

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

ETUDE DES FACTEURS D'IMPORTANCES POUR EVALUER
L'ENDOMMAGEMENT D'UN MATERIAU COMPOSITE NATUREL
ABACA/EPOXYDE SOUS L'EFFET DE LA TEMPERATURE ET
L'HUMIDITE

Présenté par :

- ❖ Melle MENAD RANIA
- ❖ Melle MOKEDDEM NESRINE

Soutenu le 12/07/2022 devant le jury composé de :

Président	Pr: ZENASNI Ramdane	Université de Mostaganem UMAB
Examineur	Mme : CHENINENawel.H	Université de Mostaganem UMAB
Encadreur	Dr :KHIAT Mohamed Amine	Université de Mostaganem UMAB

Année Universitaire : 2021 / 2022



Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes qui ont contribué au succès de mon mémoire.

Je tiens à exprimer toute reconnaissance à mon encadreur Mr KHIAT sidi Mohammed amine je le remercie de m'avoir encadré, orienté, aidé, conseillé. Pour son aide. Ses conseils avisés et sa supervision éclairée tout au long de la rédaction du mémoire.

J'adresse mes sincères remerciements à tous les professeurs, intervenants et toutes les personnes qui par leur paroles, leurs écrits, leurs conseils et leurs critiques ont guidé mes réflexions.

Je remercie également toute l'équipe pédagogique de l'université de Mostaganem UMAB.

Je remercie mes très chers parents, qui ont toujours été là pour moi. Je remercie mes très chers amis (es) pour leurs encouragements, je remercie mes amis (es) qui ont toujours été là pour moi. Leur soutien inconditionnel et leurs encouragements ont été d'une grande aide.

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

Dédicace

Je dédie ce modeste effort à mes chères sans eux je ne serai pas arrivé là où j'en suis aujourd'hui, ce projet de fin d'études représente le fruit de leur soutien et encouragement.

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 ma chère tante Djoher BelKacem

Ton affection, 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 sœur Dounia Benz

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

Rania

Dédicaces

Dédicaces Grace à Dieu le tout puissant, j'ai achevé la réalisation de ce modeste travail que je tien très chaleureusement à le dédier à :

Ma mère chérie et mon père

Qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mes études et pour leurs patience que Dieu les protègent et les gardes pour moi.

A mes adorables frères et sœurs.

A ma très chère Grand-mère

Que Dieu te protège, te donne bonne santé et longue vie parmi nous.

À mes très chères amis et camarades

Pour tous les moments d'échange et de débat aux personnes qui m'ont toujours aidé et soutenue sans oublier mes cousines

Nesrine

Résumé

Les matériaux composites sont nés de l'association de matériaux aux caractéristiques complémentaires, pour conférer à cet assemblage des propriétés originales. Cependant, les matériaux composites et en particulier les composites à fibres. L'essor de ces matériaux est à l'origine lié au développement de l'industrie de l'aéronautique et de l'aérospatiale militaire, puis plus récemment dans le domaine du transport civil, dans le cadre d'une politique d'économie d'énergie et de protection de l'environnement. En effet, ces applications nécessitent des matériaux qui soient, à la fois légers, résistants et rigides. Afin de valoriser les causes et les conséquences de la défaillance des plaques stratifiées, 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 devenue un domaine de recherche d'un intérêt scientifique et technologique très prospère, qui a incité de nombreux chercheurs à mener des recherches exhaustives et fructueuses.

Le présent travail décrit un modèle analytique permettant de prévoir la résistance et la durabilité d'un composite unidirectionnel en Abaca époxyde en utilisant des techniques micromécaniques. Ce modèle suppose qu'un groupe de fibres cassées est entouré d'un nombre de fibres intactes. L'évolution des charges des caractéristiques particulières de la fibre naturelle, 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 Abaca.

Abstract

Composite materials are born from the association of materials with complementary characteristics, to give this assembly original properties. However, composite materials and in particular fiber composites. The development of these materials is originally linked to the development of the aeronautics and military aerospace industry, and more recently in the field of civil transport, as part of a policy of energy saving and environmental protection. Indeed, these applications require materials that are light, resistant and rigid. In order to value the causes and consequences of the failure of laminated plates, the complete understanding of the behavior laws that generate the evolution of the damage phenomenon of these materials under critical loads, must be established. Nowadays, the damage mechanics of composite materials at matrix-fiber interfaces has become a research area of great scientific and technological interest, which has prompted many researchers to conduct comprehensive and successful research.

The present work describes an analytical model to predict the strength and durability of a unidirectional epoxy Abaca composite using micromechanical techniques. This model assumes that a group of broken fibers is surrounded by a number of intact fibers. The evolution of the loads of the particular characteristics of the natural fiber, the matrix, and the fiber/matrix interface, are the most important factors to evaluate the strength of the composite from a micromechanical point of view. Interface and adhesion conditions are taken into consideration by this model to quantify the rate of normal shear stress transfer through the matrix between two neighboring intact and broken fibers.

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

موجز

ومع ذلك، المواد المركبة و خاصة الألياف لمركبة تولد المواد المركبة من ارتباط المواد بخصائص تكميلية، لمنح خصائص التجميع الأصلية هذه في الواقع،تتطلب هذه التطبيقات مواد خفيفة الوزن ومقاومة صلبة ولتقييم أسباب وعواقب فشل الصفائح الخشبية، يجب إيجاد فهم كامل لقوانين السلوك التي تولد تطور ظاهرة تلف هذه المواد تحت الأحمال الحرجة. في الوقت الحاضر،أصبح الضرر الميكانيكي للمواد المركبة في واجهات الألياف المصنوفة مجالاً للبحث ذي اهتمام علمي وتكنولوجي ناجح للغاية،مما دفع العديد من الباحثين إلى إجراء أبحاث وكان تطوير هذه المواد مرتبطاً في الأصل بتطوير صناعة الطيران والصناعة العسكرية، ومؤخراً في مجال النقل المدني،كجزء من سياسة لتوفير الطاقة وحماية البيئة. في الواقع، هذه التطبيقات تتطلب شاملة ومثمرة. يصف هذا العمل نموذجاً تحليلياً للتنبؤ بقوة ومتانة مركب إيبوكسي أبأكا.أحادي الاتجاه باستخدام تقنيات ميكانيكية دقيقة. يفترض هذا النموذج أن مجموعة من الألياف المكسورة محاطة بعدد من الألياف السليمة. يعد تطور أحمال الخصائص الخاصة للألياف الطبيعية والمصنوفة وواجهة الألياف/المصنوفة 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 المصنوفة بين ليفين سليمين ومكسورين قريبين.

الكلمات الرئيسية:ميكانيكا دقيقة،ميكانيكا حرارية،مركب أحادي الاتجاه،مصنوفة إيبوكسي واجهة – أليف أبأكا

Table des matières

Résumé	I
Table des matières	IV
Table des figures	VII
Table des tableaux	IX
Liste des symboles	X
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralité sur les Matériaux composite	
I.1 Généralité sur les matériaux composites	4
I.1.1 Introduction	4
I.1.2 Historique	4
I.2 Différents type de matériaux composites	5
I.2.1 Matériaux composites de grande diffusion	5
I.2.2 Matériaux composites de hautes performances	5
I.3 Constituants des Matériaux Composites	5
I.3.1 la matrice	5
I.3.1.1 Les différents types de matrices	6
I.3.1.1.1 Les matrices céramiques	6
I.3.1.1.2 Les matrices métalliques	6
I.3.1.1.3 Les matrices organiques	6
I.3.2 Les renforts	7
I.3.2.1 Architecture des renforts	8
I.3.2.1.1 Les unidirectionnels	9
I.3.2.1.2 Les bidirectionnels	9

I.3.2.1.3 Les tissus	9
I.3.2.2 Classification des fibres	10
I.3.2.2.1 Les fibres de verre	11
I.3.2.2.2 Les fibres de carbone	11
I.3.2.2.3 Les fibres d'aramides	11
I.3.3 Les charges et les additifs	11
I.3.3.1 Les charge	11
I.3.3.2 Les additifs	12
I.4 Types de composites	12
I.4.1 Les monocouches	12
I.4.2 Les stratifiés	13
I.4.3 Les Sandwichs	13
I.5 Avantages et inconvénients des matériaux composites	14
I.6 Les secteurs d'application des composites	14
<i>Chapitre II : Généralité sur les Fibres naturelles (Abaca/époxyde)</i>	
II.1 Généralité sur les fibres naturelles	16
II.1.1 Définition	16
II.1.2 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme Renfort des matériaux composites	16
II.1.3 Avantages des composites renforcés de fibres naturelles	17
II.1.4 Inconvénients principaux	17
II.2 Fibre végétale	17
II.2.1. Définition de la fibre végétale	17
II.2.2. Composition et propriétés de différentes fibres végétales	18
II.2.3. Transformation des fibres végétales	18
II.2.4 Caractéristique mécanique des fibres – Comparatif	19
II.2.5 Avantage des fibres végétales	19

II.3 Quelques fibres naturelles et leurs usages	20
II.4 Abaca/époxyde	20
II.4.1 La plante abaca	20
II.4.2 La fibre	21
II.4.3 Traitement alcalin des fibres d'abaca	21
II.4.4 Traitement à l'acide acrylique de la fibre	22
II.4.5 Traitement au permanganate de la fibre d'abaca	22
II.4.6 Avantages pour l'environnement	22
II.4.7 Les avantages et inconvénients	22
II.4.8 Les usages de l'abaca	22
II.4.8.1 Papier	22
II.4.8.2 Automobile	23
II.4.8.3 Producteurs	23
II.4.8.4 Production et commerce	23
II.4.9 Perspectives du marché	23
II.5 Epoxyde	24
II.5.1 Oxyde de propylène(PO)	24
II.5.2 Oxyde d'éthylène(OE)	24
II.5.3 Réaction des époxydes	25
II.5.4 Les résine époxydes	25
<i>Chapitre III : Modèle de Rupture Longitudinale Avec Résultats et Discussion</i>	
III.1 Introduction	27
III.2 Rupture Longitudinale Avec Effet Environnemental.	27
III.3 Résultats et Discussions	33
III.3.1 Evaluation de longueur ineffective	33
III.3.1.1 charge de traction appliquée $\sigma=0.5\sigma_0$, avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et de la température de T = 20 °C, à 120 °C.	33

III.3.1.2 charge de traction appliquée $\sigma=0.7\sigma_0$, toujours avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et de la température de $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, à $120\text{ }^\circ\text{C}$.	35
III.3.1.3 charge de traction appliquée $\sigma=\sigma_0$, avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et de la température de $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, à $120\text{ }^\circ\text{C}$	36
III.3.2 Evaluation de la concentration de contrainte	38
III.3.2.1 Pour Variation de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité et de la température pour un chargement $\sigma= 0.7\sigma_0$	38
III.3.2.2 Pour Variation de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité et de la température pour un chargement complet $\sigma=\sigma_0$.	39
III.3.2.3 Variation de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la température et pour des concentrations d'humidité ($C=0, 0.5$ et 1) et un chargement complet $\sigma=\sigma_0$	40
III.3.3 Evolution du Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée avec une progression constante d'humidité et de la température	42
Conclusion	44
Biographique	45

Table de la figure

Figure I.1 : Schéma illustratif d'un matériau composite [12]	4
Figure I.2 : Les trois grandes familles de matrice [20]	5
Figure I.3 : Types de renfort [23]	8
Figure I.4 : Nappe unidirectionnel [24]	9
Figure I.5 : Toile ou taffetas [24]	9
Figure I.6 : Schéma d'un serge [25]	10
Figure I.7 : Schéma d'un satin [25]	10
Figure I.8 : fibre de verre [27]	10
Figure I.9 : Fibre de carbone [28]	11
Figure I.10 : Fibre d'aramide [29]	11
Figure I.11 : Plis UD [32]	12
Figure I.12 : Schéma d'un stratifiés [33]	13
Figure I.13 : Schéma d'un sandwich [35]	14
Figure II.1 : Classification des différentes fibres naturelles [40]	16
Figure II.2 : Transformation des fibres végétales [47].	18
Figure II.3 : La plante de kénaf [51]	20
Figure II.4 : La plante de sisal [52]	20
Figure II.5: La fibre de lin [53]	20
Figure II.6 : La plante de l'abaca [55]	21
Figure II.7 : La fibre de l'abaca [56]	21
Figure II.8 : papier de l'abaca [59]	23
Figure II.9 : la structure de l'époxyde [61]	24
Figure II.10 : Oxyde d'éthylène [62]	25
Figure III.1 : Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes.	29
Figure III.2 : Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace.	31
Figure III.3 : Géométrie d'un échantillon	32
Figure III.4 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et pour une température de 20° à 120°, pour une charge de traction appliquée $\sigma = 0.5\sigma$	34

Figure III.5 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et pour une température de 20° à 120°, pour une charge de traction appliquée $\sigma = 0.7\sigma_0$	36
Figure III.6 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et pour une température de 20° à 120°, pour une charge de traction appliquée $\sigma = \sigma_0$	37
Figure III.7 : Evolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité (T =20, 60 et 120 °C et $\sigma = 0.7\sigma_0$)	39
Figure III.8: Evolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive d'humidité croissante et (T =20, 60 et 120 °C et $\sigma = \sigma_0$)	40
Figures III.9: Evolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la température et concentration d'humidité (C=0.1, 0.5 et 1 avec $\sigma = 0.7\sigma_0$)	41
Figures III.10 : Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée, avec une progression constante d'humidité et de la température.	43

Table des tableaux

Tableau I.1 :Principal différences entre les matrices TP et TD [21]	7
Tableau I.2 :Les différentes formes de renforts [22]	8
Tableau II.1 :Lesavantages et les inconvénients des fibres végétales [41]	17
Tableau II.2 : Compositionet propriétés de différentes fibres végétales [46].	18
Tableau II.3 : Composition et propriétés de différentes fibres végétales [48]	19
Tableau II.4 : Caractéristique des résines thermodurcissables [65]	26
TableauIII.1 : Caractéristiques mécaniques d'un échantillon en composite Abaca/époxyde	32
Tableau III.2 : Caractéristiques géométriques d'un échantillon en composite Abaca/époxy	32

Liste des symboles

- Am** : Surface de la matrice
- Af** : Surface de la fibre
- a** : Zone du décollement localement plastifiée
- 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

Introduction générale

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité. Ces Matériaux se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie. Ils sont devenus indispensables pour la construction dans plusieurs domaines comme l'aérospatiale, la construction navale, l'automobile, etc. Comme leur nom l'indique, ils sont composés de plusieurs constituants qui se présentent principalement en deux phases : la matrice et le renfort [1]. Dans ce cas, nous parlons de matériaux composites développés à des fins spéciales. Les composites aux interfaces matrice-fibres sont très sensibles aux contraintes environnementales (humidité et température) qui peuvent provoquer la dégradation du composite et le rendre inutilisable. Ces dernières années, le développement de modèles de résistance composites est devenu de plus en plus complexe. Ce type de modèle ignore la résistance de la résine humide et tend à fournir une estimation très proche de la résistance du composite, en tenant compte de la contribution de la matrice comme jonction entre les fibres endommagées. Un autre facteur du développement des matériaux composites est la spécificité qu'ils confèrent, que ce soit d'un point de vue mécanique, thermique, etc.

Dans la conception de structures composites, deux propriétés sont essentielles, qui sont la caractérisation à l'échelle micromécanique et macro-mécanique du module d'élasticité et de la résistance mécanique. Un résumé de ces propriétés peut être trouvé dans les travaux de Christensen [2]. Ses travaux s'appuient sur des modèles micromécaniques d'homogénéisation et utilisent la définition de volumes élémentaires représentatifs pour homogénéiser les matériaux composites. Parmi les nombreux modèles de matériaux composites modernes depuis leur création, nous pensons que certains d'entre eux peuvent être utilisés en fonction de nos attentes de résultats et de paramètres. Bien que le modèle de Zweben et Rosen soit considéré comme le modèle le plus ancien pour prédire la résistance à la traction, il est basé sur une analyse de cisaillement de fibres alignées uni directionnellement. Cependant, nous ne les utiliserons pas car ils ne prennent pas en compte les effets des concentrations de contraintes dans les fibres adjacentes à la fibre cassée [3,4].

