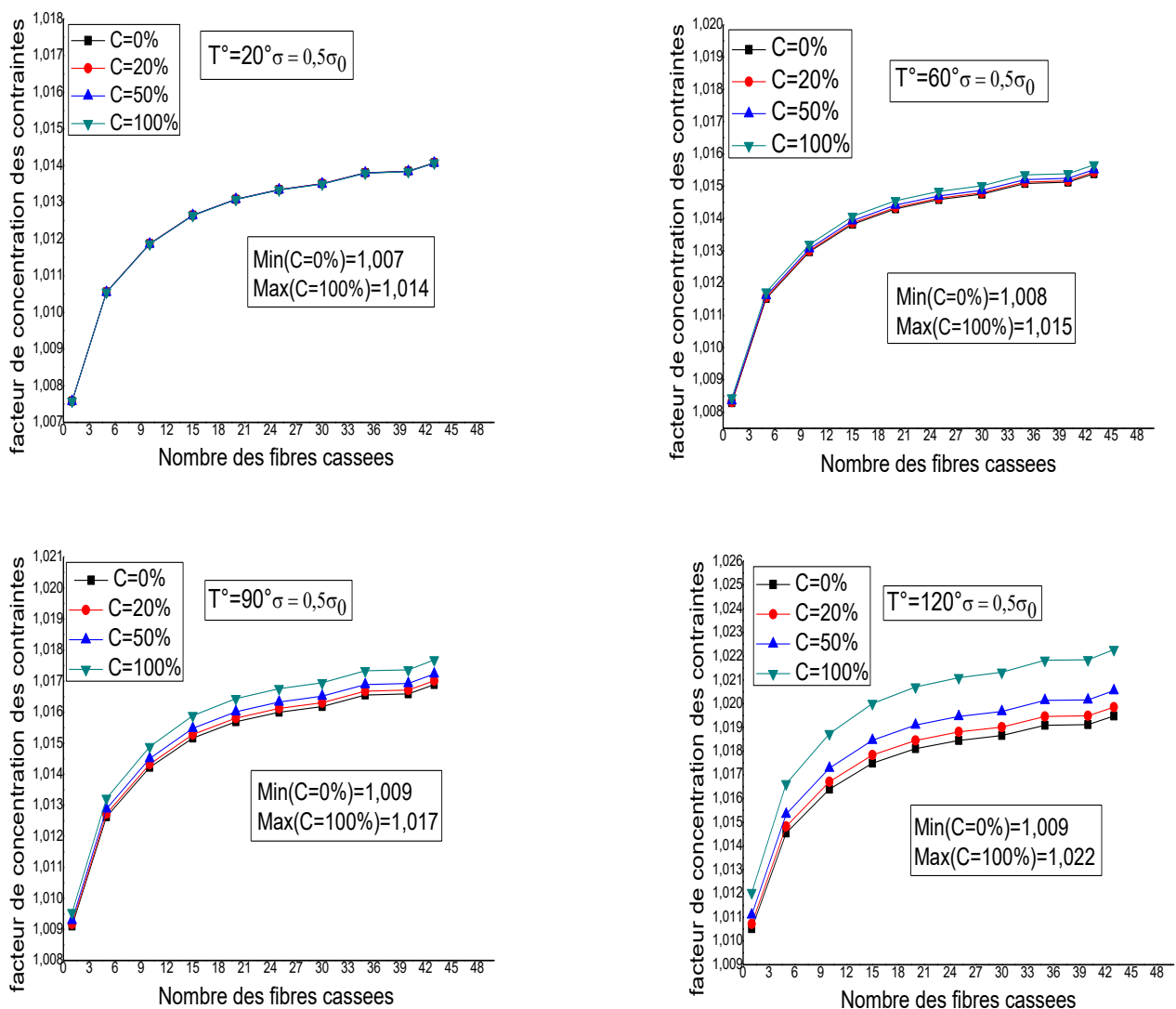


Figure IV.6/ Evolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation progressive de la concentration d'humidité pour différentes T° et C% et pour $\sigma = 0.5\sigma_0$.

IV.2.3/ Evolution de concentration de contrainte en fonction de la température et du nombre des fibres cassées, pour un chargement de $0.5 \sigma_0$ et (des concentrations d'humidités variable).

