

Faculty of Sciences and Technology
Department of Mechanical Engineering

كلية العلوم والتكنولوجيا
قسم المهندسة الميكانيكية

N° d'ordre : M...../GM/2022

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

Prédictions et comparaisons de l'endommagement
d'un composite unidirectionnel pour six cas de fibres
naturelles

Présenté par :

❖ BENGHERNAOUT Khadoudja

❖ BELMEGDAD Nadia

Soutenu le 13 / 07 / 2022 devant le jury composé de :

Président	Dr : BENDOUKHA Mohamed	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Mr: BENAÏSSA Mohamed	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr : KHIAT Mohamed Amine	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021 / 2022



Remerciements

Nous tenons d'abord à remercier Allah de tout puissant et miséricordieux qui nous a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail qui a fait de ce jour une date inoubliablement gravée dans nos cœurs.

Merci à Monsieur le chef département Ould Saïd Belkacem Tout au long de cette année, il a su orienter aux bons moments et nous prodiguer ses conseils. Pour tout cela, sa confiance et sa disponibilité, on le remercie vivement.

Nous adressons notre profonde gratitude à nos enseignants de du département de génie mécanique Université de Mostaganem pour les efforts qui ont déployé avec leurs paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques afin d'arriver à ce stade.

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

Nous aimerions également remercier le Dr : BENDOUKHA Mohamed d'avoir présidé notre jury.

Nous adressons nos remerciements aux enseignant « Mr. BENAÏSSA Mohamed » D'avoir accepté d'examiner notre modeste travail.

Nous tenons remercier La famille Benghernaout Et Belmegdad, pour le soutien continu qu'elle nous a apporté tout aux longs de ces années d'études.

Je n'oublierai pas non plus tous ceux qui, de près ou de loin, par leur compétence, leur aide technique et leurs conseils ont contribué à la réalisation de ce travail

Dédicaces

Je dédie ce modeste effort À mes chers ça représente le fruit de leur soutien et encouragement

A mon Chère papa

Tout l'encre du monde ne pourrait suffire pour exprimer mes sentiments envers un être très cher. Vous avez toujours été mon école de patience, de confiance et surtout d'espoir et d'amour. Vous êtes et vous resterez pour moi ma référence, la lumière qui illumine mon chemin. Ce travail est le résultat de l'esprit de sacrifice dont vous avez fait preuve, de l'encouragement et le soutien que vous ne cessez de manifester, j'espère que vous y trouverez les fruits de votre semence et le témoignage de ma grande fierté de vous avoir comme père. J'implore Dieu, tout puissant, de vous accorder une bonne santé, une longue vie et beaucoup de bonheur.

A Ma chère Maman

Aucune dédicace très chère maman, ne pourrait exprimer la profondeur des sentiments que j'éprouve pour vous, Vous avez guetté mes pas, et m'avez couvé de tendresse, ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Vous m'avez aidé et soutenu pendant de nombreuses années avec à chaque fois une attention renouvelée. Puisse Dieu, tout puissant vous combler de santé, de bonheur et vous procurer une longue vie.

A mes chères sœurs

Sultana Et ma petit ange Badia source de bonheur je Vous aime beaucoup Je vous souhaite beaucoup de succès, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur

A mes amis

Naila Samah Wiam En souvenir des moments heureux passés ensemble, avec mes vœux sincères de réussite, bonheur, santé et de prospérité.

A ma cousine

Nabila Aucune dédicace ne peut exprimer ma gratitude de t'avoir comme cousine et sœur je n'oublierais jamais ton encouragement et ton soutien le long de mes études Je te souhaite beaucoup de succès, de prospérité et une vie pleine de joie et de bonheur.

A ma très chère Grand-mère

Ton affection, ta prière et ton amour inconditionnel ont été pour moi l'exemple de persévérance. Dieu te protège, te donne bonne santé et longue vie parmi nous.

A ma binôme Nadia

Je la souhaite Beaucoup de Réussite et joie dans sa Vie

A tous ceux qui ont de loin ou de près contribués à ce travail qui m'ont encouragé soutenus et aidés Et à tous ceux qui ont partagé ma joie en ce jour ci.

Khadoudja

Dédicaces

*Je dédie cet évènement marquant de ma vie à la mémoire de **mon père** décédé trop tôt.
J'aurais souhaité sa présence en ce moment pour partager ma joie. Puisse dieu, le tout puissant,
l'avoir en sa sainte miséricorde !*

*A celui qui Qui m'a donné la vie... S'affection me couvre, sa bienveillance me guide et sa
présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents
obstacles.....**Ma chère mère***

*A ma chère sœur et leur enfants, source de joie et de bonheur.....**Rekia, assile, alae.***

*A mon cher frère source de vie, d'espoir et de motivation..... **Imad, Amin.***

*Au cœur le plus pur et la plus belle amie..... **Khadouja.***

*A ma très chère amie**Hadjar.***

*A tous ceux que le destin a voulu que les jardins d'études me réunissent et en
fassent des frères*

Nadia

Résumé

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

Mots Clés : Micromécanique, Composite unidirectionnel, Interface Matrice époxyde et Fibre naturelle.

Abstract

The present work continues the work done so far on the damage of natural fibre composites and improves the analytical study to predict the strength and durability of a unidirectional composite by comparing six cases of natural fibres, Jute, Ramie, Alfa, Sisal, Linen and Abaca in an epoxy matrix. This model assumes that a group of broken fibres is surrounded by a number of intact fibres in a well-defined arrangement. The load evolution of the particular characteristics of the fibre, the matrix, and the fibre/matrix interface, are the most important factors in assessing the strength of the composite from a micromechanical point of view. The interface and bonding conditions are taken into consideration by this model to quantify the rate of transfer of normal shear stresses through the matrix between two neighboring intact and broken fibres.

Keywords: Micromechanics, Unidirectional composite, Epoxy matrix and natural fibre interface.

ملخص

لا يزال العمل الحالي يتماشى مع مختلف الأعمال التي تم القيام بها حتى الآن بشأن تلف المواد المركبة للألياف الطبيعية، ويحسن في كل مرة الدراسة التحليلية التي تجعل من الممكن التنبؤ بقوة مركب أحادي الاتجاه من أجل مقاومة ومتانة مركب أحادي الاتجاه مقارنة بهذا الوقت - هذه الحالات الست من الألياف الطبيعية، جوت ورامي وألفا وسيسال ولين وأباكافا في مصفوفة إيبوكسي. يفترض هذا النموذج أن مجموعة من الألياف المكسورة محاطة بعدد من الألياف السليمة في شكل ترتيب صعب. يعد تطور أحمال الخصائص الخاصة للألياف والمصفوفة وواجهة الألياف/المصفوفة أهم العوامل لتقييم قوة المركب من وجهة نظر ميكانيكية دقيقة. يتم أخذ ظروف الواجهة والالتصاق في الاعتبار من خلال هذا النموذج لتحديد معدل نقل ضغوط القص العادية من خلال المصفوفة بين ليفين سليمين ومكسورين قريبين.

الكلمات المفتاحية: الميكانيكا الدقيقة والواجهة المركبة أحادية الاتجاه والمصفوفة الإيبوكسية والألياف الطبيعية.

Sommaire

Remerciement	ii
Dédicaces	iii
Résumé	v
Sommaire	vi
Liste des figures	viii
Liste des tableaux	x
Listes des Symboles	xi
Introduction Général	1
Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites	
I.1 Introduction	4
I.1.1. Un composite... c'est quoi	4
I.1.2 Historique	4
I.2 Les Principaux constituant des Matériaux Composites	5
1.2.1 Les Matrices	5
1.2.2 Les Renforts	7
1.2.2.1 Les différentes Types de Renforts	8
1.2.2.2 Architectures de renforts	8
1.3. Les Types de Composites	9
I .4 Les époxydes	11
I .4.1 Définition	11
I .4.2 Historique	11
I .4.3 Domaines d'applications	11
I .4.4 Avantages et inconvénients d'époxydes	12
I .4.4.1 Les Avantages des composites	12
I .4.4.2 Les inconvénients des composites	12
1.5 Que fabrique-t-on en matériaux composites	12
I.6 Avantages et inconvénients des composites	13
Chapitre II Généralités sur les Fibres Naturelles	
II .1 Introduction	15
II .1.1 Définition des fibres naturelles	15
II.1.2 Présentation des Différentes Fibres Naturelles	15
II.1.3 Comparaison des fibres naturelles et artificielles.....	16
II .1.4 Intérêt d'utilisation des fibres naturelles	17

II .1.5 Domaines d'utilisation Des fibres Naturelles	17
II .1.6 Principaux avantages et inconvénients des fibres Naturelles	17
II .2 Les fibres végétales	17
II .2.1 Composition et propriétés de différentes fibres végétales	18
II .2.2 Principaux avantages et inconvénients des fibres Végétal	18
II.3 Présentations des différentes fibres végétales	19
II.3.1 Le jute	19
II.3.2 La Ramie	19
II.3.3 Alpha.....	20
II.3.4 Le lin	20
II.3.5 Le sisal	21
II.3.6 Abaca	21
Chapitre III : Modèle de Rupture longitudinale	
III.1 Introduction	23
III.2 Formulation du Problème applications sur un échantillon.....	24
Chapitre IV : Résultats et Discussions	
IV.1/ Applications	27
IV.2/ détermination de la concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différents changements environnementaux différents.....	29
IV.2.1/ Evaluations facteur de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différents températures (20° à 120°), cas d'une concentration d'humidité $C=50\%$	29
IV.2.2/ Evaluations facteur de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différents températures (20° à 120°), cas d'une concentration d'humidité $C=100\%$	30
IV.3/ Evolution de la zone plastique.	32
IV.3.1/ Evaluation de la longueur inefficace pour des températures de 40° , 80° et 120° en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargements appliquée de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 et pour une concentration d'humidité $C= 50\%$	32
IV.3.2/ Evaluation de la longueur inefficace pour des températures de 40° , 80° et 120° en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargements appliquée de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 et pour une concentration d'humidité $C= 100\%$	33
IV.4/ Evolution du déplacement longitudinal.....	35
Référence	37
Conclusion Général	40
Annex	41

Liste de figures

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Figure 1.1 : Matériaux composites	4
Figure I.2 : Des constituants du composite	5
Schéma I.3 de types des matrices	5
Figure I.4: Différents types de renforts employés dans les matériaux composites	7
Schéma I.5 des types de renforts	8
Figure I.6 : fibre Mat	9
Figure I.7 : Toile	9
Figure I.8 : Multidirectionnels	9
Figure I.9 : Plis à renforcement unidirectionnel	10
Figure I. 10 : constitution d'un stratifié	10
Figure 1.11 : Constitution d'un sandwich	10

Chapitre II Généralités sur les Fibres Naturelles

Figures II.1 : La production mondiale de fibres	15
Schémas II.2 des différentes fibres naturelles	16
Figure II.3 : Le Jute	19
Figure II.4: Fibre des feuilles de Jute	19
Figure II.5 : La plante de Ramie	19
Figure II.6 : : Fibre des feuilles de Ramie.....	19
Figure II.7 : La plante de Halfa	20
Figure II.8 : : Fibres de Halfa	20
Figure II.9 : La plante de lin	20
Figure II.10 : Fibres de Lin	20
Figure II.11 : La plante de Sisal	21
Figure II.12 : Fibres de Sisal	21
Figure II.13: La plante d'abaca	21
Figure II.14 : Fibres de Abaca	21

Chapitre III : Modèle de Rupture longitudinale

Figure III -1 : Arrangement des fibres intactes autour des fibres cassées.....	24
Figure III.2. Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes.....	24

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Figure IV.1. Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace.....	27
Figure IV.2 : géométrie de l'échantillon.	28

Figure IV.3 Evaluations facteur de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différents températures (20° à 120°), cas $C=50\%$	30
Figure IV.4 Evaluations facteur de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différents températures (20° à 120°), cas d'une concentration d'humidité $C=100\%$	31
Figure IV.5 Evaluation de la longueur inefficace en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargement appliquée de $0.5 \sigma_0$ au chargement complet σ_0 et pour une concentration d'humidité $C= 50\%$	33
Figure IV.6 Evaluation de la longueur inefficace en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargement appliquée de $0.5 \sigma_0$ à σ_0 et pour une concentration d'humidité $C= 100\%$	34
Figure IV.7 Evolution du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée, des fibres cassées et les conditions environnementales pour les Six cas de fibres	36

Liste des tableaux

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Tableau I.1. Propriétés mécaniques des résines thermodurcissables.....	6
Tableau I.2 Tableau I.2 Propriétés mécaniques des résines thermoplastiques	6
Tableau I.3 – Propriétés mécaniques des résines époxydes	11
Tableau I.4 Caractéristique des résines thermodurcissables	12

Chapitre II Généralités sur les Fibres Naturelles

Tableau II.1 : Comparaison entre les fibres naturelles & artificielles	16
Tableau. II.2 : Composition et propriétés de différentes fibres végétales	18
Tableau II.3 : Propriétés mécaniques en traction de quelques fibres végétales	18

Chapitre IV : Résultats et Discussions

Tableau IV. 1. Caractéristiques mécaniques et géométriques des échantillons en composite Jute-Alfa-Ramie-Sisal-Abaca et lin / époxyde	28
--	----

Liste des symboles

Am : Surface de la matrice
Af : Surface de la fibre
a : Zone du décollement localement plastifié
a : Coefficient d'indice de la matrice
d : la densité
D : le diamètre
 β : paramètre des modules de géométrie fibre-matrice
c : Indice du composite en bloc
Cc : Indice d'humidité absorbée
Ec : Module de Young du composite
Ef : Module de Young de la fibre
Em : Module de Young de la matrice
El : Module des fibres adjacentes intactes
f : Coefficient d'indice de la fibre
g : Température Shift relatif par unité d'humidité absorbée
Gm : 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 : La masse volumique
 η : Paramètre de cisaillement
L : Longueur de l'échantillon
L0 : Longueur de référence de l'échantillon
rf : Rayon de la fibre
R2 : Quantité géométrique du composite
ni : Nombre de fibre cassée
vm : Coefficient de poisson de la matrice
Vf : Fraction volumique de la fibre
t : Epaisseur de l'échantillon
Topr : Température d'utilisation
Trm : Température de référence
Tog : Température de transition vitreuse dans un milieu sec
W : Largeur de l'échantillon
PC : Poids du composite
Pm : Poids de la matrice
Pf : Poids de la fibre
Ui : Déplacements
j : L'accroissement de la charge

Introduction générale

Les matériaux composites sont des matériaux à très hautes propriétés mécaniques qui se développent aujourd'hui dans presque tous les domaines et sont source de grands défis pour toutes sortes de réalisations de haute technologie [1].

Les matériaux composites sont et seront de plus en plus utilisés dans des applications industrielles. Ils remplacent souvent les matériaux métalliques dans de nombreux domaines. Deux facteurs clés motivent le développement et l'utilisation des matériaux composites. Le premier, à très haut rapport résistance/masse, trouve son utilité dans les applications où des économies substantielles sont requises dans les applications aérospatiales et automobiles [2].

Le développement des matériaux composites est également porté par un deuxième facteur, lié aux particularités de ces matériaux, qui offrent aux concepteurs une liberté supplémentaire, tant d'un point de vue mécanique que thermique : le choix du comportement des matériaux [2,3] 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 pour le dimensionnement des structures composites, qui est la caractérisation à l'échelle micromécanique et macro-mécanique du module d'élasticité et de la résistance mécanique. Une synthèse de ces caractéristiques peut être trouvée dans l'œuvre de Christensen [4].

Ce travail s'appuie sur un modèle micromécanique d'homogénéisation et utilise la définition de volumes élémentaires représentatifs pour réaliser l'homogénéisation des matériaux composites. Ces matériaux ont fait l'objet de nombreux travaux de recherche dans lesquels on cite les modèles Zweben et Rosen [5,6], considérés comme l'un des plus anciens modèles de prédiction de la résistance des composites à matrice polymère. Les deux auteurs ont étudié les dommages de l'arrangement structuré des fibres, et ils ont déterminé la longueur effective pour estimer la résistance à la traction sur la base de l'analyse de la force de cisaillement des fibres disposées dans une direction unidirectionnelle. Cependant, leur modèle ne tenait pas compte de l'effet de la concentration de contraintes dans les fibres adjacentes à la fibre cassée.

Phoenix et al. [7] ont pu déterminer la contrainte et la durée de vie à la rupture statistique des fibres de carbone unidirectionnelles. Leur modèle se compose de sept fibres de carbone parallèles dans un arrangement hexagonal dans une matrice époxy

Ces dernières années, l'application des fibres naturelles dans les matériaux composites a suscité un grand engouement, notamment dans le domaine des composites à matrice organique [8].

L'utilisation de matériaux composites à matrices organiques ne cesse de se développer dans divers domaines, en particulier les stratifiés à fibres longues de carbone et les matrices époxy sont de plus en plus utilisés pour réaliser des composants structuraux. Les bonnes propriétés mécaniques spécifiques de ces matériaux permettent de réduire le poids de la structure particulièrement recherché dans les industries aéronautiques et aérospatiales [9]. Avec cette étude, nous visons d'étudier les prédictions et les comparaisons de l'endommagement d'un composite unidirectionnelle pour six cas de fibres naturelles le Jute, Ramie, Alfa, Sisal, Lin et Abaca dans une matrice en époxyde.

Toujours dans le même axe de recherche sur l'étude et la performance des composites unidirectionnelles et le choix du matériau adopter. L'objectif de ce travail est de comparer et choisir le matériau le plus performant des différents résultats obtenus.

Ce modèle est basé sur le modèle de Gao et Reifsnider [10], qui permet de prédire la résistance et la durabilité des composites unidirectionnels en utilisant des techniques micromécaniques. Le modèle suppose qu'un groupe de fibres cassées est entouré de nombreuses fibres intactes. Si la contrainte qui provoque la rupture des fibres est suffisamment importante, elle peut être transférée à travers la matrice aux fibres adjacentes, créant d'abord une zone localement plastifiée puis une probable rupture.

Les estimations des longueurs inefficaces qui limitent la zone de plastification localisée, ainsi que le facteur de concentration de contraintes, permettent d'une part d'évaluer la résistance de nos composites unidirectionnels en faisant varier la température et l'humidité, et d'autre part de faire varier réellement la contrainte appliquée pour chaque cas de ces fibres, pour comparer et décrire la résistance de notre composite.

Pour atteindre cet Objectif, nous avons divisé ce notre travail en quatre chapitres :

Le premier chapitre présenté une recherche bibliographique sur les principaux types matériaux composites. Par la suite, nous avons abordés les différents types des fibres naturelles et leurs utilisations en particulier Jute, Ramie, Alfa, Sisal, lin et Abaca (étude ressemant faite).