Ces dernières années, l'humanité a été confrontée à des problèmes liés à la dégradation de l'environnement et a dû prendre conscience de l'importance de développer de plus en plus de matériaux composites à base de fibres naturelles.

Ce travail s'inscrit dans la continuité de travaux de recherche menés antérieurement par nos collègues. Cette fois ci en utilisant les fibres naturelles Abaca. Le processus de fracture longitudinale a été analysé, y compris les interactions micromécaniques entre les fibres naturelles et la matrice, tout en tenant compte de l'effet hygrothermique sur la dégradation du matériau composite

Ce modèle, basé sur le modèle de Gao et Reifsnider [5], permet de prédire la résistance et la durabilité des composites unidirectionnels en utilisant des techniques micromécaniques. Le modèle suppose qu'un ensemble de fibres cassées est entouré de nombreuses fibres intactes. Si la contrainte est à l'origine de la rupture des fibres, elle est suffisamment importante pour qu'elle puisse être transmise à travers la matrice aux fibres adjacentes, créant d'abord une zone de plastification localisée puis éventuellement une rupture. Des estimations de longueurs inefficaces qui limitent la zone de plastification localisée, ainsi que des facteurs de concentration de contraintes, permettent d'évaluer la résistance de nos composites unidirectionnels abaca/époxyde.

Pour atteindre cet objectif, nous divisons notre travail en trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous avons mené une étude bibliographique sur différents matériaux composites. Au chapitre deux, nous avons abordé différents types de fibres naturelles, en particulier l'abaca. Ensuite, le troisième et dernier chapitre est consacré aux modèles de rupture des composites unidirectionnels afin d'évaluer l'endommagement de notre composite. 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 Abaca-époxyde.

Enfin, nous concluons notre travail par une conclusion générale résumant les principaux résultats et les recommandations futures.

Chapitre I

Généralité sur les Matériaux composite

I.1 Généralité sur les matériaux composites**I.1.1 Introduction :**

Le mot composite vient du mot latin « compositus » qui veut dire : composé ou constitué de deux ou plusieurs parties différentes [6].

Un matériau est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément [7]. Les matériaux composites sont, et seront, de plus en plus utilisés dans les applications industrielles. Ils viennent souvent détrôner les matériaux métalliques dans de nombreux domaines [8].

Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue appelée matrice [9]. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces [10]. Les matrices les plus communes sont les polymères thermoplastiques, thermodurcissables ou élastomères [11].

Les renforts sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés. Les renforts les plus utilisés sont les fibres de verre et de carbone bien que les fibres naturelles gagnent en popularité [10].

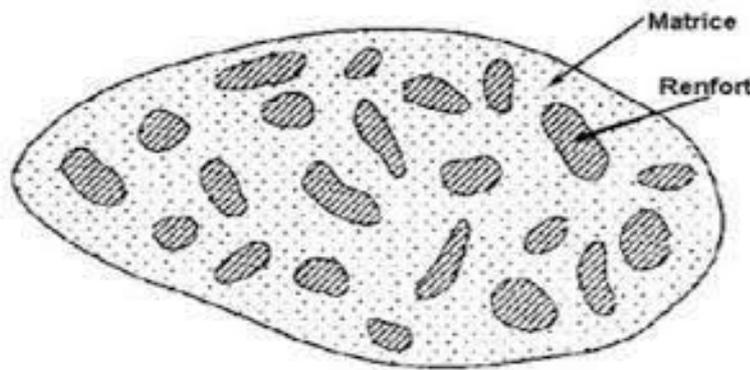


Figure I.1: Schéma illustratif d'un matériau composite [12]

I.1.2 Historique :

Les premiers matériaux composites fabriqués par l'homme étaient probablement à base de bois, on trouvera parmi les premiers composites artificiels figurent les arcs mongols (2000 ans av. J.-C) [13]. Leur âme en bois était contrecollée de tendon au dos et de corne sur sa face interne, puis le torchis utilise pour la construction pour ses propriétés d'isolation et son faible coût [14]. En 1823, Charles Macintosh créa l'imperméable en imprégnant du caoutchouc sur du tissu [15]. Par la suite, en 1892, Hennebique déposa un brevet sur un matériau très semblable au béton armé d'aujourd'hui [16]. Outre les fibres d'origines artificielles ou synthétiques, c'est -à-dire celles créées par l'homme, il y a plusieurs types de fibres d'origines naturelles [17]. Comme mentionnées plus tôt, les fibres naturelles ont sans aucun doute été les premières à être utilisées par l'homme.

I.2 Différents type de matériaux composites

On distingue deux types de composites : les composites de grandes diffusions et les composites de hautes performances.

I.2.1 Matériaux composites de grande diffusion :

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient, leur composition chimique de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes et la simplicité du principe d'élaboration du matériau (moulage par contact) [18].

I.2.2 Matériaux composites de hautes performances :

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique ou le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées.

Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%. [18]

I.3 Constituants des Matériaux Composites :

I.3.1 La matrice :

La matrice est composée de résines mélangées pour améliorer ses propriétés, Une charge qui facilite également la mise en œuvre et réduit les coûts de production. Un mélange est considéré comme une phase homogène mécaniquement, on obtient donc matériau composite composé d'un matériau de renforcement et d'une matrice. La fonction de la matrice est d'assurer la liaison entre les fibres et de transmettre la contrainte. Il assure la résistance du matériau dans le sens transversal du renfort, ainsi que la protection des fibres physicochimiques combattent les facteurs environnementaux nocifs. Est-elle réglage direct de la résistance thermique et de la résistance à la compression et cisaillement intercalaire. La résine utilisée doit être assez déformable et avoir une bonne compatibilité fibre. Ils doivent également avoir une faible densité d'une manière qui préserve les propriétés mécaniques spécifiques du composite Haute. [19]

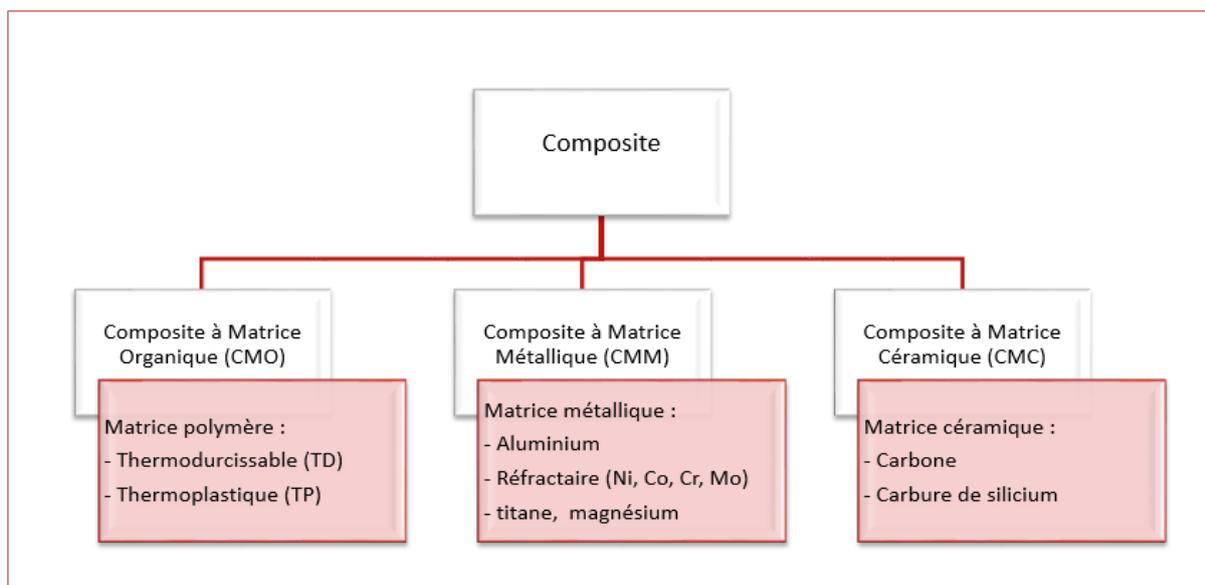


Figure I.2: Les trois grandes familles de matrice [20]

I.3.1.1 Les différents types de matrices :

En fonction de la nature de la matrice, les matériaux composites peuvent se classer selon les trois familles suivantes :

I.3.1.1.1 Les matrices céramiques :

Des matériaux céramiques tels que le verre et le carbure de silicium (SiC) sont utilisés pour la matrice de ce type de composite. La matrice peut être associée à des renforts tels que des métaux, du carbone et des céramiques. Ce type de composite est développé dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques telles que la ténacité et la résistance aux chocs thermiques [19].

I.3.1.1.2 Les matrices métalliques :

Température de service maximale basse pour les polymères, le carbone

Il existe un risque d'oxydation au-dessus de 500°C, il faut donc parfois envisager d'utiliser

Meilleure inertie chimique à des températures plus élevées, certains métaux et alliages métalliques peuvent répondre à cette exigence, utilisez donc une matrice métallique

Sous certaines conditions:

- Propriétés mécaniques supérieures,
- une meilleure résistance aux agressions de certains solvants,
- résistance aux hautes températures,
- le comportement n'est pas complètement élastique,
- augmenter le poids du matériau composite,

I.3.1.1.3 Les matrices organiques :

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

Actuellement les résines thermodurcissables (TD) qui sont associées à des fibres longues sont majoritairement utilisées, mais l'utilisation de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement, il est important de bien identifier les différences fondamentales entre ces deux types de matrice.

-la structure de (TP) est sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour leur donner forme (puis les chaînes se plient), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent), cette opération est réversible.

-la structure de (td) a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se joint (double liaison de polymérisation) pour durcir définitivement, lors du chauffage. [21]

Les principales différences entre les matrices (TP) et (TD) sont représentées dans ce tableau :

Tableau I.1 : Principal différences entre les matrices TP et TD [21]

Matrices	Thermoplastique (TP)	Thermodurcissable (TD)
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Moulage	Chauffage+ refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Cours	Long
Tenue thermique	Réduite	Bonne
Tenue au bloc	Assez bonne	Limitée
Chutes et déchets	Recyclable	Perdus ou recyclés en charge
Mouillabilité renforts	Difficile	Aisée

I.3.2 Les renforts

Les barres d'acier sont les barres d'acier qui supportent la majeure partie de la force mécanique. Les renforts peuvent être classés comme suit :

-Leur composition : métaux, verres, polymères, etc. ;

-Leur forme : <C

Fibres : courtes (0,1 - 1 mm), longues (1 - 50 mm) ou continues (> 50 mm).

Charges de renfort : gravier (ajouté au ciment pour faire du béton), sable, billes de verre, etc. ;

Leur disposition : nattes (feuilles de fibres en vrac non tissées) ou tissées.

Le tableau suivant résume les agencements possibles des différentes formes de renforts en matériaux composites :

Tableau I.2 : les différentes formes de renforts [22]

Type de renfort	Renfort non orienté	Renfort orienté
Fibres longues ou continues	Mat de fibres longues	Parallèlement les unes par rapport aux autres : renforcement unidirectionnel, Selon un angle prédéfini (45° par exemple les unes par rapport aux autres) : renforcement multidirectionnel : renfort tissé,
Fibres courtes	Mat de fibres hachées, exemple : waferboard	Orientation préférentielle, exemple : panneau de grandes particules orientées (OSB)
Charges	Majoritairement	Orientation préférentielle possible

Les matériaux de renforcement peuvent exister seuls dans la matrice (composites homogènes) ou en combinaison avec des matériaux de renforcement de propriétés différentes (composites hybrides).

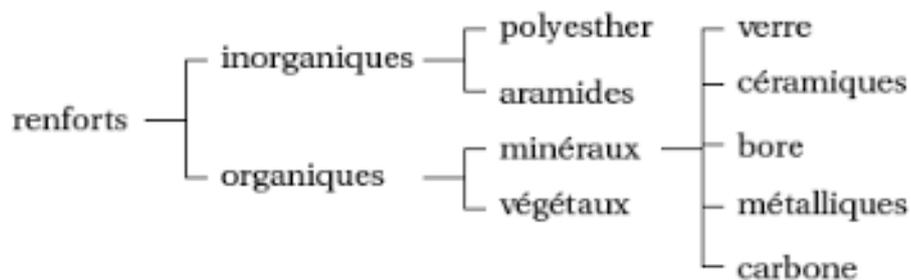


Figure I.3 : Type de renfort [23]

I.3.2.1 Architecture des renforts

Il existe différentes géométries et textures de renforts. [21]

I.3.2.1.1 Les unidirectionnels (UD)

Dans une nappe unidirectionnelle, les fibres sont assemblées parallèlement les unes aux autres à l'aide de fils de trame très légers, figure (I.4). Taux de l'équilibre très grand.

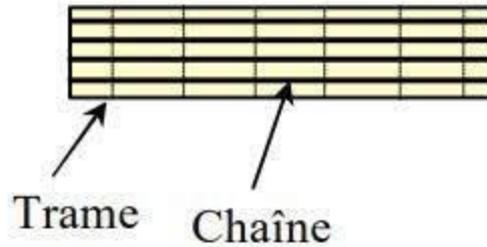


Figure I.4 : Nappe unidirectionnel [24]

I.3.2.1.2 Les bidirectionnels

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 stratifiées, orientés selon deux directions généralement perpendiculaires, soit par nappes continues, soit par tissage.

I.3.2.1.3 Les tissus

A. Toile ou taffetas : Chaque fil de chaîne passe au-dessus puis au-dessous de chaque fil de trame, et inversement. Le tissu présente une bonne planéité et une relative rigidité, mais ne se déforme pas facilement lors de sa mise en place. De nombreuses intersections consécutives produisent un retrait important et dégradent les propriétés mécaniques.

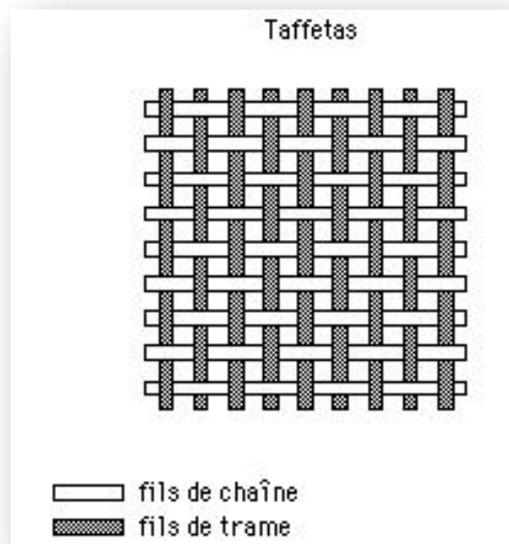


Figure I.5 : Toile ou taffetas [24]

B. Serge : Chaque chaîne flotte sur plusieurs (n) trames, et chaque trame flotte sur (m) chaînes. Plus grande flexibilité que le taffetas avec une bonne densité linéaire. En face, sergé 2/2.

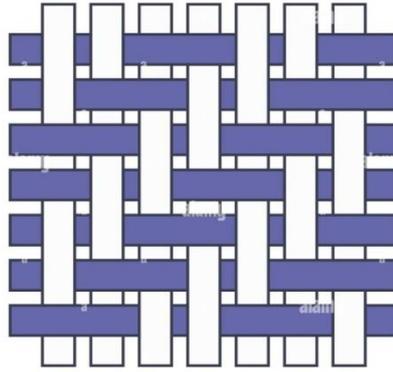


Figure I.6 : schéma d'un Serge [25]

C. **Satin** : chaque fil de chaîne flotte sur plusieurs (n-1) fils de trame, et inversement. Ces tissus ont des aspects différents de chaque côté et sont assez souples et adaptés à la mise en forme de pièces à surfaces complexes. Ils présentent une forte masse spécifique.

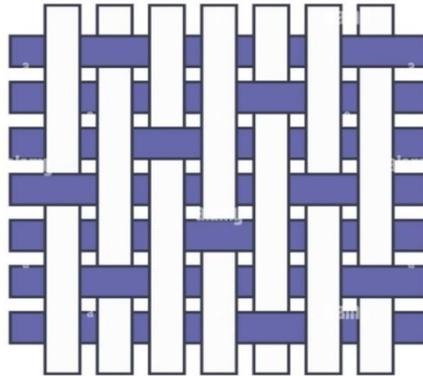


Figure I.7: schéma d'un satin [25]

I.3.2.2 Classification des fibres :

I.3.2.2.1 Les fibres de verre :

Elle constitue le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à

Partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore.).

