



وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
جامعة عبد الحميد ابن باديس مستغانم
Université Abdelhamid Ibn Badis de Mostaganem
كلية العلوم و التكنولوجيا
Faculté des Sciences et de la Technologie



N° d'ordre :...../GM/2020

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES DE MASTER ACADEMIQUE

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Construction Mécanique

Thème

Etude et comparaisons de l'endommagement d'un
composite unidirectionnel à des différents types de
fibres naturelles

Présenté par :

1 : BELHADJ Aymene Mokhtar

2 : BENNACEUR Hadjar

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

Président : Pr ZENASNI Ramdane

UMAB - Mostaganem

Examineur : Dr BENKABOUCHE Salah-Eddine

UMAB - Mostaganem

Encadreur : Dr KHIAT Mohammed Amine

UMAB - Mostaganem

Année Universitaire : 2019 / 2020

Dédicaces

Tout d'abord, nous remercions Allah de nous avoir donné le courage de terminer ce modeste travail.

Nous remettons ce mémoire en cadeau à nos chères familles pour nous avoir poussé et motivé dans nos études, ce projet de fin d'études représente le fruit de leurs soutient et encouragements, qu'ils nous ont prodigués tout au long de nos études, qu'ils soient remerciés par cette modeste dédicace

Enfin à nos chers amis pour nous avoir soutenus

Bennaceur Hadjar & Belhadj Aymene Mokhtar

Remerciements

Nous aimerions profiter de cette occasion pour remercier notre guide de mémoire, M. Khiat M.Amine, pour son inspiration et sa direction continue tout au long de notre travail. Ses conseils nous ont aidés tout au long de la recherche et de l'écriture de ce mémoire.

Nous aimerions également remercier le Pr. Zenasni Ramdane d'avoir présidé notre jury et d'avoir offert de nombreuses possibilités d'apprentissage grâce à ses commentaires perspicaces et à ses questions bien ciblées.

*Nous adressons nos remerciements aux enseignants
« Dr. BENKABOUCHE Salah-Eddine » et « Dr.A. Fliti »*

D'avoir accepté d'examiner notre modeste travail.

Nous aimerions remercier Mme. Chenine Halima de nous avoir aidés et d'avoir offert de nombreuses possibilités d'apprentissage grâce à ses merveilleuses idées.

Nous voudrions également exprimer notre gratitude à nos Enseignants du département de Génie Mécanique qui par leurs expériences, savoir et leurs enthousiasmes nous ont beaucoup aidé à nous développer autant que personnes et à connaître à vrais notre chemin professionnel.

Nous adressons enfin nos vifs remerciements à toutes personnes qui ont contribué à la réussite de notre travail.

RÉSUMÉ

Comparativement aux matériaux traditionnels et naturels, les matériaux composites ont connu au cours des dernières années une évolution immense traduite par les nombreuses applications s'étendant des constructions mécaniques classiques jusqu'aux constructions de pointe dans le domaine aérospatiale, de ce fait l'utilisation et la durabilité de ces matériaux est devenue un souci industriel crucial. La disponibilité de certains modèles analytiques ou pratiques fiables pour l'estimation de la durée de vie des structures en composite, permet aux constructeurs de pousser les frontières de la conception et le domaine de fonctionnement le plus loin du possible, tout en maintenant en même temps des marges de sécurité suffisantes.

Le présent travail rejoint les différents travaux réalisés jusqu'à maintenant sur l'endommagement des matériaux composites à fibres naturelles afin de prévoir la résistance et la durabilité d'un composite unidirectionnel en comparons trois cas de fibres naturelles, le Lin, le Jute et la Ramie dans une matrice en époxyde en utilisant des techniques micromécaniques.

Les développements mathématiques utilisés sont présentés dans le programme Fortran pour justifier la forme de la répartition des contraintes et ces déplacements longitudinaux autour de la fibre cassée et des fibres voisines adjacentes les plus proches. L'évolution des caractéristiques particulières des trois cas de fibres, de la matrice, et de l'interface fibre/matrice sont les facteurs les plus importants pour évaluer la dégradation de la résistance du composite d'un point de vue micromécanique. Les conditions d'interfaces et d'adhérences sont prises en considération par ce modèle pour quantifier le taux le transfert des contraintes de cisaillement par l'intermédiaire de la matrice entre deux fibres voisines intacte et cassée.

ABSTRACT

Compared to traditional and natural materials, composite materials have undergone an immense development in recent years, reflected in numerous applications ranging from conventional mechanical constructions to advanced constructions in aerospace, the use and the durability of these materials has become a crucial industrial concern. The availability of certain reliable analytical or practical models for estimating the service life of composite structures, allows manufacturers to push the boundaries of the design and the domain of use of these materials as far as possible, while maintaining at the same time sufficient safety margins.

The present work joins the various works carried out until now on the damage of natural composite materials, in order to predict the resistance and the durability of a unidirectional composite by comparing three cases of natural fibers, Linen, Jute and Ramie in an epoxy matrix using micromechanical techniques.

The mathematical equations used are presented in the Fortran program to justify the shape of the stress distribution and the longitudinal displacements around the broken fiber and the nearest adjacent neighboring fibers.

The evolution of the particular characteristics of the three cases of fibers, the matrix, and of the fiber / matrix interface are the most important factors to assess the degradation of the resistance of the composite from a micromechanical point of view. The interface and adhesion conditions are taken into account in this model to quantify the transfer rate of shear stresses through the matrix between two neighboring intact fibers and the broken fiber

ملخص

بالمقارنة مع المواد التقليدية والطبيعية، شهدت المواد المركبة تطوراً هائلاً في السنوات الأخيرة، مما يعكس في العديد من التطبيقات التي تتراوح بين الإنشاءات الميكانيكية التقليدية والإنشاءات الفضائية المتقدمة، وبالتالي أصبح استخدام هذه المواد ومثانتها مصدر قلق صناعي حاسم. ويتيح توفر بعض النماذج التحليلية أو العملية الموثوقة إمكانية تقدير عمر الهياكل المركبة و دفع حدود التصميم و تعدد ميادين الاستعمال إلى أوسع حد ممكن، مع الحفاظ في الوقت نفسه على معايير كافية للسلام

ويتماشى هذا العمل مع مختلف الأعمال المنجزة حتى الآن بشأن تلف المواد المركبة ذات الألياف الطبيعية للتنبؤ بقوة ومتانة مركب أحادي الاتجاه من خلال مقارنة ثلاث حالات من الألياف الطبيعية، لين، الجوت ورامي في مصفوفة الإيبوكسيد باستخدام التقنيات الميكانيكية الدقيقة

يتم تقديم التطورات الرياضية المستخدمة في برنامج فورتران لتبرير شكل توزيع الضغوط وهذه الحركات الطولية حول الألياف المكسورة وأقرب الألياف المجاورة المجاورة .
التغيرات في الخصائص الخاصة للحالات الثلاث من الألياف والمصفوفة ، والألياف / مصفوفة واجهة هي أهم العوامل في تقييم تدهور المقاومة المركبة من وجهة نظر ميكانيكية دقيقة. تؤخذ شروط الواجهات والالتصاقات في الاعتبار من قبل هذا النموذج لتحديد معدل نقل ضغوط القص عبر المصفوفة بين اثنين من الألياف المجاورة سليمة ومكسورة

SOMMAIRE

INTRODUCTION	
Chapitre I	
Généralités sur les composites	
I.1 Pourquoi les composites ?	4
I.2 Principaux constituants	4
I.2.1 Matrice	4
• Matrices organiques :	5
• Matrices métalliques :	7
• Matrices céramiques :.....	7
I.2.1 Renfort	7
• Renfort fibreux	7
• Renfort à particules	8
I.3 La structure des composites	9
I.3.1 Composites unidirectionnels	10
I.3.2 Composites Bidirectionnels - tissus / tricot	10
• Tissus équilibrés	10
• Tissus non équilibrés	11
I.3.3 Renforts multiaxiaux	11
Chapitre II	
Généralités sur les Fibres Naturelles	
II.1 Introduction	12
II.2 Présentation des Différentes Fibres Naturelles	12
II.3 Fibres d'origines Végétales	13
II.3.1 Classification des fibres végétales	13
II.3.2 Principales fibres végétales	14
a) Abaca	14
b) Coco	15
c) Coton	15
d) Lin	16
e) Le chanvre	16
f) Jute	17

g) Ramie	17
h) Sisal.....	18
II.4 Fibres d'origines Animales.....	18
a) Alpaga	18
b) Angora.....	19
c) Le poil de chameau	19
d) Cachemire.....	20
e) Mohair.....	20
f) Soie	21
g) Laine.....	21
CHAPITRE III.....
Modèle de Rupture Longitudina.....
III.1 Introduction.....	22
III.2 Modèle utilisé de rupture longitudinale sans effet hygrothermique	22
CHAPITRE IV
Résultats et Discussions.....
IV.1 Analyse mécanique sur la comparaison des trois fibres naturelles	29
IV.2 Facteur de concentration de contrainte	30
IV.2.1 Facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante et pour deux cas de fraction volumique 0.35 et 0.7, pour les trois cas de fibres.....	30
IV.2.1.1 Fibre en Lin	30
IV.2.1.2 Fibre en Jute	31
IV.2.1.3 Fibre en Ramie	32
IV.2.2 Facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une progression de la fraction volumique croissante et pour deux cas de chargement appliqué ($0.5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$) et pour les trois cas de fibres.....	33
IV.2.2.1 Fibre en Lin	33
IV.2.2.2 Fibre en Jute	34
IV.2.2.3 Fibre en Ramie	35
IV.2.3 Comportement du facteur de concentration de contraintes sur les trois cas des fibres en fonction du nombre de fibres cassées pour une progression du chargement appliqué	36
IV.3 Evolution de la zone localement plastifiée « a »	37

IV.3.1 Evolution de la zone plastique « a » en fonction du chargement [σ]	37
IV.3.1.1 Fibre en jute	37
IV.3.1.2 Fibre en Lin	38
IV.3.1.3 Fibre en Ramie	38
IV.3.2 Evolution de la zone plastique [a] en fonction du lin, ramie et le jute avec une variation croissante de la contrainte extérieure appliquée.	39
IV.3.2.1 Evolution de la longueur « a » « zone plastique » en fonction du lin, ramie et le jute avec une variation croissante du chargement appliquée, et pour trois cas de Vf=0.35, 05 et 0.7.	40
IV.4 Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction du chargement appliquée.	43
CONCLUSION GÉNÉRALE	
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	

LISTE DES FIGURES

Chapitre I

Figure I. 1. Les trois grandes familles de matrices [13].	5
Figure I. 2. Différents types de renforts employés dans les matériaux composites [13].	8
Figure I. 3. (a) Bobines ou rovings de carbone, (b) Pli unidirectionnel de fibres de carbone pré-imprégné de résine époxy, (c) exemple de stratifié de séquence d'empilement $[0, 90, -45, +45]_s$ [17].	10
Figure I. 4. Multidirectionnels	11

Chapitre II

Figure II. 1. Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine	13
Figure II. 2. Fibre des feuilles d'abaca [22].	14
Figure II. 3. Fibre de Coco d'abaca [23].	15
Figure II. 4. Le Coton [24].	15
Figure II. 5. Le lin [25].	16
Figure II. 6. Le chanvre [26].	16
Figure II. 7. Le Jute [27].	17
Figure II. 8. La Ramie [28].	17
Figure II. 9. Le sisal [29].	18
Figure II. 10. Fibre d'Alpaga [30].	18
Figure II. 11. Fibre d'Angora [31].	19
Figure II. 12. Fibre de poil de chameau [32].	19
Figure II. 13. Fibre en cachemire [33].	20
Figure II. 14. Fibre de Mohair [34].	20
Figure II. 15. Fibre de la soie [35].	21
Figure II. 16. Fibre de la laine [36].	21

Chapitre III

Figure III. 1. Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace.	23
Figure III. 2. Arrangement hexagonal des fibres intactes autour des fibres cassées [38].	24
Figure III. 3. Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes [8].	25

Chapitre IV

Figure IV. 1. Encombrement de l'échantillon à étudier	30
Figure IV. 2. Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante pour la fibre en Lin, et pour deux cas de fraction volumique 0.35 et 0.7.	31
Figure IV. 3. Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante pour la fibre en Jute, et pour deux cas de fraction volumique 0.35 et 0.7.	32

<i>Figure IV. 4. Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante pour la fibre en Ramie, et pour deux cas de fraction volumique 0.35 et 0.7.</i>	<i>33</i>
<i>Figure IV. 5. Evolution du facteur de concentration de contraintes pour la fibre en Lin, en fonction du nombre de fibres cassées pour une fraction volumique croissante et pour deux cas de chargements.</i>	<i>34</i>
<i>Figure IV. 6. Evolution du facteur de concentration de contraintes pour la fibre en Jute, en fonction du nombre de fibres cassées pour une fraction volumique croissante et pour deux cas de chargements.</i>	<i>34</i>
<i>Figure IV. 7. Evolution du facteur de concentration de contraintes pour la fibre en Ramie, en fonction du nombre de fibres cassées pour une fraction volumique croissante et pour deux cas de chargements.</i>	<i>35</i>
<i>Figure IV. 8. Evolution du facteur de concentration de contraintes des trois cas de fibres naturelles en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante, avec $V_f=0.53$.....</i>	<i>36</i>
<i>Figure IV. 9. Evolution de la zone plastique « a » de la fibre en Jute en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante avec un pas de 0.2, et pour $V_f=0.53$.</i>	<i>37</i>
<i>Figure IV. 10. Evolution de la zone plastique « a » de la fibre en Lin en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante avec un pas de 0.2 et pour $V_f=0.53$.</i>	<i>38</i>
<i>Figure IV. 11. Evolution de la zone plastique « a » de la fibre en Ramie en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante avec un pas de 0.2 et pour $V_f=0.53$.</i>	<i>38</i>
<i>Figure IV. 12. Evolution de la zone plastique « a » des trois fibres en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante variable et pour $V_f=0.35$.</i>	<i>40</i>
<i>Figure IV. 13. Evolution de la zone plastique « a » des trois fibres en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante variable et pour $V_f=0.5$</i>	<i>41</i>
<i>Figure IV. 14. Evolution de la zone plastique « a » des trois fibres en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante variable et pour $V_f=0.7$</i>	<i>42</i>
<i>Figure IV. 15. Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée avec une fraction volumique moyenne de 0.53.</i>	<i>43</i>
<i>Figure IV. 16. Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée et en fonction des nombres de fibres cassées, pour $V_f= 0.53$.</i>	<i>44</i>