Dans le troisième chapitre nous nous sommes intéressés essentiellement aux différents critères de rupture d'un composite unidirectionnel pour suivre le développement de rupture d'un groupe de fibres cassées entouré d'un nombre de fibres intactes.

Au quatrième et dernier chapitre, des applications ont été effectuées afin d'évaluer la résistance et le type d'endommagement à travers l'évolution de la longueur inefficace, les déplacements et la concentration des contraintes, en utilisant les effets hygrothermiques ainsi que les chargements appliqués au point de rupture.

Finalement, une conclusion générale qui résume les principaux résultats et les futures recommandations



CHAPITRE I

*Généralités sur les
matériaux composite*

I.1 Introduction

L'un des objectifs du premier chapitre est d'apporter des connaissances sur les matériaux composites en décrivant leur composition, leurs propriétés et leur structure. Les matériaux composites présentent des possibilités importantes par rapport aux matériaux traditionnels. Ils offrent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, entretien réduit et forme libre. D'autre part leurs propriétés mécaniques et chimiques, ils peuvent prolonger la durée de vie de certains équipements. Il offre une meilleure isolation thermique ou acoustique, dont certains ont une bonne isolation électrique [11], et représentent une gamme de matériaux importants pour différentes applications techniques. Ils sont un élément essentiel du processus de conception dans de nombreux domaines, notamment l'automobile, la marine et l'aviation.

I.1.1. Un composite... c'est quoi ?

Le mot composite vient du latin "compositus", qui signifie des matériaux qui combinent deux ou plusieurs matériaux (métaux, minéraux et organiques) pour obtenir une combinaison de propriétés à partir de ces matériaux [12]. Dont les propriétés globales sont supérieures à celles des phases utilisées seules ou individuelles [13].

En effet, les matériaux composites sont constitués d'une phase continue appelée matrice, dans laquelle est noyée ou logée une phase discontinue, appelée renfort ou armature. Les propriétés et les proportions des matériaux constitutifs sont les paramètres qui déterminent les propriétés du matériau composite (14)

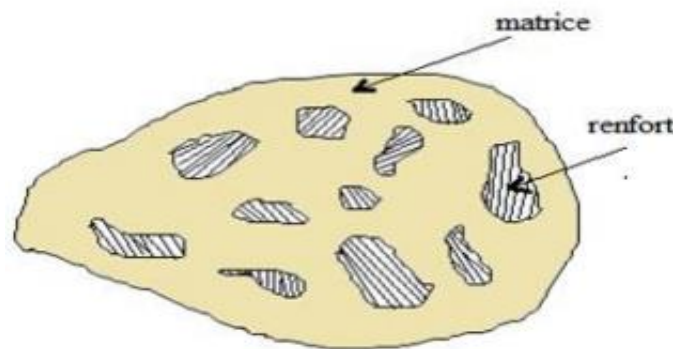


Figure I.1 : Matériaux composites [15].

I.1.2 Historique

Le premier matériau composite créé par l'homme pourrait être à base de bois. L'un des premiers matériaux composites est l'arc traditionnel mongol datant d'environ 2000 av. J.-C. [16].

Au Moyen Âge, la rafle de maïs, un matériau composite de construction populaire, était utilisée pour ses propriétés isolantes et son faible coût [17].

En 1823, Charles Mackintosh fabrique des imperméables en imprégnant du caoutchouc dans du tissu [18].

Puis, en 1892, Hennebique brevète un matériau très similaire au béton armé d'aujourd'hui [19].

I.2 Les Principaux constituants des Matériaux Composites

Les composites sont principalement composés de matériaux de matrice et de renfort, ainsi que de charges et d'additifs dont le rôle est secondaire. Ils peuvent être classés selon la nature de l'ingrédient principal ou liés à sa forme. [13].

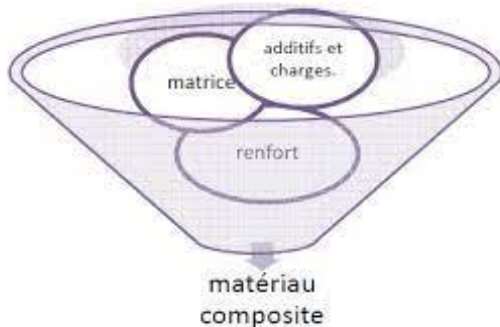
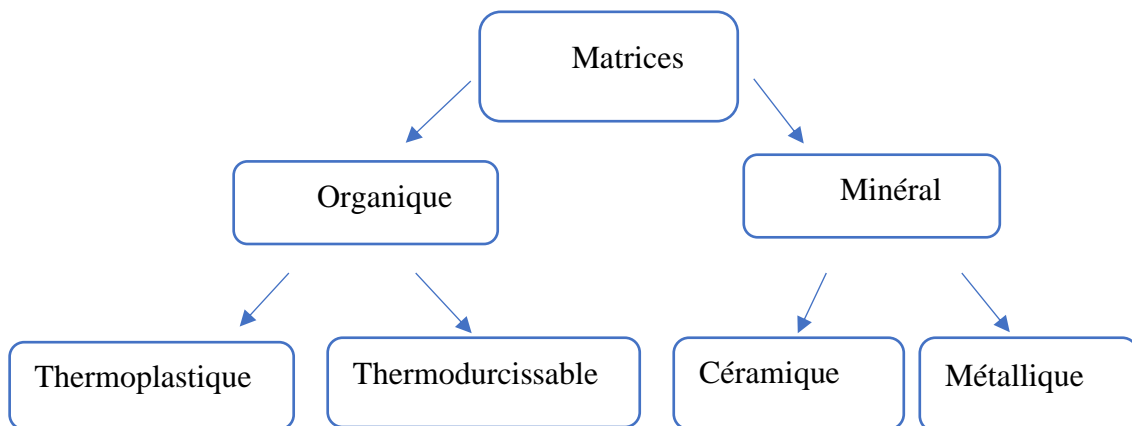


Figure I.2 : Des constituants du composite

I.2.1 Les Matrices

Le rôle de la matrice est de retenir les fibres, de leur transmettre les contraintes mécaniques, de les protéger des agressions extérieures et de les adapter à la forme de la pièce. En effet, il doit répondre à certains critères, comme une bonne déformabilité et une meilleure compatibilité avec les matériaux de renfort, ainsi qu'un faible poids, pour assurer des performances spécifiques élevées [13].

Schéma I.3 de types des matrices



➤ Matrice organique

Les matrices polymères synthétiques sont les plus courantes dans les composites grand public et sont associées au verre, à l'aramide ou à la fibre de carbone. Ils ont un faible module et une faible résistance à la traction, mais sont facilement utilisables pour l'imprégnation des renforts.

Cette dernière peut être scindée en deux grandes classes possédant différentes propriétés.

A. La matrice (résine TD)

Il a des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être moulées qu'une seule fois. Ils existent en solution sous forme de polymères non réticulés en suspension dans un solvant. Les résines polyesters insaturés, les résines de condensation (phénoliques, aminoplastes, furaniques) et les résines époxy sont des résines thermodurcissables [22].

La structure de (TD) a la forme d'un réseau tridimensionnel qui est ponté (doubles liaisons polymères) lors du chauffage pour durcir dans la forme finale. Cette transition est donc irréversible [23]

Tableau I.1. Propriétés mécaniques des résines thermodurcissables [24]

Matrice TD	Masse Vol (Kg/m ³)	E. Long (MPa)	Module de Cisaillement (GPa)	Coefficient De poisson	σ Rup (MPa)	A (%)	Cout en €/Kg
Epoxyde	—	4500	1600	0.4	130	2	5 à 15
Phénolique	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	2
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	2
Vinylester	1150	3300	—	—	75	4	3
Polycarbonate	1200	2400	—	0.35	60	—	5
Silicone	1000	2200	—	0.5	35	—	30
Uréthane	1100	700_7000	—	—	30	100	3
Polyimide	1400	4000-19000	1100	0.35	70	1	25

B. Matrice (résine TP)

Possède des propriétés mécaniques plus faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Le renfort de fibres courtes leur confère une meilleure résistance thermique et mécanique ainsi qu'une bonne stabilité dimensionnelle [23]

La structure de la (TP) est constituée de chaînes linéaires, qui doivent être formées par la chaleur (chaîne puis pliée) et refroidies pour les sécuriser (chaîne antivol). Cette opération est réversible. [23]

Tableau I.2 Propriétés mécaniques des résines thermoplastiques [24]

Matrice TP	Masse Vol (Kg/m ³)	E. Long (MPa)	Coefficient de poisson	σ Rup(MPa)	A(%)	Cout en €/Kg
PP	900	1200	0.4	30	20-400	—
PPS	1300	4000	—	65	100	—
PA	1100	2000	0.35	70	200	5
PES	1350	3000	—	85	60	20
PEI	1250	3500	—	105	60	20
PEEK	1300	4000	—	90	50	70

➤ Matrice Minéral

C. Matrice métallique

Un composite à matrice métallique (MMC) est constitué d'un matériau de renforcement et d'une matrice métallique. Les métaux ou alliages métalliques et renforts utilisés pour la fabrication des MMT sont généralement choisis en fonction de leurs propriétés spécifiques à l'état non renforcé. Par conséquent, l'aluminium, le titane et le magnésium sont les métaux de matrice les plus

couramment utilisés, ainsi que les particules de carbure de silicium (SiC) et d'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), ou parfois de borure de titane (TiB₂), de carbure de titane (TiC) ou de carbure de bore (B₄C), souvent utilisé comme renforçateur [25].

D. Matrice céramique :

Elle est un matériau composite faisant partie des céramiques techniques. Ils comportent un ensemble de fibres céramiques incorporées dans une même matrice céramique. Les fibres et les matrices peuvent en principe être fabriquées à partir de toutes les céramiques connues, même le carbone

I.2.2 Les Renforts

Le matériau de renfort assure les propriétés mécaniques du composite, et il existe un grand nombre de fibres disponibles sur le marché, en fonction du prix de revient de la structure réalisée. Les renforts à base de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéaires (fils, mèches), tissus de surface (tissus, mats), multidirectionnels (tissés, tissus complexes, tissages trois voies ou plus). [26]

Les propriétés mécaniques du matériau composite proviennent de la haute résistance et de la grande rigidité du renfort, et sa résistance et sa rigidité sont environ 10 fois voire 100 fois celles de la matrice. En effet, les renforts supportent la quasi-totalité des efforts auxquels une pièce est soumise et leur degré de renforcement dépend essentiellement de leur nature, de leur géométrie et de leur structure [12].

- *Renfort fibreux*

Les matériaux de renfort se présentent sous forme de fibres, leur disposition et leur orientation déterminent les propriétés mécaniques du composite. À cette fin, les concepteurs peuvent prévoir, contrôler et modifier leur comportement mécanique et physique en fonction de leurs propriétés et de leur échelle.

- *Renfort à particules*

Ils n'ont pas de taille préférée, ils sont utilisés pour améliorer certaines caractéristiques Mécanique ou physique, parfois juste pour réduire les coûts, tandis que Maintenir les propriétés du matériau.

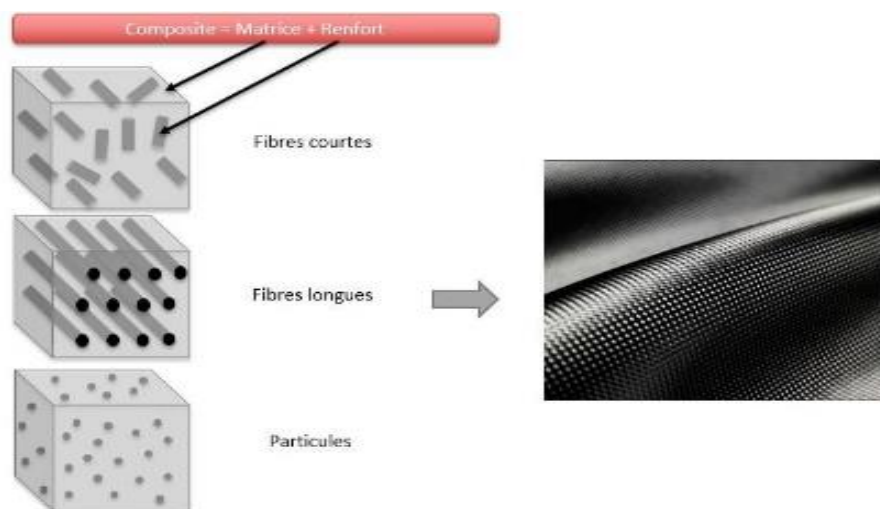
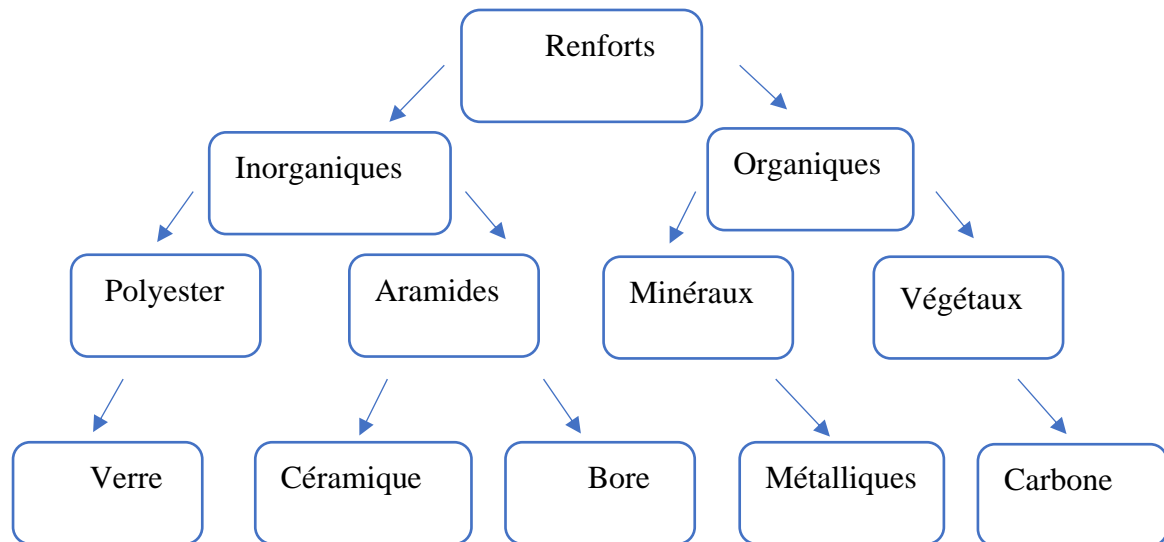


Figure I.4: Différents types de renforts employés dans les matériaux composites [27]

I.2.2.1 Les différents Types de Renforts [28]

Schéma I.5 Les différents types de renforts [22]



❖ A. Fibres de verre

Il constitue une amélioration essentielle des composites grand public. Il est obtenu à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, oxyde de bore)

❖ B. Fibre de carbone

C'est la fibre la plus couramment utilisée dans les applications hautes performances. Selon la température de combustion, il existe deux types de fibres :

- Fibres Haute Résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500°C
- Fibres Haut Module (HM) : pour une combustion de 1800 à 2000°C.

❖ C. Fibres d'aramide

Communément appelées KEVLAR®, les fibres d'aramide sont issues de la composition chimique des Polymides aromatisées.

❖ D. Fibre de bore

Fibres de bore Fibres à haut module insensibles à l'oxydation à haute température, obtenues par dépôt en phase vapeur sur un substrat de tungstène

❖ E. Fibres de silice

Elles sont produites par fusion comme du verre et sont principalement utilisées pour leur haute résistance chimique et thermique dans les tuyères des moteurs-fusées.

❖ F. Fibre de polyéthylène

Ils ont une très bonne résistance à la traction mais une mauvaise mouillabilité. Ils peuvent être utilisés pour des structures moins sollicitées,

I.2.2.2 Architectures de renforts

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

✚ Les unidirectionnels (UD) :

Fibres unidirectionnelles, c'est-à-dire que l'orientation suit la même direction dans l'espace [24] Dans une nappe UD, les fibres sont assemblées parallèlement les unes aux autres à l'aide de fils de

trame 6 très légers (pour les efforts de reprise dans le sens des fibres) [12]. Le tissu est composé de fils de chaîne et de trame perpendiculaires les uns aux autres.

Le motif d'entrelacement ou de tissage est leur caractéristique

✚ Les bidirectionnels : Surfaces tissées ou non tissées feutres mats [24].

Les formes de surface, également appelées structures bidirectionnelles (2D), sont typiques des pièces en forme de plaque ou de coque. C'est un assemblage de fibres sous forme de stratifils, orientés selon deux directions généralement perpendiculaires, soit par nappes continues, soit par tissage. [15]



Figure I.6 : fibre Mat

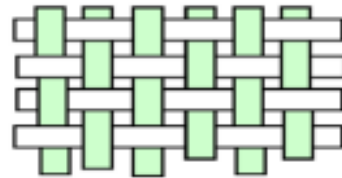


Figure I.7 : Toile

✚ Renforts multiaxiaux

Il existe d'autres conceptions de tissus avec des alignements de fibres dans plusieurs directions (> 2), depuis l'espace (appelés quelquefois « tissus multidimensionnels »).

Ce sont des tissus volumétriques qui permettent la conception de pièces composites à épaisseur variable.

Avant de former des renforts, les fibres doivent subir un traitement de surface appelé « ensimage » afin de :

- ✓ Réduire leur abrasivité avant passage dans le métier,
- ✓ Favoriser l'adhésion avec la matrice [24]



Figure I.8. Multidirectionnels [15]

I.3. Les Types de Composites [29]

Les composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches, - Les stratifiés, - Les sandwichs

➤ Les monocouches :

Différents types de monocouches se caractérisent par la forme du renfort : fibre long, fibre tissée, fibre court.