On distingue trois types de fibres :

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuit imprimés (Propriétés diélectriques) ;



Figure I.8 : Fibre de verre [27]

I.3.2.2.2 Les fibres de carbone :

C'est la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres :

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C

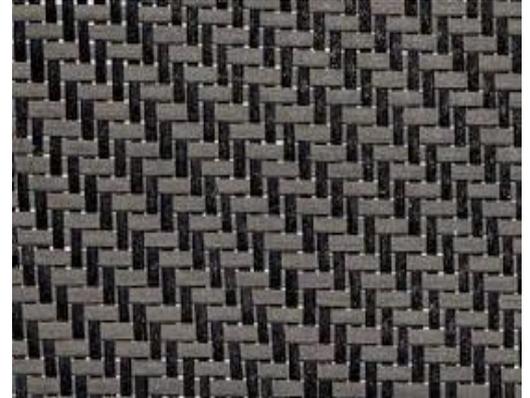


Figure I.9 : fibre de carbone [28]

I.3.2.2.3 Les fibres d'aramides :

Souvent la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramides de rigidité différentes :

- La fibre basse module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles.
- La fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances. [26]

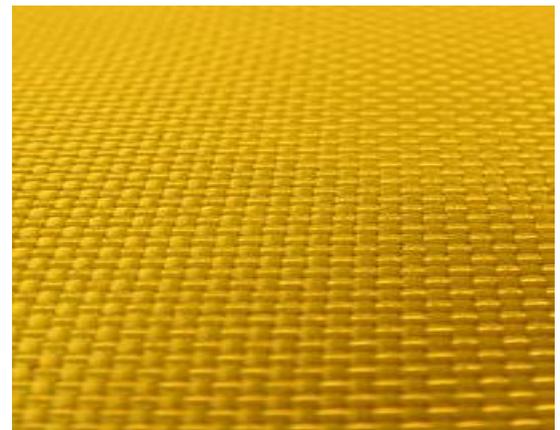


Figure I.10 : Fibre d'aramide [29]

I.3.3 Les charges et les additifs**I.3.3.1 Les charge**

Le nom général de charge désigne toute substance interne, minérale ou végétale, qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier sensiblement les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou simplement de réduire le prix de revient du matériau transformé.

Contrairement aux matériaux thermoplastiques, les matériaux thermodurcissables ont toujours contenu des charges de natures et de formes variées, souvent à des taux élevés pouvant aller jusqu'à 60 % en masse, dépassant ce pourcentage à mesure que le composé atteint la saturation.

Pour un matériau donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, en général, les substances pouvant être utilisées comme charges dans les matières plastiques doivent au préalable répondre à une série d'exigences :

- Comptabilité avec la résine de base.

- Mouillabilité.
- Uniforme de qualité et de granulométrie
- Faible action abrasive. [30]

1.3.3.2 Les additifs

Un additif désigne une substance qui est introduite dans un mélange pour conférer une propriété spécifique, ils se trouvent en faible quantité (quelque % et moins) et interviennent comme :

- Adjuvants.
- Lubrifiant et agents de démoulage.
- Pigments et colorants.
- Agent anti-retrait.
- Agent anti-ultraviolets. [30]

I.4 Types de composites

Les structures des matériaux composites peuvent être classées en trois types : [31]

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

I.4.1 Les monocouches

Les éléments de base des structures composites sont Les monocouches. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère. Ils sont caractérisés par le type de renfort utilisé : des fibres longues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus, de rubans. [31]

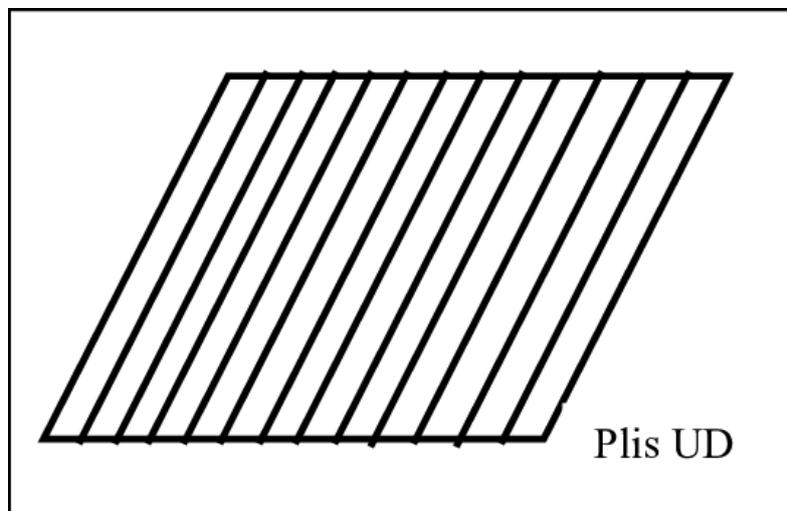


Figure I.11 : plis UD [32]

I.4.2 Les stratifiés

On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux, et une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. Les stratifiés sont les matériaux composites qui ont les meilleures performances structurales. L'idée de base est celle de superposer des couches anisotropes, renforcées avec des fibres longues, uni- ou bi- directionnelles. Si la disposition des couches successives de tissu de telle sorte que les fils de chaîne coïncident, on dit qu'on a une stratification parallèle unidirectionnelle. [31]

Si l'on dispose les couches alternativement de façon que les fils de chaîne soient en correspondance avec les fils de chaîne de la couche suivante, on dit qu'on a une stratification croisée bidirectionnelle [31]

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

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

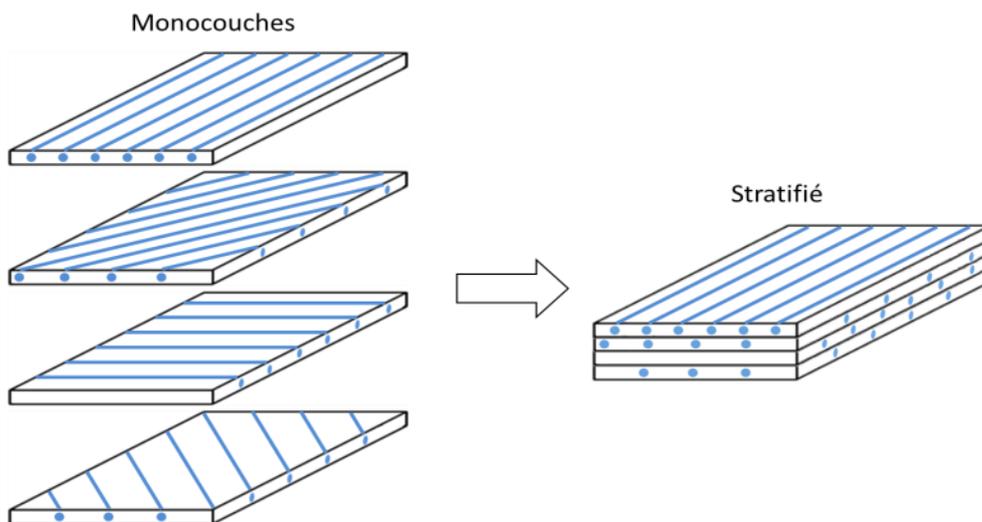


Figure I.12 : Schéma d'un Stratifiés [33]

I.4.3 Les Sandwichs

Les matériaux sandwichs résultent généralement de l'association de deux semelles ou peaux de faible épaisseur, constituées de matériaux à haute résistance et haut module et d'une âme beaucoup plus épaisse et de faible densité. Ils ont pour avantages, une grande rigidité, une résistance à la rupture élevée associées à un faible poids par unité de surface. Malgré une activité de recherche et de développement sur ces matériaux, le comportement au cours de l'endommagement reste peu connu. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique. [34]

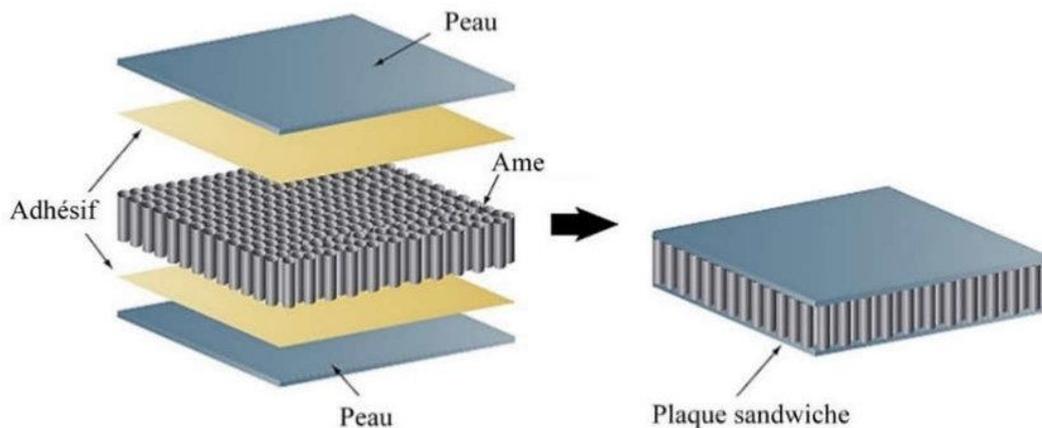


Figure I.13 : Schéma d'un sandwich [35]

I.5 Avantages et inconvénients des matériaux composites

Chaque organe a des avantages et des inconvénients, Voici les avantages et les inconvénients que présentent respectivement les matériaux composites :

- Gain de masse.
- Mise en forme de pièces complexe (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques).
- Grande résistance à la fatigue.
- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion.
- Insensibilité aux produit chimiques « mécanique » comme les graisses, huile, liquides hydraulique, peintures, solvants. [36]

Les inconvénients les plus courants sont :

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température
- Faible résistance aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes
- Prix élevé
- Tenue au choc faible. [37]

I.6 Les secteurs d'application des composites

- Electricité et électronique,
- Bâtiment et travaux publics,
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire), santé (instrumentation médicale),
- Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf, construction navale....).[38]

Chapitre II

Généralité sur les Fibres Naturelles (Abaca/époxyde)

II.1 Généralité sur les fibres naturelles :

II.1.1 Définition

Les fibres naturelles ont été les premières fibres utilisées comme renfort de résine. Elles sont d'origine végétale comme le sisal, le jute, le lin, le coton, le bois, le papier tiré du bois et quelques essais ont été effectués à partir de fibres de différentes arbres ou plantes exotiques comme le cocotier, le choum (palmier d'Afrique), ou bien elles sont d'origine minérale comme les différentes fibres d'amiante ou même animale comme la soie naturelle. Leurs propriétés mécaniques sont modestes. La figure II.1 représente un organigramme de la classification des différentes fibres naturelles [39].

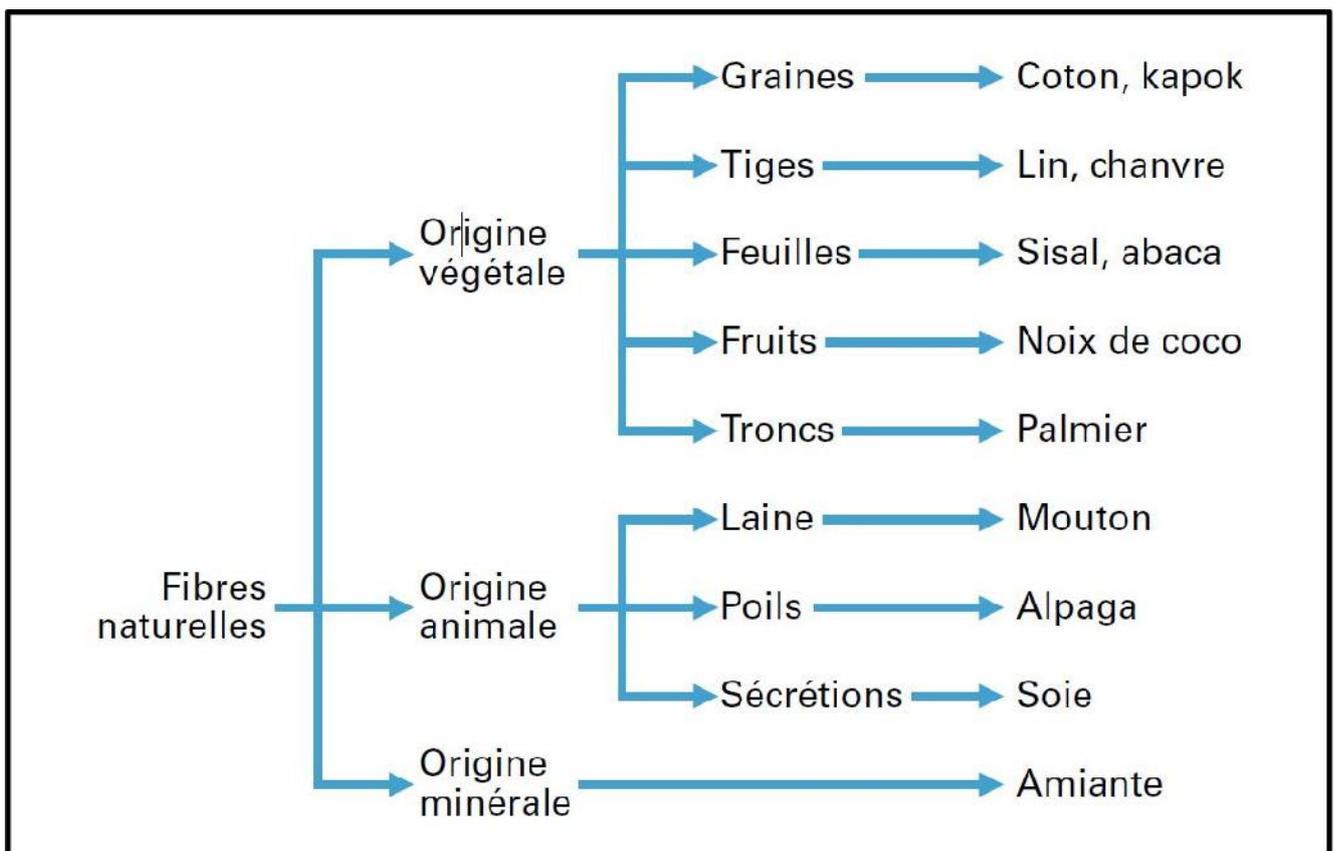


Figure II.1 : Classification des différentes fibres naturelles [40]

II.1.2 Principaux avantages et inconvénients des fibres végétales comme

Renfort des matériaux composites :

Les avantages et les inconvénients des fibres végétales en tant que renfort de matériaux polymères sont présentés Tableau II.1

Tableau II.1 : Les avantages et les inconvénients des fibres végétales [41]

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> ○ Faible coût. ○ Biodégradabilité ○ Neutre pour l'émission de CO₂. ○ Ressource renouvelable. ○ Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité). ○ Non abrasif pour les outillages. ○ Pas d'irritation cutanée lors de la manipulation des fibres. 	<ul style="list-style-type: none"> ○ Absorption d'eau ○ Pour des applications industrielles, nécessite de gestion d'un stock. ○ Fibres anisotropes. ○ Faible stabilité dimensionnelle ○ Renfort discontinu. ○ Faible tenue thermique 200 à 230°C ○ Variation de qualité en fonction du lieu de croissance, des conditions météorologiques.

II.1.3 Avantages des composites renforcés de fibres naturelles :

- Impacts environnementaux plus faibles lors de la production des fibres naturelles ;
- Quantité de fibres plus élevée pour des performances équivalentes ;
- Réduction du poids des structures composites ;
- Crédits de carbone et d'énergie lors de l'incinération des fibres naturelles [42].

II.1.4 Inconvénients principaux :

- Utilisation d'engrais dans la production de fibres agricoles ;
- Les composites renforcés de fibres naturelles pourraient avoir une durée de vie plus faible comparés aux composites renforcés de fibres de verre [43].

II.2. Fibre végétale**II.2.1. 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 [44,45].

II.2.2. Composition et propriétés de différentes fibres végétales :

Tableau II.2 : Composition et propriétés de différentes fibres végétales [46].