LISTE DES TABLEAUX

Chapitre I

Tableau I. 1. Propriétés mécaniques des résines thermoplastiques [12]	6
Tableau I. 2. Propriétés mécaniques des résines thermodurcissables [12].....	6
Tableau I. 3. Les propriétés mécaniques des renforts [12]	9

Chapitre IV

Tableau IV. 1. Caractéristiques mécaniques et géométriques des échantillons en composite Jute-Ramie et Lin/époxyde [9-11]	29
---	----

LISTE DES SYMBOLES

a	Zone de décollement localement plastifiée
A_m	Surface de la matrice
A_f	Surface de la fibre
β	Paramètre des modules de géométrie fibre-matrice
c	Indice du composite en bloc
E_c	Module de Young du composite
E_f	Module de Young de la fibre
E_m	Module de Young de la matrice
E_i	Module des fibres adjacentes intactes
f	Coefficient d'indice de la fibre
G_m	Module de cisaillement de la matrice
σ_c	Contrainte de traction du composite
σ₀	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
τ₀	Contrainte de cisaillement
ρ	Masse volumique
η	Paramètre de cisaillement
L	Longueur de l'échantillon
L₀	Longueur de référence de l'échantillon
r_f	Rayon de la fibre
R₂	Quantité géométrique du composite
n_i	Nombre de fibres cassées
ν_m	Coefficient de poisson de la matrice
V_f	Fraction volumique de la fibre
t	Epaisseur de l'échantillon
W	Largeur de l'échantillon
U_i	Déplacements
j	L'accroissement de la charge

INTRODUCTION

Les matériaux composites sont, de plus en plus utilisés dans les domaines industriels. Ils viennent souvent remplacer les matériaux métalliques dans de nombreux domaines. Il n'est pas surprenant qu'après la découverte des polymères synthétiques en 1920, des recherches convoitant l'amélioration des propriétés mécaniques de ce nouveau type de matériau aient été lancées. Le facteur primordial de l'utilisation des composites c'est le rapport résistance/masse très élevé qui trouve toute son utilité dans les applications nécessitant des gains de masse dans les applications d'aéronautiques et d'automobiles [1].

Deux de ces propriétés sont essentielles dans le dimensionnement de structures composites, il s'agit de la spécification à l'échelle micromécanique des modules élastiques et de la résistance mécanique. Une synthèse de ces propriétés peut être consultée dans les travaux de Christensen [2]. Ces travaux sont basés sur les modèles micromécaniques d'homogénéisation et ont recours à la définition d'un volume élémentaire représentatif afin d'effectuer une homogénéisation du composite fibre/résine. Par la suite plusieurs théories d'endommagement et rupture des composites unidirectionnels basées sur la statique, ont été développées pour d'écrire le comportement mécanique des matériaux composites renforcés par des fibres naturelles. Ces matériaux ont fait l'objet de très nombreux travaux de recherche, parmi ces travaux nous citons les modèles Zweben et Rosen [3,4] qui se considèrent parmi les plus anciens modèles pour la prédiction de la résistance des composites à matrice polymère.

Case et Al [5] ont proposé une technique d'analyse générale pour l'étude du comportement d'un matériau composite unidirectionnel contenant des fibres cassées. Le modèle est basé sur l'espacement des fibres (fraction volumique) et cela pour avoir une représentation proche de la réalité des fibres intactes voisines. Case et Reifsnider [6] a abordé aussi le problème d'une fissure au centre de plusieurs cylindres concentriques. Le problème a été résolu en appliquant les hypothèses d'élasticité standard, avec un choix approprié des fonctions de contraintes dans chaque constituant. Cette solution a été appliquée au problème de rupture des fibres dans un matériau composite unidirectionnel en faisant des hypothèses géométriques. Foster [7] a montré aussi que la rupture des fibres se produit d'une manière aléatoire lorsque la charge atteint la limite de résistance du composite. Par conséquent, l'accumulation statistique de cette rupture peut conduire à l'endommagement partiel ou total du composite. Gao et Reifsnider [8] ont proposé une analyse de répartition de charge utilisée en se servant du modèle probabiliste de Batdorf pour prédire la résistance à la traction. En se

basant sur les hypothèses du retardement de cisaillement « shear-lag », ils ont étudié la rupture due au cisaillement à l'interface fibre/matrice en définissant un paramètre de cisaillement utilisé pour décrire le comportement élastique complet fibre/matrice avec un décollement parfaitement plastique de la matrice.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre de la continuité des travaux de recherches effectués auparavant [9-11]. Donc, on compte aussi l'analyse du phénomène de transfert de charge de la fibre naturelle cassée à la fibre voisine intact par l'intermédiaire de la matrice. Une analyse du processus de la rupture longitudinale incluant les interactions micromécaniques entre les fibres naturelles utilisées et la matrice est nous allons effectuer des comparaisons des fibres en line, ramie et le jute. Le présent modèle qui est basé sur le modèle de Gao et Reifsnider [8] qui permet de prévoir la résistance et la durabilité d'un composite unidirectionnel en utilisant des techniques micromécaniques. Ce modèle suppose qu'un groupe de fibres cassées est entouré d'un nombre de fibres intactes sous forme d'un arrangement hexagonal. Si la contrainte responsable de la rupture d'une fibre est suffisamment importante, elle peut être transmise à la fibre voisine adjacente par l'intermédiaire de la matrice, en créant tout d'abord une zone localement plastifiée puis une probable rupture. L'estimation de la longueur inefficace limitant la zone localement plastifiée ainsi que le facteur de concentration de contraintes permettent une évaluation de la résistance de notre composite unidirectionnel en variant les fractions volumiques d'une part, d'autre part en fait varie les contraintes appliquées au point de rupture pour chaque cas de ces trois fibres afin de décrire la résistance de notre composite.

Pour atteindre cet objectif, nous avons structuré notre mémoire en quatre chapitres. Au premier chapitre, nous avons présenté une recherche bibliographique sur les différents matériaux composites ainsi que les différentes lois de comportement qui génèrent les matériaux ductiles et fragiles. Par la suite, nous avons effectué un aperçu général sur la mécanique linéaire de la rupture et sa relation avec les matériaux composites. Au deuxième chapitre, nous avons abordés les différents types des fibres naturelles et leurs utilisations.

Le troisième chapitre a été consacré au modèle de rupture longitudinale d'un composite unidirectionnel pour suivre la propagation de la rupture d'un groupe de fibres cassées entouré d'un nombre de fibres intactes sous forme d'un arrangement hexagonal. Les développements mathématiques utilisés sont présentés pour justifier la forme de la répartition des contraintes autour de la fibre cassée et des fibres voisines adjacentes les plus proches.

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

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

Chapitre I

Généralités sur les composites

I.1 Pourquoi les composites ?

La résistance théorique des matériaux est nettement supérieure à celle obtenue expérimentalement, qui se justifie par la présence de défauts et qui est inévitable malgré les mesures prises. Le recours à réduire les dimensions du matériau est l'une des solutions adoptées pour minimiser la proportion de ces défauts voire les éliminer, et de conserver tant que possible les propriétés les plus élevées. Par ailleurs, avec des dimensions tellement réduites, ces matériaux ne peuvent être exploités. Ces derniers, ayant des propriétés très élevées sont incorporés au sein d'un autre matériau moins rigide et moins résistant, qui servira à les maintenir en position et de leur conférer la forme finale du produit.

Effectivement, cet ensemble nommé « composite » a prouvé son existence méritoirement, dont il substitue en grande part plusieurs matériaux conventionnels, plus particulièrement, ceux employés dans les applications de pointes, dont le secteur aéronautique en fait l'illustration la plus frappante.

Les composites d'une manière générale sont définis comme étant un assemblage d'au moins deux phases distinctes, mais dans un sens restrictif, ils sont constitués de deux matériaux de propriétés différentes, attribuant un effet synergique à l'ensemble et aboutissant à des performances que les constituants élémentaires pris individuellement n'ont pas. En effet, les composites sont composés d'une phase continue qu'on appelle matrice, dans laquelle sont noyées ou plutôt logées des phases discontinues, nommées renfort ou matériau renforçant. Les propriétés et les proportions des matériaux constituants sont des paramètres déterminants sur les propriétés du composite [12].

I.2 Principaux constituants

Les composites sont principalement constitués d'une matrice et de renfort ainsi que des charges et des additifs dont leur contribution est secondaire. Ils peuvent être classés selon la nature des composants principaux ou par rapport à leur forme.

I.2.1 Matrice

La matrice a pour rôle de maintenir les fibres, leur transférer les sollicitations mécaniques, les protéger contre les agressions extérieures et de leur épouser la forme de la pièce. En effet, elle doit remplir certains critères, tels qu'une bonne déformabilité et une meilleure compatibilité avec les renforts, ainsi qu'un poids léger afin d'assurer des performances spécifiques élevées.

Les matrices peuvent être classées en trois grandes familles :

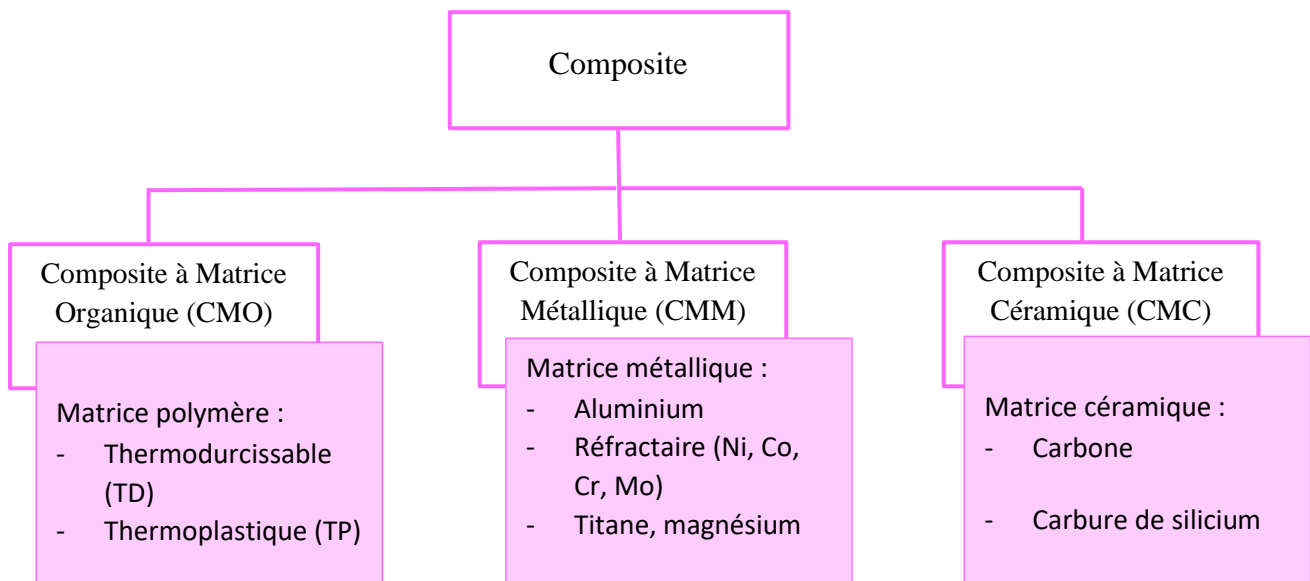


Figure I. 1. Les trois grandes familles de matrices [13].

- **Matrices organiques :**

Il existe une grande variété de résines polymères synthétiques et leur facilité de mise en forme justifie leur position dominante en termes d'utilisation, seulement, leur domaine d'emploi ne peut pas excéder 300°C. Cette dernière peut être scindée en trois grandes classes possédant différentes propriétés.

- **Résines thermoplastiques**

Utilisée en masse du fait du faible coût, et elle a aussi la faculté d'être recyclée vu la faible liaison de ses molécules qui peut être brisée par un apport thermique d'une manière réversible, seulement sa transformation requiert des températures très élevées et elles sont généralement qualifiées par de faibles propriétés mécaniques. Ces résines sont de nature amorphe ou semi cristallin de structure linéaire ou ramifiée, elles peuvent être subdivisées en plastique de grande diffusion (usage courant) et plastiques techniques (hautes performances). Le tableau ci-dessous regroupe les différentes résines thermoplastiques.

Tableau I. 1. Propriétés mécaniques des résines thermoplastiques [14]

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

- **Résines thermodurcissables**

Ce sont des polymères réticulés ayant un réseau moléculaire tridimensionnel, le produit ainsi formé est solide et infusible ce qui empêche son recyclage, d'où une nouvelle hausse de température entraîne sa destruction. Ces résines ne peuvent être récupérées après leur mise en forme car leurs molécules sont fortement reliées par des liaisons de type covalente et donc théoriquement établies de manière irréversible [15]. Tandis qu'elles possèdent des propriétés mécaniques, plus particulièrement thermomécaniques nettement supérieures à celles des résines thermoplastiques, ce qui suscite leur grand emploi. Le tableau 2 illustre les caractéristiques des résines thermodurcissables.

Tableau I. 2. Propriétés mécaniques des résines thermodurcissables [14]

Matrice TP	Masse Vol (Kg/m ³)	E. Long (MPa)	Module de cisaillement (GPa)	Coefficient de poisson	σ_{Rup} (MPa)	A (%)	Cout en €/Kg
Epoxyde	1200	4500	1600	0.4	130	2	5 à 15
Phénolique	1300	3000	1100	0.4	70	2.5	2
Polyester	1200	4000	1400	0.4	80	2.5	2
Vinylester	1150	3300			75	4	3
Polycarbonate	1200	2400		0.35	60		5
Silicone	1100	2200		0.5	35		30
Uréthane	1100	700-7000			30	100	3
Polyimide	1400	4000-19000	1100	0.35	70	1	25

- **Résines thermostables**

Ce sont des résines à usage spécifique et à la différence des précédentes, elles se caractérisent par leurs performances thermiques élevées, d'où l'intérêt de leur développement spécialement pour les secteurs aéronautique et aérospatial. En fait, elles sont issues des deux résines susmentionnées.