Par la suite, nous avons étudié le même comportement du facteur de concentration de contraintes, mais cette fois ci nous avons varié quatre températures 20,60, 90, 120°C en imposant à chaque fois une concentration d'humidité variable de 0, 20, 50 et 100% et cela pour une contrainte extérieure appliquée de $0.5\sigma_0$.

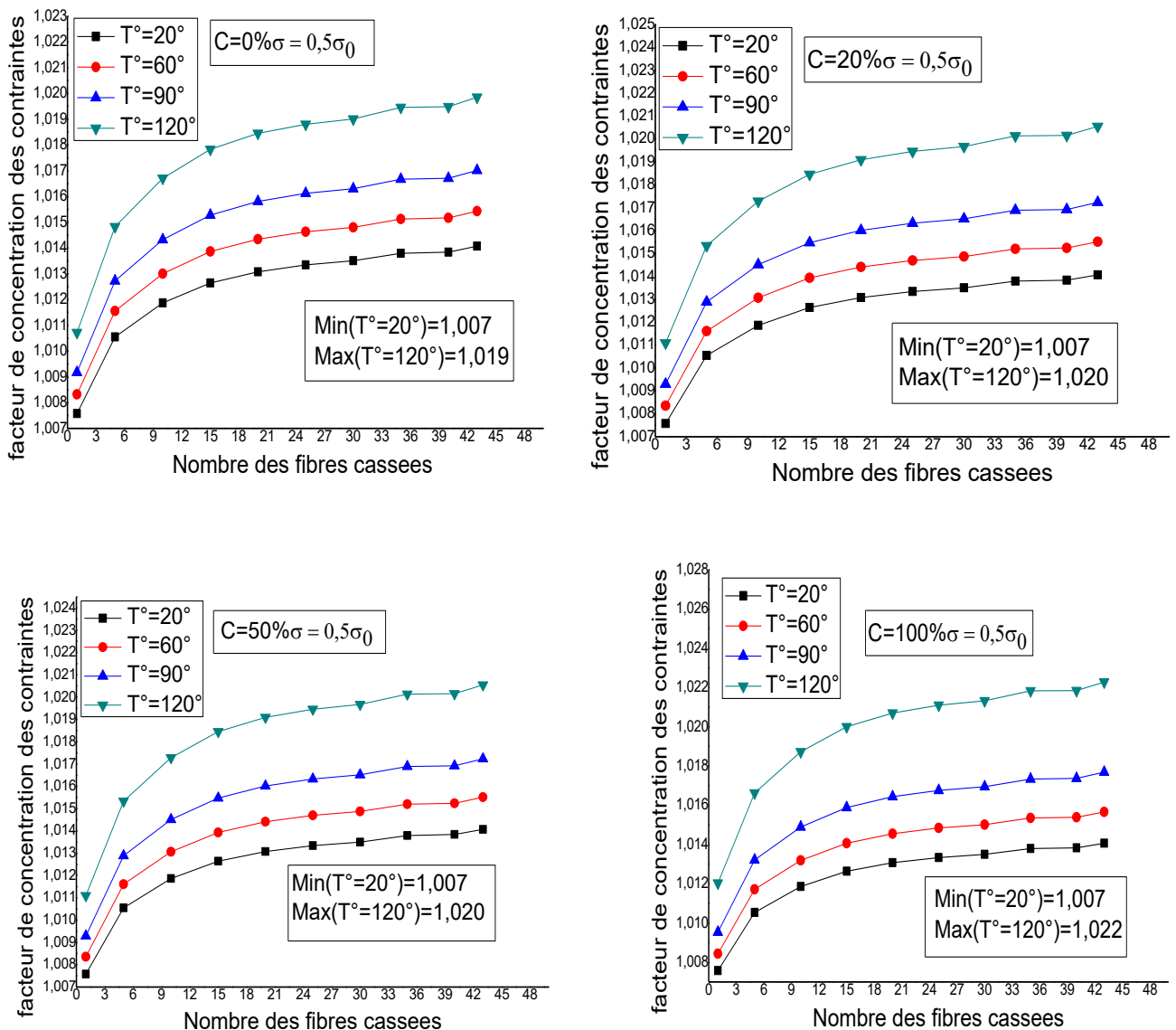


Figure IV.7/ Evolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et une variation progressive de la température et pour C=0, 20, 50 et 100%, pour $\sigma = 0.5\sigma_0$.