<i>Nature des fibres</i>	<i>% de cellulose</i>	<i>Angle micro fibrillaire (dégrée)</i>	<i>Diamètre (µm)</i>	<i>Longueur (mm)</i>
Lin	64 – 71	10	5 - 76	4 – 77
Ramie	83	7.5	16 - 126	40 – 250
Chanvre	78	6.2	10 - 51	5 – 55
Jute	61 – 71	8	25 – 200	-
Sisal	67 – 78	20	7 – 47	0.8 – 8
Noix de coco	43	45	12 - 24	0.3 - 1
Abaca	63 – 68	-	16 - 32	3 -11

II.2.3. Transformation des fibres végétales :

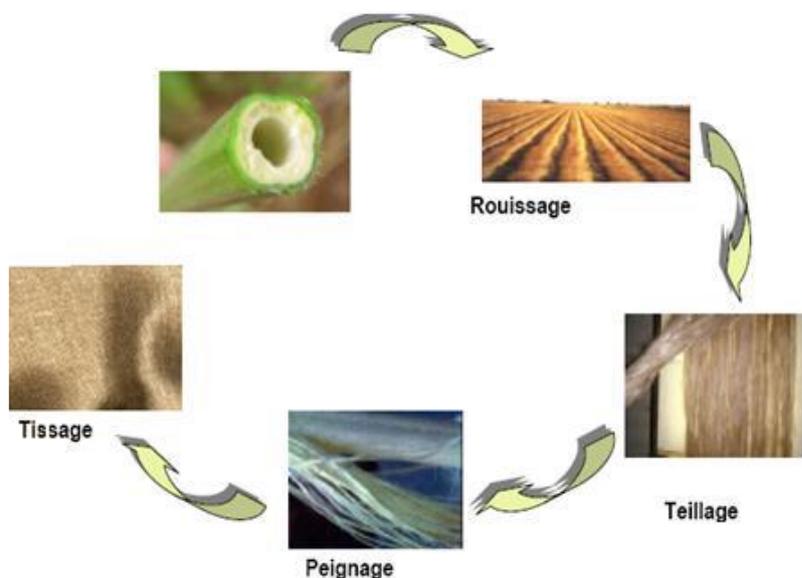


Figure II.2 : Transformation des fibres végétales [47].

II.2.4 Caractéristique mécanique des fibres – Comparatif :

Tableau II.3 : Composition et propriétés de différentes fibres végétales [48]

Fibre	Densité (kg/m ³)	Contrainte de rupt en traction (GPa)	Module de rupt en traction (GPa)	Contrainte spécifique (GPa.m ³ /kg)	Module Spécifique (GPa.m ³ /kg)	Allongement à la rupture (%)	Diamètre fibre élémentaire (µm)
Lin	1.5	1.5	60	1	10	3	20
Chanvre	1.3	0.7	50	0.5	38.5	3	30
Verre E	2.54	2.2	72	0.9	28.3	4.8	3 -30
Verre R	2.48	4.4	86	1.8	34.7	5.4	3-30
Aramide bas module	1.45	3.1	70	2.1	48.3	2	12
Aramide haut module	1.45	3.1	130	2.1	89.7	1	12
Carbone haute ténacité	1.78	2.8	200	1.6	12.4	0.5	8
Carbone haut module	1.8	2.2	400	1.2	222.2	0.5	8
Bore	2.63	3.5	400	1.3	152.1	0.8	100-200
Acier XC10	7.85	1	210	0.1	26.8	8	/
aluminium	2.63	0.4	70	0.2	26.6	/	/

II.2.5 Avantage des fibres végétales

- Faible coût ;
- Biodégradabilité ;
- Ressource renouvelable ;
- Demande peu d'énergie pour être produite ;
- Bonne isolation thermique et électrique ;
- Propriétés mécaniques spécifiques importantes (résistance et rigidité)[49].

II.3 Quelques fibres naturelles et leurs usages

Dans Ce Paragraphe, nous aborderons certaines des fibres naturelles les plus couramment utilisées en science des matériaux pour des applications liées à notre domaine mécanique. Nous citons :

- Le kénaf : c'est une plante herbacée dont la tige peut atteindre 3 m de haut. Il se trouve principalement dans les régions tropicales et en Amérique du sud. La production de kénaf en Europe est rare. Elle destinée uniquement pour le domaine papeterie [50].



Figure II.3 : La plante de kénaf [51]

- Le sisal : il s'agit d'une plante tropicale constituée par une rosette de grandes feuilles, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. il peuvent être utilisé pour fabriquer des tapis dans le cas des usages traditionnels [50].



Figure II.4 : La plante de sisal [52]

- Le lin : c'est une plante annuelle qui pousse dans le monde entier, aussi bien en Asie qu'en Europe. On l'utilise pour des papiers fins comme les papiers à cigarette ou le papier Bible [50].



Figure II.5: La fibre de lin [53]

II.4 Abaca/époxyde

II.4.1 La plante abaca

L'abaca, également nommé chanvre de manille, elle a une importance économique, est une fibre extraite de la gaine des feuilles autour de tronc de l'abaca (*musa textilis*), une espèce proche de bananier originaire des philippines et largement répandue dans les régions tropicales humides. La récolte nécessite une main-d'œuvre importante. Après avoir taillé les tiges en bandes une à une, ont récupéré la pulpe. Les fibres sont ensuite lavées et séchées.

La fibre est utilisée pour fabriquer des ficelles et des cordes. Elle fut cultivée à grande échelle à Sumatra à partir de 1925 par les Hollandais, qui en avaient observé la culture aux philippines, pour servir à la fabrication de cordages.

En moyenne, cette plante croit jusqu'à environ 6m de hauteur [54].



Figure II.6 : La plante de l'abaca [55]

II.4.2 La fibre

L'abaca est une fibre de feuille composée de cellules longues et fines faisant partie de la structure. Sa teneur en lignine est de l'ordre de 15 pour cent. La fibre d'abaca est appréciée pour sa grande résistance mécanique, sa résistance aux dommages causés par l'eau salée et sa longueur allant jusqu'à 3 mètres. Les meilleures qualités d'abaca sont fines, brillantes, de couleur beige clair et très solides [54].

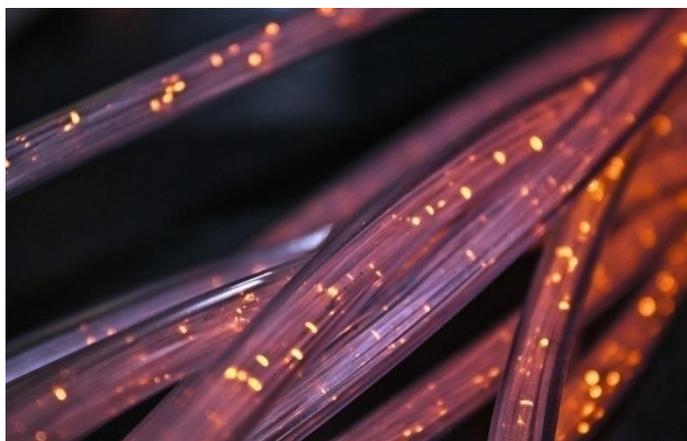


Figure II.7 : La fibre de l'abaca [56]

II.4.3 Traitement alcalin des fibres d'abaca

Les fibres déparaffinées ont été immergées dans une solution de Noah à 6% à température ambiante (30-32) pendant 1h, où le volume total de la solution était de 15 fois le poids des fibres. Les fibres ont été maintenues dans une solution alcaline pendant 36 heures à une température de 30°C; ils ont été soigneusement lavés à l'eau courante puis neutralisés avec une solution d'acide acétique à 2%. Enfin, les fibres ont été à nouveau lavées à l'eau courante pour éliminer les dernières traces d'acide qui y adhèrent, de sorte que le pH des fibres soit d'environ 7.

Ensuite, elles ont été séchées à température ambiante pendant 48 heures pour obtenir des fibres traitées à l'alcalin [57].

II.4.4 Traitement à l'acide acrylique de la fibre

D'abaca traitée à l'alcali a été trempée dans une solution d'acide acrylique (AA) à 1% à 50 % pendant 1h, puis lavée à fond avec de l'eau distillée et séchée dans un four pendant 24h à la température de 70°C [57]

II.4.5 Traitement au permanganate de la fibre d'abaca

Les fibres ont été trempées dans Noah 0 6% pendant à 30 min, puis soigneusement lavées à l'eau distillée. Ces fibres prétraitées à l'alcali ont été traitées avec 0,5% de KMnO₄ dans une solution d'acétone pendant 2 min respectivement, lavées à l'eau et séchées dans un four à 80°C [57].

II.4.6 Avantages pour l'environnement

Intercaler l'abaca dans d'anciennes monocultures et dans les forêts tropicales, en particulier entre les cocotiers, peut contribuer à lutter contre l'érosion et à restaurer la biodiversité. Planter de l'abaca peut également réduire l'érosion et la sédimentation dans les zones carrotières, qui constituent des sites de reproduction importants pour les poissons de mer. Cette plantation permet également d'améliorer la capacité de rétention d'eau du sol et de prévenir les inondations et glissements de terrain. Les déchets de l'abaca sont utilisés comme engrais organique [50].

II.4.7 Les avantages et inconvénients

L'abaca est facile à trouver. Ses fibres sont solides et résistantes. Cette matière est également flexible et est disponible dans dissidentes couleurs. Il est donc possible de fabriquer des meubles ou encore vêtement élégants.

Cette fibre est très fine. Elle doit donc être tressée de manière serrée pour une utilisation dans le domaine mobilier. De plus, ce tressage fin a tendance à retenir les poussières. Il faut donc les aspirer régulièrement [58].

II.4.8 Les usages de l'abaca

Au cours de XIX^e siècle, la fibre d'abaca était souvent utilisée dans le gréement des navires, et transformée en pâte pour fabriquer de solides enveloppes de papier. Aujourd'hui, on la retrouve dans des cordes et ficelles, dans des lignes et filets de pêches, et dans les toiles grossières de certains sacs. Si les vêtements, rideaux, écrans et meubles en abaca sont aujourd'hui des marchés de niche florissants, la fibre est essentiellement utilisée pour fabriquer du papier.

II.4.8.1 Papier

La fibre d'abaca est principalement transformée en pâte pour la fabrication des papiers spéciaux : sachets de thé et de café, boyaux pour saucisses, billets de banque-les billets de yen japonais contiennent jusqu'à 30 pour cent d'abaca-, papiers à cigarette, papiers d'emballage alimentaires et médicaux, papiers pour produits jetables, papiers à lettre de qualité supérieure, sacs d'aspirateurs, etc.



Figure II.8 : Papier de l'abaca [59]

II.4.8.2 Automobile

Dans l'industrie automobile, l'abaca est aujourd'hui principalement utilisé pour le rembourrage des garnitures intérieures et des sièges. Sa forte résistance à la traction lui permet également d'entrer dans la composition de plastiques renforcés venant remplacer la fibre de verre dans les composants extérieurs semi-structurels.

C'est ainsi que Mercedes Benz a mélangé résine thermoplastique de polypropylène et fibre d'abaca dans différentes pièces de carrosserie. Remplacer la fibre de verre par de la fibre naturelle permet de réduire le poids des pièces et rend leur production et leur recyclage plus écologiques.

Grace à sa très grande résistance mécanique et à sa longueur, la fibre d'abaca offre de riches possibilités d'application industrielles, même pour les composants soumis aux plus hautes contraintes.

II.4.8.3 Producteurs

Les philippines sont le principal producteur d'abaca, qui est cultivé sur 130 000 hectares par quelque 90 000 petits exploitants. D'autres pays d'Asie du sud-est cultivent également cette fibre, mais le deuxième principal producteur est l'Équateur, caractérisé par de grandes plantations et une mécanisation croissante.

II.4.8.4 Production et commerce

en 2010, les philippines ont produit 57 000 tonnes de fibre d'abaca et l'Équateur 10 000 tonnes. La valeur de la production mondiale est estimée à 60 millions d'USD par an. La production est essentiellement destinée à l'exportation, principalement à destination de l'Europe, du Japon et des États-Unis. Les philippines exportent de plus en plus sous la forme de pulpe plutôt que de fibre brute.

II.4.9 Perspectives du marché

L'abaca offre de riches possibilités pour remplacer la fibre de verre dans de nombreuses pièces automobiles et c'est aujourd'hui une matière première reconnue pour les produits de papier. Même si l'abaca est aujourd'hui principalement cultivé aux philippines, on pourrait augmenter l'offre si d'autres pays des zones tropicales et humides se lançaient dans cette filière. Les connaissances et l'expérience acquise en matière de production de transformation pourraient facilement être transmises à d'autres pays. [50]

II.5 Epoxyde

Les **époxydes** sont des éthers à trois membres dont la structure en anneau à forte contrainte contient deux atomes de carbone et d'oxygène (par ex., oxyde d'éthylène)

En raison de la contrainte sur la structure, les époxydes sont très réactifs et représentent un groupe fonctionnel précieux pour effectuer une grande variété de réactions.

Par conséquent, les époxydes sont très utiles dans la synthèse des polymères, des composés en pharmaceutiques et des produits de chimie fine. Parmi les époxydes communs se trouvent deux produits chimiques de base, l'oxyde de propylène(PO) et l'oxyde d'éthylène(OE), qui comptent un certain nombre d'applications [60].

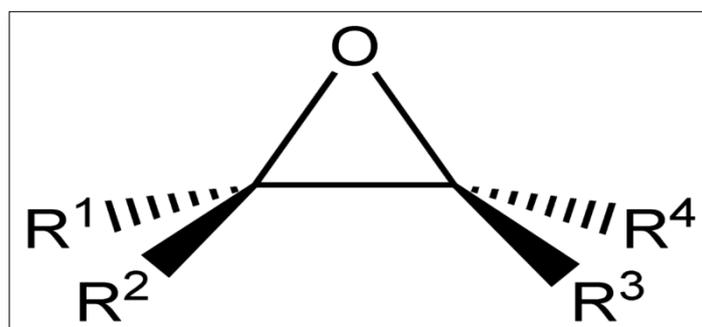


Figure II.9 : La structure de l'époxyde [61]

II.5.1 Oxyde de propylène (PO)

Le PO est utilisé comme réactif dans la production du polyuréthane. L'époxyde est converti en polyol, puis on le fait réagir avec les iso cyanates pour former le polyuréthane. Le PO est également converti en glycol polypropylénique via une polymérisation par ouverture de cycle.

En grande quantité, l'oxyde de propylène est préparé soit par chlorhydratation ou oxydation de peroxyde organique [60].

II.5.2 Oxyde d'éthylène(OE)

L'OE est utilisé pour synthétiser l'éthylène glycol, dont les nombreuses applications incluent l'utilisation en tant qu'antigel et la production de polymères, tels que le polyester et le polyéthylène téréphtalate. L'oxyde d'éthylène gazeux est utilisé dans les applications médicales en tant qu'agent stérilisant pour les instruments chirurgicaux.

L'oxyde d'éthylène peut être préparé en vrac par chlorhydratation ou, plus récemment, par réaction de l'oxygène avec le propylène à température et pression élevées en présence d'un catalyseur [60].

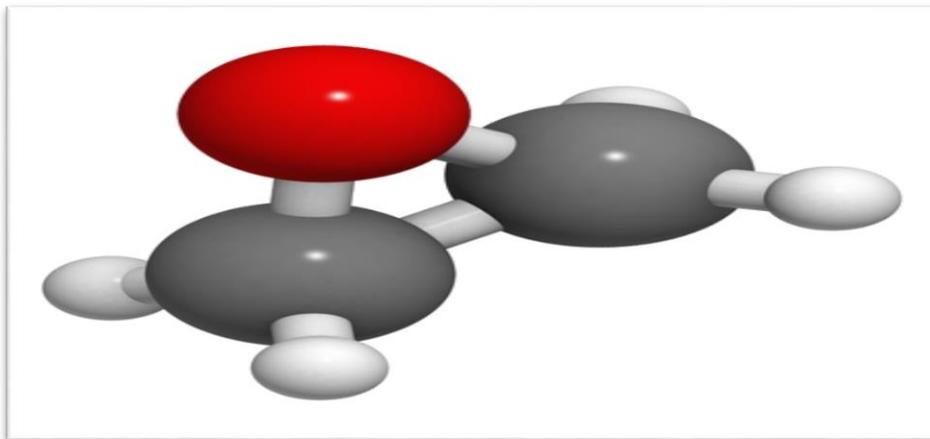


Figure II.10 : Oxyde d'éthylène(OE) [62]

II.5.3 Réaction des époxydes

La structure de l'époxyde oxyde d'éthylène fournit un groupe très fonctionnel pour les synthèses organiques. L'ouverture des anneaux d'époxyde pouvant être effectuée via le mécanisme qui a lieu, qui dépend lui-même des variables de la réaction. L'ouverture d'anneau S_N2 est initiée par un nucléophile basique fort. Par exemple, si le nucléophile est un acide oxyde ou un réactif de grignard, un alcool substitué ou du glycol se forme

Un époxyde subit une ouverture S_N1 en présence d'eau si la réaction est catalysée par acide, ce qui entraîne là encore la formation d'un alcool substitué.