- **Matrices métalliques :**

Les composites à matrice métallique (CMM) sont constitués d'un renfort et d'une matrice métallique. Les métaux ou alliages métalliques et renforts utilisés dans la fabrication des CMMs sont généralement choisis en fonction de leurs propriétés spécifiques dans l'état non renforcé. Ainsi, l'aluminium, le titane et le magnésium sont les métaux les plus couramment utilisés pour les matrices, et les particules de carbure de silicium (SiC) et d'oxyde d'aluminium (Al₂O₃), ou parfois de borure de titane (TiB₂), de carbure de titane (TiC) ou de carbure de bore (B₄C), sont généralement employés comme renforts [16].

- **Matrices céramiques :**

Sont des matériaux composites qui font partie de la céramique technique. Ils se caractérisent par un ensemble de fibres céramiques incorporées dans une matrice également céramique. Les fibres et la matrice peuvent en principe être constituées de toutes les céramiques connues, y compris même du carbone

I.2.1 Renfort

Les propriétés mécaniques des composites proviennent de la résistance et la rigidité élevées des renforts, dont elles sont de l'ordre 10 voire 100 fois supérieure à celles de la matrice. En effet, les renforts reprennent la quasi-totalité des efforts subis par la pièce et leur niveau de renforcement s'opère essentiellement en fonction de leur nature, géométrie et structure. Selon la forme des renforts on peut distinguer deux types :

- **Renfort fibreux**

Le renfort est sous forme de fibres, leur disposition ainsi que leur orientation conditionne les propriétés mécaniques du matériau composite. A cet effet, le concepteur peut prévoir, contrôler et modifier leur comportement mécanique et physique en dépendance de leur nature et leur proportion. En outre, Les fibres se distinguent aussi par leur géométrie (fibres longues ou courtes).

- **Les fibres longues**

Sont conçues pour des applications structurelles, dont les pièces devant supporter de grands efforts, ainsi, l'orientation des renforts doit être adaptée aux chargements imposés. Ils sont employés principalement dans le secteur aéronautique, aérospatial, nautique ainsi que l'automobile.

- **Les fibres courtes**

Sont destinées à des applications non structurales, elles peuvent être disposées aléatoirement sans orientations privilégiées, dont le matériau ainsi conçu est quasi-isotrope.

- **Renfort à particules**

Sans dimensions privilégiées, ils sont employés pour améliorer certaines propriétés mécaniques ou physiques et parfois uniquement, pour réduire le coût tout en conservant les caractéristiques du matériau.

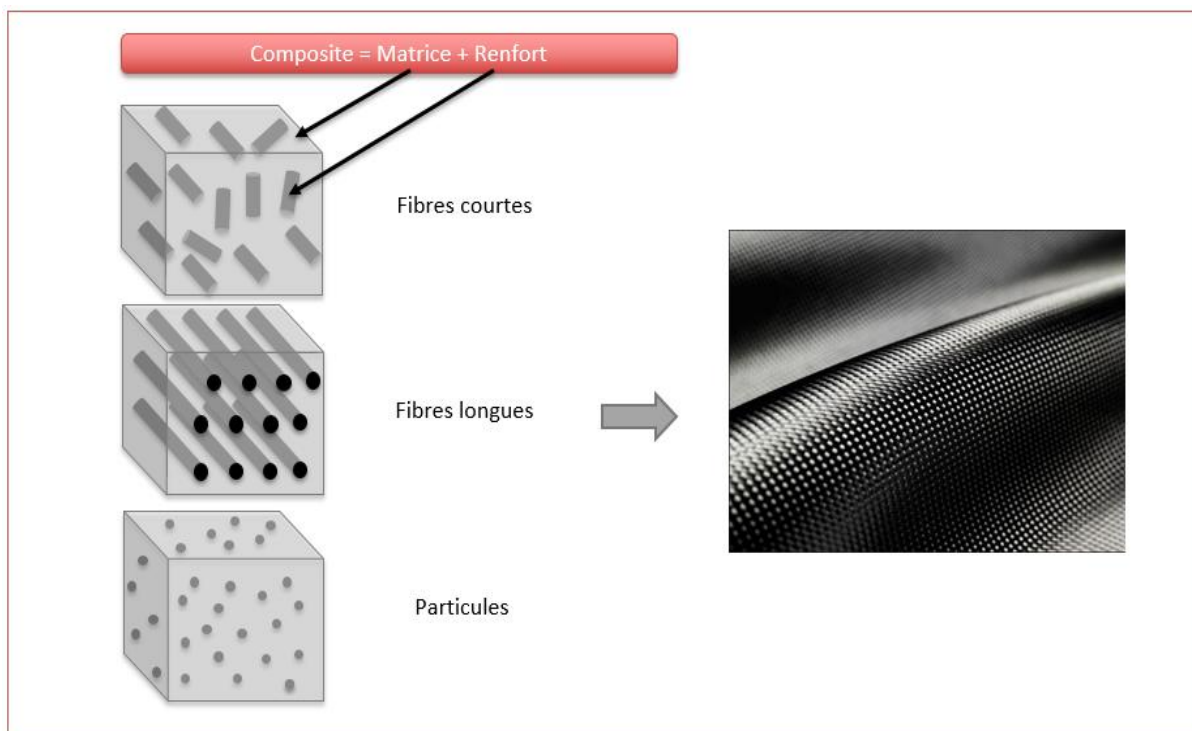


Figure I. 2. Différents types de renforts employés dans les matériaux composites [13].

Le tableau ci-dessous illustre les différents renforts employés pour renforcer les composites.

Tableau I. 3. Les propriétés mécaniques des renforts [14]

Renforts	Masse Vol (Kg/m ³)	E. Long (MPa)	Module de cisaillement (GPa)	Coefficient de poisson	σ_{Rup} (MPa)	A (%)	Cout en €/Kg
Verre R	2500	86		0.2	3200	4	10
Verre E	2600	74	30	0.25	2500	3.5	2
Kevlar 49	1450	130	12	0.4	2900	3.2	50
Carbone HR	1750	230	50	0.3	3200	1.3	40-150
Carbone HM	1800	390	20	0.35	2500	0.6	40-150
Bore	2600	400			3400	0.8	450
Alumine	3700	380			1400	0.4	

Les composites conçus en fibres longues se caractérisent par des propriétés mécaniques nettement supérieures à ceux renforcés de fibres courtes ou à particules, plus particulièrement lorsque les fibres sont dans la même direction du chargement appliqué sur la pièce. Par ailleurs, selon l'orientation des fibres se distingue le comportement des matériaux composites, en effet, pour des fibres parallèles, ils présentent un comportement anisotrope tandis que celles disposées aléatoirement ou renforcé par des particules, leur comportement est quasi isotrope.

I.3 La structure des composites

Les fibres sont de très faibles épaisseurs de l'ordre du micron, une centaine voire des milliers de fibres sont tressées ou alignées formant des torons ou fils. Ces derniers sont ensuite tissés selon des motifs variés et leur distinction réside dans leur disposition.

L'orientation des renforts dans des directions privilégiées peut être réalisée à partir de différentes architectures de renfort, allant des renforts placés dans une seule direction, appelés Uni Directionnels (UD), aux bidirectionnels (tissés, tressés, ...) et enfin des renforts multiaxiaux

I.3.1 Composites unidirectionnels

Les performances mécaniques des différents renforts unidirectionnels dépendent du type des fils qui constituent l'armure (verre, carbone, etc.) et de leur nature (fils avec ou sans torsion). Ces fibres parallèles peuvent se présenter sous deux formes : sans aucune liaison particulière, sous forme de bobine également appelée roving (figure I. 3 -a), ou bien reliée par un fil fin appelé nappes (figure I. 3 -b). À partir de ces couches, également appelées plis unitaires, un empilement séquencé est produit en fonction des propriétés mécaniques attendues (figure I. 3 -c).

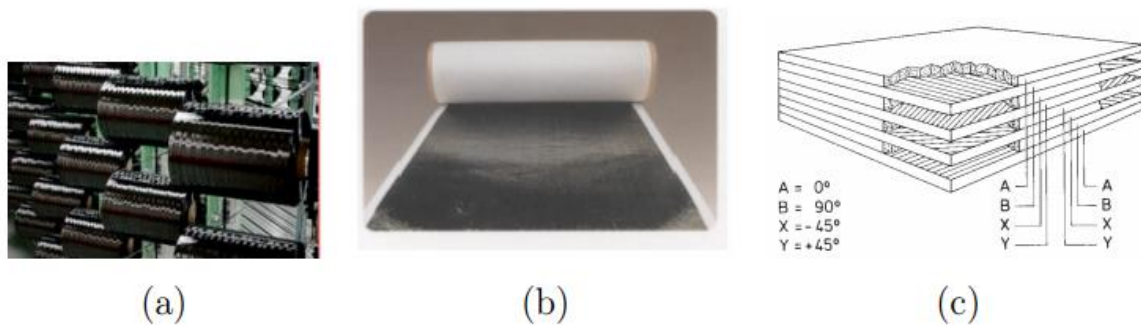


Figure I. 3. (a) Bobines ou rovings de carbone, (b) Pli unidirectionnel de fibres de carbone pré-imprégné de résine époxy, (c) exemple de stratifié de séquence d'empilement $[0, 90, -45, +45]_s$ [17].

I.3.2 Composites Bidirectionnels - tissus / tricot

Dans les composites tissés, il existe deux types ; tissus plans qui sont à base de renforts longs disposés en alternance perpendiculairement, et multidirectionnel dont la disposition de leurs fibres est selon plusieurs directions.

Le Tissus plans, confère au matériau un grand degré de stabilité dimensionnelle dans les deux directions des fibres ; chaîne et trame, mais il présente une faible raideur de cisaillement dans le plan. Il existe une grande variété de tissus plans, dont une seule couche de fibres qui les renforcent ; les pièces sont obtenues en effet, par la superposition de plusieurs plis formant un stratifié.

- **Tissus équilibrés**

Ils sont appelés ainsi car ils possèdent le même nombre de torons dans les deux directions de tissage, et ils ont les mêmes propriétés mécaniques en termes de résistance et de rigidité dans les deux sens de fibres. Malgré cela, ils ne peuvent être qualifiés d'isotrope, vu que leurs propriétés changent dans les autres directions et ils ont plutôt un comportement orthotrope.

- Tissus non équilibrés

L'anisotropie peut être contrôlée lorsque la nécessité le justifie, en faisant varier les proportions des fils dans les deux directions. Le tissu ainsi conçu est considéré non équilibré

I.3.3 Renforts multiaxiaux

Il existe d'autres tissus qui sont conçus avec une disposition de fibres dans plusieurs directions, ce sont des tissus volumiques permettant la conception des pièces composites à des épaisseurs variables. Ils se caractérisent par une bonne résistance à l'arrachement par rapport aux tissus plans, mais leurs procédés de fabrication sont complexes.

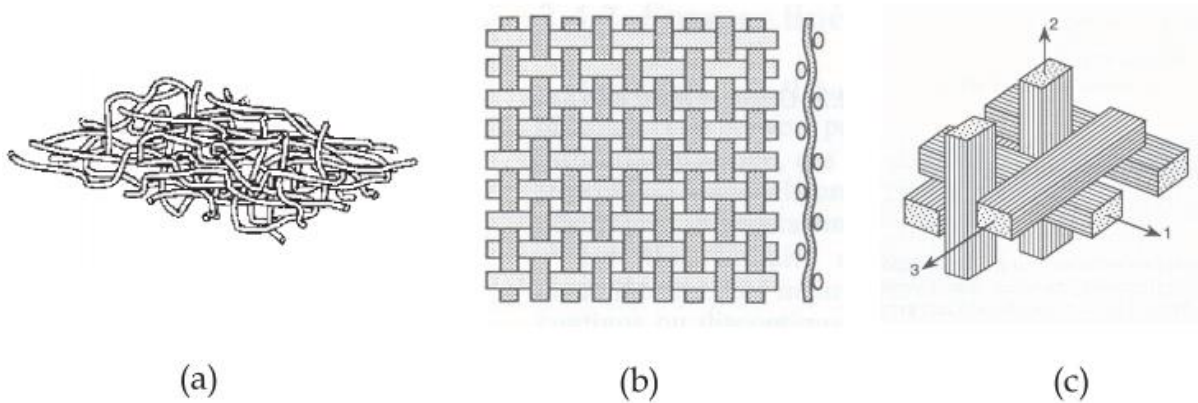


Figure I. 4. Multidirectionnels

(a) mat, (b) toile, (c) tissage 3D orthogonal, [17].

Chapitre II

Généralités sur les Fibres Naturelles

II.1 Introduction

Un matériau composite est défini comme un arrangement de fibres - continues ou non - d'un matériau résistant (le renfort), noyées dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice (le liant) conserve la disposition géométrique de l'armature et transmet les contraintes auxquelles la pièce est soumise. Il peut appartenir à la famille des polymères, métaux ou céramiques.

Sous le terme « fibres naturelles » se trouvent des fibres organiques, d'origine végétale (cellulosique) et animale (protéinique), et des fibres minérales telles que l'amiante [18].

L'utilisation de fibres naturelles comme renfort pour les matériaux composites est justifiée pour :

- Développer une ressource locale dans les pays moins industrialisés
- Développer des matériaux et des technologies qui prennent en compte les impacts environnementaux [18].

Le choix des fibres en milieu naturel, aux performances mécaniques intéressantes se fait en tenant compte :

- de leur origine et leur fonction : les fibres à hautes performances mécaniques ont un rôle structurel dans la nature
- de Leur disponibilité avec des propriétés contrôlées ; une fibre naturelle est considérée comme disponible si le volume de fibres sur le marché est suffisant pour produire des pièces industrielles.
- de leur composition et de leur structure souvent complexe. Bien que les matériaux composites soient souvent présentés comme nouveaux et révolutionnaires, il est possible de les trouver partout dans la nature, que ce soit dans le monde végétal ou dans le monde animal. Une multitude de matériaux naturels, certains rigides mais légers, comme les os, d'autres souples mais résistants, comme le bois, doivent leurs propriétés mécaniques à leur structure composite

II.2 Présentation des Différentes Fibres Naturelles

Les fibres naturelles peuvent être subdivisées en trois groupes principaux selon leur origine (figure I.1) :

Les fibres végétales qui comprennent : les fibres des poils séminaux de graines (coton, kapok) ; Fibres libériennes extraites de tiges végétales (lin, chanvre, jute, ramie) ; fibres dures extraites de feuilles (sisal), de troncs (chanvre de Manille), d'enveloppes de fruits (noix de coco);

Les fibres animales provenant des poils, tels que la toison animale, et les sécrétions comme la soie

Les Fibres minérales.