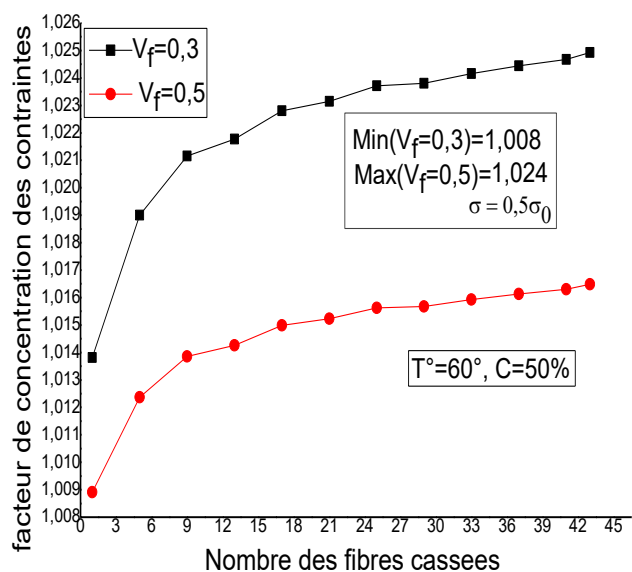
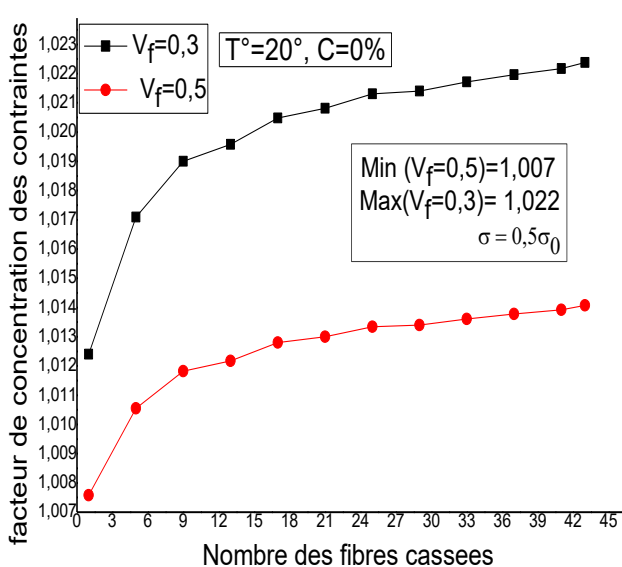
Les figures IV.7 montrent que les variations des températures sur la concentration de contraintes n a presque aucun effet lorsqu'ont fait varié les concentrations d'humidités de 0 à 100% cela est du aux

propriétés mécanique de la fibre Alfa qui résiste aux forte variations d’humidité, comme nous le voyons sur les valeurs maximums et minimums des quartes cas du facteur de concentration d’humidité.

IV.2.4/ Evolution de concentration de contrainte en fonction de deux fractions volumique 0.3 et 0.5 et dans des conditions hygrothermiques variables, pour un chargement de $0.5 \sigma_0$

Pour terminer nous étudions l’effet de la fraction volumique des fibres V_f sur l’évolution du facteur de concentration des contraintes dans la zone endommagée comme nous l’avons présenté dans les figures IV.8, c’est que nous avons varié la fraction volumique des fibres de 0.3 et 0.5, pour trois cas de conditions d’environnements exposer à une contrainte de traction $\sigma=0.5\sigma_0$. Ce que nous pouvons c’est que le facteur de concentration des contraintes dans la zone endommagée est très importants pour $V_f=0.3$, cela est du au volume des fibres Alfas qui est très réduits dans le composite, dominé par le volume important de la résine. Par la suite le facteur devient moins important avec l’augmentation du volume des fibres Alfas dans le composite qui devient plus résistants. D’autre part le facteur de concentration des contraintes devient plus sensible avec l’augmentation de la température et de l’humidité.

La relation entre le facteur de concentration des contraintes dans la zone endommagée et le nombre de fibres Alfas cassées pour les deux fractions volumique est non linéaire. L’augmentation de la fraction volumique des fibres a un effet significatif sur la grandeur des conditions hygrothermiques.