Parmi les autres nucléophiles qui peuvent ouvrir un époxyde, citons les molécules contenant des groupements amines et mercapto. Les époxydes réagissent avec les éléments suivants :

- L'ammoniac pour former des B- hydroxy amines ;
- Les thiols pour former des B-hydroxy mercaptans ;
- Les alcools pour former des B-hydroxy-éthers ;
- Les groupes cyano pour former des nitriles ;
- Les amines primaires ou secondaires pour former des amines secondaires ou tertiaires, respectivement ;
- La triphénylphosphine, pour former des oléfines ;
- Les ylures de phosphore pour former des cyclopropanes. [60]

II.5.4 Les résines époxydes [63]

Les résines les plus utilisées après les résines polyester 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 polyester).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (construction aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées.

Toutefois, pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de recuit très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), et à des températures qui sont relativement élevées (50 à 100 °C).

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons :

- De bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters.
- Une bonne tenue aux températures élevées : 150°C à 190°C
- Une excellente résistance chimique
- Un faible retrait au moulage (de 0.5 à 1 %).
- Une très bonne mouillabilité des renforts.
- Une excellente adhérence aux matériaux métalliques.

Parmi les inconvénients, nous citerons:

- Un temps de polymérisation long
- Un coût élevé
- La nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre
- Une sensibilité à la fissuration [64].

Tableau II.4 : Caractéristique des résines thermodurcissables [65]

Résines époxydes renforcées avec des fibres naturelles Gassan [65] a étudié le vieillissement des

Résine	T _f (°C)	P (Kg/m ²)	ε ^{Rt} (%)	σ ^{Rt} (MPa)	σ ^{Rc} (MPa)	E (GPa)
Polyesters	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2,8 à 3.6
Phénoliques	120	1200	2,5	40	250	3 à 5
Epoxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

composites qui se caractérise par l'apparition de fissures.

Ces fissures dépendent de la ductilité et du type de matrice, ainsi que du module de la fibre. L'humidité se disperse dans le composite et augmente les fissures entre les fibres et la matrice. Les mesures montrent une réduction progressive de la résistance et de la dureté avec une augmentation d'humidité dans le matériau.

L'effet de l'humidité influence:

- a) La viscoélasticité de la matrice chargée de fibre;
- b) L'atténuation de la thermo élasticité;
- c) L'atténuation de la friction de Coulomb due au glissement;
- d) L'énergie de dissipation et l'amorce de fissure ou du délaminage.

Chapitre III
Modèle de Rupture
Longitudinale Avec
Résultats et Discussion

Chapitre III Modèle de Rupture Longitudinale Avec Résultats et Discussion

III.1 INTRODUCTION

L'évolution de rupture des composites naturels renforcés de fibres est un phénomène complexe d'accumulation de dommages microstructuraux. Contrairement aux matériaux fragiles homogènes, les matériaux unidirectionnels ne contiennent pas de populations de défauts préexistants qui pourraient provoquer une rupture soudaine du matériau. Lorsque les composites sont chargés, une accumulation de fibres naturelles et une défaillance de la matrice se produisent. Ce sont des pannes critiques Lors d'un chargement mécanique d'un matériau composite, des microfissures apparaissent dans la matrice, des fibres se rompent (rupture fragile), des décohésions se créent aux interfaces, des plastifications apparaissent sans entrainer la ruine du matériau. Les processus de rupture des composites sont donc d'une grande différence et ne peuvent être décrits que si l'on connaît les états suivantes :

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

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

III.2 RUPTURE LONGITUDINALE AVEC EFFET ENVIRONNEMENTAL.

Sous l'effet environnemental des composites 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 [66-67]. Pour introduire l'effet de la concentration d'humidité et la température sur les propriétés mécaniques, Tsai [68] a proposé la température non-dimensionnelle T^* , qui est le principal paramètre pour évaluer les caractéristiques hygrothermiques du composite.

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

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

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

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

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

Chapitre III Modèle de Rupture Longitudinale Avec Résultats et Discussion

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

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

Le modèle utilisé dans cette étude pour l'estimation de la résistance d'un composite unidirectionnel est celui de Gao et de Reifsnider [5]. 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 généralement avec le changement de longueur inefficace dans la région de rupture des fibres et la concentration de contrainte correspondante des fibres intactes adjacentes. La longueur non stable est généralement définie comme la longueur entre le point de rupture de la fibre et le moment où la fibre retrouve sa capacité à supporter la charge complète. Lorsque la contrainte de cisaillement à l'interface atteint, une fissure se produit à l'interface. Cette hypothèse est soutenue dans la littérature, citant une similitude où il a été constaté que pour des températures de résine élevées, la résistance au cisaillement à l'interface composite est proche de celle de la matrice en bloc [69].

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 naturelles cassées et leurs voisins dans cette région. 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 $\eta = 1$. On suppose encore que le noyau cassé peut être assimilé à un matériel homogène avec une section transversale circulaire dont le module de Young peut être obtenu par la règle de mélanges:

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

Où A correspond à la surface, et E correspond au module de Young équivalent. Les propriétés substituées avec f se rapportent à des propriétés de la fibre tandis que celles qui sont substituées avec m se rapportent à des propriétés de matrice et c_c représente l'indice d'humidité absorbée. Comme il vient d'être cité auparavant, des endommagements locaux sont inclus dans le modèle par l'introduction d'une zone de décollement et de plasticité locale, où la contrainte de cisaillement de la matrice et de l'interface est considérées comme constante pour la valeur $\eta\tau_0$. Les équations d'équilibre dans la zone ($0 \leq x \leq a$) [70]:

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

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

Chapitre III Modèle de Rupture Longitudinale Avec Résultats et Discussion

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.1).

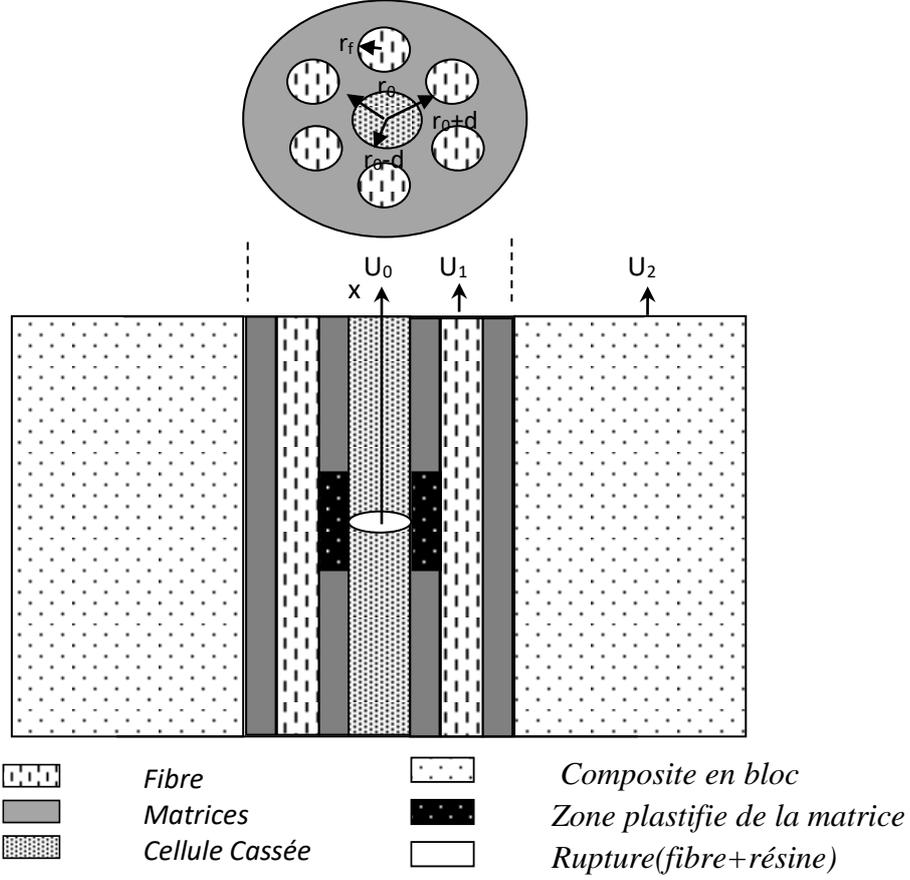


Figure III.1 : Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes.

Nous 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 (8) et (9) s'écrivent comme suite :

$$U_0(x) = \frac{\eta \tau_0}{r_0 E_1} x^2 + C_0 \quad (8)$$

$$U_1(x) = C_1 (e^{\lambda_1 x} - e^{-\lambda_1 x}) + \frac{2r_0 \eta \tau_0}{(R_2^2 - r_0^2) E} \frac{1}{\lambda_1^2} (1 - e^{-\lambda_1 x}) + \frac{\sigma_c}{E_c} x \quad (9)$$

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

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

E_1 est le module des fibres adjacentes intactes donnée par :

Chapitre III Modèle de Rupture Longitudinale Avec Résultats et Discussion

$$E_1 = \frac{E_f A_f + E_m A_m}{A_f + A_m} \quad (10)$$

De même, pour la région $a \leq x \leq \infty$ où aucun écoulement n'aura lieu à l'interface, les équations d'équilibre sont [70] :

$$E\pi(r_0 - d)^2 \frac{d^2 U_0}{dx^2} + 2\pi r_0 \frac{G_m}{2d} (U_1 - U_0) = 0 \quad (11)$$

$$n_i A_f E_f \frac{d^2 U_1}{dx^2} + 2\pi(r_0 + 2d + 2r_f) \frac{G_m}{2d} (U_2 - U_1) - 2\pi r_0 \frac{G_m}{2d} (U_1 - U_0) = 0 \quad (12)$$

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

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= \bar{U}_0 e^{-\gamma x} \\ U_1 &= \bar{U}_1 e^{-\gamma x} \\ U_2 &= \frac{\sigma_c}{E_c} x \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

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

$$U_0(x) = C_2 e^{-\sqrt{\gamma_1} x} + C_3 e^{-\sqrt{\gamma_2} x} + \frac{\sigma_c}{E_c} x \quad (14)$$

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

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

Ou γ_1 , A, B et D sont des équations algébriques:

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

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

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

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

Chapitre III Modèle de Rupture Longitudinale Avec Résultats et Discussion

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

Ce concept est illustré sur la figure III.2, où σ_f dans la figure est la contrainte de la fibre.

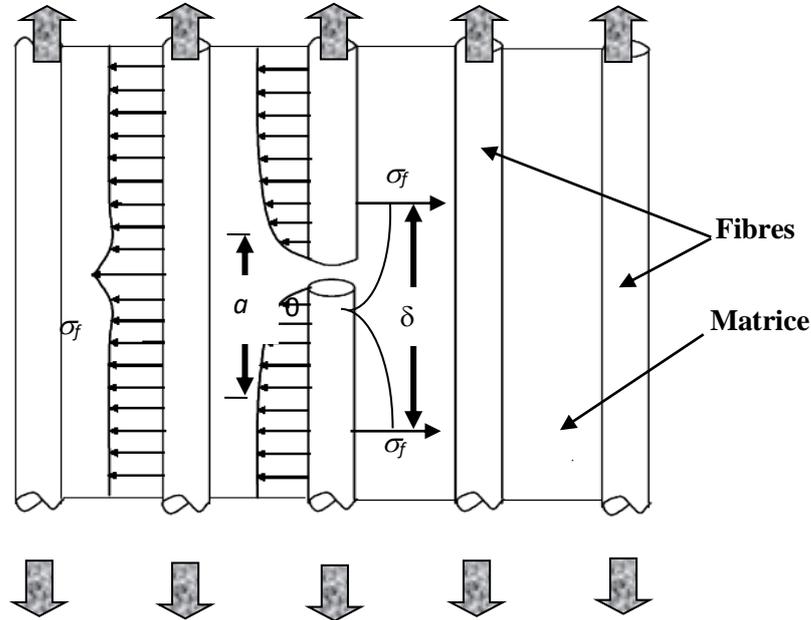


Figure III.2 : Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace.

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 :

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

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

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

Pour mettre en valeur le modèle analytique présenté, nous avons effectué des applications sur un échantillon. Les caractéristiques mécaniques et géométriques sont regroupées respectivement aux tableaux III.1 et III.2, ces données sont tirées de [71]. Pour apprécier l'évolution de l'endommagement aux zones localement plastifiées, nous avons procédé à une augmentation progressive de la charge extérieure de 0.5σ , 0.7σ et 0.9σ (presque le chargement complet). 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. Par la suite, nous allons déterminer l'évolution du déplacement longitudinal des fibres cassées et intactes en fonction du chargement appliqué à notre échantillon.

Chapitre III Modèle de Rupture Longitudinale Avec Résultats et Discussion

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

Module de Young de la fibre E_f	15.1Gpa
Module de Young de matrice E_m	2.323Gpa
Contrainte de cisaillement τ_0	15.2Mpa
Coefficient de Poisson de la matrice ν	0.43
Fraction Volumique des fibres V_f	0.5
Paramètre de cisaillement η	1.0
Température de transition vitreuse dans un milieu sec T_g^0	160°C
Humidité absorbée c	0.01
Température d'utilisation, T_{opr}	20°C à 120°C
Température de référence T_{m}	20°C à 24°C

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

Longueur de l'échantillon L	200mm
Largeur de l'échantillon W	0.025mm
Epaisseur de l'échantillon t	0.005mm
Rayon de la fibre r_f	0.000020 mm
Nombre maximal de fibres cassées n_i	43

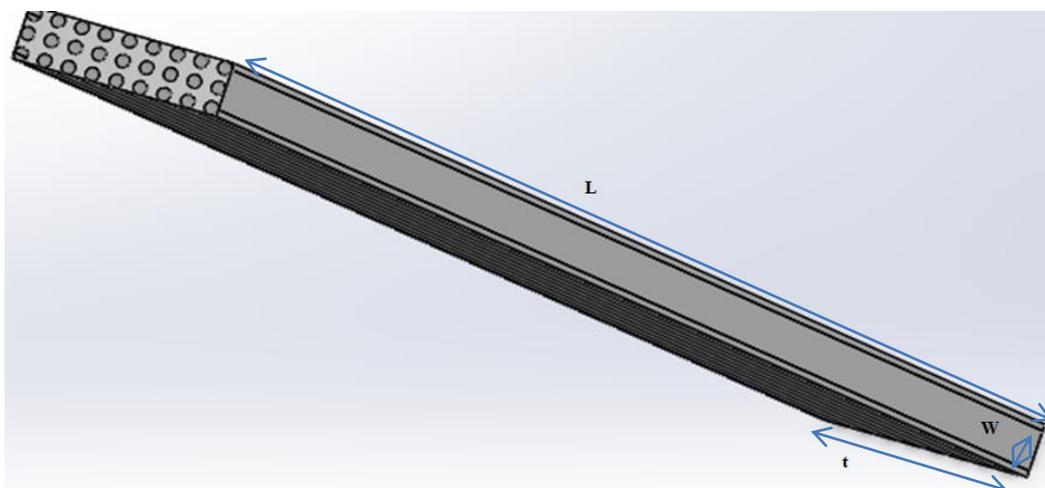


Figure III.3: Géométrie d'un échantillon

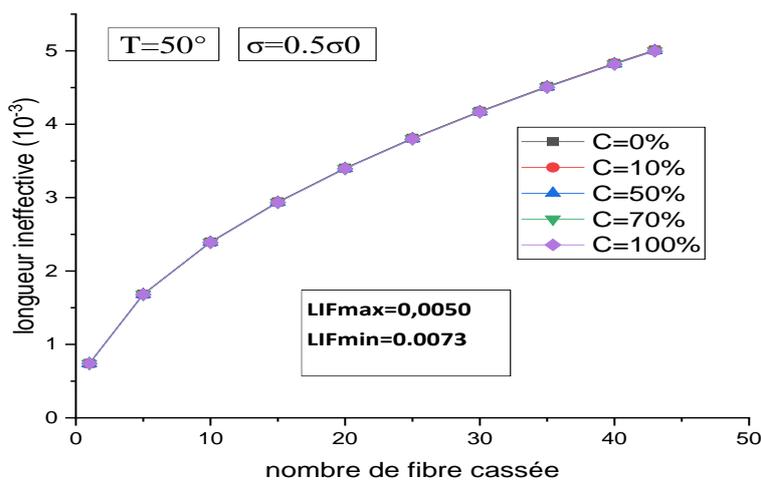
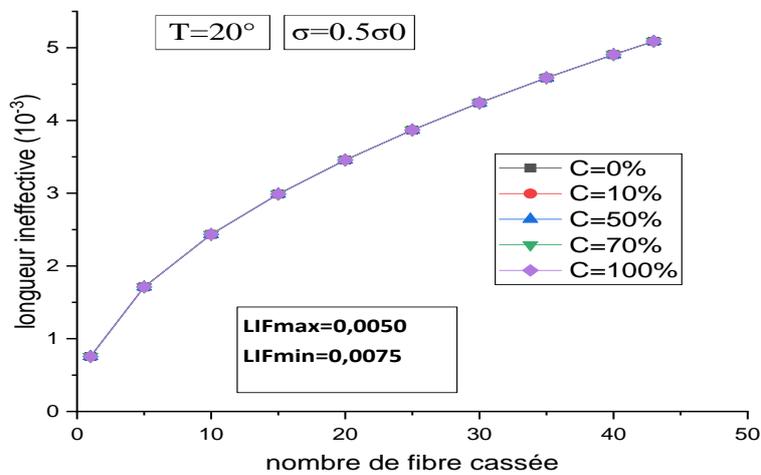
III.3 Résultats et Discussions