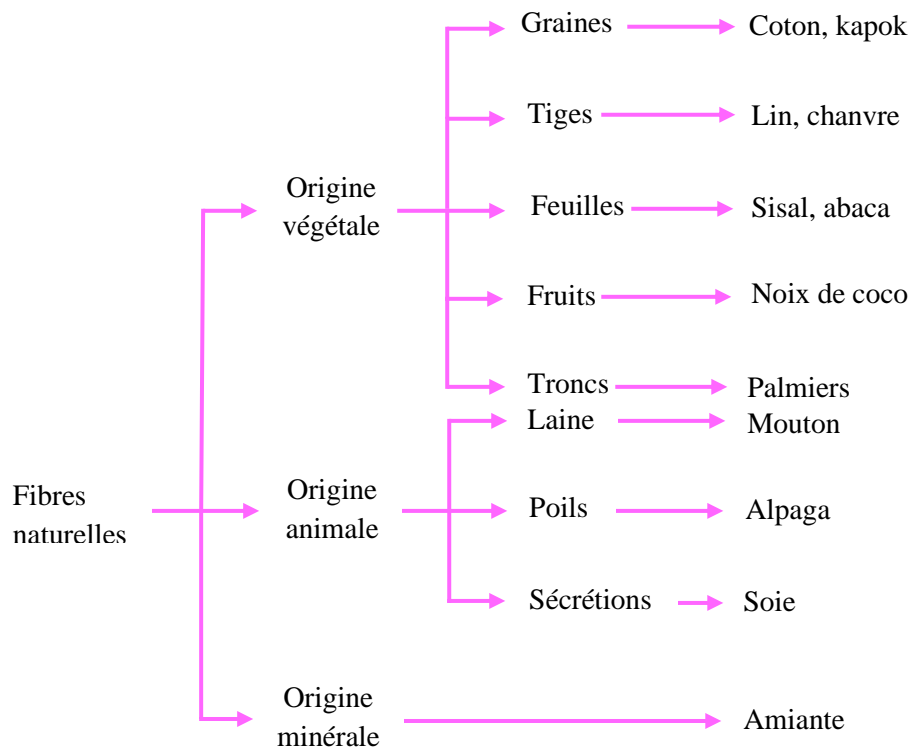


Figure II. 1. Classification des fibres naturelles en fonction de leur origine

II.3 Fibres d'origines Végétales

Les fibres végétales sont des structures fibrillaires biologiques composées de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. Dans une proportion relativement faible d'extractibles non azotés, de matières protéiques brutes, de lipides et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent fortement de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [19,20].

II.3.1 Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différenciation pour les fibres

- Selon l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tige (kénaf, jute, lin, ramie) et en fibres de feuilles (sisal, abaque, paille de graminées) [19].
- Selon leur teneur en holocélullose (cellulose et hémicellulose) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigides des matériaux ligneux comme le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (molles, souples, des plantes non ligneuses, souvent annuelles relativement moins riches en lignine comme le kénaf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) [20].
- Selon leur longueur, les fibres végétales peuvent être regroupées en deux catégories : les fibres longues, dites libériennes, issues des tiges et de l'écorce des tiges des plantes annuelles. Ils sont mous, tandis que les longues fibres des feuilles ou des troncs d'arbres sont plus dures et plus rigides en raison de leur forte teneur en lignine. Et les fibres courtes ou les câbles associés aux fibres longues [19].

II.3.2 Principales fibres végétales

a) Abaca

Une fibre extraite des feuilles d'abaca (*Musa textilis*), une espèce de bananier originaire des Philippines. Il peut mesurer jusqu'à 3 mètres de long, très résistant à la casse, utilisé pour fabriquer des cordes pour bateaux. Aujourd'hui, la pâte de chanvre est utilisée dans les sachets de thé, les enveloppes de saucisses, les billets de banque, les papiers à cigarettes et les papiers à lettres de qualité supérieure. Aujourd'hui, il fait une percée dans l'industrie automobile [21].



Figure II. 2. Fibre des feuilles d'abaca [22].

b) Coco

Une fibre lignocellulosique entourant la noix de coco. C'est l'une des fibres dures, en raison de sa teneur élevée en lignine, un polymère naturel. Plus résistant mais moins flexible que le coton, il est utilisé pour réaliser des tissus d'ameublement pour meubles et matelas, brosses, cordes et cordes. Ces fibres courtes et brutes qui entourent la noix de coco sont utilisées pour fabriquer des cordes, des matelas, des brosses, des géotextiles et des sièges d'auto [21].



Figure II. 3. Fibre de Coco d'abaca [23].

c) Coton

Le coton, composé de cellulose, est la fibre naturelle la plus utilisée au monde. Il reste le roi incontesté de l'industrie textile mondiale. Ses qualités sont telles - douceur, "respirabilité", résistance, entre autres - qu'elle est la fibre naturelle la plus utilisée au monde ; il est utilisé pour fabriquer toutes sortes de vêtements et textiles pour la maison.



Figure II. 4. Le Coton [24].

d) Lin

Une fibre végétale connue pour sa solidité. Il a été l'un des premiers à être récolté, filé et tissé pour la fabrication de textiles. La fibre de lin est également utilisée pour fabriquer des billets de banque et du papier à cigarette, des composants automobiles - elle est ensuite combinée avec du polypropylène et d'autres fibres synthétiques -, des géotextiles isolants et anti-érosifs [21].



Figure II. 5. Le lin [25].

e) Le chanvre

Une fibre vendue dans le monde entier pour fabriquer des vêtements, des cordes et du papier. Cette fibre extrêmement résistante est de plus en plus utilisée pour fabriquer des matériaux de construction et des bioplastiques pour l'industrie automobile. Les dernières avancées de la « cotonnalisation » pourraient permettre la commercialisation de vêtements de meilleure qualité.



Figure II. 6. Le chanvre [26].

f) Jute

Extraite de la tige de plantes appartenant aux genres *Corchorus capsularis* et *Colitorius*, le jute est une fibre naturelle très résistante ; il arrive en deuxième position, après le coton, en termes de volume de production et d'utilisations. La fibre de jute est utilisée pour fabriquer des sacs d'emballage et de transport et fournit des moyens de subsistance à des millions de petits agriculteurs.



Figure II. 7. Le Jute [27].

g) Ramie

Figure II. 8. La Ramie [28].

Originnaire d'Asie de l'Est, la ramie (*Boehmeria nivea*) ou l'ortie chinoise est une plante à fleurs appartenant à la famille des orties ; son écorce est utilisée depuis des millénaires pour la production de cordes, fils et tissus appelés lin chinois. Il donne une fibre blanche d'aspect soyeux et très résistant, dont l'absorbance et la densité ressemblent au lin.

h) Sisal



Figure II. 9. Le sisal [29].

Plante succulente adaptée aux climats chauds, elle pousse même dans les régions arides. Le sisal, impropre à la fabrication de vêtements, remplace l'amiante et la fibre de verre dans un grand nombre de matériaux composites. Les produits dérivés du sisal sont utilisés dans la composition du biogaz, des ingrédients pharmaceutiques et des matériaux de construction.

II.4 Fibres d'origines Animales

a) Alpaga



Figure II. 10. Fibre d'Alpaga [30].

Un animal domestique de la famille des camélidés d'Amérique du Sud. L'alpaga est l'une des sources les plus abondantes de fibres animales, il existe deux types de cheveux et une variété de couleurs naturelles. Les fibres de l'alpaga Huacayos sont

courtes, douces et riches, tandis que les fibres des singes sont soyeuses, brillantes et dures. Ces fibres sont utilisées pour fabriquer des tissus de luxe de haute qualité

b) Angora



Figure II. 11. Fibre d'Angora [31].

La laine blanche et soyeuse de lapins Angora, appréciée pour sa finesse et son élasticité, se mélange à d'autres fibres naturelles, créant des tissus et des tissus en laine de haute qualité. Certaines fibres naturelles proviennent de fines tiges d'ortie, qui poussent en Asie de l'Est, d'autres de la délicate toison de chameau des Andes.

c) Le poil de chameau



Figure II. 12. Fibre de poil de chameau [32]

Il y a deux qualités de poil de chameau : le poil de dessus, plutôt grossier et la couette du dessous qui est très fin. Ce sont les chameaux de Bactriane de la Mongolie intérieure et de la Mongolie qui donnent les fibres de meilleure qualité. La couette des chamelons est d'une finesse et d'une douceur extrêmes. La couleur la plus courante est brun rouge, avec des variantes de l'allant du brun au gris. La toison blanche est très rare et la plus prisée.

d) Cachemire

Figure II. 13. Fibre en cachemire [33]

La laine cachemire faite avec du poil très fin de la chèvre cachemire *Capra hircus laniger* a un toucher très doux. Bien que très léger. Comme il est rare, il est considéré comme une fibre de luxe. Jusqu'à récemment, la plupart des vêtements en cachemire étaient fabriqués en Europe, aux États-Unis et au Japon, mais de nos jours la Chine est de loin le plus grand producteur de cachemire brut, de cachemire fin et de vêtements en cachemire.

e) Mohair

Figure II. 14. Fibre de Mohair [34]

Extrait des poils d'une chèvre Angora, originaire de Turquie. Cette fibre blanche, très fine et soyeuse, est très appréciée pour sa douceur, sa douceur soyeuse et sa compatibilité avec les colorants. C'est une source de chaleur en hiver, mais aussi de fraîcheur lorsque l'été est humide. Il est utilisé pour la production de tissus en laine, étoles, foulards et tissus durables. Les couvertures en mélange de laine et de mohair sont d'excellente qualité.

f) Soie



Figure II. 15. Fibre de la soie [35]

La soie est une fibre textile animale extrêmement populaire. Il provient du cocon produit par la chenille du mûrier bombyx. Le fil de soie est un fil continu très résistant d'une longueur de 500 à 1500 mètres. Grâce à ses nombreuses propriétés, notamment son pouvoir absorbant élevé et sa faible conductivité thermique, la soie est très appréciée dans la production de haute couture et de lingerie, est également utilisé pour la production de revêtements muraux et de tapis. Depuis la Chine ancienne, lorsque son usage était réservé à la famille royale, la soie était la reine des fibres.

g) Laine



Figure II. 16. Fibre de la laine [36]

La laine est l'une des principales fibres utilisées dans le monde, la structure protéique lui confère des propriétés uniques - une élasticité et une flexibilité exceptionnelles - avec lesquelles les fibres synthétiques ne peuvent rivaliser. La laine est l'une des fibres les plus populaires au monde en raison de son approvisionnement limité et de ses propriétés uniques.

CHAPITRE III

Modèle de Rupture Longitudina

III.1 Introduction

La mécanique de la rupture serait apte à répondre aux préoccupations de la rupture d'une fibre unique à un nombre important de fibre voisine intact. Cependant, étendre une telle approche aux composite unidirectionnels, ou le comportement du matériau est dirigé par la probabilité de diffusion des défauts dans les fibres due aux concentrations de contraintes des composites unidirectionnels doit être pris en considération. Lors d'un chargement mécanique d'un matériau composite, des microfissures apparaissent dans la matrice, des fibres se cassent (rupture fragile ou ductile), des décollements se créent aux interfaces sans entrainer la ruine de la pièce. Les processus de rupture des composites sont donc d'une grande diversité et ne peuvent être décrits que si l'on connaît :

- ✓ L'état des contraintes et des déformations dans le matériau ;
- ✓ Les phénomènes de diffusion de fissure dans la microstructure ;
- ✓ La nature de l'interface entre la matrice et la fibre.

Les critères de rupture ont pour objectifs de permettre à l'auteur d'avoir une évaluation de la résistance mécanique des matériaux composites. On propose dans ce qui suit, de décrire le modèle de rupture longitudinale simplifié permettent alors d'estimer les caractéristiques de résistance du composite en utilisant les fibres naturelles.

III.2 Modèle utilisé de rupture longitudinale sans effet hygrothermique

Le prototype utilisé dans cette étude pour l'estimation de la résistance d'un composite unidirectionnel est celui de Gao et de Reifsnider [8]. Ce modèle permet d'introduire la variation des caractéristiques mécaniques de la matrice en époxyde et les différentes fibres naturelles en vue de prédire le comportement et la résistance d'un composite unidirectionnel. Cette résistance varie le plus souvent en fonction, du changement des longueurs inefficaces dans la zone de la rupture de la fibre et des concentrations de contraintes correspondantes des fibres voisines intactes. La longueur inefficace est généralement définie comme étant la longueur comprise entre l'endroit de la rupture de la fibre jusqu'à la longueur pour laquelle la fibre regain à sa capacité de supporter le chargement complet. Ce concept est illustré sur la figure III.1, où σ_f dans la figure est la contrainte de la fibre et δ est la longueur inefficace. L'approche du modèle consiste à employer la condition de la contrainte de cisaillement à l'interface pour calculer les longueurs inefficaces et la concentration de contraintes autour des fibres cassées.