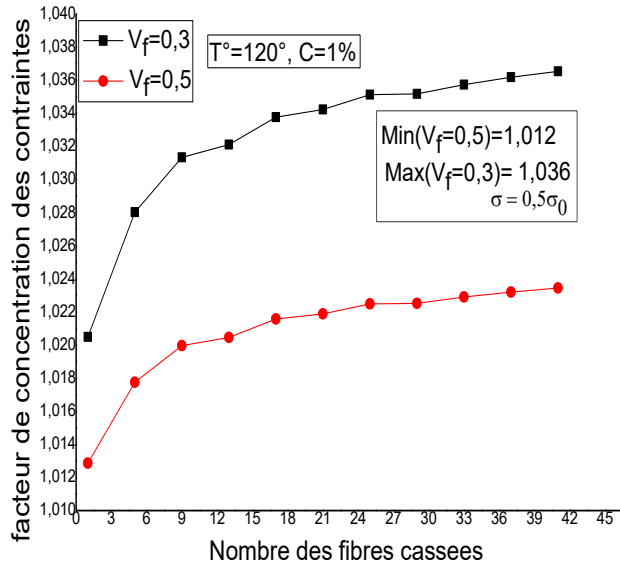


Figure IV.8/ Evolution de concentration de contrainte en fonction de deux fractions volumique 0.3 et 0.5 et dans des conditions hygrothermiques variables, pour un chargement de $0.5 \sigma_0$

Conclusion Générale

De la présente étude, nous pouvons dire que les endommagements des matériaux composites unidirectionnels en fibre Alfa/Epoxyde pour des conditions environnementale variables, dépend essentiellement de la disposition des fibres et de la fraction volumique des fibres à l'intérieur de la matrice. La transmission de la contrainte d'une fibre à l'autre passe par la matrice en présence des contraintes de cisaillement aux interfaces. La détermination du facteur de concentration de contrainte, permet d'avoir une idée plus claire sur l'évolution de la rupture des fibres et la probabilité d'endommagement des fibres voisines adjacentes. Le voisinage de l'endroit de rupture est caractérisé par une zone localement plastifiée qui deviendra élastique en éloignant de cette zone. Sous des contraintes extérieures progressives, la zone plastique et la région inefficace deviennent plus larges en fonction du nombre de fibres cassées et par la suite elles deviennent critiques malgré que la variation des concentrations d'humidités de 0% à 100% à peu d'effet sur les différents résultats trouvés, d'autre part elle très favorable lorsqu'on fait varié la température de 20°C à 120°C, Ceci est dû au comportement fragile et résistant du matériau Alfa/Epoxyde ce qui favorise le passage rapide de l'endommagement d'une fibre alfa cassée à une autre ce qui nous permettra d'être en conformité avec les lois de la micromécanique. En effet, les composites Alfa/époxy, ils présentent une bonne rigidité et un gain de poids très important. Ils sont plus résistants au vieillissement et à l'endommagement introduit par flexion que les composites à base de fibres de carbone. Les résultats obtenus ont montré aussi que la résistance des fibres Alfas et le module de Young sont relativement insensibles à la variation de l'humidité. La fraction de fibres de 0.3 est trop faible pour obtenir un renforcement efficace avec la résine

Finalement, nous pouvons dire que le présent travail constitue pour nous et pour les futurs chercheurs une base pour développer l'axe de l'endommagement des matériaux bio composites unidirectionnels et plus précisément l'effet de la température allant jusqu'à la limite pour éviter les dégradations des composites unidirectionnels aux interfaces matrice-fibres.

Pour futures recommandations, nous estimons poursuivre cet axe de recherche pour toucher d'autres matériaux de renfort purement naturel et des résines traités qui répond aux exigences mécanique tel que le comportement non linéaire caractérisé par la viscoélasticité du composite.