Les résultats réunis pour la fibre Abaca, une analyse du processus de la rupture longitudinale incluant les interactions micromécaniques entre la fibre naturelle Abaca et la matrice en époxyde. Puisque la contrainte responsable de la cassure d'une fibre est suffisamment importante, elle peut être transmise à la fibre voisine adjacente par l'intermédiaire de la matrice, en créant tout d'abord une zone localement plastifiée puis une probable rupture

III.3.1 Evaluation de longueur inefficace

Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la charge de traction appliquée ($0.5\sigma_0$, $0.7\sigma_0$ et σ_0) pour différentes concentrations d'humidités et températures.

III.3.1.1 charge de traction appliquée $\sigma=0.5\sigma_0$, avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et de la température de $T = 20^\circ\text{C}$, à 120°C .



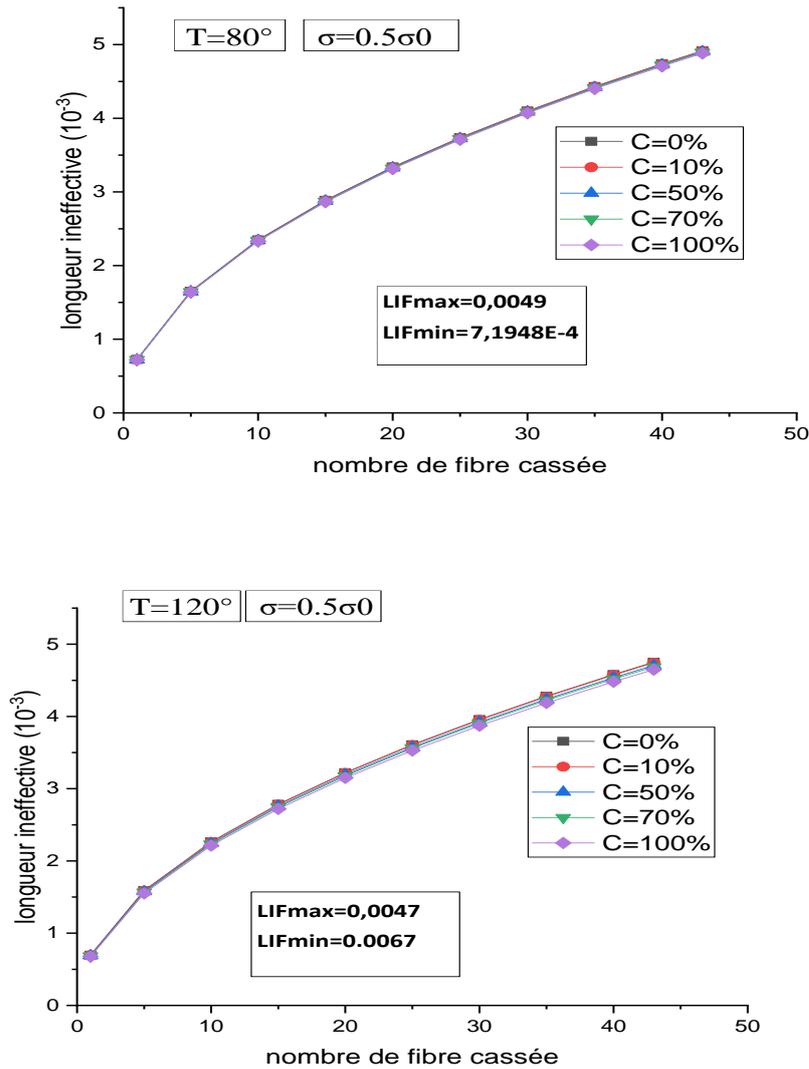
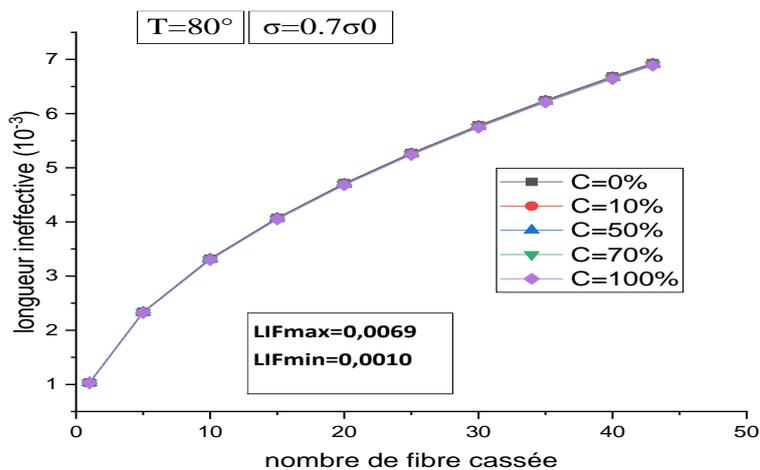
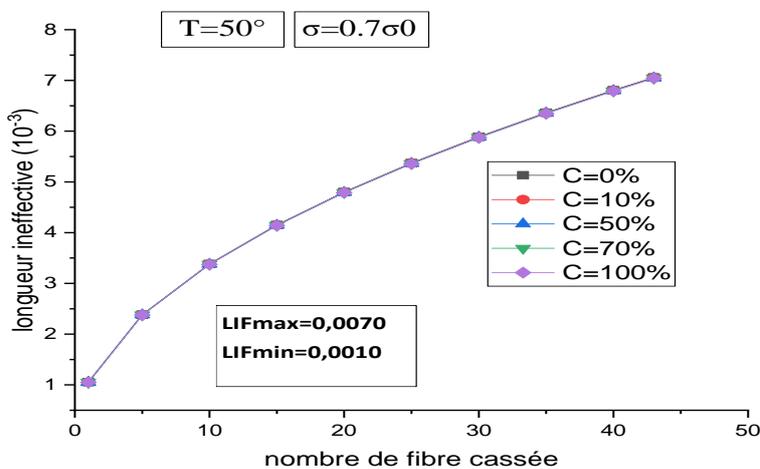
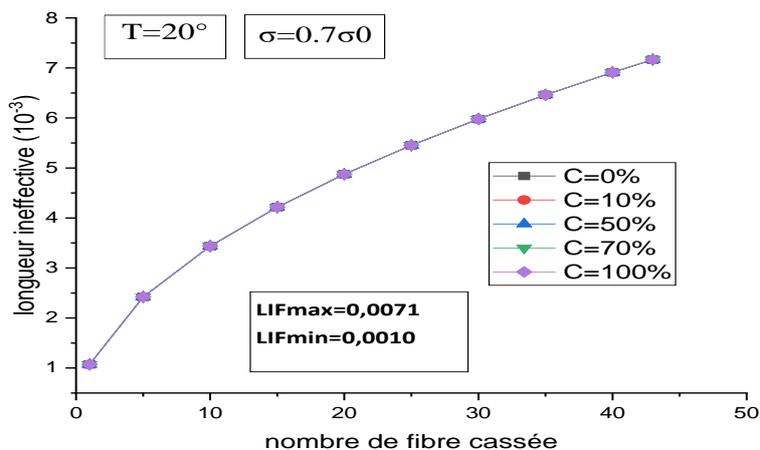


Figure III.4 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et pour une température de 20° à 120°, pour une charge de traction appliquée $\sigma=0.5\sigma$

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 °C, à 120 °C. Les figures III.4, nous pouvons clairement voir une superposition de toutes les courbes représentatives de la longueur inefficace. Nous pouvons en déduire que pour les basses températures, la variation de la concentration d'humidité n'a pas d'effet sur la longueur inefficace. Avec l'augmentation de la température à partir de 80 °C à 120 °C, la sensibilité de la longueur inefficace à une variation de la concentration d'humidité devienne toujours moins importante. À T = 120 °C, la longueur inefficace pour 43 fibres cassées qui est de 0.005 mm pour C = 0% sera 0.0047 mm à C = 100%. Nous pouvons donc en déduire que la température est un facteur plus au moins important pour la valorisation de la longueur inefficace, car elle génère une dégradation des caractéristiques mécaniques et elle active le processus de diffusion d'humidité.

Chapitre III Modèle de Rupture Longitudinale Avec Résultats et Discussion

III.3.1.2 charge de traction appliquée $\sigma=0.7\sigma_0$, toujours avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et de la température de $T = 20\text{ }^\circ\text{C}$, à $120\text{ }^\circ\text{C}$.



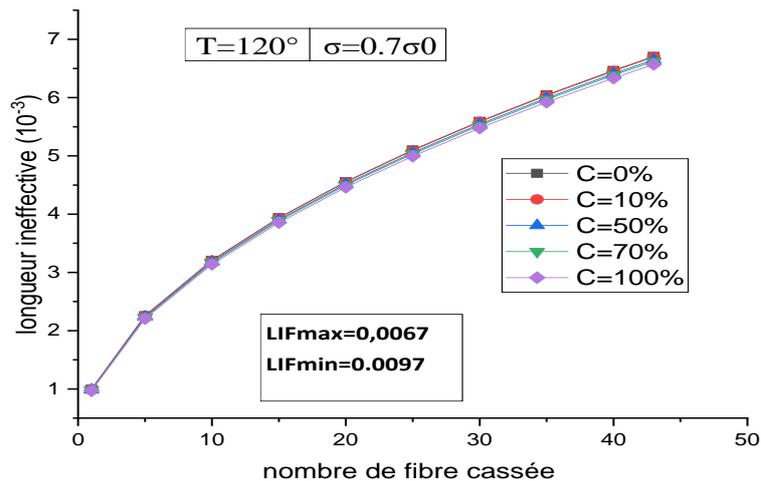
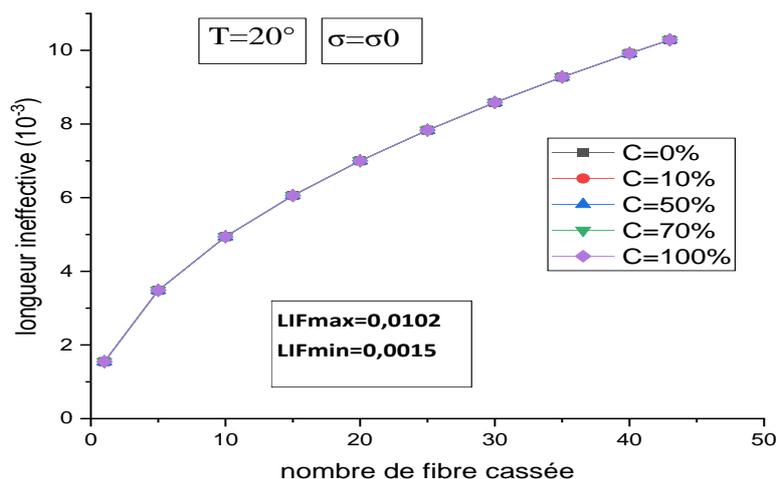


Figure III.5 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et pour une température de 20° à 120°, pour une charge de traction appliquée $\sigma = 0.7\sigma_0$

Pour la suite du travail nous avons évolué 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 °C, à 120 °C, mais cette fois-ci on a augmenté le chargement à 0.7σ₀. Pour les figures III.5 on remarque qu'il y a toujours une superposition de toutes les courbes représentatives de la longueur inefficace mais avec une nette augmentation de la longueur inefficace.

III.3.1.3 charge de traction appliquée $\sigma = \sigma_0$, avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et de la température de T = 20 °C, à 120 °C.



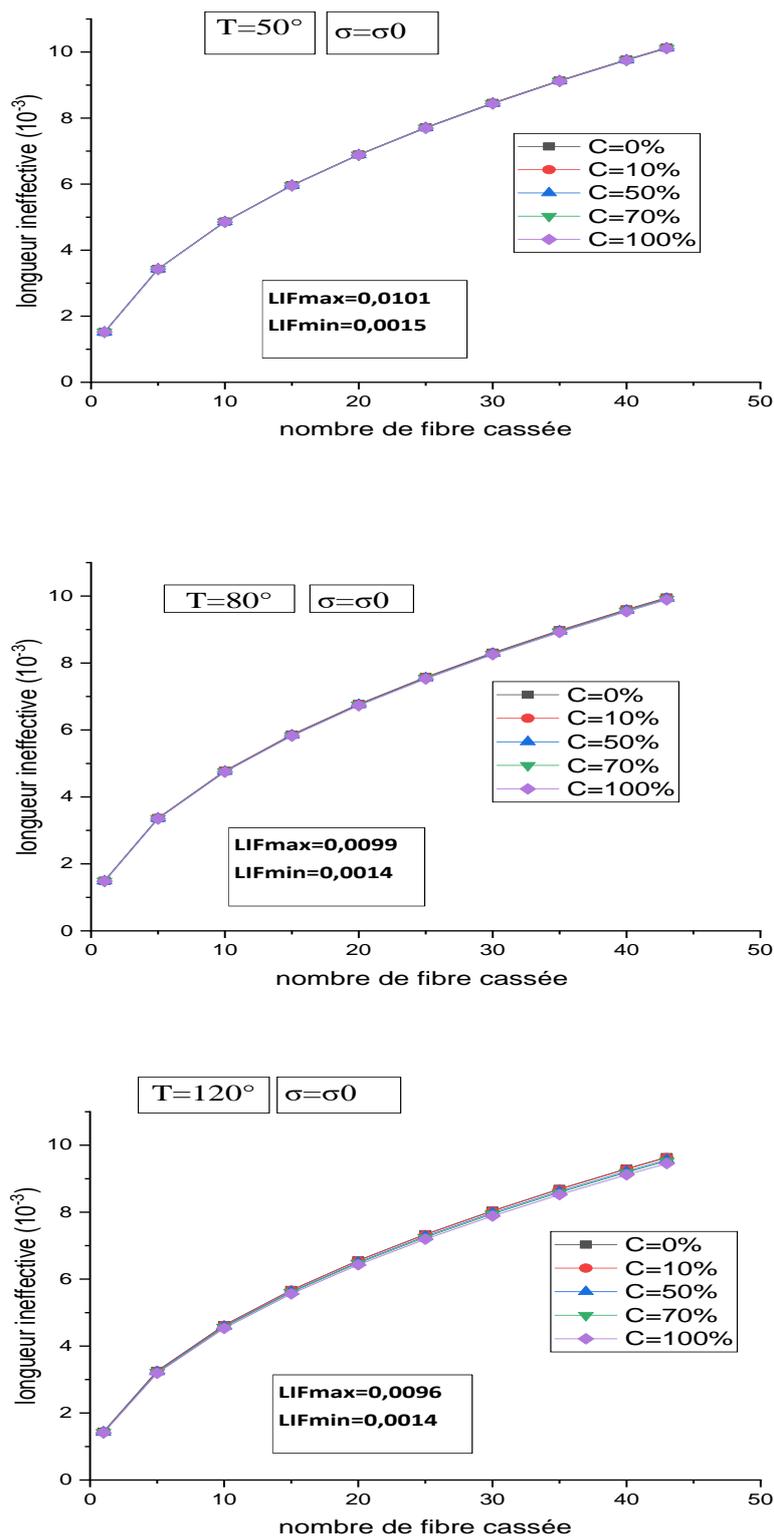


Figure III.6 : Evolution de la longueur inefficace en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité de 0% à 100% et pour une température de 20° à 120°, pour une charge de traction appliquée $\sigma = \sigma_0$