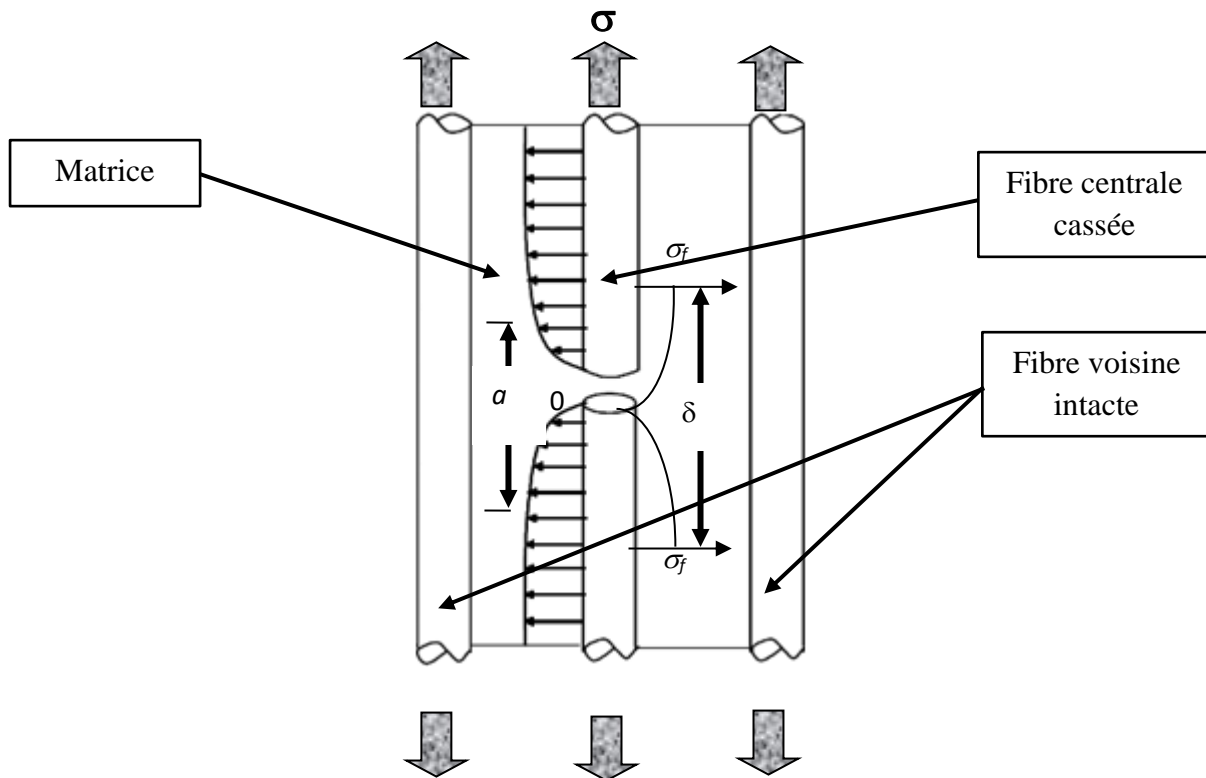


Figure III. 1. Fibre cassée avec l'extension de la longueur inefficace.

Selon Gao et Reifsnider [8], les propriétés dues à la traction d'un composite renforcé par des fibres, dépendent de la résistance, des modules d'élasticité de la fibre, de la résistance et la stabilité chimique de la matrice et aussi de l'efficacité de l'adhérence à l'interface fibre/matrice au cours du transfert de charge. Dans le cas des différentes fibres naturelles utilisées, les modules d'élasticité et la résistance mécanique de la fibre demeurent presque inchangeables avec la variation de la fraction volumique. Cependant, à cause de la difficulté trouvée lors de la détermination des propriétés aux interfaces, la résistance d'adhérence aux interfaces est considérée comme étant liée à la contrainte d'écoulement de la matrice et de l'interface τ_0 . La fissure à l'interface aura lieu lorsque la contrainte de cisaillement à l'interface atteint τ_0 .

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

$\eta=1$, la contrainte de cisaillement dans la région inélastique est égale à τ_0 . Pour l'application de ce modèle dans cette étude, on prend $\eta=1$.

Un schéma significatif de ce problème est donné par la figure III.2. Ce modèle suppose qu'il existe un noyau central de i fibres cassées qui sont entourées de fibres non cassées exposées à des concentrations de contraintes dues aux fibres cassées [37] Les fibres non cassées sont à leur tour entourées d'un matériau homogène 'efficace' qui se déforme uniformément (Figure III.3).

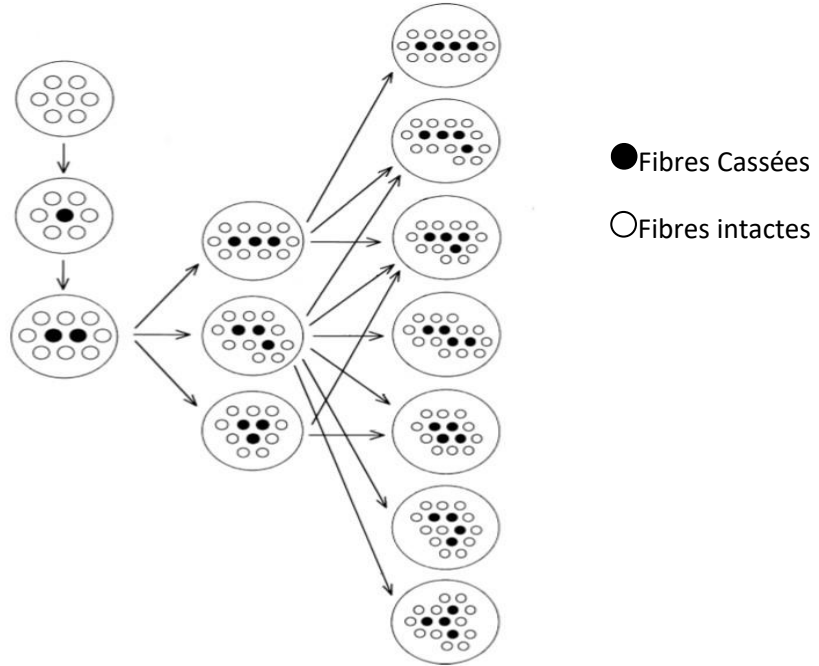


Figure III. 2. Arrangement hexagonal des fibres intactes autour des fibres cassées [38]

On présume que la cellule cassé peut-être approprié à un matériel homogène avec une section transversale circulaire dont le module de Young peut être obtenu par la règle de mélanges :

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

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. Les paramètres A_f , A_m , rayon r_0 et le diamètre d sont donnés par les équations suivantes :

$$A_f = \pi r_f^2 \quad \text{(III.2)}$$

$$A_m = \pi (r_f + d)^2 - \pi r_f^2 \quad \text{(III.3)}$$

$$r_0 = \sqrt{i(r_f + d)^2} \quad (\text{III.4})$$

$$d = \frac{r_f}{\sqrt{V_f}} - r_f \quad (\text{III.5})$$

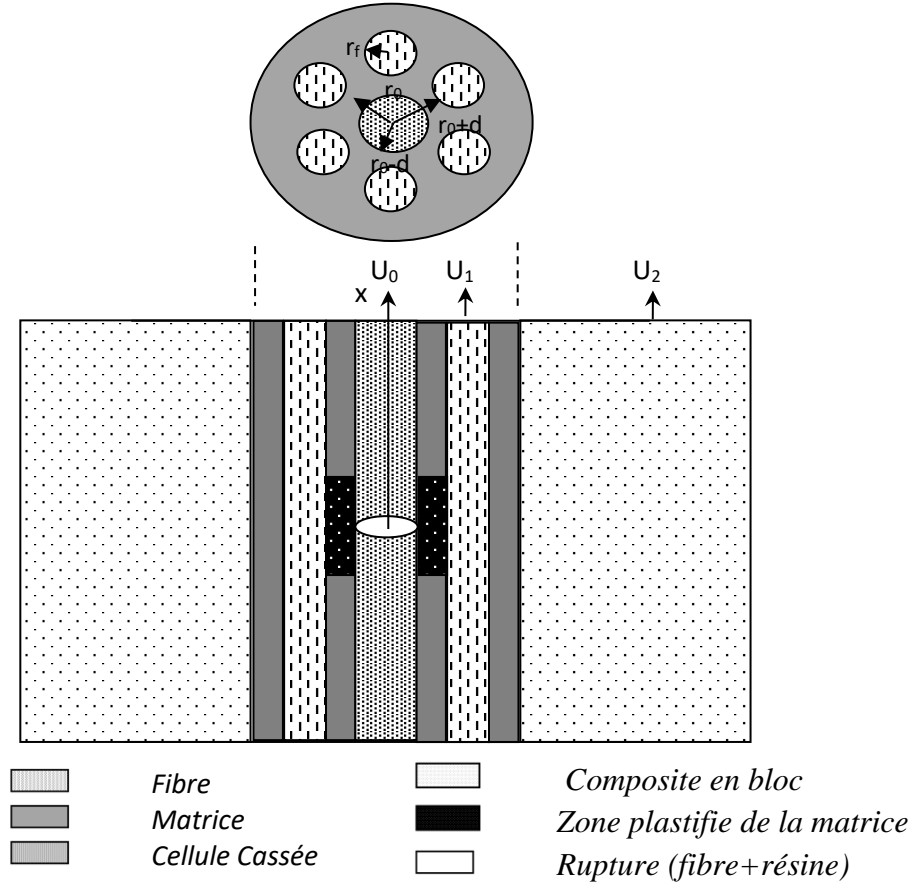


Figure III. 3. Composite unidirectionnel avec rupture transversale d'une fibre et un endommagement local de la matrice et des fibres adjacentes [8].

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

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

$$iA_f E_f \beta \frac{d^2 U_0}{dx^2} - 2\pi r_0 \eta \tau_0 = 0 \quad (\text{III.6})$$

$$iA_f E_f \frac{d^2 U_1}{dx^2} + 2\pi(r_0 + 2d + 2r_f) \frac{G_m}{2d} (U_2 - U_1) + 2\pi r_0 \eta \tau_0 = 0 \quad (\text{III.7})$$

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

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

Le module de cisaillement de la matrice est donné par :

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

La solution de ces deux équations (2.13) et (2.14) avec les conditions aux limites est :

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

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

des solutions pour U_0 et U_1 . Après introduction des conditions nécessaires, les deux équations (III.6) et (III.7) s'écrivent comme suite :

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

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

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

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

E_1 est le module des fibres adjacentes intactes donnée par :

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

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

$$E_c = E_f V_f + (1 - V_f) E_m \quad (III.12)$$

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

$$E\pi(r_0 - d)^2 \frac{d^2 U_0}{dx^2} + 2\pi r_0 \frac{G_m}{2d} (U_1 - U_0) = 0 \quad (\text{III.13})$$

$$n_i A_f E_f \frac{d^2 U_1}{dx^2} + 2\pi(r_0 + 2d + 2r_f) \frac{G_m}{2d} (U_2 - U_1) - 2\pi r_0 \frac{G_m}{2d} (U_1 - U_0) = 0 \quad (\text{III.14})$$

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

$$\left. \begin{aligned} U_0 &= \bar{U}_0 e^{-\gamma x} \\ U_1 &= \bar{U}_1 e^{-\gamma x} \\ U_2 &= \frac{\sigma_c}{E_c} x \end{aligned} \right\} \quad (\text{III.15})$$

Substituant l'équation (2.22) dans les équations (2.20 et 2.21), on obtient les deux équations différentielles suivantes :

$$U_0(x) = C_2 e^{-\sqrt{\gamma_1} x} + C_3 e^{-\sqrt{\gamma_2} x} + \frac{\sigma_c}{E_c} x \quad (\text{III.16})$$

$$U_1(x) = C_2 \left(1 - \frac{\gamma_1}{A}\right) e^{-\sqrt{\gamma_1} x} + C_3 \left(1 - \frac{\gamma_1}{A}\right) e^{-\sqrt{\gamma_2} x} + \frac{\sigma_c}{E_c} x \quad (\text{III.17})$$

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

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

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

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

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

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

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

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

$$\tau(x) = (U_0(x) - U_1(x)) \frac{G_m}{2d} \quad (\text{III.18})$$

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

$$\tau_0 = (U_0(a) - U_1(a)) \frac{G_m}{2d} \quad (\text{III.19})$$

Une fois que la valeur de a est connue, on peut alors obtenir $U_0(x)$ et $U_1(x)$ en termes de quantités connues. Il est à noter que des solutions doivent être trouvées pour chaque nombre de cassures adjacentes possibles, et pour chaque pas de charge considéré. Les concentrations de contraintes C_i pour i fibres cassées, sont alors :

$$C_i = \frac{\left. \frac{dU_1(x)}{dx} \right|_{x=0}}{\sigma_c / E_c} \quad (\text{III.20})$$

Les longueurs inefficaces peuvent être calculées en résolvant pour les distances le long de "x" prises pour les contraintes le long des fibres cassées pour atteindre la valeur appliquée de la contrainte (ou $C_i = 1$). Pour n chargement progressif, les contraintes de traction σ_c est une fraction de la résistance des fibres σ_0 . Si, j est l'accroissement de la charge, on peut écrire :

$$\sigma_c = \frac{\sigma_0 j}{n} \quad (\text{III.21})$$

La longueur inefficace δ est un paramètre requis par les différents modèles probabilistes de rupture. Cette longueur δ des mesures expérimentales peuvent être effectuées pour une configuration de fissuration donnée à l'aide de la spectroscopie [39]

Cependant, la reconduction systématique de mesure pour différents types de composites serait onéreuse. Pour cela, on a recours à des modèles prévisionnels de δ [40,41]

Pour un arrangement hexagonal, l'expression de δ est donnée par :

$$\delta = \frac{1}{2} \left[\ln \left(\frac{\pi}{6V_f} \right) \frac{E_f A_f}{2\pi G_m} \right]^{\frac{1}{2}} \cdot 2r_f \quad (\text{III.22})$$

CHAPITRE IV

Résultats et Discussions

IV.1 Analyse mécanique sur la comparaison des trois fibres naturelles

Dans cette section, une analyse du processus de rupture longitudinale incluant les interactions micromécaniques entre les fibres naturelles de jute, de ramie et de lin ainsi que la matrice époxy. Ces comparaisons nous ramènent à une synthèse sur les trois projets de recherche en master déjà réalisés. Cette comparaison nous a été imposée pour décrire l'efficacité de la fibre la plus performante sur son choix d'un point de vue géométrique et mécanique. Étant donné que la contrainte responsable de la rupture d'une fibre est suffisamment importante, elle peut être transmise à la fibre voisine adjacente à travers la matrice époxy, créant d'abord une zone localement plastifiée, puis éventuellement une rupture. L'estimation de la longueur inefficace des trois fibres limitant la zone localement plastifiée permet d'évaluer la résistance de notre model (voir figure IV.1).