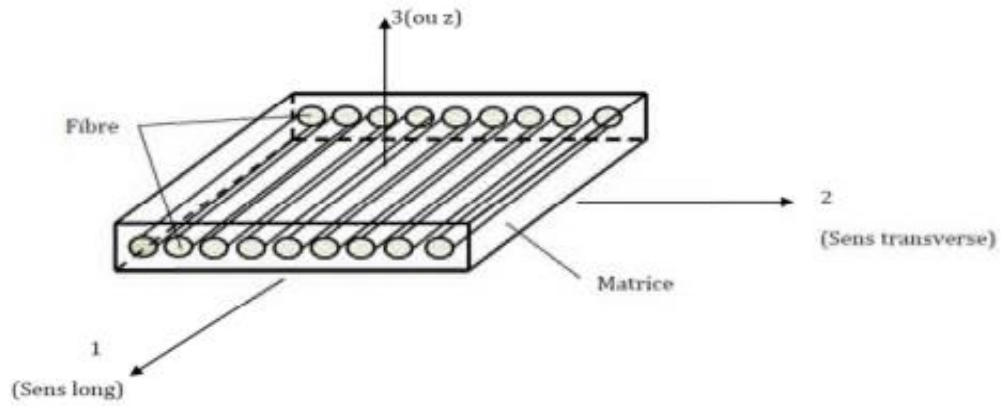


Figure I.9 : Plis à renforcement unidirectionnel [29]

➤ Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de couches simples, chacune avec sa propre orientation par rapport à une référence commune pour les couches et désignée comme référence du stratifié (Figure 1.4). Le choix du stratifié, notamment l'orientation, permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques

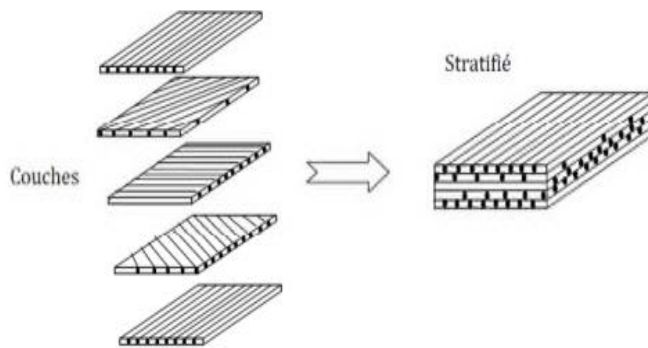


Figure I.10 : constitution d'un stratifié

➤ Les matériaux sandwichs

Les mélanges de type sandwich consistent principalement en deux composants appelés peaux et noyaux. Peaux de faible épaisseur, fabriquées à partir de matériaux à haute résistance et à module élevé et d'un noyau plus épais à faible densité

Les propriétés de ce matériau dépendent des propriétés de l'âme et de la peau, de leur épaisseur et des propriétés de liaison entre elles [12].

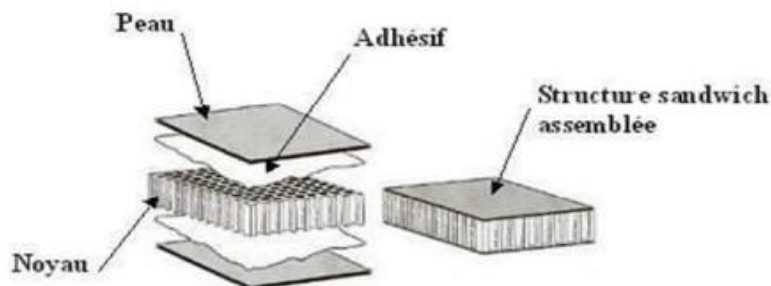


Figure I.11 : Constitution d'un sandwich

I.4 Les époxydes

I.4.1 Définition

Le terme "époxyde" désigne une variété de prépolymères contenant une ou plusieurs unités époxy, dont l'application principale concerne les matériaux composites (matrices époxy à renfort de fibres de verre ou de carbone) [30].

I.4.2 Historique :

La résine époxyde a été découverte presque simultanément par Casten en Suisse et Greenlee aux États-Unis. Les auteurs anglo-saxons ont nommé ces produits résines époxyde pour souligner que des groupements époxyde (oxygène attaché à deux carbones consécutifs) constituent leur point commun. Une abréviation couramment utilisée est EP

I.4.3 Domaines d'applications

Ce sont des produits performants pour un grand nombre d'applications dont certaines sont incontestablement élevées (31) :

- Industries aéronautique et automobile (collage de structures et de panneaux) ;
- Industrie électrique moyenne et haute tension (matériel électrique);
- Électronique);
- Sports (skis, raquettes, arcs de compétition, cadres de vélo en fibre de carbone, double came, etc.) ;
- Outils (duplicatas, maîtres modèles, boîtes à noyaux, etc.) ;
- Stratifiés et composites (nids d'abeilles, structures triangulaires, arbres de transmission, carrosseries de voitures de sport, etc.) ;
- Revêtement résistant aux produits chimiques, réparation de fissures de barrage, etc.

Tableau I.3 – Propriétés mécaniques des résines époxydes[1].

Caractéristique	Norme (1)	Valeur moyenne pour la formule de référence
Contrainte à la rupture en traction	ISO 527	70 à 80 N/mm ² ou MPa
Allongement à la rupture en traction	ISO 527	1 à 1,5 %
Contrainte à la rupture en compression	ISO 604	140 à 150 N/mm ² ou MPa
Contrainte à la rupture en flexion	ISO 178	110 à 130 N/mm ² ou MPa
Allongement maximal à la rupture en flexion	ISO 178	1,2 à 1,7 %
Module d'Young en traction	DIN 53457	10 200 N/mm ² ou MPa
Coefficient de Poisson	≈ 0,35
Résistance au choc Charpy	ISO 179	7 à 10 kJ/m ²

Les résines les plus utilisées après les résines polyesters insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5% du marché mondial des composites, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters) [1].

Tableau I.4 Caractéristique des résines thermodurcissables

Résines	Tf (°C)	ρ (kg/m ³)	ϵ_f (%)	σ_f (Mpa)	σ_t (Mpa)	E (Gpa)
Epoxydes	290	1100 a 1500	2 a 5	60 a 80	250	3 a 5

I.4.4 Les avantages et les inconvénients

I.4.4.1 Les avantages

Parmi les avantages de l'époxyde, on retiendra :

- Les bonnes propriétés mécaniques (traction, flexion, compression, impact, fluage...) sont supérieures au polyester.
- Bonne résistance aux hautes températures : 150°C à 190°C
- Excellente résistance chimique
- Bonne mouillabilité des matériaux de renforcement.
- Excellente adhérence aux matériaux métalliques.

I.4.4.2 Les inconvénients

Les inconvénients que nous mentionnerons incluent

- Temps d'agrégation long
- Coût élevé
- La mise en œuvre nécessite des précautions
- Sensibilité à la fissuration

I.5 Que fabrique-t-on en matériaux composites [24]

Les matériaux composites se développent aujourd'hui dans presque tous les domaines et sont à l'origine de diverses réalisations de haute technologie. Le développement des matériaux composites modernes est essentiellement dû aux exigences de plus en plus avancées de l'industrie

La gamme d'applications est très large notamment dans ces domaines.

✓ Électricité électronique :

Isolants de la grosse construction électrique, supports de disjoncteurs, armoires, capots, chemins de câbles. Éoliennes :

✓ Bâtiment & travaux publics :

Cellules d'habitation, cheminées d'usines, coffrages ; moules à béton, piscines, panneaux de façade, profilés, cloisons, portes, mobilier, sanitaire ;

✓ Transport routier :

Pièces de carrosseries bouteilles de carburant gazeux, bras de suspension, carters, cabines, sièges, citernes routières, camions isothermes, caravanes

✓ Transport ferroviaire :

Voitures, wagons. Portes, sièges, panneaux intérieurs, gaines de ventilation :

✓ Transport maritime :

Embarcations de sauvetage, chalutiers, engins de débarquement, bâtiments antimines, bateaux de plaisance, canoës ;

✓ Transport filaire :

Cabines de téléphériques, télécabines :

✓ Transport aérien :

Avions de tourisme « tout composite », pales d'hélicoptères, hélices, arbres de transmission, disques de freins d'avions ;

✓ Transport spatial :

Corps de propulseurs, réservoirs, tuyères, corps de rentrée dans l'atmosphère ;

✓ Mécanique général et divers :

Engrenages, coussinets, corps de vérins, bras de robots manipulateurs, roues inertielles, tuyauterie, bouteilles de gaz sous pression, tubes pour plates-formes offshore,

✓ Sports et loisirs :

Raquettes de tennis et de squash, cannes à pêche, skis, perches à sauter, planches à voile, arcs et flèches, javelots, casques de protection, cadres de bicyclette, clubs de golf,

1.6 Avantages et inconvénients des composites [12]

1.6.1 Avantages

- Leur légèreté : faible densité 1/3 par rapport à l'acier
- Résistance à la corrosion et à la fatigue : maintenance réduite,
- Ils sont insensibles aux produits tels que graisses, huiles hydrauliques, peintures et solvants,
- Ils peuvent prendre plusieurs formes, intégrer des accessoires et permettre une réduction du bruit (isolation phonique)
- Bonne isolation thermique et électrique (selon le type de renfort)

1.6.2 Inconvénients

- Processus généralement complexe
- Difficulté à détecter les pannes
- Sensible aux chocs
- Comportement au feu
- Coût des matières premières et procédés de fabrication Gestion et réglementation plus stricte des déchets générés.



CHAPITRE II

Généralités sur les Fibres Naturelles

II .1 Introduction

Comme évoqué au chapitre 1, il est important de connaître les propriétés de composition d'un matériau composite, car c'est sur la base de ce critère que l'on peut connaître a priori les propriétés du matériau et ainsi en déduire les forces et les faiblesses.

Les questions que nous nous sommes posées étaient : C'est quoi les fibres naturelles et quelle sont leurs types et pourquoi est-ce intéressant ?

Nous attirons votre attention sur le fait que le terme "fibres naturelles" regroupe plusieurs types de fibres

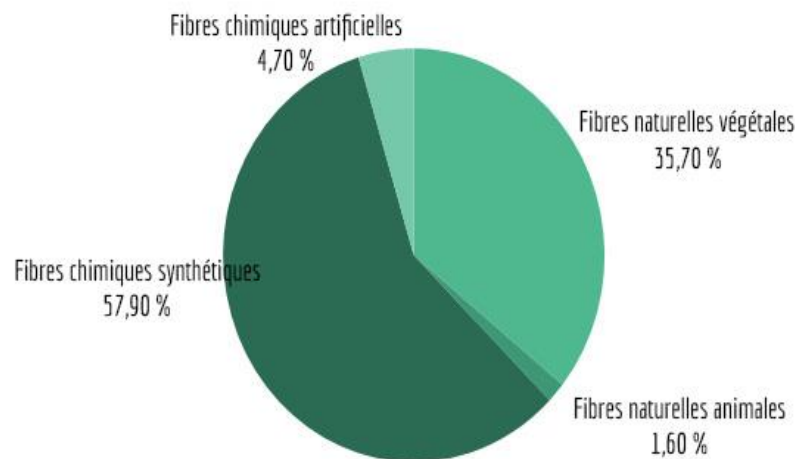
- ❖ Fibres végétales, fibres animales ou minérales [32].

II .1.1 Définition des fibres naturelles

Ce sont les fibres les plus anciennes et les plus utilisées car ce sont des fibres stables, elles peuvent être obtenues à partir de sources naturelles, elles sont utilisées dans les matériaux composites depuis 3000 ans, elles ont une meilleure résistance mécanique, une plus grande capacité de gain de poids et de rentabilité, et surtout elles peuvent être recyclé.

Un autre aspect important des fibres naturelles est leur décomposition. En les assemblant avec des polymères biodégradables, il est possible de créer des composites à faible impact environnemental :100 % recyclables [33].

Les fibres naturelles peuvent en outre être définies comme des agrégats de cellules de diamètre négligeable par rapport à leur longueur [34].



Figures II.1 : La production mondiale de fibres [35]

II.1.2 Présentation des Différentes Fibres Naturelles

Les fibres naturelles sont classées selon leur origine. Il est donc possible de Distinguer trois grandes familles :

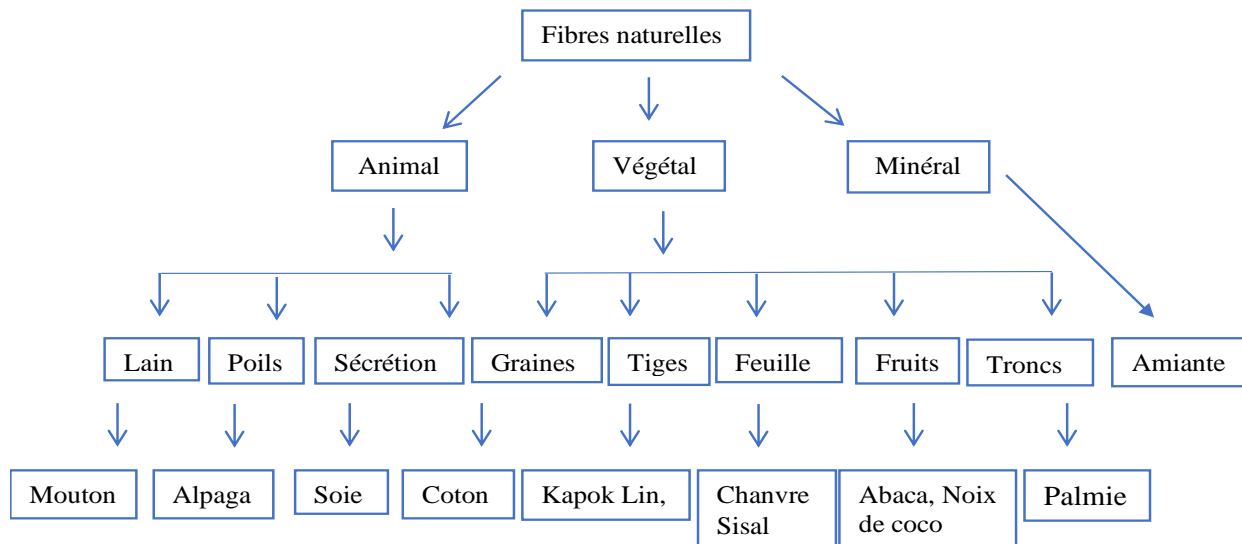
- Les fibres minérales (amiante).
- Les fibres animales

La source de ces fibres est animale La base de ces fibres est la protéine Ils peuvent émaner des sécrétions des poils (laine animale) ou de la soie. Ces fibres sont produites en petites quantités et relativement coûteuses.

➤ Les fibres végétales

Ce sont les fibres des graines à poils fins (coton, kapok) les fibres libériennes extraites des tiges des plantes (lin, chanvre, jute, ramie), les fibres dures des feuilles (sisal), des troncs d'écorces de fruits (sisal, chanvre de manille, noix de coco) ; et les fibres des graines à poils fins (coton, kapok [36]).

Schémas II.2 des différentes fibres naturelles



II.1.3 Comparaison des fibres naturelles et artificielles [38]

Tableau II.1 : Comparaison entre les fibres naturelles & artificielles [37].

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

❖ Pour résumer les informations du tableau, les fibres naturelles sont moins nocives pour l'environnement que les fibres synthétiques. Les fibres naturelles ont moins d'impact sur l'environnement en raison de leur composition et de leur mode d'obtention, car ce sont des produits 100% naturels, ce qui les rend faciles à régénérer et à recycler. C'est leur plus grand avantage par rapport aux autres fibres. Les fibres synthétiques, en revanche, sont plus intéressantes d'un point de vue mécanique, car leurs performances en flexion, traction et compression ont en fait constamment surpassé les fibres naturelles.

II .1.4 Intérêt d'utilisation des fibres naturelles [39]

Il est raisonnable d'utiliser des fibres naturelles comme renfort pour les composites :

- Dans les pays peu industrialisés pour valoriser les ressources locales, les matériaux composites en fibres naturelles ont ouvert de nouvelles filières pour les produits agricoles.
- Développer des matériaux et des technologies qui prennent en compte l'impact sur l'environnement.

II .1.5 Domaines d'utilisation Des fibres Naturelles [40]

A) Produits de construction :

- Planchers ;
- Profilés de portes, de fenêtres ;
- Clôtures ;

B) Infrastructure

- Trottoir ;
- Signalisation routière ;
- Isolant phoniques.

C) Automobile :

- Panneaux intérieurs ;
- Garnitures des toits ;
- Planchers de camion.

D) Divers :

- Palettes ;
- Tables de pique-nique ;
- Equipements de jeux publics.

II .1.6 Principaux avantages et inconvénients des fibres Naturelles [40]

Principaux avantages :

1. Réduire l'impact environnemental de la production de fibres naturelles.
2. Réduire le poids de la structure composite.
3. Crédits carbone et énergie lors de la combustion de fibres naturelles.

Principaux Inconvénients :

1. Les engrais sont utilisés dans la production de fibres agricoles.
2. Par rapport aux composites renforcés de fibres de verre, la durée de vie des composites renforcés de fibres naturelles peut être plus courte.

II .2 Les fibres végétales :

Les fibres végétales sont couramment utilisées car ce sont les fibres les plus disponibles. Ils sont des structures biologiques fibreuses composées de cellulose, d'hémicellulose et de lignine. Les proportions des composants dépendent largement de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [41].

II .2.1 Composition et propriétés de différentes fibres végétales

Tableau. II.2 : Composition et propriétés de différentes fibres végétales [40/ 42 /43]

Nature des fibres	Cellulose (%)	Angle micro fibrillaire (Dégré)	Diamètre (μm)	Longueur (mm)	Rapport L/d
Lin	64_71	10	5_7	4_77	1842
Ramie	83	7,5	16_126	40_250	3500
Chanvre	78	6.2	10_51	5_55	___
Jute	61_71	8	25_200	9 - 70	110
Sisal	67_78	20	7_47	0.8_8	100
Noix de coco	43	45	12_24	0.3_1	___
Halfa	45_54	___	5_10	0.6_14	1964
Abaca	63_68	___	16_32	3_11	___

Tableau II.3 : Propriétés mécaniques en traction de quelques fibres végétales [44]

Fibre	E (GPa)	All (%)	Sigma (mm)	Densité
Lin	58	3.27	1339	1.53
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
Alfa	12.7	1.6	75 – 154	1.51

II .2.2 Principaux avantages et inconvénients des fibres Végétal [45]

❖ Les avantages :

- Faible empreinte carbone
- Leur biodégradabilité
- Bonnes performances d'isolation phonique et d'inertie thermique
- Leur densité est faible (brillante)
- leur Sources renouvelable
- Ils ont de bonnes propriétés mécaniques
- Aucun résidu après incinération
- Faible abrasivité

❖ Inconvénient :

- Faible stabilité dimensionnelle
- Faible résistance thermique (dégradation 200° - 230°C)
- Grande variabilité des propriétés en fonction de l'âge, du lieu de culture, du climat, de l'orientation (anisotropie),
- Une dépendance de la récolte (point de vue qualitatif et quantitatif)
- Dépendance à la récolte (perspectives qualitative et quantitative)

II.3 Présentations des différentes fibres végétales

II.3.1 Le jute

Le jute est une plante buissonnante originaire d'Asie du Sud-Est. Il est cultivé de la même manière que le coton, le lin ou le chanvre utilisé pour fabriquer des textiles. Il provient de la tige de la plante du même nom cultivée en zone tropicale, du genre *Corchorus* appartenant à la famille des Tiliacées

Les principaux pays producteurs sont l'Inde et le Bangladesh. Il s'agit d'une fibre naturelle très durable, il est juste derrière le coton en termes de rendement et d'utilisation. Sa fibre anti-corrosion est principalement utilisée pour fabriquer des toiles d'emballage, du lin et des toiles décoratives rugueuses.