Nous pouvons clairement voir une superposition de toutes les courbes représentatives de la longueur inefficace même avec le chargement complet $\sigma = \sigma_0$. Nous pouvons en déduire que pour les basses températures, la variation de la concentration d'humidité n'a pas d'effet sur la longueur inefficace. Avec

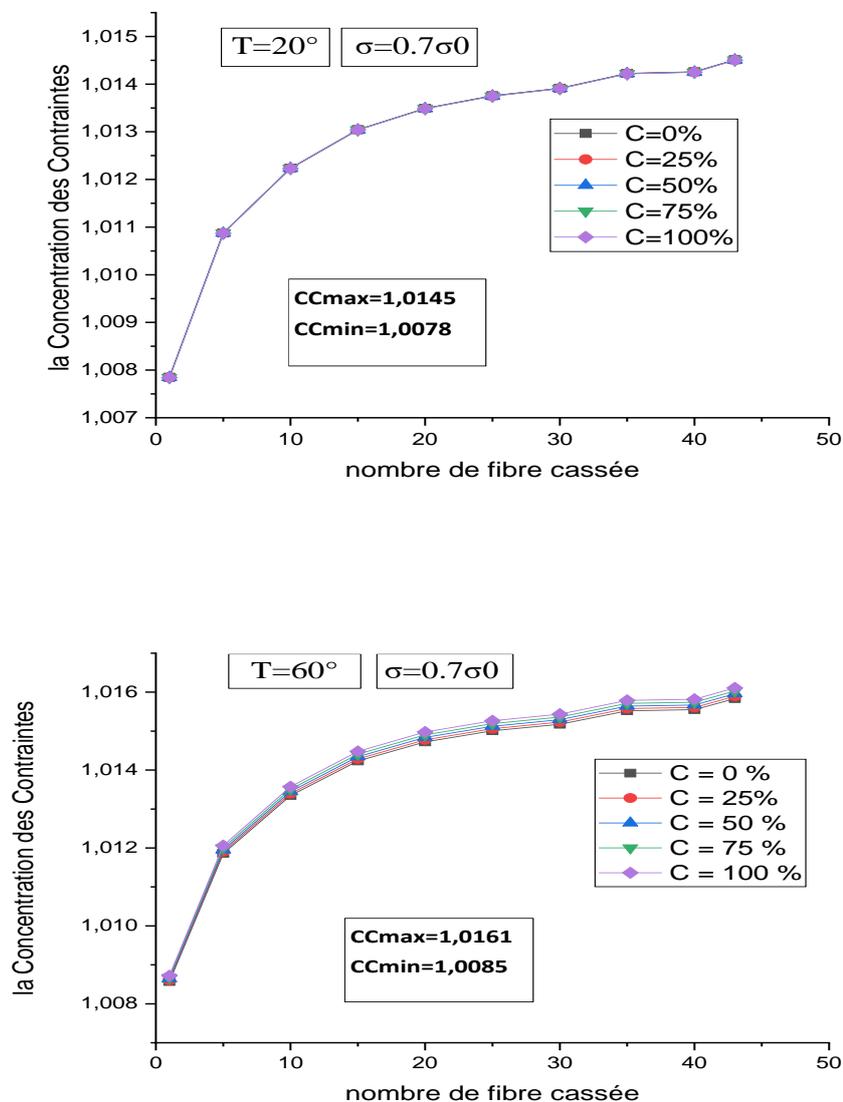
Chapitre III Modèle de Rupture Longitudinale Avec Résultats et Discussion

l'augmentation de la température jusqu'à 120 ° C et avec $\sigma=\sigma_0$, la sensibilité de la longueur inefficace devienne importante en fonction des cassures des fibres.

III.3.2 Evaluation de la concentration de contrainte

L'estimation de la longueur inefficace, 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 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.

III.3.2.1 Pour Variation de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité et de la température pour un chargement $\sigma=0.7\sigma_0$.



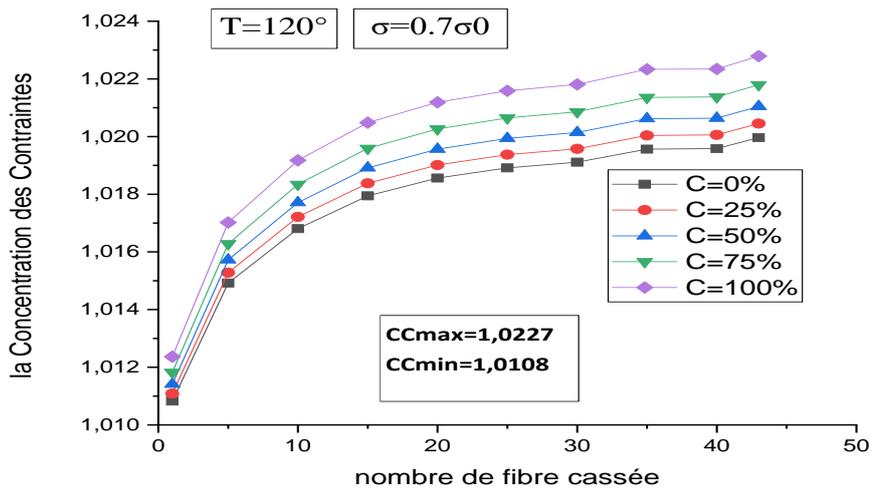
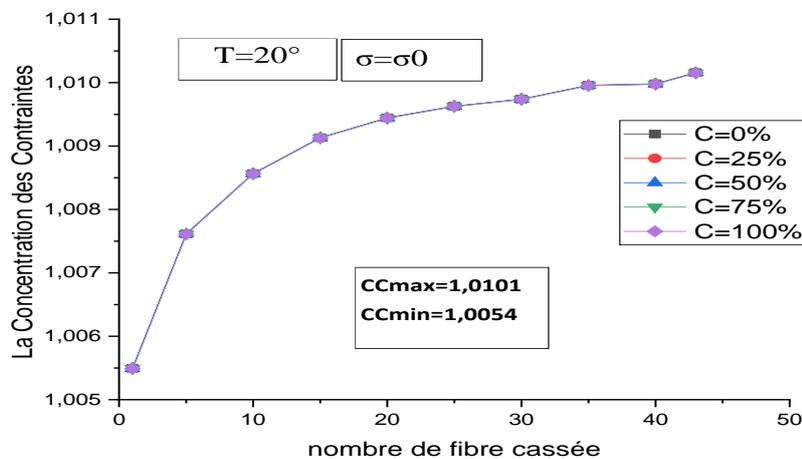


Figure III.7 : Evolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité ($T = 20, 60$ et $120^\circ C$ et $\sigma = 0.7\sigma_0$)

Pour illustrer l'effet des conditions environnementales sur la dégradation de la région inefficace entourant par les fibres cassées, nous avons présenté aux figures III.7 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 $T = 20^\circ C$, $60^\circ C$ et $120^\circ C$, sous l'effet d'une contrainte extérieure appliquée égale à 0.7. Dans les figures suivantes, 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 figure pour $T=20^\circ$. Par la suite l'effet de la concentration d'humidité devient de plus en plus important avec l'augmentation de la température de $60^\circ C$ à $120^\circ C$ une distinction claire apparaît entre toutes les courbes.

III.3.2.2 Pour Variation de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la concentration d'humidité et de la température pour un chargement complet $\sigma=\sigma_0$.



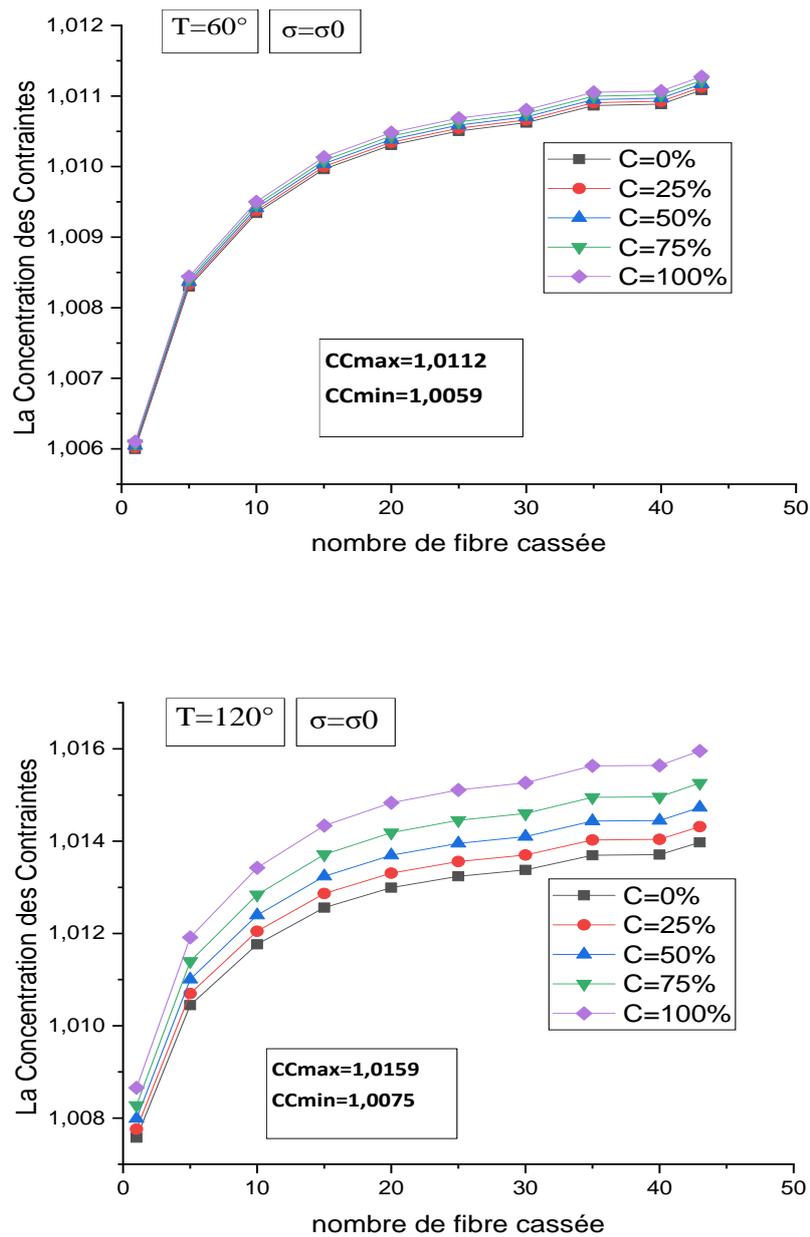
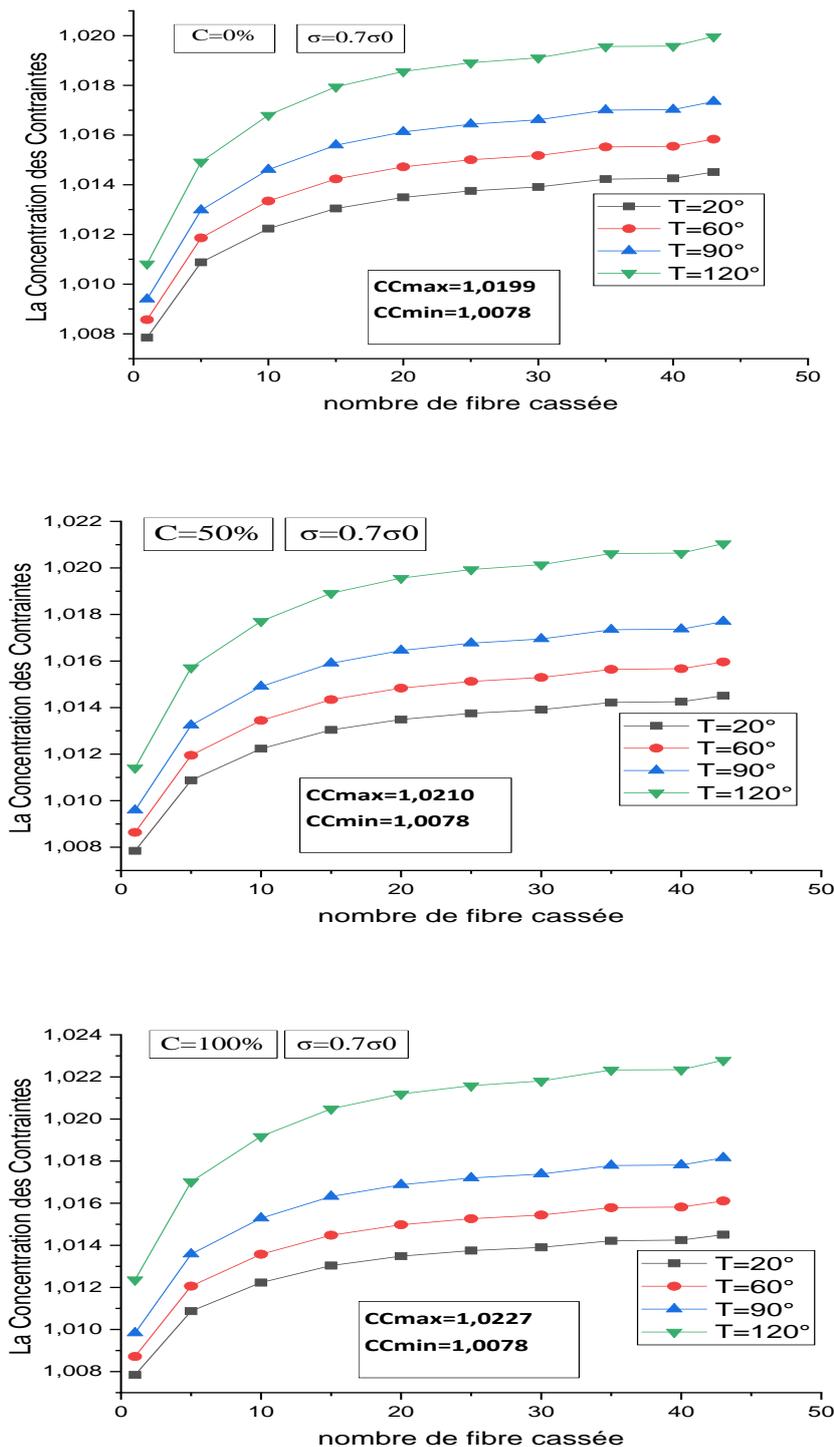


Figure III.8: Evolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive d'humidité croissante et ($T = 20, 60$ et $120^\circ C$ et $\sigma = \sigma_0$)

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

III.3.2.3 Variation de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la température et pour des concentrations d'humidité ($C=0, 0.5$ et 1) et un chargement complet $\sigma=\sigma_0$