Références Bibliographique

- [1] c.m.boyer. «Composites unidirectionnels : modèles probabilistes de rupture et évaluation de la fiabilité». Thèse d'université, blaise pascal, 1997.
- [2] p.m. manne et s.w.tsal. «Design optimization of composite plates, part i: design criteria for strength, stiffness, and manufacturing complexity of composite plates». Journal of materials science, 32:544-571, 1998.
- [3] r. m. christensen. Mechanics of composite materials. krieger publishing company, malabar, florida, 1991.
- [4] gassan j., bledzki a.k., composites reinforced with cellulose based fibres. progress in polymer science, 1999, 24, 221-274.
- [5] mishra s., tripathy s.s., misra m., mohanty a.k., nayak s.k., novel eco-friendly biocomposites; biofiber reinforced biodegradable polyester amide composites: fabrication and properties evaluation. j. reinf. plast. comp., 2002, 21 (1), 55-70.
- [6] o'donnell, a., dweib, m.a., wool, r.p. 2004 natural fibre composites with plant oil-based resin. comp. sci. tech., **64**, 1135-1145.
- [7] pearce, e.m. 1985 "fibre chemistry", handbook of fibre science and technology: volume iv. menachem lewin eli m. pearce, new york, 1985, 737-746.
- [8] scrivener, k., van damme, h. 2004 construction materials : from innovation to conservation. mrs bulletin, **may**, 308-312.
- [9] gao, z., reifsnider, k. l. "micromechanics of tensile strength in composite systems," composite materials: fatigue and fracture, fourth volume, astm stp 1156, 1993, pp. 453-470.
- [10] khiat m.a, sereir z, chateaneuf a, "uncertainties of unidirectional composite strength under tensile loading and variation of environmental conditio," theoretical and applied fracture mechanics 56 (2011) 169–179
- [11] Berreur.l, maillard.b. d, etnösperger.de, « l'industrie française des matériaux composites », ministère de l'économie des finances et de l'industrie, p1-47,2002.
- [12] A. Elouaer, "Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales," Thèse de doctorat, Reims, France, 2011.

Références Bibliographique

- [13] DJEBLOUN, Youcef (2004) *ETUDE DE LA RUPTURE EN MODE I D'OUVERTURE DES MATERIAUX COMPOSITES*. Masters thésis, Université Mohamed Khider Biskra.
- [14] JULES.E.J, « *Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis Diélectrique* », Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, 2001
- [15] JULES.E. J, « *Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites thermodurcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis Diélectrique* », Ecole nationale supérieure d'arts et métiers, 2001.
- [16] KAUSCH.H.H, HEYMANS.N, PLUMER.C.J, and DECROLY.P, « *Matériaux polymères: propriétés mécaniques et physique* », 2001.
- [17] Jean Marie. Berthelot, *Matériaux composites « comportement mécanique et analyse des Structures* », édition TEC et DOC, 1999.
- [18] DJEBLOUN, Youcef (2004) *ETUDE DE LA RUPTURE EN MODE I D'OUVERTURE DES MATERIAUX COMPOSITES*.
- [19] MOKADDEM.A, « *Modélisation du Comportement de L'interface Fibre-Matrice de Matériaux Composites* », Mémoire de magister, USTO, 2008.
- [20] CARMA « *Glossaire des matériaux composites* » Actualisation octobre 2006
- [21]. M. Abdelmouleh, S. Boufi, M.N. Belgacem, A. Dufresne, 2007; Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading; *Composites Science and Technology* 67, 1627-1639.
- [22]. Suganti Ramarad; Preparation and properties of kenaf bast fiber filled (plasticized) poly(lactic acid) composites; Master, 2008
- [23]. N. Lu et S. Oza. «Thermal stability and thermo-mechanical properties of hemp-high density polyethylene composites: Effect of two different chemical modifications.». *Composites Part B: Engineering.*, Vol. 44, 2013, pp 484-490.
- [24]. Arnold J. C., Alston S. M., Life cycle assessment of the production and use of polypropylene tree shelters. *Journal of Environmental Management*, 94 (1), pp. 1-12, 2012.

Références Bibliographique

- [25]. D.Nedjraoui « Adaptation de l'alfa (*Stipa tenacissima* L) aux conditions stationnelles », Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la technologie Houari Boumediene USTHB, Alger (1990)
- [26]. A. Y. Nenonene, 'Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage'', thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.
- [27]. F. Michaud, ''Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage'' thèse de doctorat, université Laval, 2003.
- [28]. Yim J-H, Cho S-Y, Seo Y-J et. Jang B-Z. "A study on material damping of 0° laminated composite sandwich cantilever beams with a viscoelastic layer". *Composites structures* 2003; 60:367-374.
- [29]. M.M. Kabir, H. Wang, K.T. Lau et F. Cardona. «Chemical treatments on plant-based natural fibre reinforced polymer composites: An overview.», *Composites Part B:Engineering.*, Vol.43, 2012, pp. 2883–2892.
- [30]. P.A. Sreekumar et al. «Effect of fiber surface modification on the mechanical and water absorption characteristics of sisal/polyester composites fabricated by resin transfer molding.», *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing.*, Vol.40, 2009, pp. 1777–1784.
- [31]. Y. Xie, C.A.S. Hill, Z. Xiao, H. Militz et C. Mai. «Silane coupling agents used for natural fiber/polymer composites: A review ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 41, 2010, pp. 806-819.
- [32]. C.F. Kuan, H.C. Kuan, C.C.M. Ma et C.M. Huang. « Mechanical, Thermal and Morphological Properties of Water-Crosslinked Wood Flour Reinforced Linear Low- Density Polyethylene Composites ». *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, Vol. 37, 2006, pp. 1696-1707.