Il est également utilisé pour tisser de la corde, des baskets, des bâches, des tapis ou des rideaux bon marché [46].



Figure II.3 : Le Jute [47]



Figure II.4 : Fibre des feuilles de Jute [48]

II.3.2 La Ramie

Ramie (*bochneria nivea*) est une plante arbustive (herbe chinoise). Fleurs appartenant à la famille *Urtica*. Originaire d'Asie de l'Est, principalement en Chine, au Japon et aux États-Unis. Il a la forme d'une touffe, avec une hauteur de tige d'environ 1,5 à 3 m et de grandes feuilles.

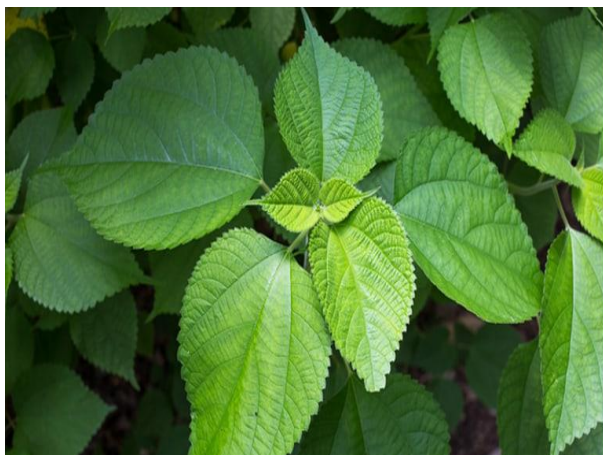


Figure : II.5 : La plante de Ramie [50]



Figure II.6 : Fibre des feuilles de Ramie [51]

Ces fibres ressemblent à Fibres de lin, mais plus longues, plus solides et plus dures. Son écorce est utilisée pour produire de la corde, du fil et un tissu appelé lin chinois [49].

II.3.3 Alpha

Alpha son nom scientifique (*Stipa tenacissima*) et arabe (Halfa) est une herbe. Cette plante est originaire du bassin méditerranéen occidental, une région assez sèche, et elle pousse dans les régions semi-arides d'Afrique du Nord. Du Maroc à la Libye et au sud de l'Europe (Espagne, Italie), il délimite le désert, là où l'Alpha s'arrête, le désert commence [52] [53].

Les fabricants de papier ne sont pas étrangers à Alpha, car les Britanniques l'utilisent depuis des années. Le premier brevet britannique pour l'utilisation et le traitement de l'alfa date en effet au 19 novembre 1839 [54].



Figure II.7 : La plante de Halfa [55]



Figure II.8 : Fibres de Halfa [55]

II.3.4 Le lin

Le lin appartient à la famille de la linacée. Le lin est une plante annuelle qui pousse partout dans le monde, y compris en Asie et en Europe. Distribué en Russie, Pologne, Belgique et France. il est une fibre végétale reconnue pour sa solidité.

Les avantages de cette fibre sont sa grande longueur, en moyenne de 25 mm, et sa bonne résistance. Le lin peut être utilisé comme substitut du coton

Il est utilisé dans les papiers fins comme le papier à cigarette ou le papier Bible, mais aussi dans les pièces automobiles - alors combiné avec du polypropylène et d'autres fibres synthétiques - comme géotextiles isolants et résistants à l'érosion [56]



Figure II.9 : La plante de lin [57]



Figure II.10 : Fibres de Lin [58]

II.3.5 Le sisal

Le sisal est une plante tropicale adaptée aux climats chauds et constituée de rosettes à grandes feuilles qui poussent principalement en Amérique du Sud et en Afrique. La plante de sisal a environ 200 à 250 feuilles, chaque feuille contient 1000 à 1200 paquets de fibres, la longueur moyenne de ces fibres est de 3 mm

Le sisal, impropre à l'habillement, comme substitut de l'amiante et de la fibre de verre dans de nombreux matériaux composites [59]



Figure II.11 : La plante de Sisal [60]



Figure II.12 : Fibres de Sisal [61]

II.3.6 Abaca

L'abaca est un espèce bananier textile qui pousse aux Philippines et qui est très recherchée dans la confection de rabanes, nappes, stores ou vêtements. Très résistant à la casse, utilisé pour fabriquer des cordes marines

Principalement utilisé pour la composition de papier filtre et de sachets de thé. Ce sont des papiers poreux qui nécessitent une bonne résistance à la déchirure. Aujourd'hui, il fait son entrée dans l'industrie automobile [56].



Figure II.13: La plante d'abaca [62]



Figure II.14 : Fibres de Abaca [62]

A decorative graphic of a scroll with a blue border and grey circular accents at the corners, containing the chapter title.

CHAPITRE III

Modèle de Rupture longitudinale

III.1 Introduction

Le processus de rupture des composites renforcés de fibres longues naturelles est un phénomène complexe d'accumulation de dommages microstructuraux. Les processus de rupture des composites sont donc d'une grande différence et ne peuvent être décrits que si l'on connaît :

Le critère de résistance de chaque matériau ;

L'état des contraintes et des déformations dans le matériau ;

Les phénomènes de propagation de fissure dans le chargement appliqué ;

Les critères de rupture ont pour objectifs de permettre au concepteur d'avoir une évaluation de la résistance mécanique des matériaux composites. Le critère est une expression mathématique reliant les contraintes effectives régnant dans le matériau aux contraintes ultimes pouvant être supportées par ce dernier. Le procédé se résume à l'utilisation des divers critères existant dans la littérature, qui dépendent tous d'un certain nombre de paramètres qui sont précisément des résistances ultimes pour des sollicitations élémentaires [63]

Le modèle utilisé dans cette étude pour l'estimation de la résistance d'un composite unidirectionnel est celui de Gao et de Reifsnider [10]. Ce modèle permet d'introduire la variation des caractéristiques mécaniques de la matrice et des fibres en fonction de la température et de l'humidité en vue de prédire la résistance d'un composite unidirectionnel. Cette résistance varie le plus souvent en fonction, du changement des longueurs inefficaces dans la zone de la rupture de la fibre et des concentrations de contraintes correspondantes des fibres voisines intactes. La longueur inefficace est généralement définie comme étant la longueur comprise entre l'endroit de la rupture de la fibre jusqu'à la longueur pour laquelle la fibre regain à sa capacité de supporter le chargement complet. La fissure à l'interface aura lieu lorsque la contrainte de cisaillement à l'interface atteint τ_0 . Cette supposition est soutenue en littérature citez ressèment en laquelle on l'a constaté que pour la température T_g élevée influes sur la résine [64]

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 locale. 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.

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.1. 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 [65]. Les fibres non cassées sont à leur tour entourées d'un matériau homogène 'efficace' qui se déforme uniformément.

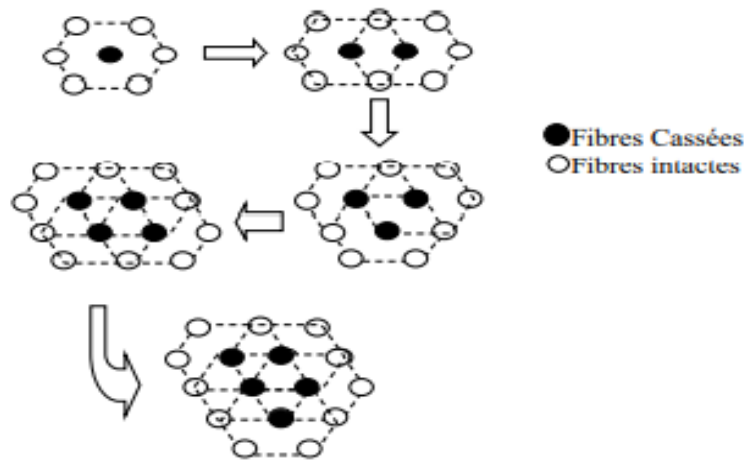


Figure III.1 : Arrangement des fibres intactes autour des fibres cassées

III.2 Formulation du Problème applications sur un échantillon.

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

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

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

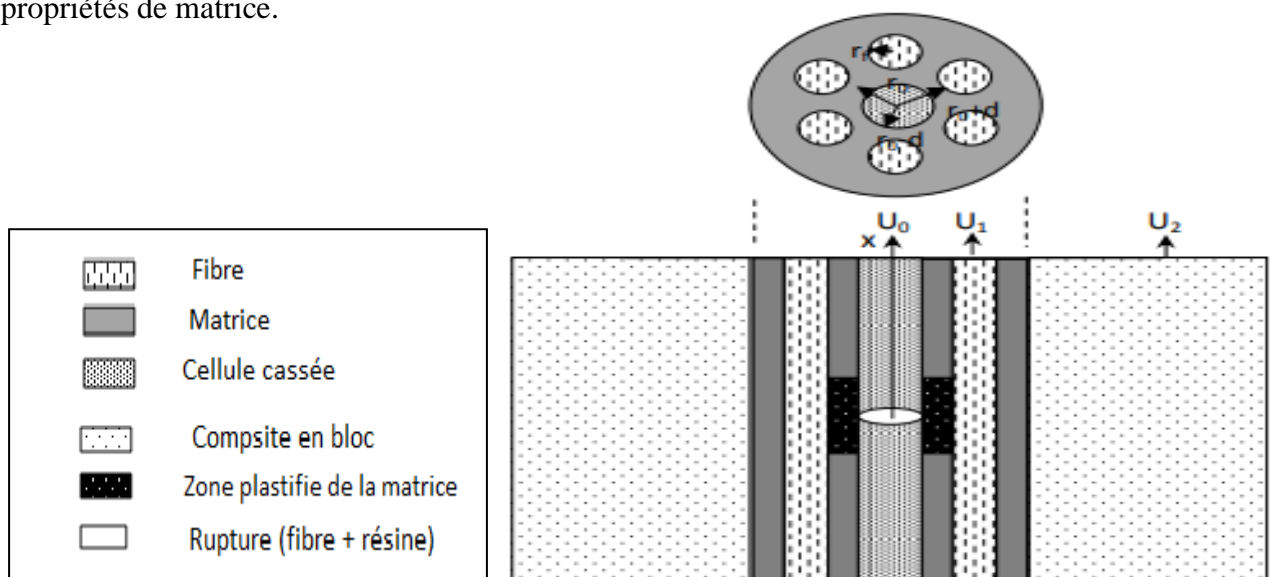


Figure III.2: Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes.

L'endommagement local est inclus dans le modèle par l'introduction d'une zone de décollement et de plasticité locale (Figure IV.1), où la contrainte de Cisaillement de la matrice et de l'interface est considérée comme constante pour la valeur $\eta\tau_0$. Les équations d'équilibre dans cette zone ($0 \leq x \leq a$) sont comme suite :

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

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

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

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

Où C_0 et C_1 sont les constantes d'intégration, et E_1 est le module des fibres adjacentes intactes, R_2 est une quantité géométrique avec $R_2 = r_0 + 2r_f + d$, et $\lambda = \frac{2R_2}{R_2^2 - r_0^2} \frac{G_m}{E} \frac{1}{2d}$ est une valeur propre obtenue par la résolution de l'équation (3). De même, pour la région où aucun écoulement n'aura lieu à l'interface, les équations d'équilibre sont :

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

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

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

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

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

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



CHAPITRE IV

*Résultats et
Discussions*

IV.1/ Applications

Pour mettre en valeur l'étude théorique présentée aux paragraphes précédents, et comme nous poursuivons toujours les résultats des travaux de recherches effectués en les étudiants en Masters II. Nous allons effectuer des applications sur un échantillon d'une plaque stratifiée en six matériaux/époxyde. Les caractéristiques mécaniques et géométriques sont regroupées respectivement aux tableaux 1 et 2. Pour apprécier l'évolution de l'endommagement aux zones localement plastifiées, nous avons procédé à deux chargements progressifs $0.5 \sigma_0$ et σ_0 de la contrainte de traction appliquée aux bords de l'échantillon.

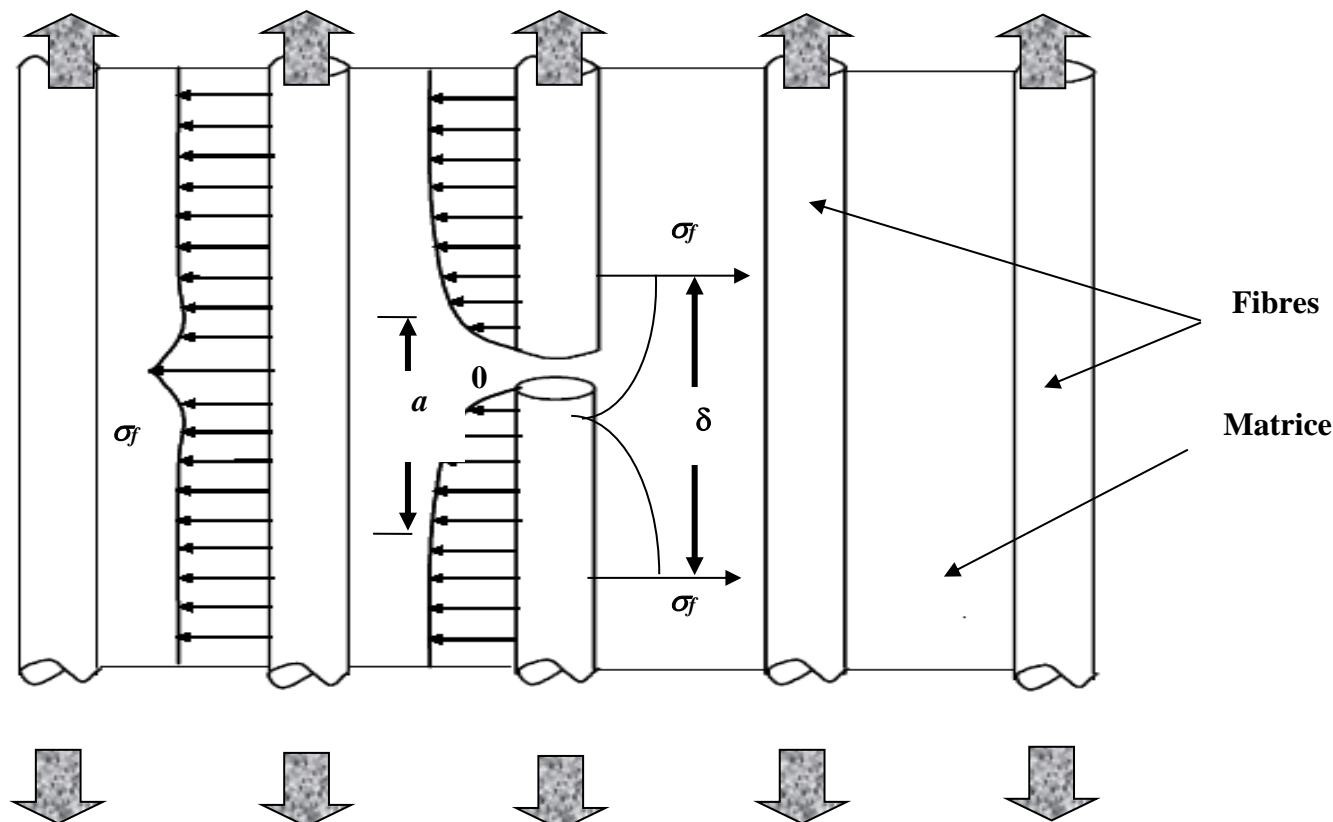


Figure IV.1. Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace.

L'augmentation de la charge, nous a permis de quantifier l'extension de la zone localement plastifiée et la zone inefficace pour laquelle la Fibre regain à sa capacité de supporter le chargement complet et cela en fonction du nombre de fibres cassées. Finalement, nous allons déterminer et comparer l'évolution de la longueur inefficace des six fibres naturelles en Jute, Ramie, Alfa, Sisal, Lin et Abaca.

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

Tableau IV. 1. Caractéristiques mécaniques et géométriques des échantillons en composite Abaca-Alfa -Jute - lin -Ramie et Sisal / époxyde [66/67/68/69/70/67]

Désignations	Fibre en Jute	Fibre en Alfa	Fibre en Ramie	Fibre en Sisal	Fibre en Abaca	Fibre en Lin
Module de Young de la fibre E_f	26,5 Gpa	13,4 Gpa	80 Gpa	5 Gpa	15.1 Gpa	20 GPa
Module de Young de matrice E_m	2,72 Gpa					
Contrainte appliquée σ_0	2,95 Gpa					
Coefficient de Poisson de la matrice ν	0.43					
Fraction Volumique des fibres V_f	0.53					
Paramètre de cisaillement η	1.0					
Longueur de l'échantillon L	200 mm					
Largeur de l'échantillon W	15 mm					
Epaisseur de l'échantillon t	4 mm					
Rayon de la fibre r_f	0,0005 mm	0,00075 mm	0,0004 mm	0,00015 mm	0.000020 mm	0.000010 mm
Nombre maximal de fibres cassées n_i	43					

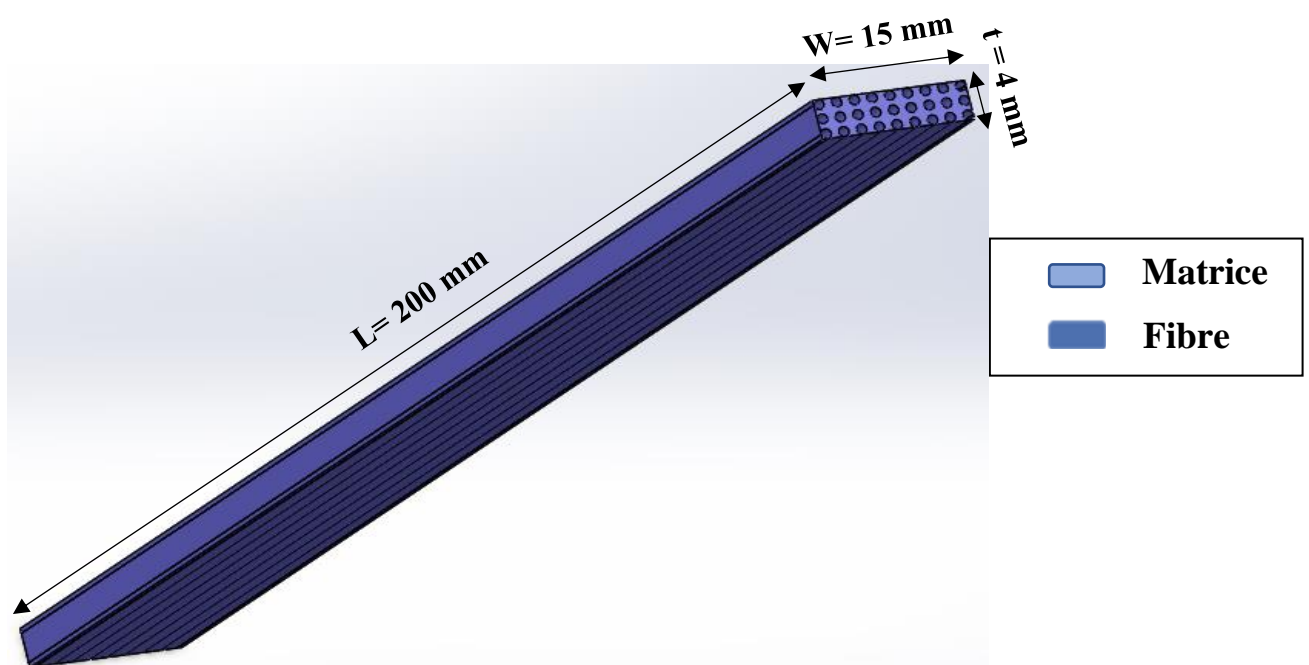


Figure IV.2 : géométrie de l'échantillon.