Tableau IV. 1. Caractéristiques mécaniques et géométriques des échantillons en composite Jute-Ramie et Lin/époxyde [9-11]

Désignations	Fibre en Jute	Fibre en Lin	Fibre en Ramie
Module de Young de la fibre E_f	18 GPa	20 GPa	42.3 GPa
Module de Young de matrice E_m	2.92 GPa		
Résistance de référence fibre σ_0	4.02 GPa	4.25 GPa	5.25 GPa
Contrainte de cisaillement τ_0	17.5 MPa	18.5 MPa	21.25 MPa
Coefficient de Poisson de la matrice ν	0.43		
Fraction Volumique des fibres V_f	(0.3-0.7) variable		
Paramètre de cisaillement η	1.0		
Longueur de l'échantillon L	100 mm		
Largeur de l'échantillon W	25 mm		
Epaisseur de l'échantillon t	5 mm		
Rayon de la fibre r_f	$35e^{-7}$ m	10^{-6} m	$25e^{-6}$ m
Nombre maximal de fibres cassées n_i	43		

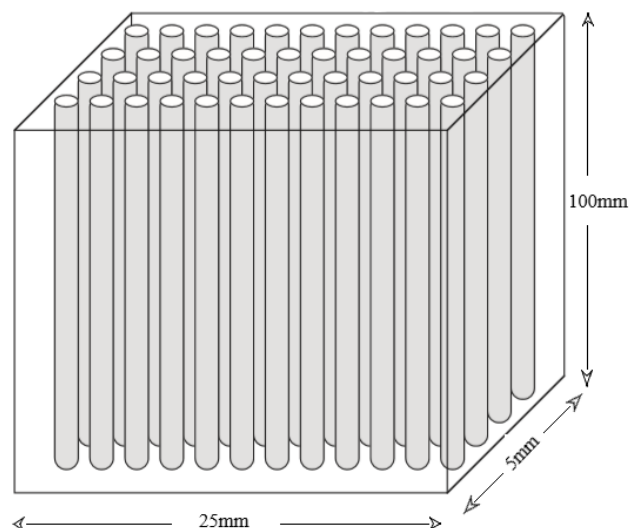


Figure IV. 1. Encombrement de l'échantillon à étudier

IV.2 Facteur de concentration de contrainte

Avant de déterminer la taille de la zone localement plastifiée et la longueur inefficace pour les trois cas de fibres, le facteur de concentration de contraintes des zones endommagées des fibres de lin, de jute et de ramie peut être spécifié. Ce facteur est d'une grande importance car il nous donne la relation entre la contrainte déterminée au point de rupture des fibres et la contrainte externe appliquée. Cela nous permettra de déterminer la concentration de la contrainte au niveau des fibres cassées, et de prédire une rupture probable des fibres voisines adjacentes.

Dans ce contexte, nous avons présenté les premiers résultats de la concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées, de l'augmentation des charges et des fractions volumiques pour les trois cas de fibres.

IV.2.1 Facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante et pour deux cas de fraction volumique 0.35 et 0.7, pour les trois cas de fibres

IV.2.1.1 Fibre en Lin

La concentration de contrainte au point de rupture cas de la fibre en Lin illustrée sur la figure IV.2. définit la variation du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante ($0.5\sigma_0$, $0.7\sigma_0$ et le chargement complet) à l'endroit de rupture des fibres. et cela pour deux cas extrêmes de fraction volumique 0.35 et 0.7.

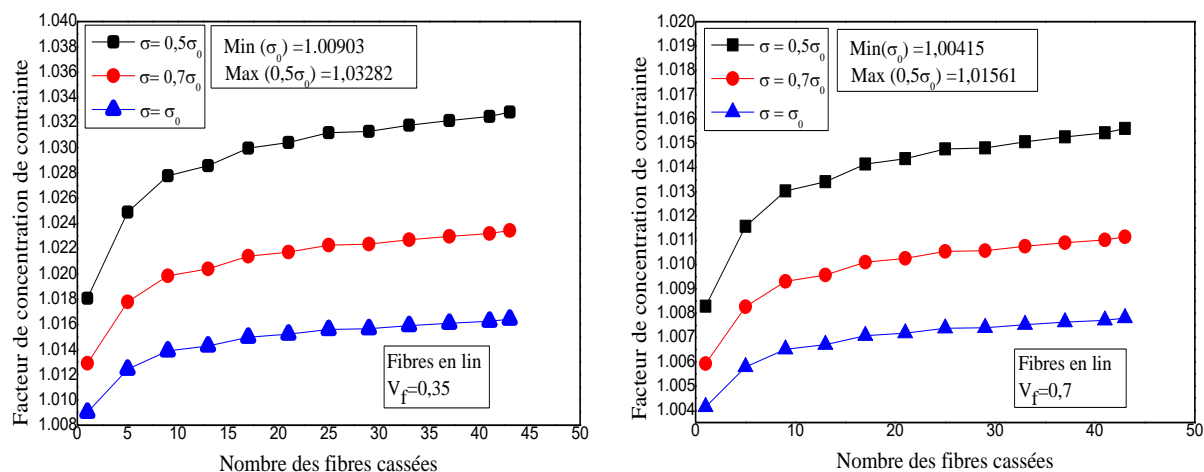


Figure IV. 2. Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante pour la fibre en Lin, et pour deux cas de fraction volumique 0.35 et 0.7.

On voit bien que ce facteur augmente progressivement en fonction du nombre de fibres cassées. L'augmentation est plus rapide lorsque le nombre de fibres cassées est très faible, puis il commence à se stabiliser au fur et à mesure que le nombre de fibres cassées augmente. Par contre, il diminue en fonction de la contrainte externe appliquée. En revanche, le facteur de concentration de contraintes est plus important lorsque la fraction volumique augmente de 0,35 à 0,7, ce qui nous montre la bonne rigidité du matériau avec une fraction volumique importante, c'est-à-dire ayant un nombre significatif de fibres dans le composite.

Le facteur de concentration de contraintes maximal localisé sur la première figure IV.2 ($V_f=0.35$) à $\sigma = 0.5\sigma_0$, 43 fibres en Lin cassées ($C_{max}= 1.03282$), puisque le nombre de fibres dans la matrice est moins important. Tandis que la valeur minimale de ce facteur ($C_{min}= 1.00415$) située dans la seconde figure IV.2 ($V_f=0.7$) obtenue pour une fibre cassée sous une contrainte extérieure maximale $\sigma = \sigma_0$, ceci est dû au volume important des fibres qui occupent la matrice.

IV.2.1.2 Fibre en Jute

Pour le cas de la fibre de jute illustré à la figure IV.3 où le facteur de concentration de contraintes est évalué en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte externe croissante, et pour deux cas extrêmes de fraction volumique 0,35 et 0,7. De la même manière on observe que ce facteur augmente progressivement en fonction du nombre de fibres cassées. L'augmentation est plus rapide lorsque le nombre de fibres cassées est très faible, puis il commence à se stabiliser lorsque le nombre de fibres cassées augmente. En revanche, il diminue en fonction de la contrainte externe appliquée.

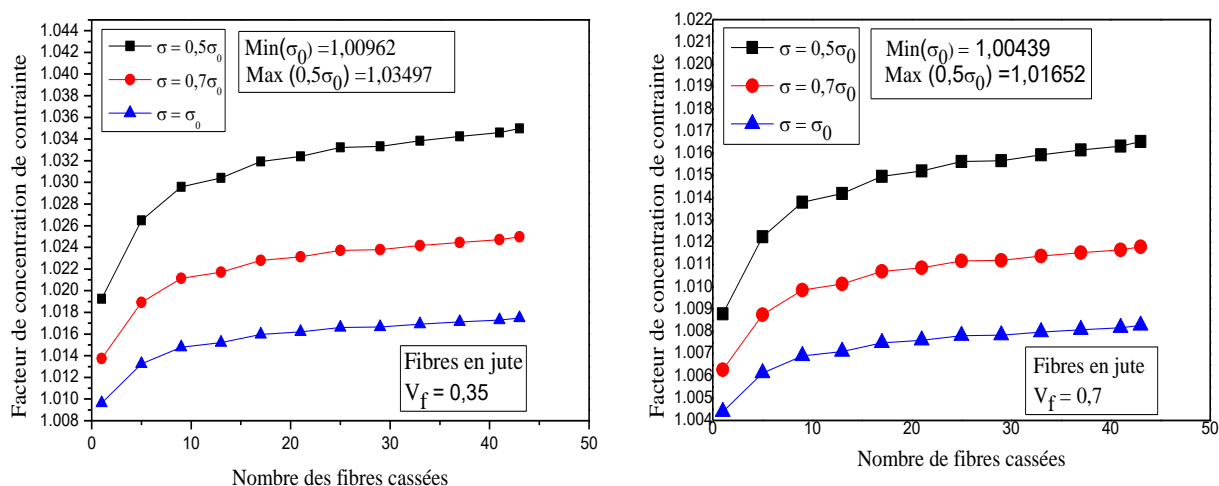


Figure IV. 3. Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante pour la fibre en Jute, et pour deux cas de fraction volumique 0.35 et 0.7.

D'autre part, le facteur de concentration de contraintes est plus important lorsque la fraction volumique passe de 0,35 à 0,7. On note également que la concentration de contraintes pour le cas de la fibre de Jute est légèrement supérieure à celle du Lin si l'on compare les valeurs trouvées.

Le facteur de concentration de contraintes maximal est localisé sur la figure IV.3 ($V_f=0.35$) pour $\sigma = 0.5\sigma_0$ pour 43 fibres cassées ($C_{\text{max}}= 1.0349$) pour la fibre en Jute. Tandis que la valeur minimale de ce facteur ($C_{\text{min}}= 1.00439$) est localisée sur l'autre figure IV.3 ($V_f=0.7$) est obtenue pour une fibre cassée sous une contrainte extérieure maximale $\sigma = \sigma_0$.

IV.2.1.3 Fibre en Ramie

Pour le troisième cas concernant la fibre Ramie, les résultats de la concentration de contrainte au point de rupture sont illustrés sur la figure IV.4 qui montre la variation du facteur de concentration de contrainte en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte externe croissante (0,5, 0,7 et le chargement complet) au point de rupture des fibres. Et cela pour deux cas extrêmes de fraction volumique 0,35 et 0,7.

Le facteur augmente progressivement avec le nombre de fibres cassées. L'augmentation est plus rapide lorsque le nombre de fibres cassées est très faible, puis elle commence à se stabiliser lorsque le nombre de fibres cassées augmente. En revanche, elle diminue en fonction de la contrainte externe appliquée. Cependant, le facteur de concentration de contraintes est plus important lorsque la fraction volumique passe de 0,35 à 0,7.

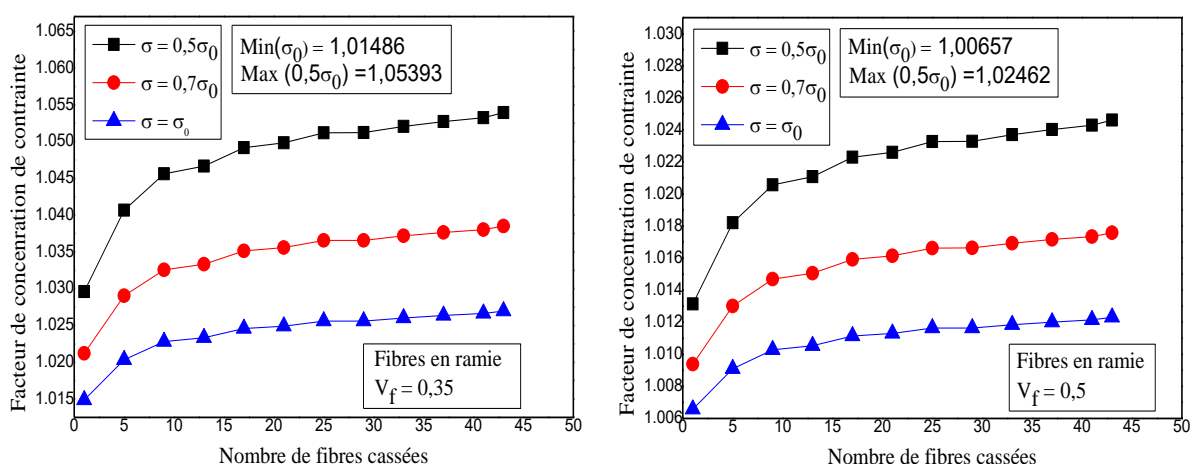


Figure IV. 4. Evolution du facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante pour la fibre en Ramie, et pour deux cas de fraction volumique 0.35 et 0.7.

On note également que la concentration de contraintes pour la fibre Ramie y est légèrement supérieure à celle de Jute si l'on compare les valeurs trouvées. Le facteur de concentration de contraintes maximal est localisé sur la première figure IV.4 ($V_f=0.35$) à $\sigma = 0.5\sigma_0$ pour 43 fibres cassées ($C_{\text{max}} = 1.05393$), puisque le nombre de fibres qui occupent le volume de la matrice est moins important. Tandis que la valeur minimale de ce facteur ($C_{\text{min}} = 1.00657$) est située dans la seconde figure IV.4 ($V_f=0.7$) sous une contrainte extérieure maximale $\sigma = \sigma_0$, cela est dû au grand volume de fibres occupant la matrice.

IV.2.2 Facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une progression de la fraction volumique croissante et pour deux cas de chargement appliqué ($0.5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$) et pour les trois cas de fibres.

IV.2.2.1 Fibre en Lin

La figure IV.5 illustre la variation de concentration de contrainte en fonction du nombre de fibre cassées pour des fractions volumiques variable croissante (0.35, 0.5, et 0.7) pour deux cas de chargements ($\sigma = 0.5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$). Nous pouvons lire sur les figures que le facteur de concentration de contrainte est beaucoup plus important aux premières fibres cassées par la suite elle se stabilise aux successions des cassures des fibres, par contre le facteur devient moins important lorsqu'on fait augmenter la fraction volumique ainsi que les chargements de 0.5 à $\sigma = \sigma_0$.