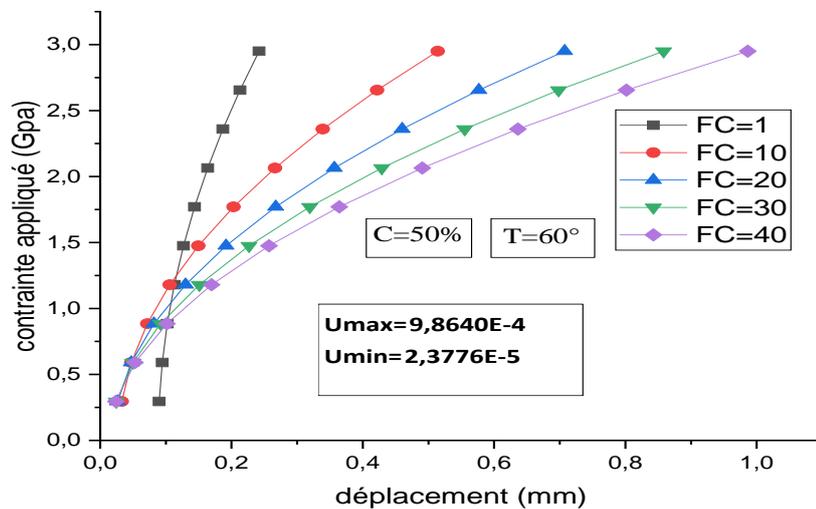
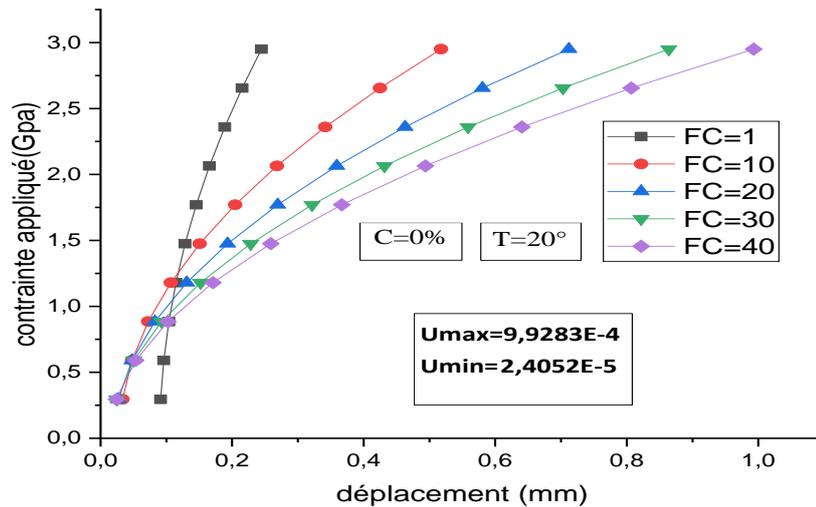
Figures III.9: Evolution de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées avec une variation progressive de la température et concentration d'humidité ($C=0.1, 0.5$ et 1 avec $\sigma = 0.7\sigma_0$)

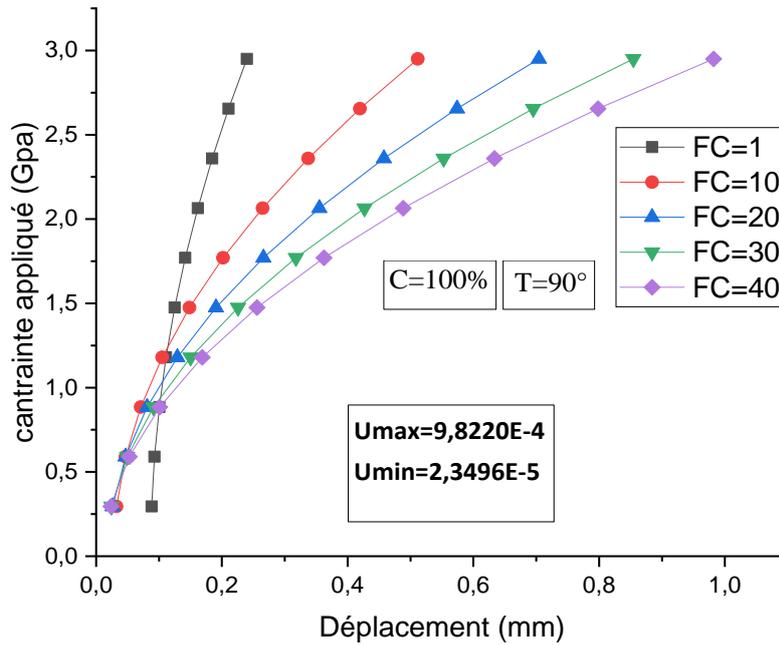
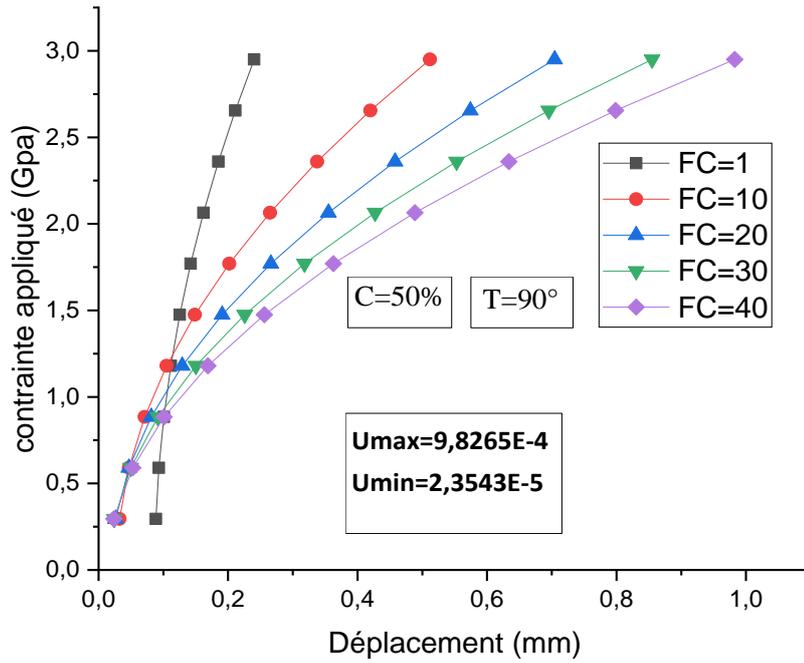
Dans les figures III.9 suivantes, la concentration de contraintes devient plus importante avec l'augmentation du nombre de fibres cassées. Par la suite, cette concentration devient relativement stable si le nombre de fibres est très grand, d'autre part la variation de température elle n'a aucune influence sur la concentration de contrainte.

Chapitre III Modèle de Rupture Longitudinale Avec Résultats et Discussion

III.3.3 Evolution du Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée avec une progression constante d'humidité et de la température

Les figures III.10 représentent la variation du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée. De cette figure, on peut dire que le déplacement augmente en fonction de la contrainte de traction appliquée aux bords de l'échantillon. Le déplacement croît plus rapidement avec l'augmentation du nombre de fibres cassées. Cette croissance est marquée par une divergence assez distinctive entre les différentes courbes de ces figures





Figures III.10 : Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée, avec une progression constante d'humidité et de la température.

Conclusion

L'objectif de cette étude était d'assurer un moyen très explicite pour suivre l'endommagement progressif d'un composite unidirectionnel, et d'analyser le phénomène de transfert de charges qui a lieu lors de la rupture longitudinale du matériau composite. Pour cela, nous nous sommes focalisés, en premier lieu, sur le processus de rupture des composites unidirectionnels à renforts fragiles et à matrice ductile (largement utilisés dans les applications industrielles). En se plaçant à l'échelle micromécanique et en analysant le processus de la rupture de ces composites, certains paramètres influant sur la propagation de la rupture ont pu être identifiés tel que la longueur inefficace le long des fibres cassées, ainsi que le facteur de concentration de contrainte aux fibres cassées et aux fibres voisines puisque la transmission de la contrainte d'une fibre à l'autre passe par la matrice. La détermination du facteur de la concentration de contrainte, nous a permis d'avoir une idée plus claire sur l'évolution de la rupture des fibres et la probabilité d'endommagement des fibres voisines adjacentes. On a constaté aussi que le voisinage de l'endroit de rupture est caractérisé par une zone localement plastifiée qui deviendra élastique en éloignant de cette zone. D'où, une forte concentration de contraintes est localisée au point de fissures de la fibre. Cette dernière devient moins importante en s'éloignant de la zone plastique.

Sous l'effet d'une variation simultanée de la température et la concentration d'humidité, la zone plastique et la région inefficace deviennent plus larges en fonction du nombre de fibres cassées et par la suite elles deviennent critiques sous les conditions d'environnements extrêmes. L'évolution du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée ou 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. Les résultats obtenus ont montré aussi que la résistance des fibres en Abaca et le module de Young sont relativement insensibles aux conditions environnementales.

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 composites unidirectionnels à base de fibre Naturelle et plus précisément l'effet de l'humidité et de la température sur les dégradations des composites aux interfaces matrice-fibres.

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

Bibliographie

- [1] C.M.Boyer. « Composites unidirectionnels : modèles probabilistes de rupture et évaluation de la fiabilité». Thèse d'université, Blaise Pascal, 1997.
- [2] R. M. Christensen. Mechanics of composite materials. Krieger publishing company, Malabar, Florida, 1991.
- [3] Rosen, B.W., 1964. Tensile failure of fibrous composites. AIAA J. 2, 1985–1991.
- [4] Zweben, C., 1968. Tensile failure of fiber composites. AIAA J. 6, 2325–2331.
- [5] 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.
- [6] introduction https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riau_composite#cite_note-:1-1
- [7] Mécanique des composites à hautes performances, version 3, février 2019, S. Drapier
- [8] c.m.boyer. «Composites unidirectionnels : modèles probabilistes de rupture et évaluation de la fiabilité». Thèse d'université, blaise pascal, 1997.
- [9] **Bahlouli, N.**, « Comportement mécanique en température du pli élémentaire d'un stratifié carbone/époxy », 1994, Cachan, Ecole normale supérieure.
- [10] introduction, glossaire des matériaux composite – carma – actualisation décembre 2004.
- [11] élastomère dans wikipedia. Récupéré le 28 novembre 2010 de :
<http://fr.wikipedia.org/wiki/%c3%89lastom%c3%a8re>
- [12] schéma d'un matériaux composite sur le site internet
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fpmb.univ-saida.dz>
- [13] arc. Dans wikipedia. Récupéré le 28 novembre 2010 de [http://fr.wikipedia.org/wiki/arc_\(arme\)](http://fr.wikipedia.org/wiki/arc_(arme))
- [14] torchis. Dans wikipedia. récupéré le 28 novembre 2010 de <http://fr.wikipedia.org/wiki/torchis>
- [15] Charles macintosh. dans wikipedia. récupéré le 28 novembre 2010 de
http://fr.wikipedia.org/wiki/charles_macintosh
- [16] François Hennebique. dans wikipedia. récupéré le 28 novembre 2010 de
:http://fr.wikipedia.org/wiki/fran%27ois_hennebique
- [17] Baley, c. (2005). fibres naturelles de renfort pour matériaux composites. récupéré de
:<https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-materiaux-fonctionnels-materiaux-biosources-tian0/archive-1/fibres-naturelles-de-renfort-pour-materiaux-composites-n2220/>
- [18] Pierre jaquinet, Utilisation des matériaux composites, Edition Hermès, paris,1991.
- [19] Daniel Gay, Matériaux Composites 4ème Edition, Hermès 2009.

- [20] Lestrois grandes familles de matrices sur le site internet
<http://content.bloomoon.eu/formulaire-newsletter>
- [21] Glossaire des matériaux composite » -carma –Actualisation octobre 2006.
- [22] les différentes formes de renforts dans wikipedia
https://fr.wikipedia.org/wiki/Mat%C3%A9riaux_composite
- [23] <https://www.univ-bouira.dz/ar/wp-content/plugins/download-attachments/includes/download.php?id=210286>
- [24] matériaux/glossaire/taffetas sur le site Internet
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fold.cybel.fr%2Fcommunaute%2Fmat%C3%A9riaux>
- [25] [ViktoriaMelkischeva](#) / Alamy Banque d'images vectorielles
- [26] Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable.
- [27] fibre de verre sur le site Internet
<https://textileaddict.me/fiche-technique-le-verre-textile-fibre-de-verre/>
- [28] fibre de carbone sur le site Internet
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.techno-science.net%2Factualite>
- [29] fibre d'aramide dans wikipedia. <https://fr.wikipedia.org/wiki/Aramide>
- [30] Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot, Des Matériaux ,3 ème Edition, Ecole de Montréal, 2000 [.
- [31] Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures, 5e édition, Jean Marie Berthelot, Ed. Tec & Doc, 2012
- [32] Un plis sur le site Internet https://www.researchgate.net/figure/FigI-2-Couche-dun-composite-b-Stratifies-Un-stratifie-est-constitue-dun_fig2_326319856
- [33] stratifiée sur le site Internet <https://www.semanticscholar.org/paper/Mod%C3%A9lisation-analytique-de-l%27amortissement-des-des->
- [34] M. Mezzo Aghiles, Mémoire de Master, Etude d'une sollicitation Hors axes d'un composite unidirectionnelle (verre e/époxyde) : cas de la traction, 2012.
- [35] schéma d'un sandwich sur le site Internet
<https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FSche->
- [36] N. Bahlouli, "Cours Matériaux Composites ", sur le site Internet " <http://www-ipst.u-strasbg.fr/cours/mat%C3%A9riaux-composite/tm.htm>.
- [37] cours de matériaux composite, l'université des matériaux composites sur le site Internet
www.composites.free.fr
- [38] Daniel Gay, Matériaux Composites 4ème Edition, Hermès 2009.
- [39] Jean Weis , Claude Bord glossaire des matériaux composites I structure Constituants Fabrication
- [40] <https://www.google.com/url?sa=i&url=https%3A%2F%2Fwww.researchgate.net%2Ffigure%2FOrigine-des-fibres-vegetales-dans-la-plante->

- [41] glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable (p 08).
- [42] glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable (p 08).
- [43] glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable (p 09).
- [44] glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable (p 09).
- [45] a. y. nenonene, "élaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kéraf et de bio adhésifs 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.
- [46] glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable (p 05).
- [47] présentation journée technique pep, 13 septembre 2006, (p 07).
- [48] glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origine renouvelable, pages(05,06 et 07).
- [49] Hervé bindi, carma, Joël léveque, atoutveille, Alain parisse, composite, les fibres composites d'origine naturelle, conférences techniques, 28 septembre 2006 (p 02).
- [50] Gharbaoui. A, «effet de l'orientation des fibres naturelles sur la résistance locale d'un composite partiellement endommagé », 2015.
- [51] Plante de kéraf sur le site Internet <https://www.researchgate.net/profile/T-Bettaieb->
- [52] Plante de sisal sur le site Internet https://live.staticflickr.com/5002/5219408347_1a56947e78_b.jpg
- [53] <https://encryptedtbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcRCw6Xiajm4mn59A19KP8RPnY03gUZ>
- [54] Fibre abaca sur le site internet <https://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/abaca0/fr/>
- [55] La plante de l'abaca dans Wikimedia
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/8/83/Musa_textilis_19zz.jpg/270px-
- [56] La fibre de l'abaca sur le site Internet <https://www.phonandroid.com/fibre-optique-le-nombre-de-litiges-grimpent-en-fleche-les-abonnes-enragent.html>
- [57] <https://core.ac.uk/download/pdf/249334403.pdf>
- [58] <https://www.toutvert.fr/abaca-proprietes/>
- [59] papier d'abaca sur le site Internet <https://www.lazada.com.ph/tag/abaca-paper/>
- [60] https://www.mt.com/ch/fr/home/applications/L1_AutoChem_Applications/L2_ReactionAnalysis/e
- [61] <https://fr.wikiedia.org/wiki/%C3%89poxyste>
- [62] https://fr.123rf.com/photo_18947372_1-oxyde-d-%C3%A9thyl%C3%A8ne-oxirane-
- [63] Jean Marie Berthelot (2005). Matériaux composites « comportement élastique d'un matériau composite unidirectionnel, constitution d'un matériau composite unidirectionnel, Edition TEC & DOC, 11 rue Lavoisier 75008 Paris, France »
- [64] J. Gassan, A study of fiber and interface parameters affecting the fatigue behavior of natural fiber composites, Composites Part A, 33, 369-374 (2002)

- [65] 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)
- [66] 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.
- [67] Tsai, S.W.: *Composite Design*, Think Composites, 4th edn. Dayton (1988)
- [68] 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.
- [69] Khiat M.A, Sereir Z, Chateauneuf A, “Uncertainties of unidirectional composite strength under tensile loading and variation of environmental conditio,” *Theoretical and Applied Fracture Mechanics* 56 (2011) 169–179
- [70] Curtin, W. A. and Takeda, N. “Tensile strength of fiber-reinforced composites: II. Application to polymer matrix composites,” *Journal of Composite Materials*, Vol. 32 (1998) pp. 2060-2081.