IV.2/ détermination de la concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différents changements environnementaux différents.

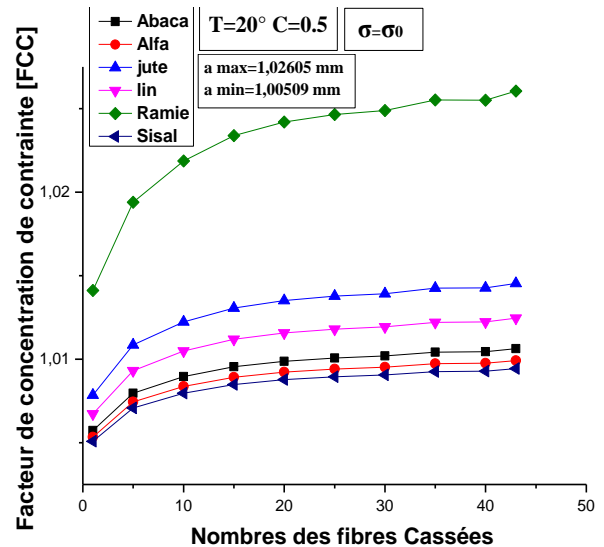
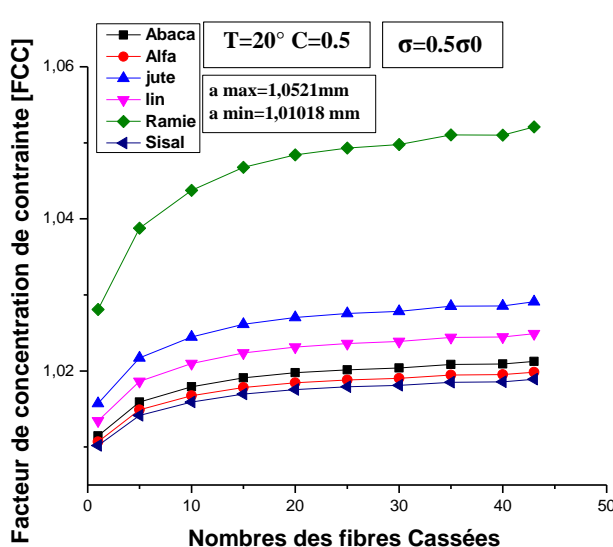
IV.2.1/ Evaluations facteur de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différents températures (20° à 120°), cas d'une concentration d'humidité $C=50\%$.

Le facteur de concentration de contraintes dans la zone endommagée des fibres peut être établi pour nous indiquer la taille de la progression sur l'évolution d'enchaînement des cassures des fibres et cela des six matériaux étudiés. Ce facteur est d'une grande importance car il nous donne la relation entre la contrainte déterminée au point de rupture des fibres et la contrainte externe appliquée. Celui-ci nous permettra de déterminer la concentration de la contrainte au niveau des fibres cassées, et de prévoir une rupture probable des fibres voisines adjacentes.

Dans ces conditions, nous avons présenté les premiers résultats de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées, avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différents températures (20° à 120°), cas d'une concentration d'humidité $C=50\%$. Représentés sur les figures IV.4.

Le facteur de concentration de contrainte au point de rupture des fibres indiquée sur les figures IV.4 montre clairement l'augmentation progressivement de ce facteur en fonction du nombre de fibres cassées. Cette augmentation est plus rapide lorsque le nombre de fibres cassées est très faible, puis il se stabilise au fur et à mesure que le nombre de fibres cassées augmente. Par contre ce facteur diminue en fonction du chargement appliquée.

Nous remarquons aussi que le facteur de concentration de contraintes est beaucoup plus important pour le matériau en ramie, puis la jute et le Lin, en revanche les matériaux Abaca, Alfa et Sisal sont beaucoup moins important, ce qui nous montre la bonne rigidité des matériaux Abaca, Alfa et Sisal par rapport simultanément le Ramie, Jute et le Lin. Ou le facteur de concentration de contraintes maximal localisé sur la première figure IV.2 pour $\sigma = 0.5\sigma_0$ et cela pour le matériau Ramie ($C_{max}= 1.052$) pour 43 fibres cassées. Tandis que la valeur minimale de ce facteur ($C_{min}= 1.0051$) située dans la dernière figure IV.2 ($\sigma = \sigma_0$) obtenue pour une fibre cassée sous une contrainte extérieure maximale pour le matériau en Sisal.



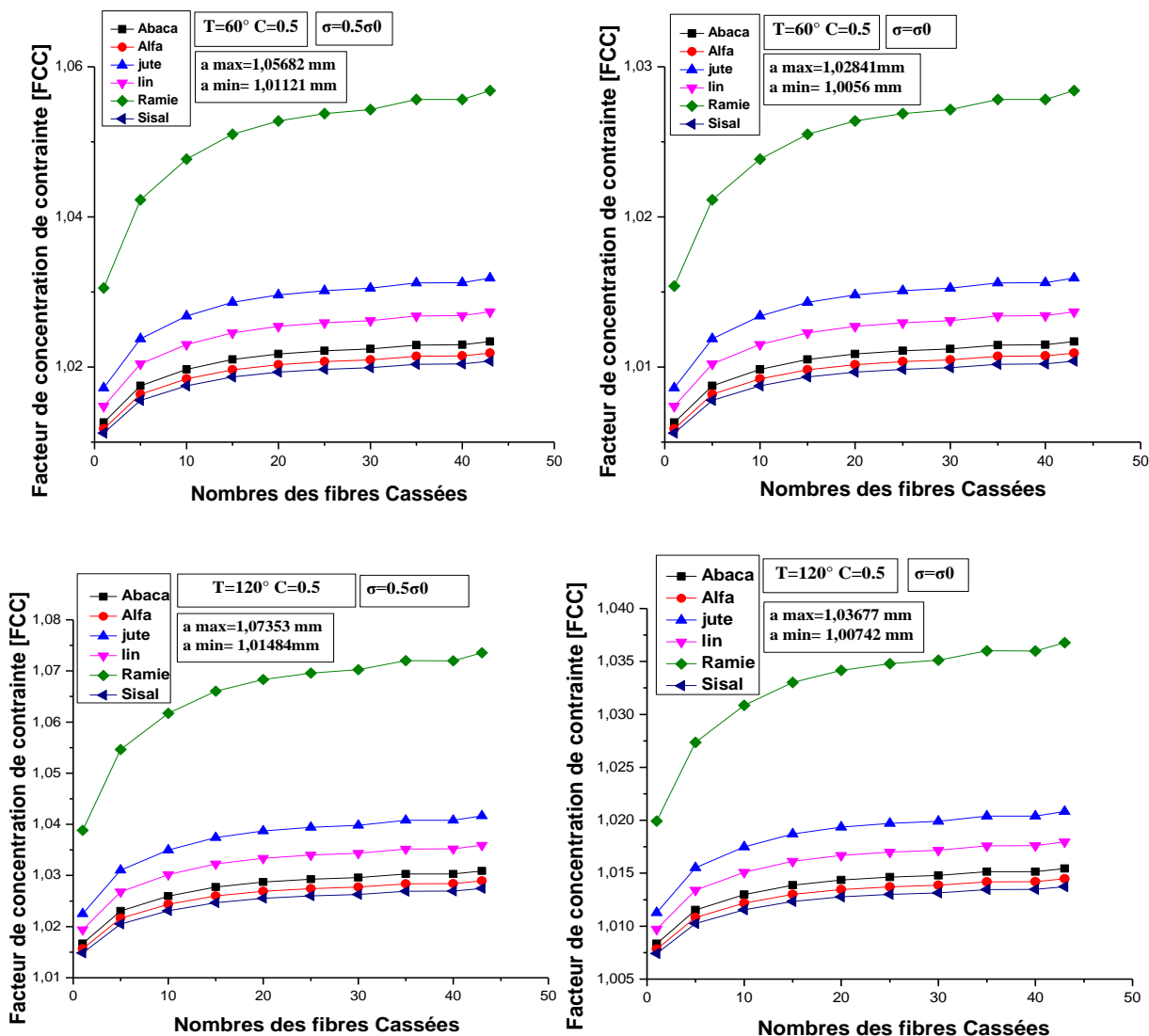


Figure IV.3 Evaluations facteur de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différents températures (20° à 120°), cas $C=50\%$

Nous apercevons aussi dans ces résultats que les facteurs de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et pour différents chargements sont approchant pour les fibres Abaca, Alfa, et Sisal, contrairement à la fibre Ramie. Cela est dû à la grande valeur du module de Young du Ramie par rapport à celui des autres matériaux. Par contre Le facteur de concentration de contrainte au point de rupture des fibres est moins sensible la progressions simultanément de la température de 20° 120°C , comme nous pouvons le voir sur les différents figures IV.4. Et cela pour concentration d’humidité de $C=50\%$.

IV.2.2/ Evaluations facteur de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différents températures (20° à 120°), cas d’une concentration d’humidité $C=100\%$.

Dans le cas ou la concentration d’humidité $C=100\%$ le facteur de concentration de contrainte au point de rupture des fibres indiquée sur les figures IV.5 montre nettement l’augmentation progressivement de ce facteur en fonction du nombre de fibres cassées. Cette augmentation est plus claire lorsque le nombre de fibres cassées est très faible, puis il se stabilise au fur et à mesure que le nombre de fibres cassées augmente. Par contre ce facteur diminue toujours en fonction du chargement appliquée de $0.5 \sigma_0$ au chargement complet σ_0 .

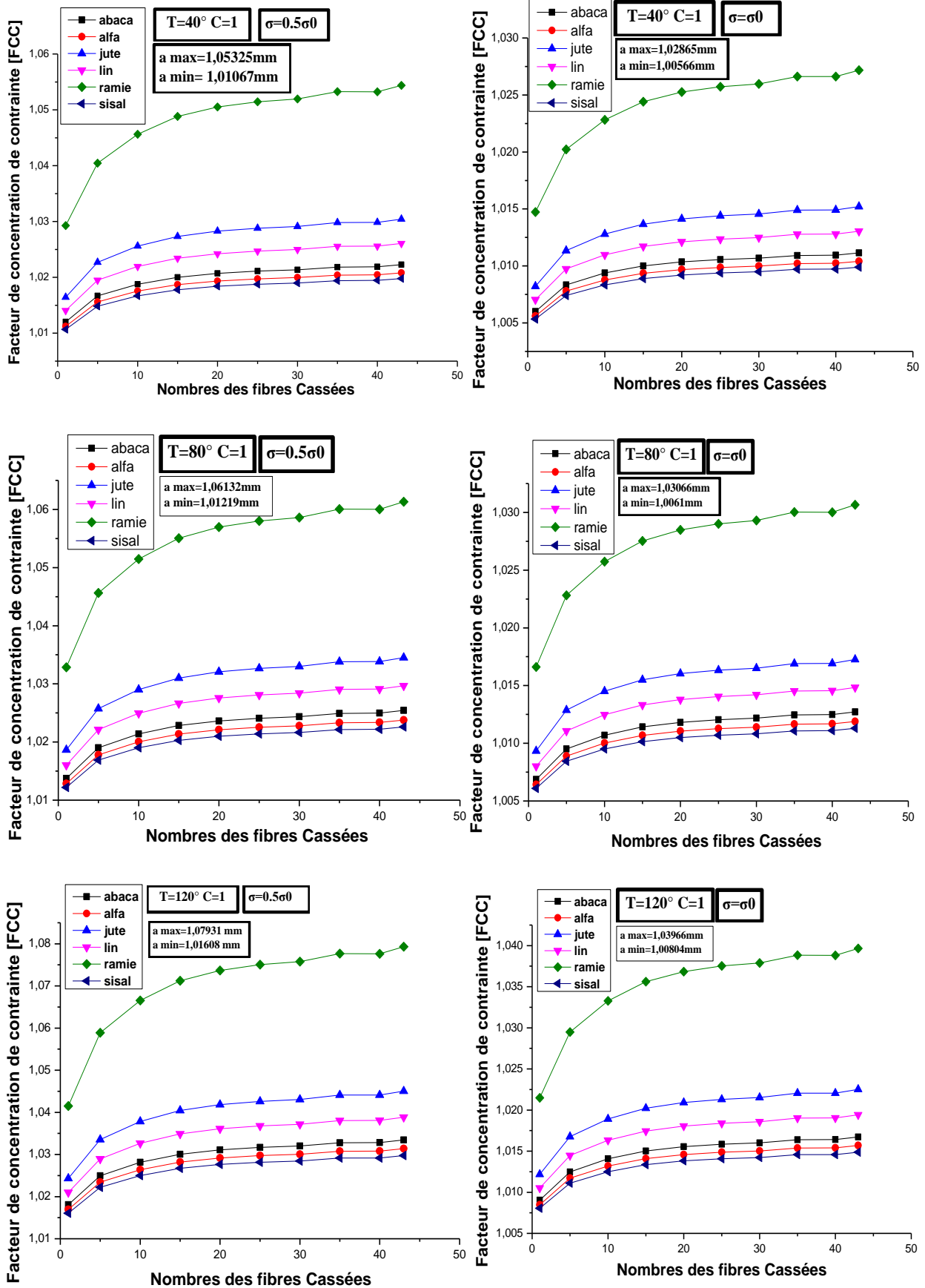


Figure IV.4 Evaluations facteur de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différentes températures (20° à 120°), cas d'une concentration d'humidité $C=100\%$.

Nous remarquons aussi que le facteur de concentration de contraintes augmente sensiblement avec l'augmentation de température de 40° à 120°, comme l'indiquent les six figures IV.5. Ceci nous montre la bonne rigidité des matériaux Abaca, Alfa et Sisal par rapport simultanément le Ramie, Jute et le Lin.

IV.3/ Evolution de la zone plastique.

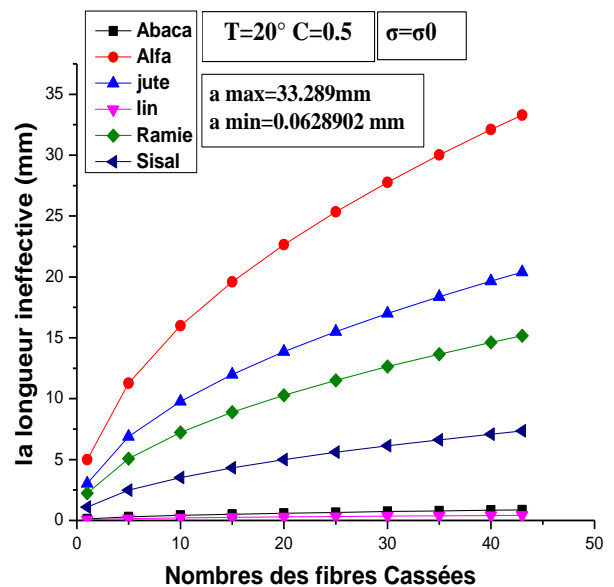
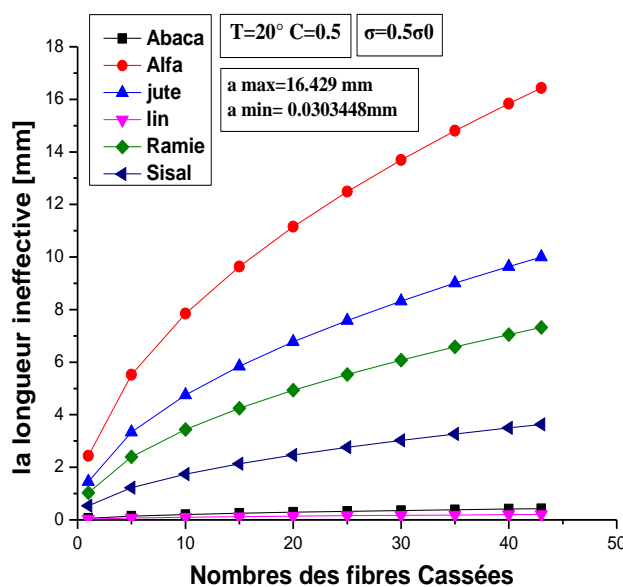
IV.3.1/ Evaluation de la longueur inefficace pour des températures de 40°, 80° et 120° en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargements appliquée de 0.5 σ0 et σ0 et pour une concentration d'humidité C= 50%

L'estimation de la longueur ineffective limitant la zone localement plastifiée permet une évaluation de la résistance de notre composite unidirectionnel.

Donc, les figures IV.6 illustre la longueur ineffective en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargement appliquée de 0.5 σ0 au chargement complet σ0 et pour une concentration d'humidité C= 0.5.

L'évolution de la zone plastique *a* de la matrice en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante de 0.5 σ0 à σ0. Il est évident que la zone localement plastifiée devient plus importante en fonction du nombre de fibres cassées. Puisque la longueur ineffective δ est 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, donc elle doit inclure la zone localement plastifie *a* ($\delta > a$).