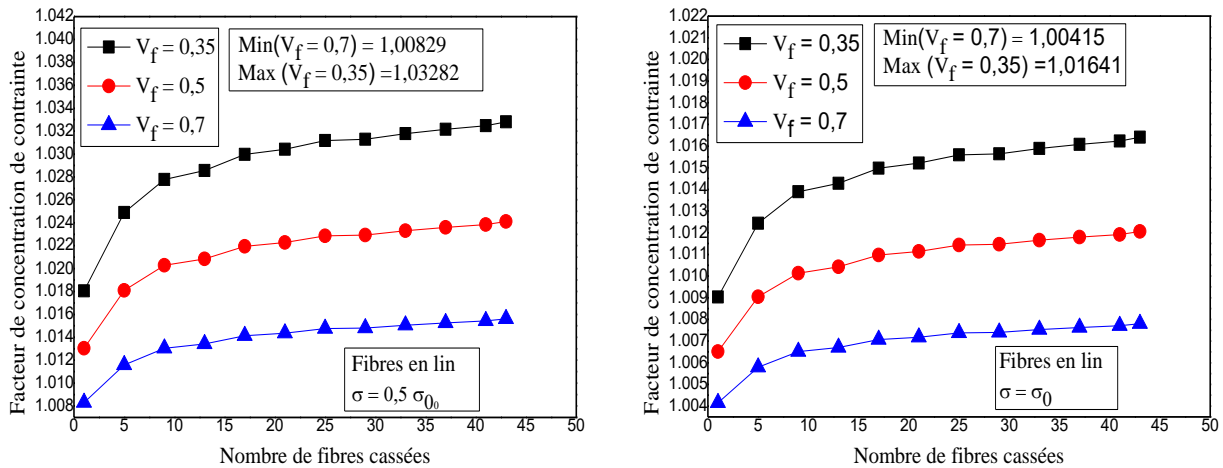


Figure IV. 5. Evolution du facteur de concentration de contraintes pour la fibre en Lin, en fonction du nombre de fibres cassées pour une fraction volumique croissante et pour deux cas de chargements.

Le facteur de concentration de contraintes maximal est localisé sur la première figure IV.5 ($\sigma = 0,5\sigma_0$) à $V_f = 0,35$ pour 43 fibres cassées ($C_{\text{max}} = 1,03282$) de la fibre en Lin. Tandis que la valeur minimale de ce facteur ($C_{\text{min}} = 1,00415$) est située dans la seconde figure IV.5 ($\sigma = \sigma_0$), obtenue pour une fibre cassée avec une fraction volumique de 0,7

IV.2.2.2 Fibre en Jute

En ce qui concerne la fibre de jute, les résultats de la concentration de contrainte au point de rupture sont illustrés à la figure IV.6, qui montre la variation du facteur de concentration de contrainte en fonction du nombre de fibres cassées pour une fraction volumique croissante (0,35, 0,5 et 0,7) et un chargement de $\sigma = 0,5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$. On note une légère augmentation du facteur de concentration de contraintes par rapport aux valeurs de la fibre de lin.

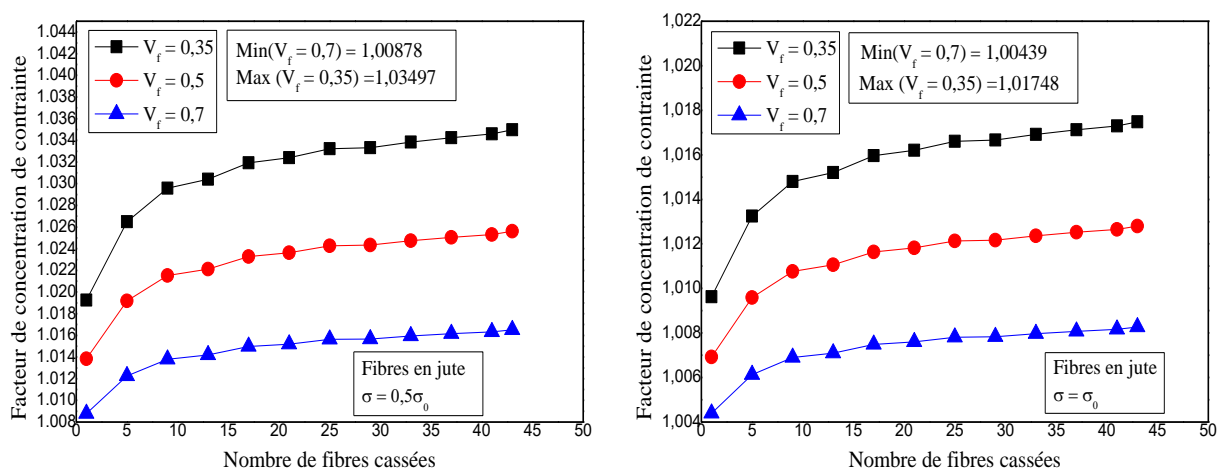


Figure IV. 6. Evolution du facteur de concentration de contraintes pour la fibre en Jute, en fonction du nombre de fibres cassées pour une fraction volumique croissante et pour deux cas de chargements.

Le facteur de concentration de contrainte maximale de la fibre de jute situé sur les deux courbes de $V_f = 0,35$ sur la figure IV.6 pour 43 fibres cassées est ($C_{\max} = 1.03497$ et $C_{\max} = 1.01748$) respectivement pour ($\sigma = 0.5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$).

Tandis que la valeur minimale à $V_f = 0.7$ est ($C_{\min} = 1.00878$ et $C_{\min} = 1.00439$) respectivement pour ($\sigma = 0.5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$), cela montre que le facteur de concentration de contrainte a un impact direct sur la fraction volumique et sur les chargements

IV.2.2.3 Fibre en Ramie

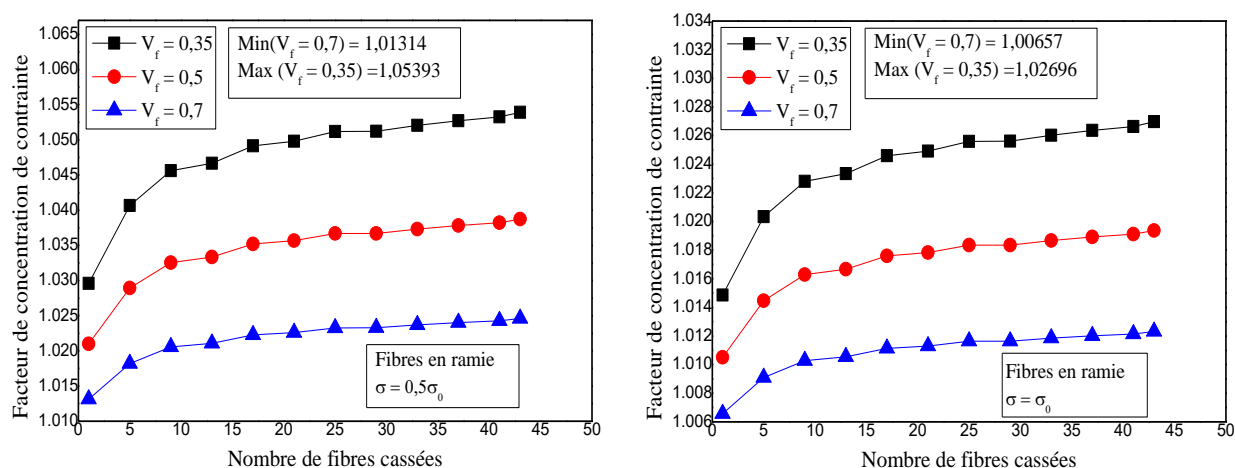


Figure IV. 7. Evolution du facteur de concentration de contraintes pour la fibre en Ramie, en fonction du nombre de fibres cassées pour une fraction volumique croissante et pour deux cas de chargements.

Pour le cas des fibres Ramie, illustré à la figure IV.7 où le facteur de concentration de contraintes est évalué en fonction du nombre de fibres cassées pour une fraction volumique croissante, et pour deux cas de contraintes externes $\sigma = 0,5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$. On note que la concentration de contraintes de la fibre Ramie est légèrement supérieure à celle du Jute. Il est à noter que le facteur de concentration de contrainte maximal se situe dans les deux courbes de la figure IV.7 à $V_f = 0,35$ pour 43 fibres cassées soit ($C_{\max} = 1,05393$ et $C_{\max} = 1,02696$) respectivement pour ($\sigma = 0,5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$). Alors que la valeur minimale, obtenue à $V_f = 0,7$ est ($C_{\min} = 1,01314$ et $C_{\min} = 1,00657$) pour ($\sigma = 0,5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$).

On note dans ces derniers résultats que les facteurs de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées et pour différentes fractions volumiques sont approximatives pour les fibres de Jute et Lin, contrairement à la fibre Ramie. Cela est dû à la grande valeur du module de Young du Ramie, qui est d'environ 42,3 GPa par rapport à celui du Jute et Lin, 18 GPa et 20 GPa respectivement.

IV.2.3 Comportement du facteur de concentration de contraintes sur les trois cas des fibres en fonction du nombre de fibres cassées pour une progression du chargement appliqué

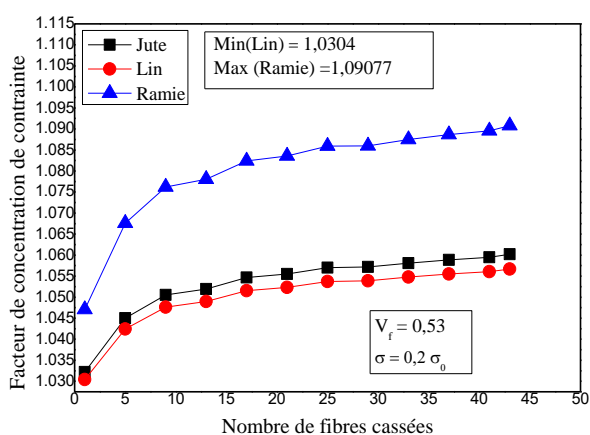


Figure IV.8.a

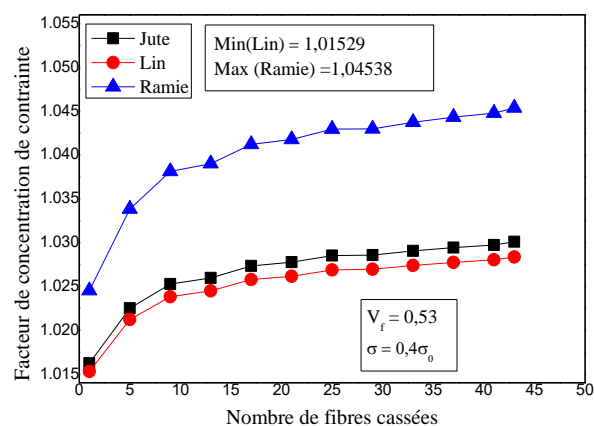


Figure IV.8.b

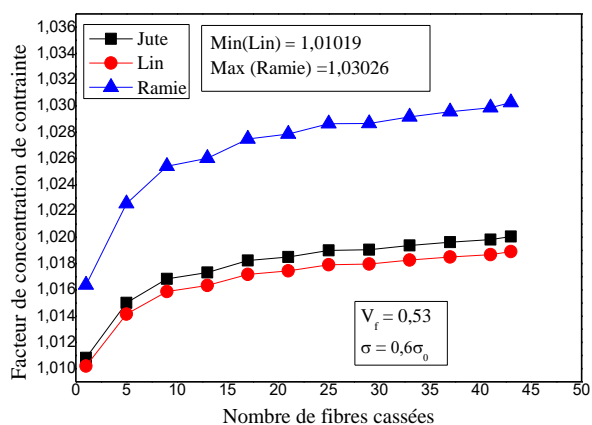


Figure IV.8.c

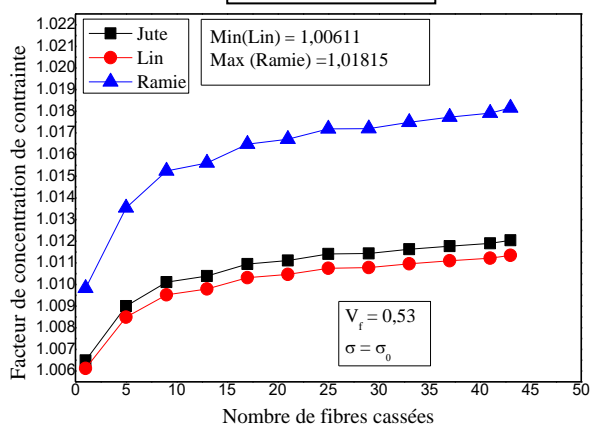


Figure IV.8.d

Figure IV. 8. Evolution du facteur de concentration de contraintes des trois cas de fibres naturelles en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante, avec $V_f=0.53$

La figure IV.8 illustre la variation de concentration de contrainte en fonction de nombre de fibre cassées pour les trois fibre naturelles (Lin, Jute, Ramie) pour une contrainte extérieure croissante ($\sigma = 0.2\sigma_0$, $\sigma = 0.4\sigma_0$, $\sigma = 0.6\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$) et une fraction volumique fixe $V_f=0.53$.

On note également que le facteur de concentration de contraintes augmente progressivement en fonction du nombre de fibres cassées. Nous pouvons voir que l'augmentation est plus rapide lorsque le nombre de fibres cassées est très faible, puis il commence à se stabiliser lorsque le nombre de augmente.

Le facteur de concentration de contraintes maximal localisé sur la figure IV.8.a pour 43 fibres cassées à $\sigma = 0.2\sigma_0$ est ($C_{max}= 1.09077$) pour la fibre en Ramie, Tandis que la valeur minimale est ($C_{min}= 1.00611$), située dans la figure IV.8.d pour la fibre en Lin obtenue pour une fibre cassée sous une contrainte $\sigma = \sigma_0$. Cela nous amène à déduire que la fibre de lin est moins résistante que celle de Jute et beaucoup moins résistante que celle de Ramie.

IV.3 Evolution de la zone localement plastifiée « a »

Après avoir déterminé le facteur de concentration de contraintes dans les zones endommagées pour les fibres de Lin, Jute et Ramie, où nous avons effectués différentes variations sur le facteur de concentration de contraintes, en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante et une variation de fraction volumique de 0.35 à 0.7, et ce pour les trois cas de fibres. D'autre part on a variée le facteur de concentration de contraintes en fonction du nombre de fibres cassées pour une progression de la fraction volumique croissante pour deux cas de chargement appliqué ($0.5\sigma_0$ et $\sigma = \sigma_0$) et ceci pour déduire la fiabilité et la durabilité des trois cas de fibres que nous étudions.

Cette fois, nous déterminons la grandeur de la zone localement plastifiée en fonction des fibres cassées pour différents chargements pair et impair. Les résultats illustrent donc l'évolution de la zone plastique « a » de la matrice en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte externe croissante avec un pas de 0,2 paire et impaire.

IV.3.1 Evolution de la zone plastique « a » en fonction du chargement [σ]

IV.3.1.1 Fibre en jute

Comme nous le voyons sur les figures IV.9 Il est évident que la zone localement plastifiée pour la fibre en jute devient plus importante avec l'augmentation du nombre de fibres cassées, et du chargement appliqué où elle passe de $0.066 \cdot 10^{-3}$ m d'une fibre cassée pour une contrainte extérieure $\sigma = 0.1 \sigma_0$ à $5.98 \cdot 10^{-3}$ m pour quarante-trois fibres cassées d'un chargement complet $\sigma = \sigma_0$.