Références Bibliographique

- [33]. S.K.Batra « Other long vegetable fibers », In: Handbook of fibre Science and Technology, Ed. M.Lewin and E.M.Pearce, New York. Marcel Dekker, Vol. 4, Fibre Chemistry, pp. 505-575 (1998).
- [34]. P.S. Mukherjee and K.G.Satyanarayana « Structure and properties of some vegetable fibers. II. Pineapple fibre. II.Pineapple fibre», Journal of Materials Science, Vol 21, pp.51-56 (1986).
- [35]. A.Ishikawa, S.Kuga and T.Okano « Determination of parameters in mechanical model for cellulose III fibre »,Polymer, Vol 39, issue 10, pp. 1875-1878, (1998).
- [36]. C.Baley «Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », Techniques de l'ingénieur (2005)
- [37]. « L'alfa: Importance écologique et socio-économique », Portail de l'agriculture marocaine, Terre et Vie, N°61-62,(Novembre 2002).
- [38]. A. Moulay, K.Benabdeli and A.Morsli « Contribution a l'identification des principaux facteurs de dégradation des steppes a Stipa tenacissima du sud-ouest Algerien », Mediterranea, Serie de estudios biológicos época II, n° 22,Universidad de Alicante (2011).
- [39]. A. Bessadok and S. Marais, Effect of chemical treatments of Alfa (Stipa tenacissima) fibers on water-sorption properties, Composites Science and Technology, 67 (2007) 685–697
- [40]. M.Rhanem « L'alfa (Stipa tenacissima L.) dans la plaine de Midelt (haut bassin versant de la Moulouya, Maroc) –Éléments de climatologie », Physio-Géo [En ligne], Vol 3 (janvier 2009).
- [41]. (Bessadok et al. 2009, Ben Brahim at al. 2007, Hammiche et al. 2013, Khaldi et al. 2014 Mechakra et al. 2015, Rokbi et al. 2011).
- [42] Z.Hashin et B. Walter Rosen. « The elastic moduli of fiber-reinforced materials ». Journal of applied mecanics materials, 7 :448-64, 1973
- [43] Roy, S., Xu, W., Patel, S., Case, S.: Modeling of moisture diffusion in the presence of bi-axial damage in polymer matrix composite laminates. Int. J. Solids Struct. 38, 7627–7641 (2001)
- [44] Sereir Z., Boualem N., Effect of long term hygrothermal loadings and stacking sequences on the damage of hybrid composites, Theoretical and Applied Fracture Mechanics, Vol47. (2), P 147-163, 2007.

Références Bibliographique

- [45] [Tsai, S.W.: Composite Design, Think Composites, 4th edn. Dayton (1988)],
- [46] [Gao, Z., Reifsnider, K. L. “Micromechanics of Tensile Strength in Composite Systems,” Composite Materials: Fatigue and Fracture, Fourth Volume, ASTM STP 1156, 1993, pp. 453-470].
- [47] [Batdorf, S. B. “Tensile strength of unidirectional reinforced composites—I,” Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 1, 1982, pp. 153-167] pour déterminer la résistance de notre composite].
- [48] [DiBeneditto,A.T. “ Measurement of thermomechanical stability of interphases by the embedded single fiber test,”Composites Science and Technology,Vol.42 (1992),pp.103-123].
- [49] [Detassis,M.,Pegoretti,A.,and Migliaresi,C. “Effect of temperature and strain rate on interfacial shear stress transfer in carbon/epoxy model composites,”*Composites” Science and Technology*,Vol.53 (1995),pp.39-46].
- [50] [Camata G., Corotis R., Spacone E., Simplified stochastic modeling and simulation of unidirectional fiber reinforced composites, Probabilistic Engineering Mechanics 19 (2004) 33