A cet effet et sous les conditions environnementales l'évolution de la zone plastique *a* de la matrice en fonction du nombre de fibres cassées pour un chargement croissante de 0.5 σ0 à σ0 est inversement ils décroît légèrement avec l'augmentation de la température de 20°C jusqu'à 120°C pour une concentration d'humidité de 50% comme le montre les figures IV.6.



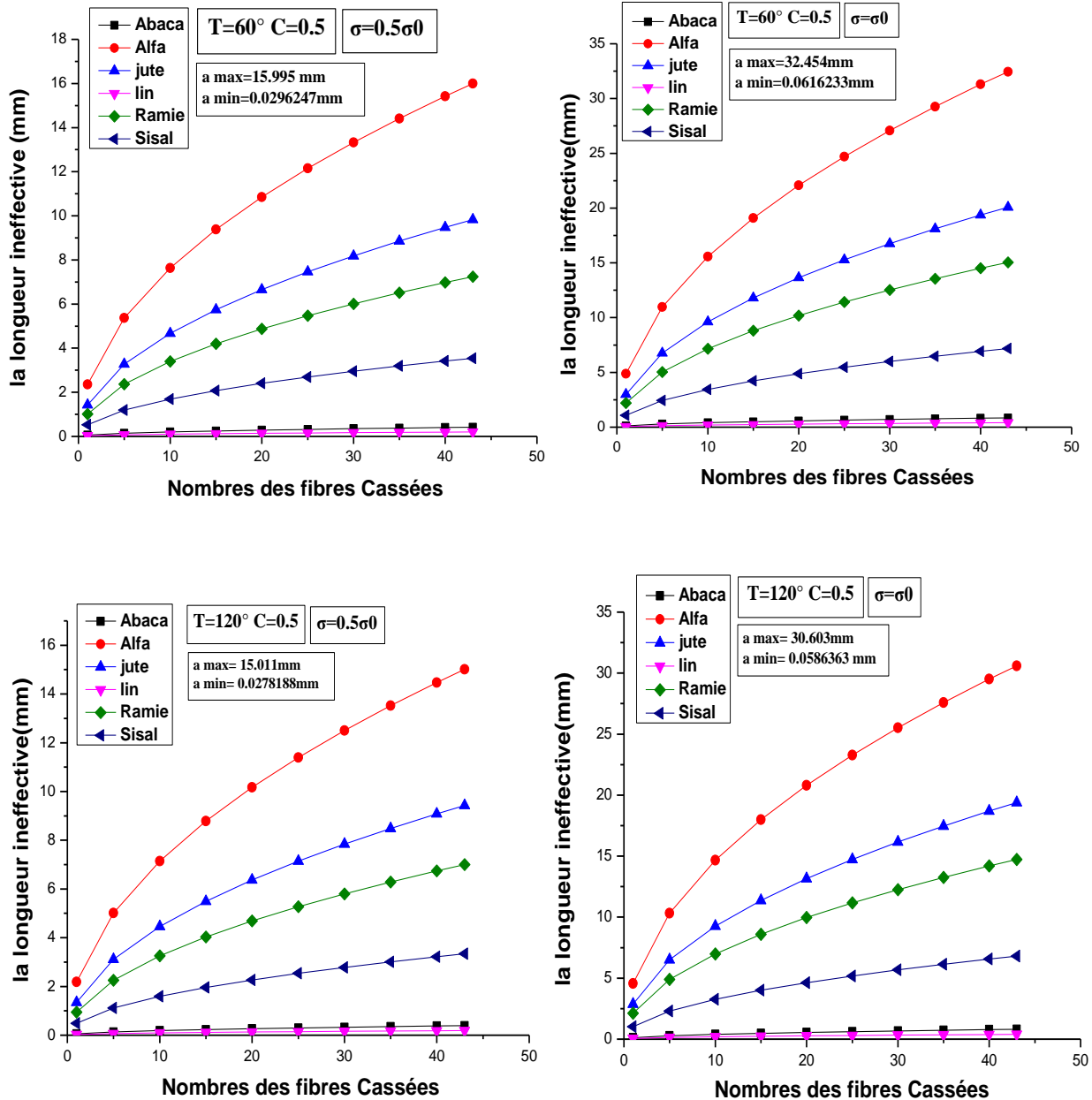


Figure IV.5 Evaluation de la longueur inefficace en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargement appliquée de $0.5 \sigma_0$ au chargement complet σ_0 et pour une concentration d’humidité $C= 50\%$

IV.3.2/ Evaluation de la longueur inefficace pour des températures de 40° , 80° et 120° en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargements appliquée de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 et pour une concentration d’humidité $C= 100\%$

Pour une concentration d’humidité $C= 100\%$ l’estimation de la longueur inefficace limitant la zone localement plastifiée, ou sont évolution en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante de $0.5 \sigma_0$ à σ_0 . Il est certain que cette zone localement plastifiée devient plus importante en fonction du nombre de fibres cassées, et inversement cette longueur inefficace elle diminue légèrement avec l’augmentation de la concentration d’humidité $C= 100\%$.

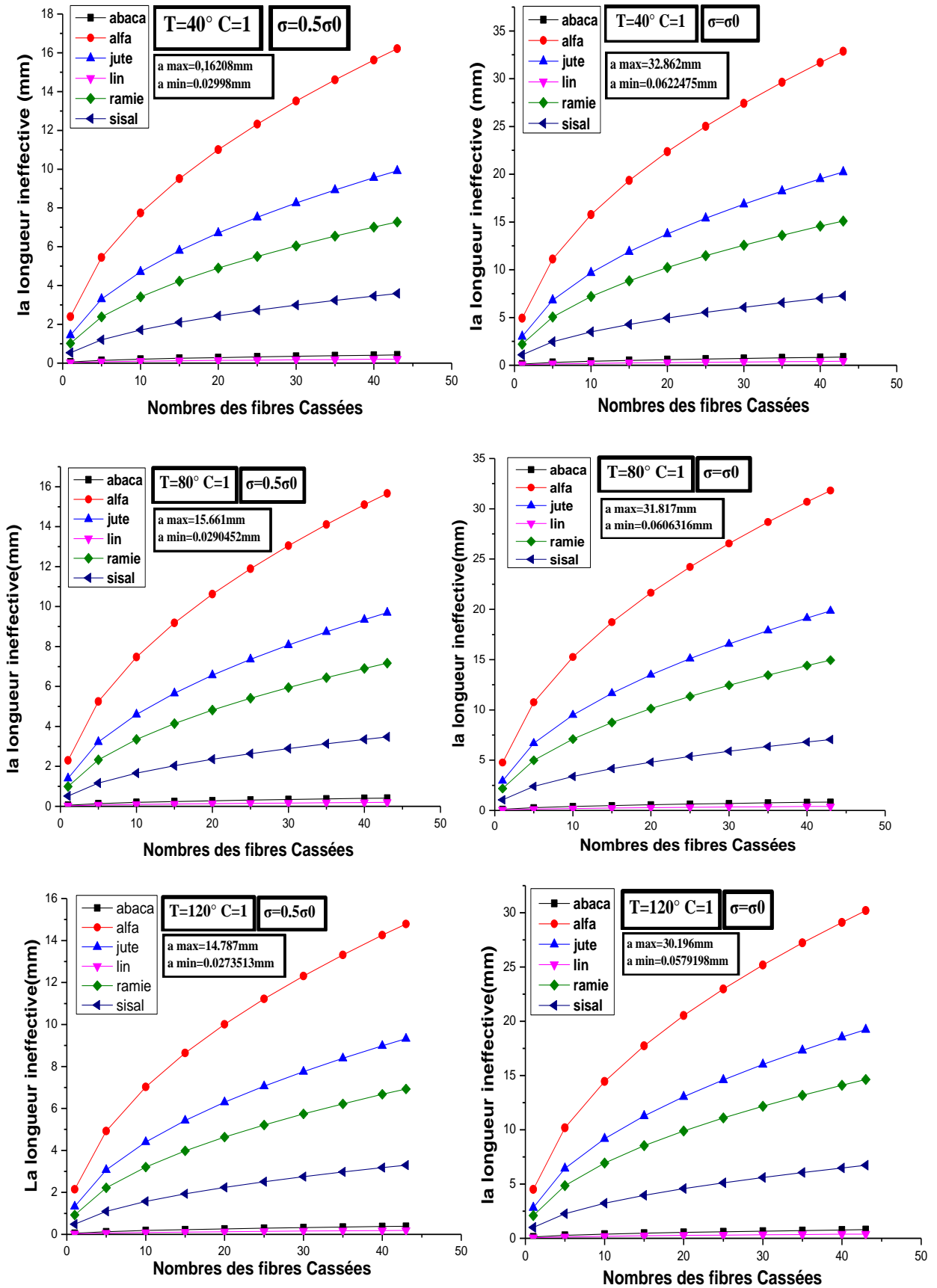
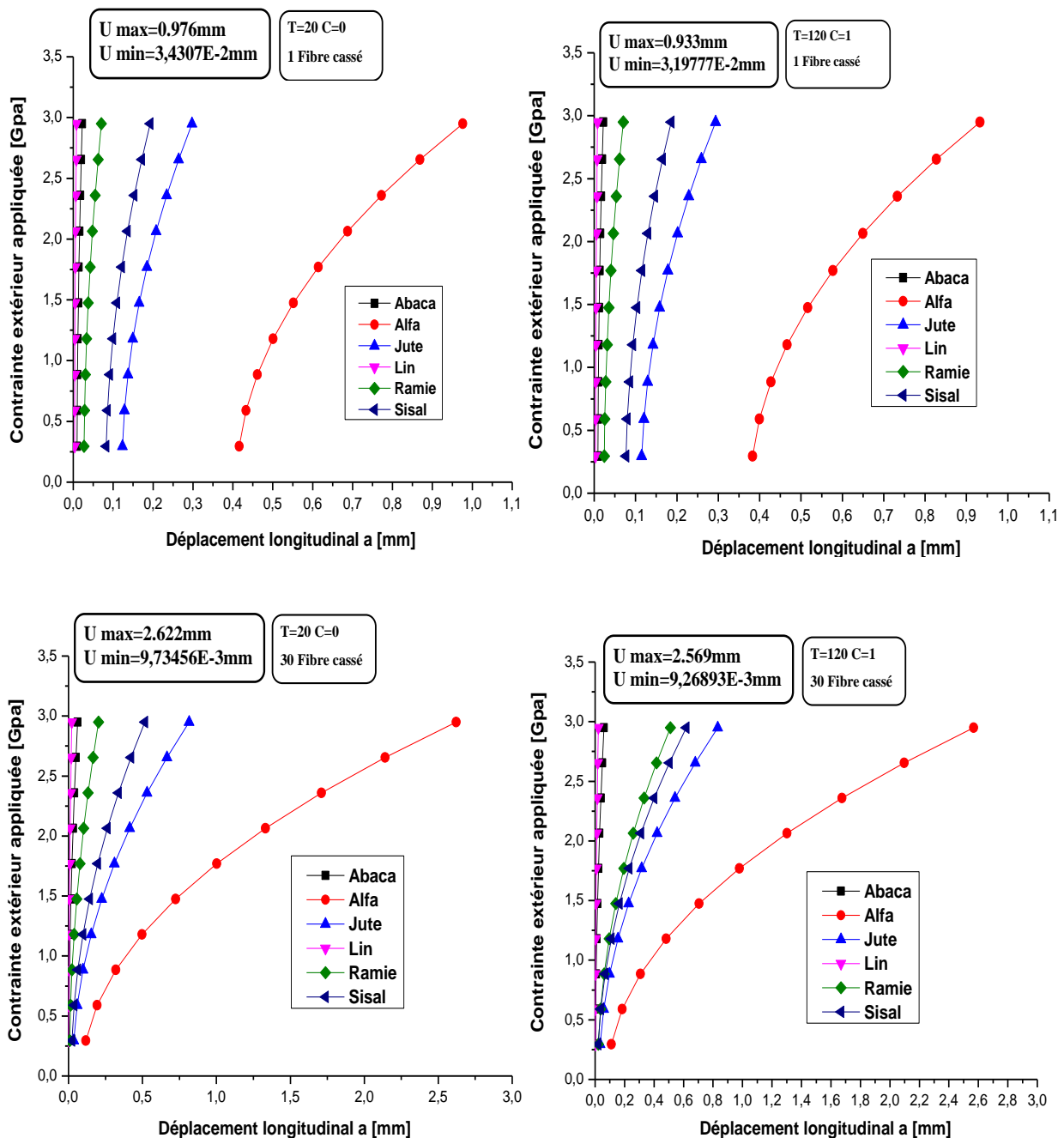


Figure IV.7 Evaluation de la longueur inefficace en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargement appliquée de 0.5 σ0 à σ0 et pour une concentration d'humidité C= 100%

IV.4/ Evolution du déplacement longitudinal.

Pour ces derniers résultats on a étudié l'évolution du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée, des fibres cassées et les conditions environnementales pour les Six cas de fibres naturelles Abaca, Alfa, Sisal, Ramie, Jute et le Lin. De ces figures, on peut dire que le déplacement augmente sous une forme exponentielle en fonction de la contrainte de traction appliquée aux bords de l'échantillon. Le déplacement croit plus rapidement avec l'augmentation du nombre de fibres cassées, essentiellement pour la Lin, Abaca, Ramie, Sisal et la Jute respectivement, et beaucoup moins pour le matériau Alfa. Cette croissance est marquée par une divergence assez distinctive entre les différentes courbes de ces six figures IV.7. Cela reflète le phénomène de non-linéarité dans la zone endommagée qui se caractérise par une plasticité locale.



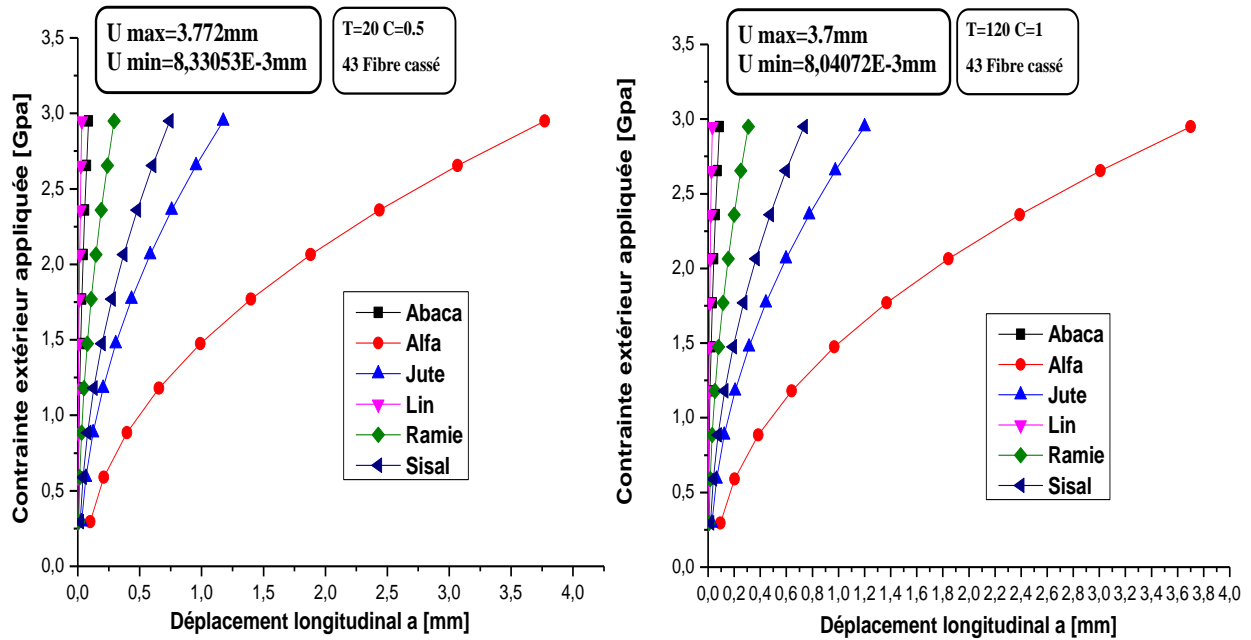


Figure IV.7 Evolution du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée, des fibres cassées et les conditions environnementales pour les Six cas de fibres

D'autre part on remarque aussi que le déplacement longitudinal en fonction du chargement appliqué n'a aucune influence avec la variation progressive de la température de 20° à 120° et de même pour la concentration d'humidité. On peut voir tous les détails des figures pour les autres températures dans la partie annexe.

La bonne lecture qu'on peut voir sur ces figures IV.7 c'est que le déplacement longitudinal des fibres Lin, Abaca, Ramie est très faible par rapport à celui de Sisal et Jute, et beaucoup plus important celui d'Alfa. Ce qui montre la bonne rigidité des cinq premiers matériaux, et c'est l'importante de cette étude.

Référence Bibliographique

- [1] Jean Marie Berthelot (2005). Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures, Edition TEC & DOC, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, France
- [2] c.m. boyer. « Composites unidirectionnels : modèles probabilistes de rupture et évaluation de la fiabilité ». Thèse d'université, blaise pascal, 1997.
- [3] 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.
- [4] r. m. christensen. Mechanics of composite materials. krieger publishing company, malabar, florida, 1991.
- [5] rosen, b.w., 1964. Tensile failure of fibrous composites. aiaa j. 2, 1985–1991.
- [6] zweben, c., 1968. Tensile failure of fiber composites. aiaa j. 6, 2325–2331.
- [7] Phoenix, s. l., schwartz, p., robinson iv, h. h. “statistics for the strength and lifetime in creep-rupture of model carbon/epoxy composites,” composites science and technology, vol. 32, 1988, pp. 81-120.
- [8] gassan j., bledzki a.k., composites reinforced with cellulose-based fibres. progress in polymer science, 1999, 24, 221-274
- [9] Thèse de doctorat en sciences Présentée par BREK SAMIR à l'Université Hadj Lakhdar de Batna
- [10] 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
- [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] PDF sur une généralité des matériaux composites M2 Génie Procèdes des Matériaux Unv Abd Hamid ibn Badis
- [13] Mécanique des composites à hautes performances, version 3, février 2019, S. Drapier
- [14] L. Belgacem. “Contribution à l'étude de l'endommagement des pipes en matériaux composites hybrides sollicités au flambement,” Thèse Doctorat En Sciences, Université de Mostaganem,2018
- [15] Jean-Marie Berthelot, Matériaux Composites, Comportement mécanique et analyse des structures, 5^{eme} édition, 2012
- [16] arc, dans wikipedia [http://fr.wikipedia.org/wiki/arc_\(arme\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/arc_(arme))
- [17] torchis. Dans wikipedia <http://fr.wikipedia.org/wiki/torchis>
- [18] charles macintosh. Dans wikipedia http://fr.wikipedia.org/wiki/charles_macintosh
- [19] françois hennebique. Dans wikipedia, http://fr.wikipedia.org/wiki/françois_hennebique
- [20] baley, c. (2005). Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. Récupéré de: <http://www.techniques-ingenieur.fr/book/n2220/fibresnaturelles-de-renfort-pour-materiaux-composites.html>
- [21] ouajai, s., shanks, r.a. (2005). composition, structure and thermal degradation of hemp cellulose after chemical treatments, polym. degrad. stabil., 89, 327-335
- [22] Laurent Gormet, « Généralités sur les matériaux composites », ECN, Centre Nantes ,2008.
- [23] «Glossaire des matériaux composites» - carma –Actualisation octobre 2006.
- [24] Daniel Gay « Matériaux Composites ». lavoisierhermes. 2015

Référence Bibliographique

- [25] Min YU. Elaboration de composites à matrice métallique d'alliages d'aluminium par projection à froid. Thèse 2013, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [26] Laurent Gorent " Généralités sur les matériaux composite » Engineering school.2009
- [27] <http://www.bloomoon.eu/fr/actualites/lettres-de-veille-et-white>
<http://www.bloomoon.eu/fr/actualites/lettres-de-veille-et-white-papers/materiaux-composites-tendancespapers/materiaux-composites-tendances>
- [28] Mémoire GHARBAOUI Asma Mostaganem 2015
- [29] Mémoire HASSAINE Mohamed RÉHABILITATION PAR LES FIBRES FRP DES STRUCTURES DÉGRADÉES Université ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEN
- [30] P. BARDONNET, "Résines époxydes (EP)," Techniques de l'Ingénieur, vol. A3465.
- [31] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/materiaux-th11/matieres-thermodurcissables-monographies-42146210/resines-epoxydes-ep-a3465/?fbclid=IwAR21>
- [32] Mémoire : influence de diverses modifications du Genêt d'Espagne sur les propriétés mécaniques rhéologiques et thermiques de composites à matrice thermoplastique présenté par Fadel Ahlem
- [33] hervé bindi, carma, joël léveque, atoutveille, alain parisse, compositec, les fibres composites d'origine naturelle, conférences techniques, 28 septembre 2006.
- [34] <https://www.agrocomposites.fr/focus-sur-la-fibre-naturelle/#:~:text=Fibre%20naturelle%2C%20toute,tension%20est%20supprim%C3%A9>
- [35] <https://www.dressingresponsable.com/introduction-aux-fibres-textiles/>
- [36]. 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
- [37] Wambua, P., Ivens, J., Verpoest, I. (2003). Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? Comp. Sci. Tech., 63, 1259-1264.
- [38] Joshi, S.V., Drzal, L.T., Mohanty, A.K., Arora, S. (2003). Are natural fiber composites environmentally superior to glass fiber reinforced composites? Composites Part A : Appl. Sci. Manuf, 35, 371-376.
- [39] PFE étude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort en matière végétale le titre présenté par AYADI A. et MEDDAHI A. Boumerdès soutenu en 2006.
- [40] glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable.
- [41] PFE étude expérimentale du comportement mécanique des stratifiés à renfort en matière végétale le titre présenté par AYADI A. et MEDDAHI A. Boumerdès soutenu en 2006
- [42] C.Baley «Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », Techniques de l'ingénieur (2005).
- [43] « L'alfa: Importance écologique et socio-économique », Portail de l'agriculture marocaine, Terre et Vie, N°61-62,(Novembre 2002).
- [44] A. Moulay, K.Benabdeli and A.Morsli « Contribution à l'identification des principaux facteurs de dégradation des steppes à Stipa tenacissima du sud-ouest Algérien », Mediterranea, Serie de estudios biológicos época II, n° 22,Universidad de Alicante (2011).
- [45] 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
- [46] Le jute, de la fibre à la toile (monchval.com)
- [47] <https://www.meubliz.com/definition/jute/>
- [48] <https://medium.com/@Texia/jute-fibre-eeae288ee264>
- [50] <https://www.toutvert.fr/ramie-proprietes/>
- [51] <https://textileaddict.me/la-ramie-fibre-textile-dortie/>

Référence Bibliographique

[52] G.G.Giménez « Aportaciones a la química del esparto español ». Anales de la Universidad de Murcia. Vol 13, N° 1. Curso 1954-55

[53] M. Abdelaziz Lallam. Extraction et étude des propriétés physiques et mécaniques des fibres d'Alfa (Esparto grass) en vue d'applications textiles, 2010, p8.

[54] Pierre BRUNET et Léo BERJAUD. Collection de brochures hebdomadaires pour le travail libre des enfants Documentation d'adaptation pédagogique des Commissions de l'Institut Coopératif de l'Ecole Moderne ,8Novembr1951

[55] <https://samak-deco.fr/blog/7-lalfa-cette-fibre-vgtale-mise-en-valeur-par-les-artisans-tunisiens>

[56] <http://www.fao.org/natural-fibres-2009/about/15-natural-fibres/fr/>

[57] <http://linfrance.com/le-lin-et-ses-fibres-exceptionnelles/>

[58] <https://www.futura-sciences.com/tech/dossiers/technologie-vegetal-textiles-585/page/4/>

[59] Future Fibres : Sisal (fao.org)

[60] <https://www.alamyimages.fr/la-fibre-de-sisal-matiere-premiere-de-la-chine-image256831492.html>

[61] <https://www.agroligne.com/site-map/articles/212-e-agroligne/le-meilleur-de-l-info/24925-plantation-de-la-fibre-de-sisal-retour-sur-la-premiere-experience-a-naama-et-ghardaia.html>

[62] <https://www.bisson-bruneel.com/article-1/>

[63] Z.Hashin et B. Walter Rosen. « The elastic moduli of fiber-reinforced materials ». Journal of applied mechanics materials, 7 :448-64, 1973

[64] [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].

[65] [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

[66] Mémoire Menad Rania / MokademNesrine Etude des facteurs d'importances pour évaluer l'endommagement d'un matériau composite naturel Abaca/Époxyde sous l'effet de la température et l'humidité 2022

[67] Mémoire ETHALI Mohamed El Amine / SAFI AMEUR AbdelkaderEtude et simulation des performances des composites à base de quatre fibres naturelles et matrice en époxyde 2021

[68] ABASSINI Sahar et GUENOUNA Mokhtaria, Master 2 Génie Mécanique, thème : Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans les matériaux composites Jute/Époxyde unidirectionnels pour des températures variable, Soutenance le 28 Mai 2018

[69] GHARBAOUI Asma Master 2 Génie Mécanique, thème : Effet De L'Orientation Des Fibres Naturelles Sur La Résistance Locale D'un composite Partiellement Endommagé, Soutenu le 16 Juin 2015

[70] BOUDEBZA Taha Yacine et BAMOUNE Sofiane Master 2 Génie Mécanique, thème : Prédiction de la résistance micromécanique et l'évolution thermomécanique d'un composite Ramie/Epoxyde unidirectionnels en milieu humide, Soutenance le 28 Mai 2018

Conclusion Général

De la présente étude, on a accentué principalement sur l'étude et la comparaison de six cas de fibres naturelles, le Jute, Ramie, Alfa, Sisal, Lin et Abaca dans une matrice en époxyde. Nous pouvons dire que les vieillissements et les endommagements des matériaux composites à fibres naturelles unidirectionnels pour des températures variables de 20°C à 120°C, dépend essentiellement de la nature de la fibre et de la disposition 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 et les déplacements du composite en fonction du chargement appliqué, 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 un chargement 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 de température de 20° à 120°C a moins d'effet suivant les différents résultats trouvés, d'autre part elle augmente le déplacement longitudinal dans la zone plastique ce qui favorise le passage rapide de l'endommagement d'une fibre cassée à une autre ce qui nous permettra d'être en conformité avec les lois de la micromécanique. En effet, les composites pour les six cas de fibres naturelles, le Jute, Ramie, Alfa, Sisal, Lin et abaca /époxyde ou ils présentent une plus grande rigidité à part l'Alfa et ils sont plus résistants à l'endommagement

Les résultats obtenus montrent aussi que le déplacement longitudinal des fibres Lin, Abaca, Ramie est très faible par rapport à celui de Sisal et Jute, et beaucoup plus important celui d'Alfa. Ce qui montre la bonne rigidité des cinq premiers matériaux est confirmé les résultats trouvés sur les derniers travaux fait par nos précédents collègues.

Pour futures recommandations, nous comptons poursuivre toujours cet axe de recherche pour toucher d'autres cas de fibres naturelles.

Annexe

➤ Le Fichier Donnée de Programme Fortran

2.72e+9 (26,5 Gpa,13,4 Gpa,80 Gpa,5 Gpa,15.1 Gpa,20 GPa)

0.43 2.95e+9 18.5e+6 0.53 1.0 43 0.200 0.302e-3 5.1

0.015 0.004 (0,0005 mm,0,00075 mm,0,0004 mm ,0,00015 mm,0.000020 mm,0.000010 mm)

6	8	9	10	11	11	12	13	13	14	15	15	16
	16	16	17	17	18	18	18	19	19			
20	20	20	21	21	21	22	22	22	23	23	23	23
	24	24	24	24	25	25	25	25				

22 160 20 0.5 0.04

➤ Paramètres Mécaniques et Géométriques Fibre/Epoxyde

Em0= module de young matrices epoxide= 2.72e+9

Ef0= module de Young de la fibre = Voir Le tableau IV.1 (Jute-Alfa-Ramie-Sisal-Abaca et lin)

Vnu12m= Coefficient de poisson de la matrice-fibre=0.43

Sigma0=contrainte de traction ou chargement maximal= 2.95e+9

tau0=contrainte de cisaillement= 18.5e+6

vf=fraction volumique (0.3-0.9) variable

vnéta=1, paramètre de cisaillement=1.0

n43=nombre de fibre cassée=43

VL=longueur de l'échantillon en m= 0.200

VL0=Longueur de référence de l'échantillon =3.02e-4

v1m=Coefficient de poisson de la matrice= 5.1

w=largeur de l'échanton en m= 15e-3

t=Epaisseur de l'échantillon en m= 4e-3

rf=rayon de la fibre en m = Voir Le tableau IV.1 (Jute-Alfa-Ramie-Sisal-Abaca et lin)

Evaluations facteur de concentration de contrainte

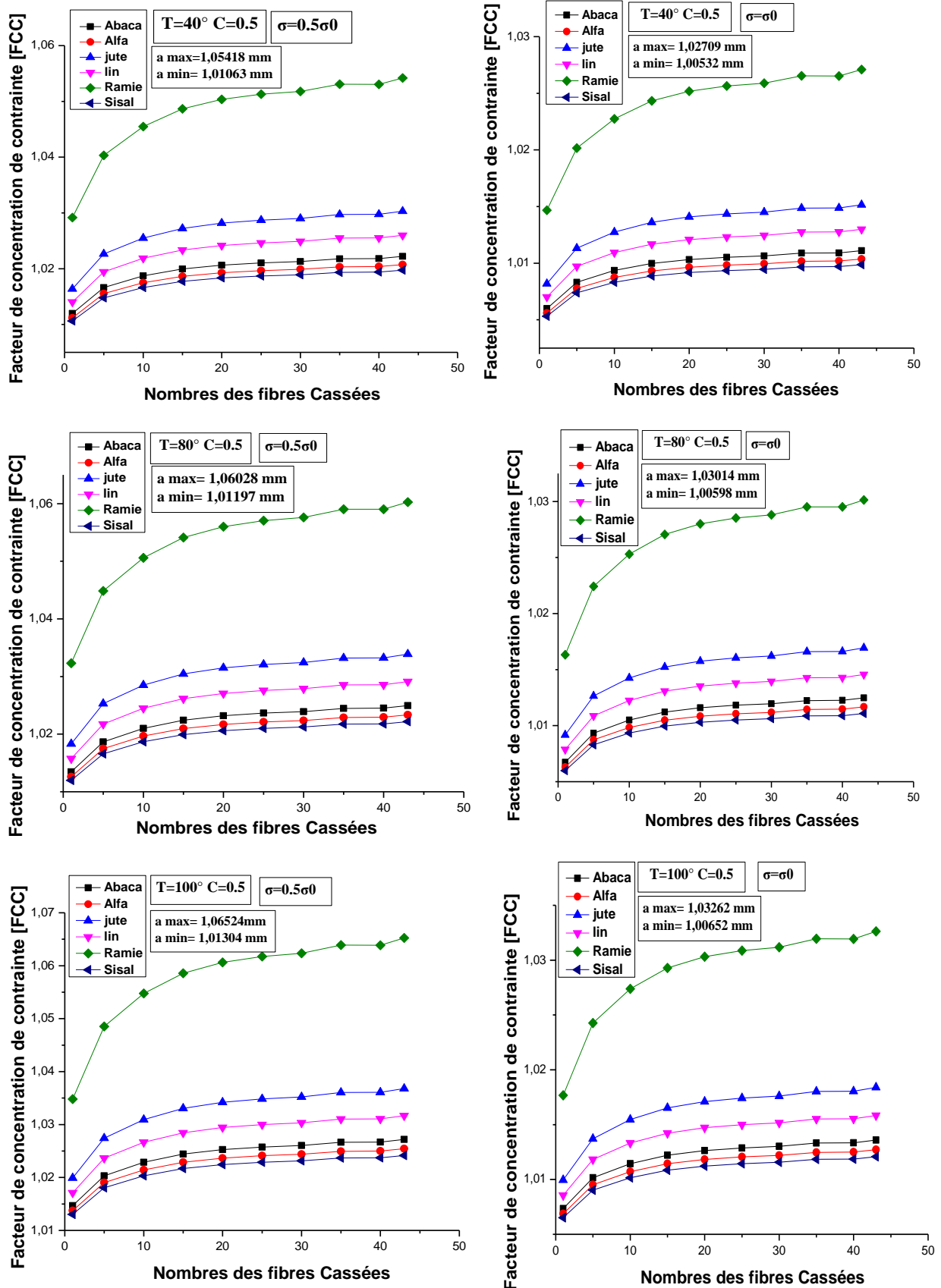


Figure IV.3 Evaluations facteur de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différentes températures (40° , 80° et 120°), cas $C=50\%$.

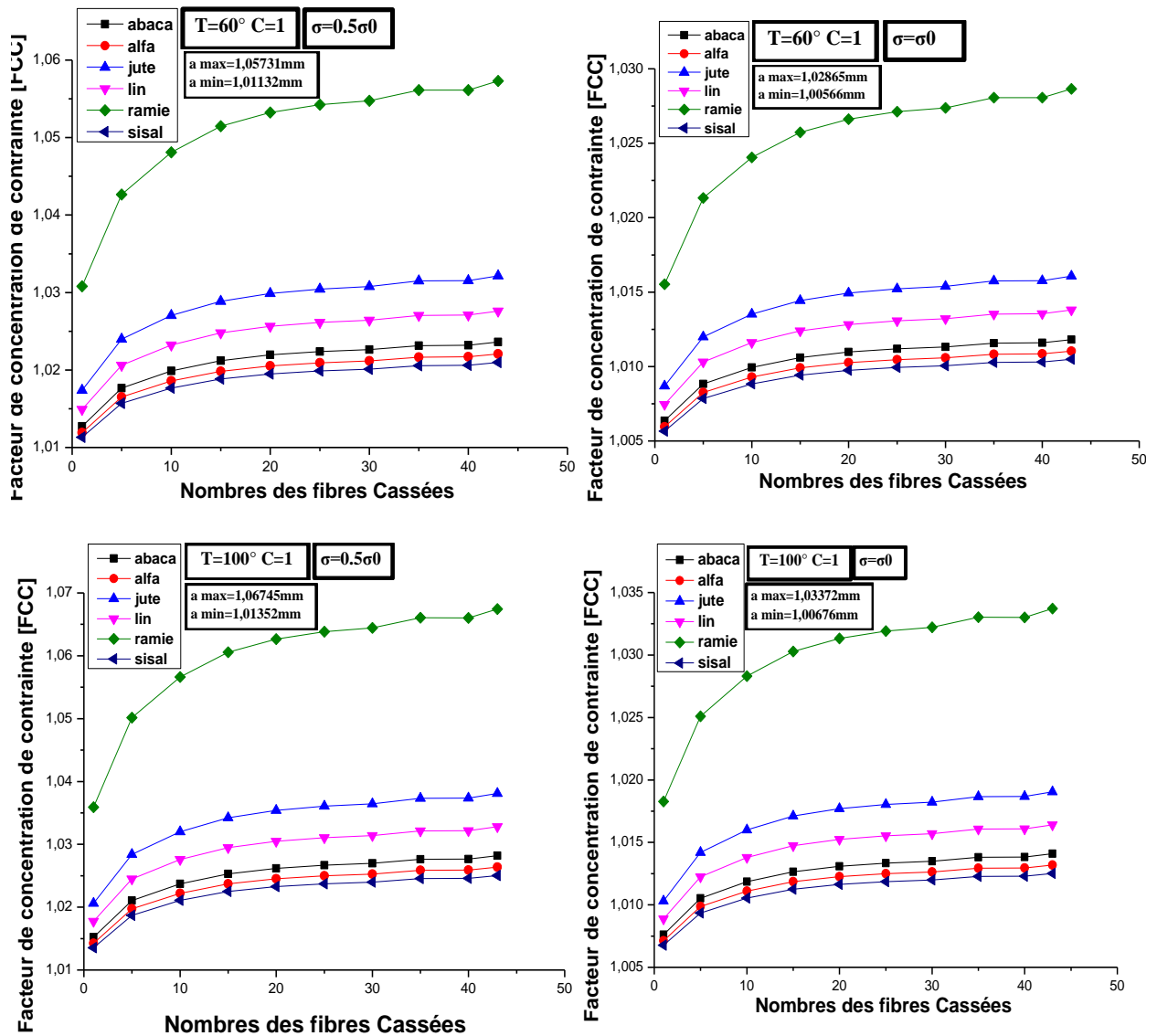
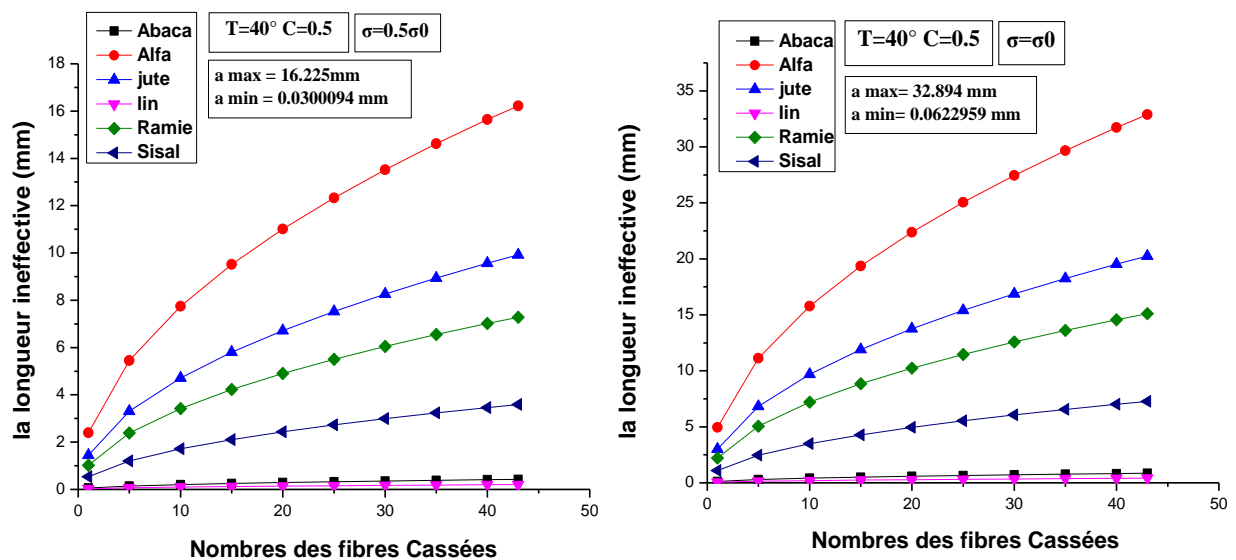


Figure IV.4 Evaluations facteur de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibres cassées avec un chargement variable de $0.5 \sigma_0$ et σ_0 pour des différentes températures (60° et 100°), cas d'une concentration d'humidité $C=100\%$

🚧 Evaluation de la longueur inefficace



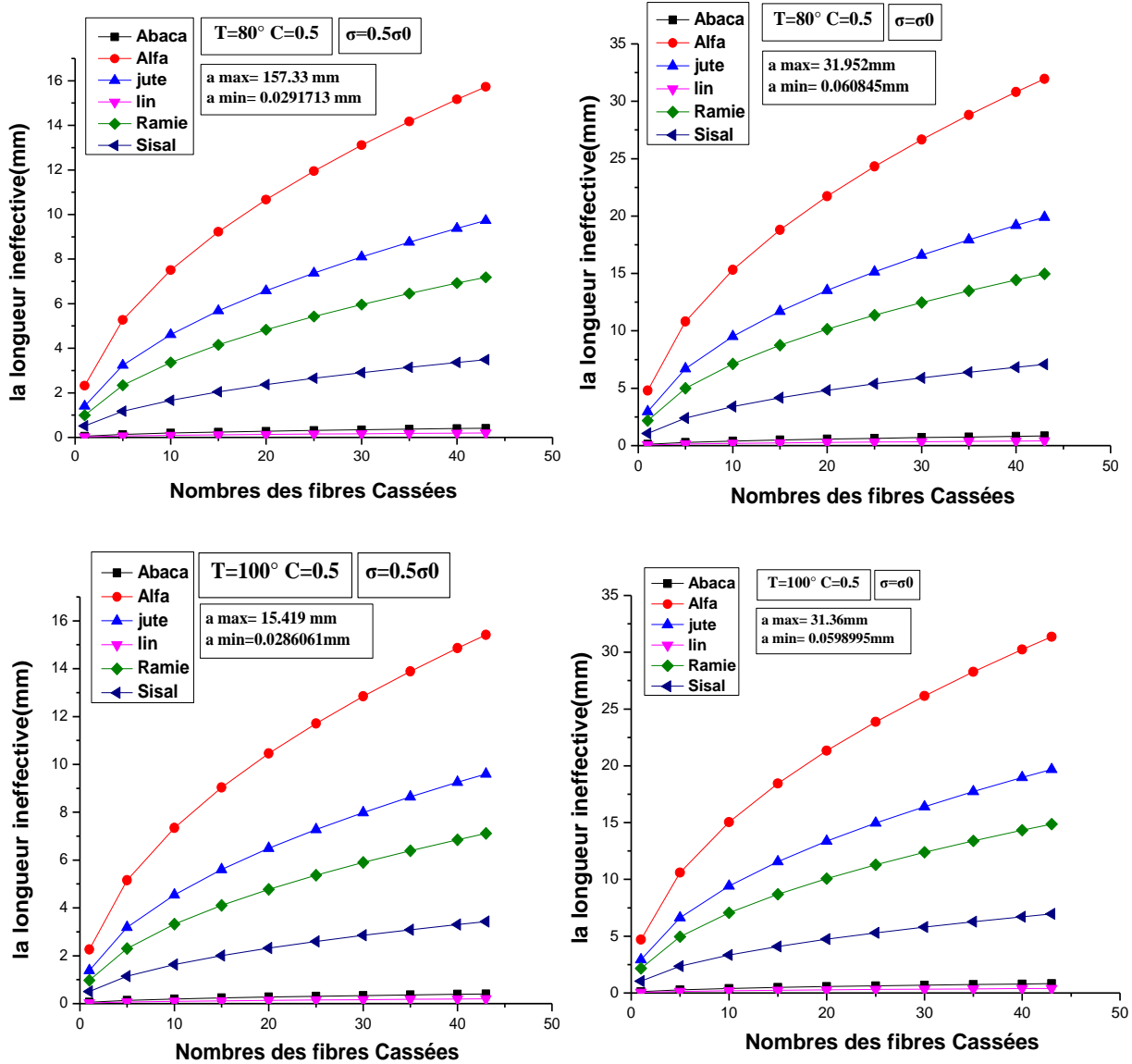
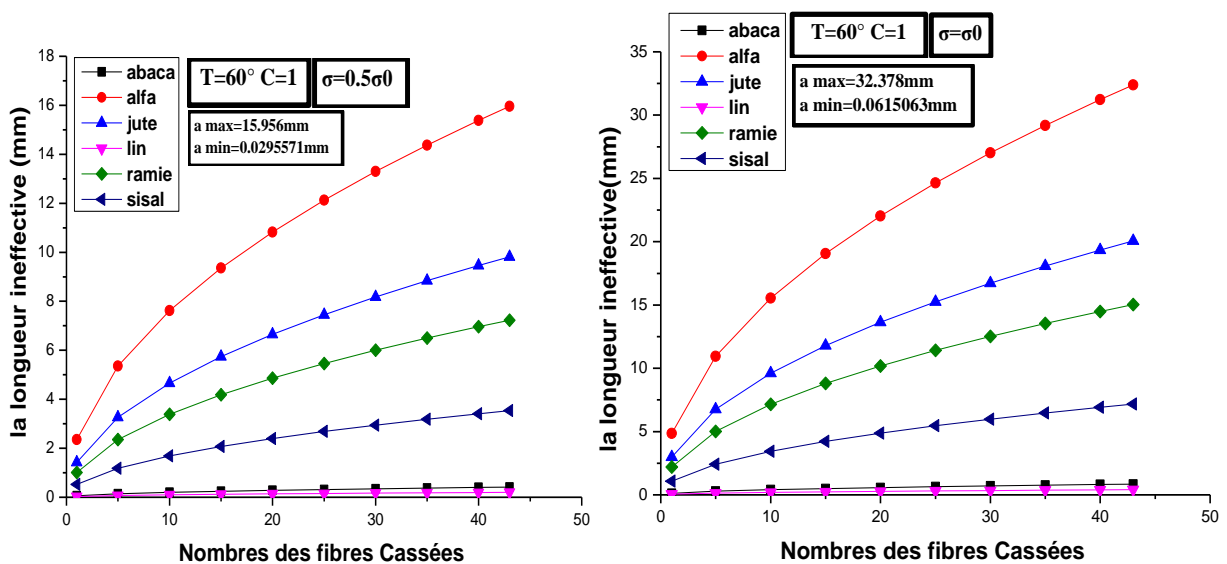


Figure IV.5 Evaluation de la longueur inefficace en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargement appliquée de $0.5 \sigma_0$ au chargement complet σ_0 et pour une concentration d'humidité $C = 50\%$



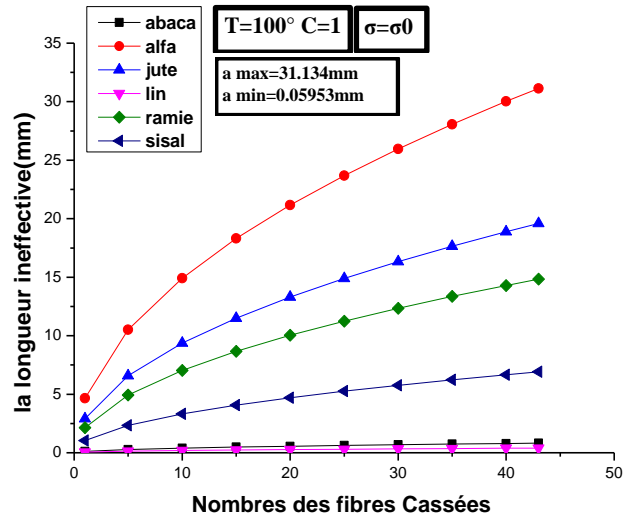
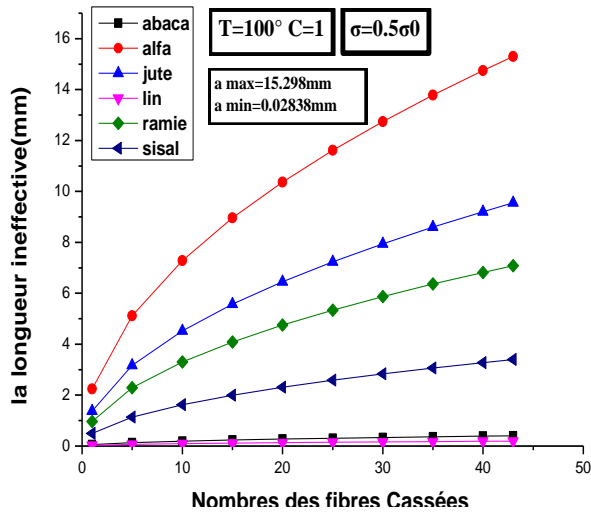
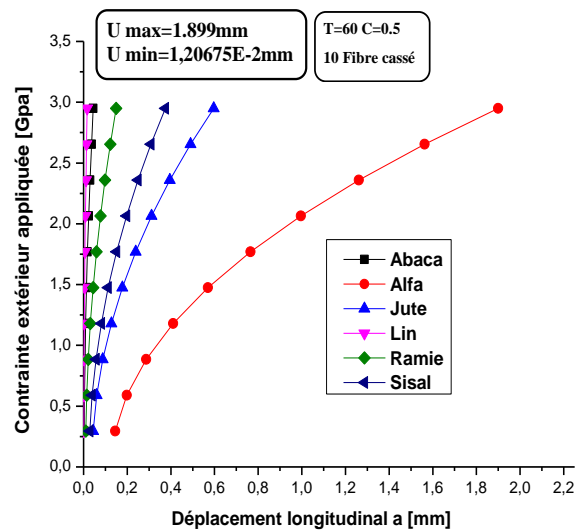
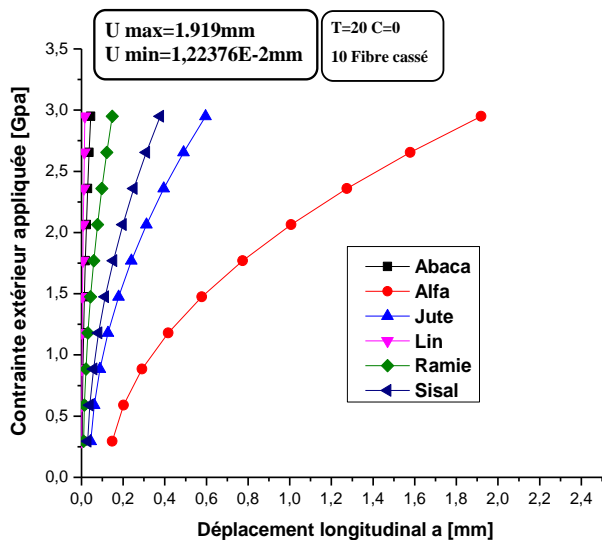
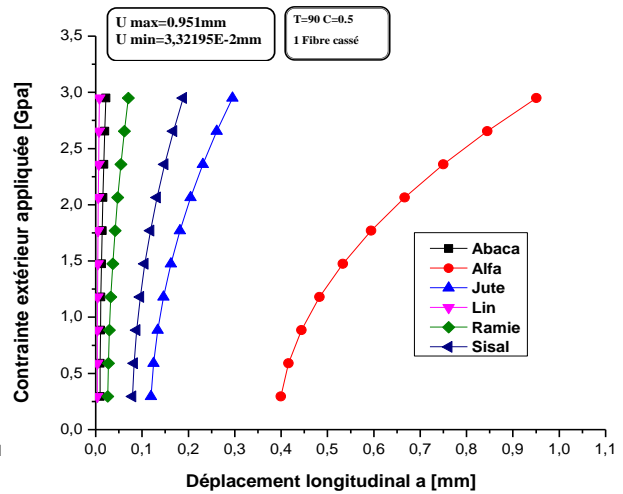
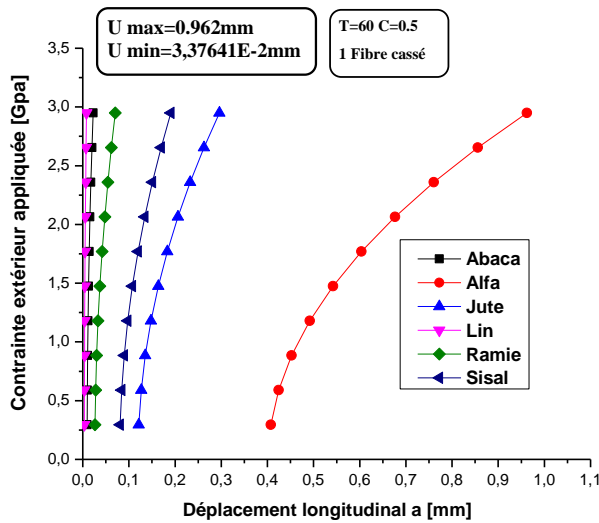


Figure IV.6 Evaluation de la longueur inefficace en fonction de nombre de fibres cassées pour six matériaux différents avec des chargement appliquée de $0.5 \sigma_0$ à σ_0 et pour une concentration d'humidité $C=100\%$

Evolution du déplacement longitudinal.



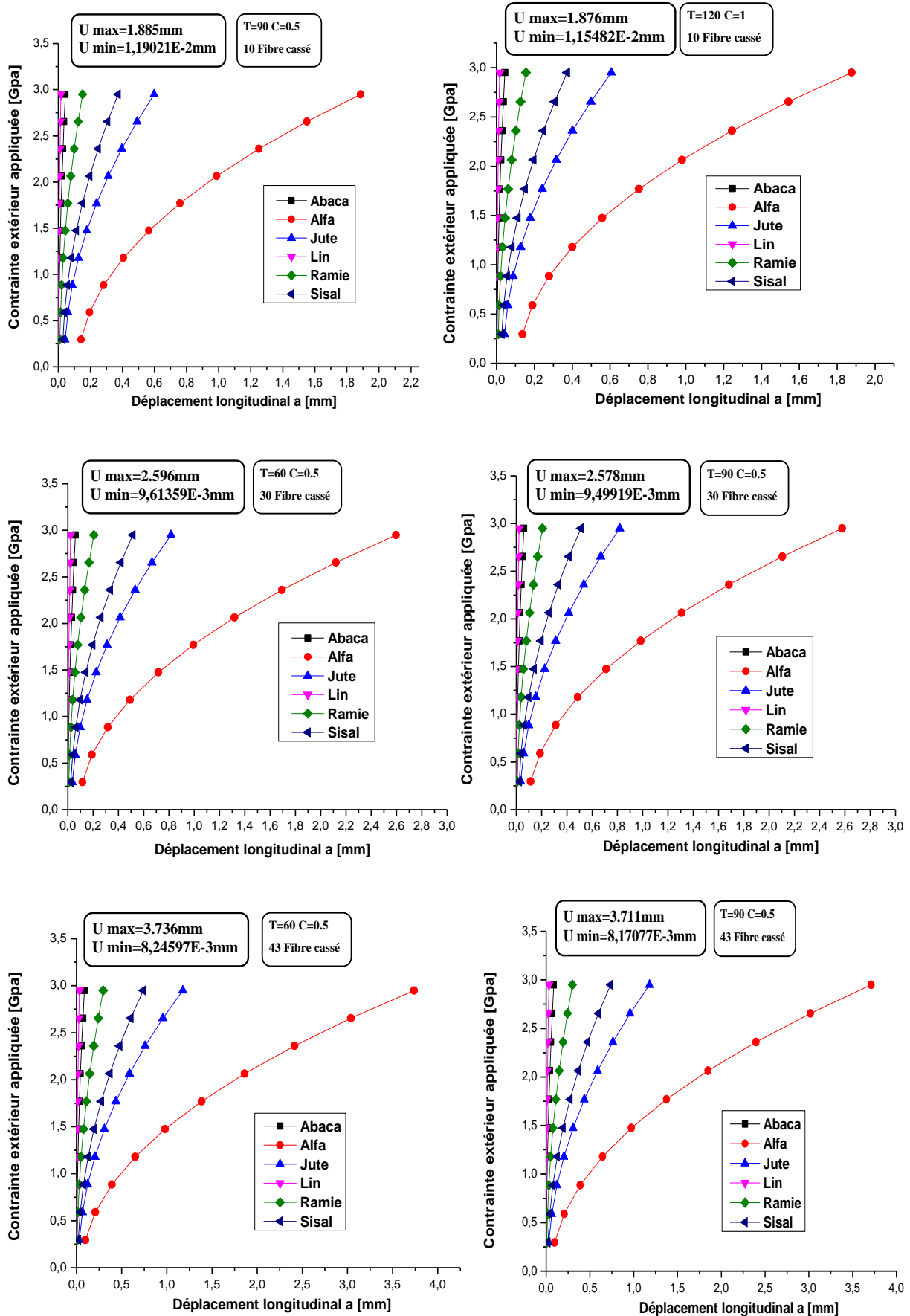


Figure IV.7 Evolution du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée, des fibres cassées et les conditions environnementales pour les Six cas de fibres