On peut donc dire que l'extension de la zone localement plastifiée « a » dépend essentiellement du nombre de fibres cassées et de la charge appliquée pour une fraction volumique moyenne de 0,53.

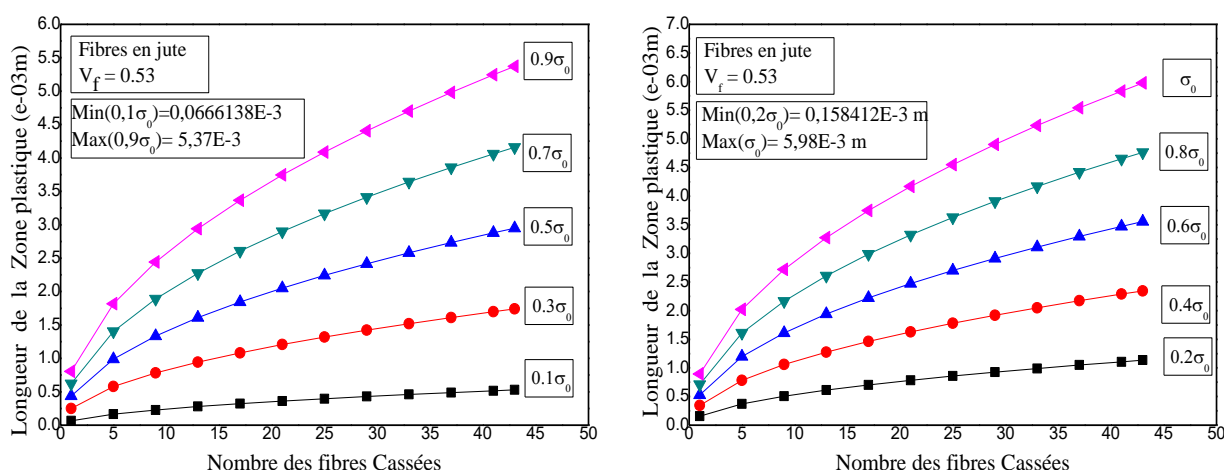


Figure IV. 9. Evolution de la zone plastique « a » de la fibre en Jute en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante avec un pas de 0.2, et pour Vf=0.53.

IV.3.1.2 Fibre en Lin

De même pour la fibre de lin où nous avons tracé les figures IV.10 pour voir l'évolution de la zone plastique « a » de la matrice en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante avec un pas de 0.2 et pour une fraction volumique moyenne de 0.53.

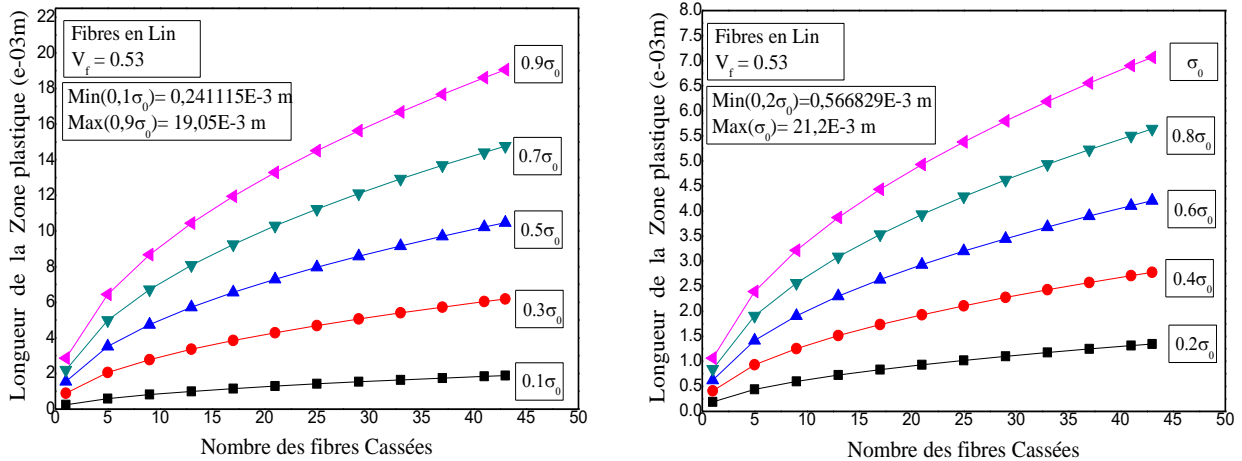


Figure IV. 10. Evolution de la zone plastique « a » de la fibre en Lin en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante avec un pas de 0.2 et pour Vf=0.53.

Nous confirmons l'approche des valeurs trouvées précédemment pour la fibre de jute, que la zone localement plastifiée pour ce cas-là, devient plus importante en fonction du nombre de fibres cassées, et du chargement appliqué là où elle passe de $0.2411 \cdot 10^{-3}$ m d'une fibre cassée pour une contrainte extérieure $\sigma = 0.1\sigma_0$ à $21.2 \cdot 10^{-3}$ m pour quarante-trois fibres cassées pour un chargement complet $\sigma = \sigma_0$.

IV.3.1.3 Fibre en Ramie

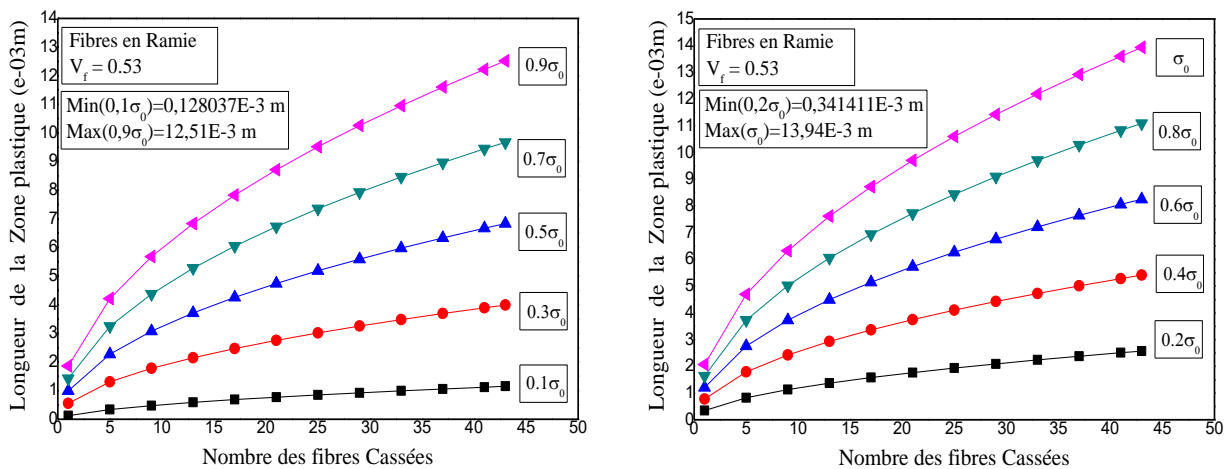


Figure IV. 11. Evolution de la zone plastique « a » de la fibre en Ramie en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante avec un pas de 0.2 et pour Vf=0.53.

Pour le troisième cas de fibre en Ramie, La figure IV.11 représente l'évolution de la zone plastique a en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante avec un pas de 0.2 et pour une fraction volumique moyenne de 0.53, ceci confirme l'approche des valeurs trouvées précédemment pour les deux cas de fibres (jute et lin) , et que la zone localement plastifiée devient plus importante en fonction du nombre de fibres cassées et du chargement appliqué où elle passe de $0.128 \cdot 10^{-3}$ m d'une fibre cassée pour une contrainte extérieure $\sigma = 0.1\sigma_0$ à $13.9 \cdot 10^{-3}$ m pour quarante-trois fibres cassées pour un chargement complet $\sigma = \sigma_0$.

Cela nous ramène à retracer l'évolution de la zone plastique « a » en fonction des trois cas de fibres afin de définir l'approche des longueurs de la zone plastique en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte externe.

IV.3.2 Evolution de la zone plastique [a] en fonction du lin, ramie et le jute avec une variation croissante de la contrainte extérieure appliquée.

Étant donné que la longueur inefficace δ est définie comme la longueur entre l'emplacement de la rupture de la fibre et la longueur pour laquelle la fibre revient à sa capacité à supporter une charge complète, elle doit donc inclure la zone localement plastifiée « a » ($\delta \geq a$). Selon les lois de comportement mécanique et à partir du point de rupture, la fibre naturelle cassée doit passer par une zone localement plastifiée « a », puis par une zone transitoire avant d'atteindre la zone parfaitement élastique délimitée par une longueur δ dite inefficace. Ceci nous amène à tracer l'évolution de la zone plastique « a » en fonction de ces trois cas de matériaux afin de clarifier l'approche des longueurs de la zone plastique en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte externe appliquée croissante et en fonction de la fraction volumique

IV.3.2.1 Evolution de la longueur « a » « zone plastique » en fonction du lin, ramie et le jute avec une variation croissante du chargement appliquée, et pour trois cas de $V_f=0.35$, 05 et 0.7.

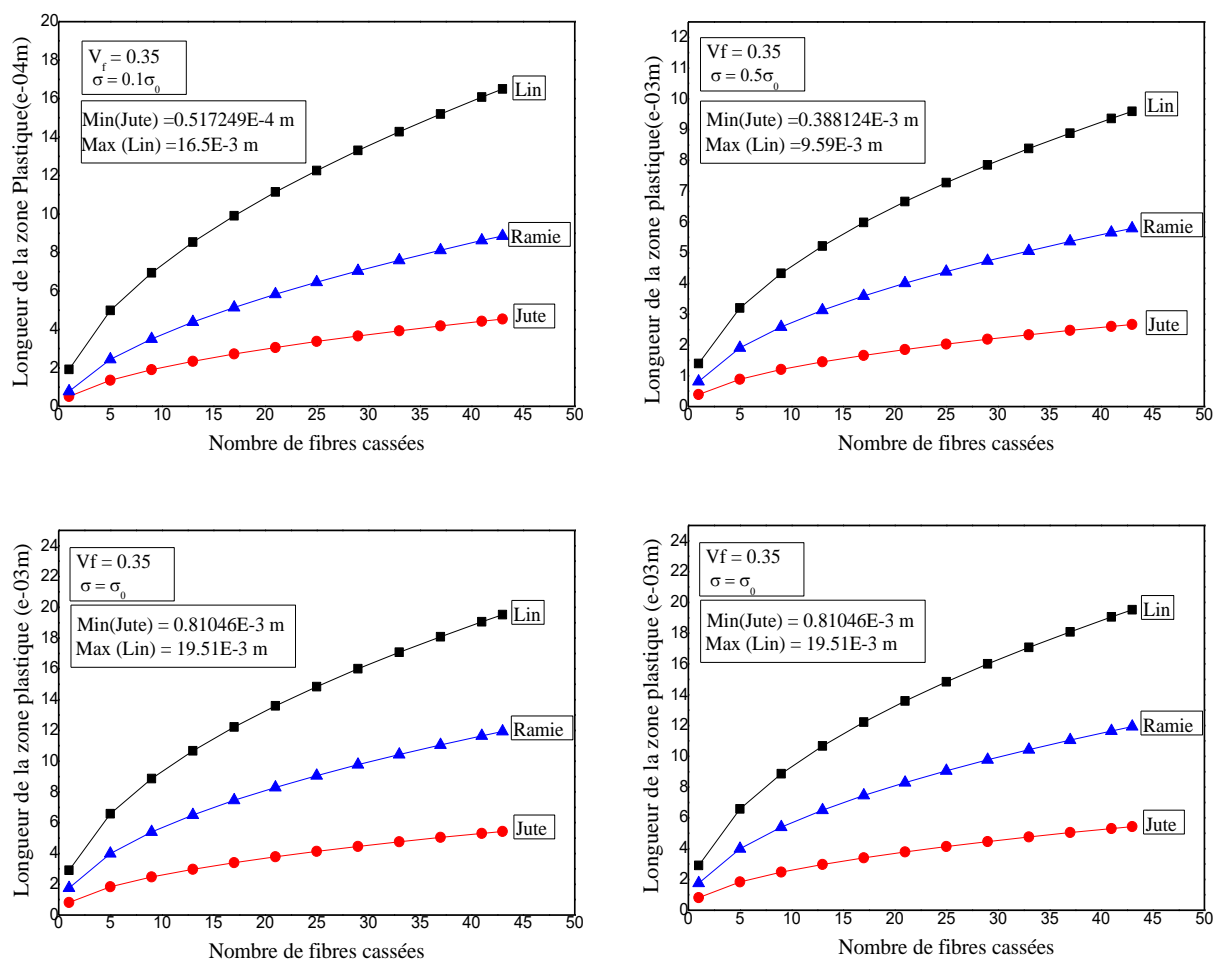


Figure IV. 12. Evolution de la zone plastique « a » des trois fibres en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante variable et pour $V_f=0.35$.

Pour une petite fraction volumique de 0,35 où le volume des fibres dans la matrice est moins important, nous avons fait varier la longueur de la zone plastique « a » des trois fibres Lin, Ramie et Jute, ceci en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante variable de $0.1\sigma_0$, $0.5\sigma_0$, $0.7\sigma_0$ et σ_0 .

Comme le montrent les figures IV.12 il est évident que la longueur de la zone localement plastifiée pour la fibre en lin s'allonge en fonction du nombre de fibres cassées, et du chargement appliqué où elle passe de $0.517 \cdot 10^{-4}$ mm pour une contrainte extérieure de $\sigma = 0.1\sigma_0$ pour la fibre en jute d'une fibre cassée à $19.51 \cdot 10^{-3}$ mm de quarante-trois fibres cassées pour un chargement complet $\sigma = \sigma_0$ pour la fibre en Lin.

On peut donc dire que l'extension de la zone localement plastifiée « a » dépend essentiellement du nombre de fibres cassées et de la charge appliquée pour une fraction volumique moyenne. Cela montre également que les longueurs des zones plastiques du lin sont plus importantes que celles du jute. D'autre part, nous pouvons révéler à travers les courbes la résistance du matériau utilisé.

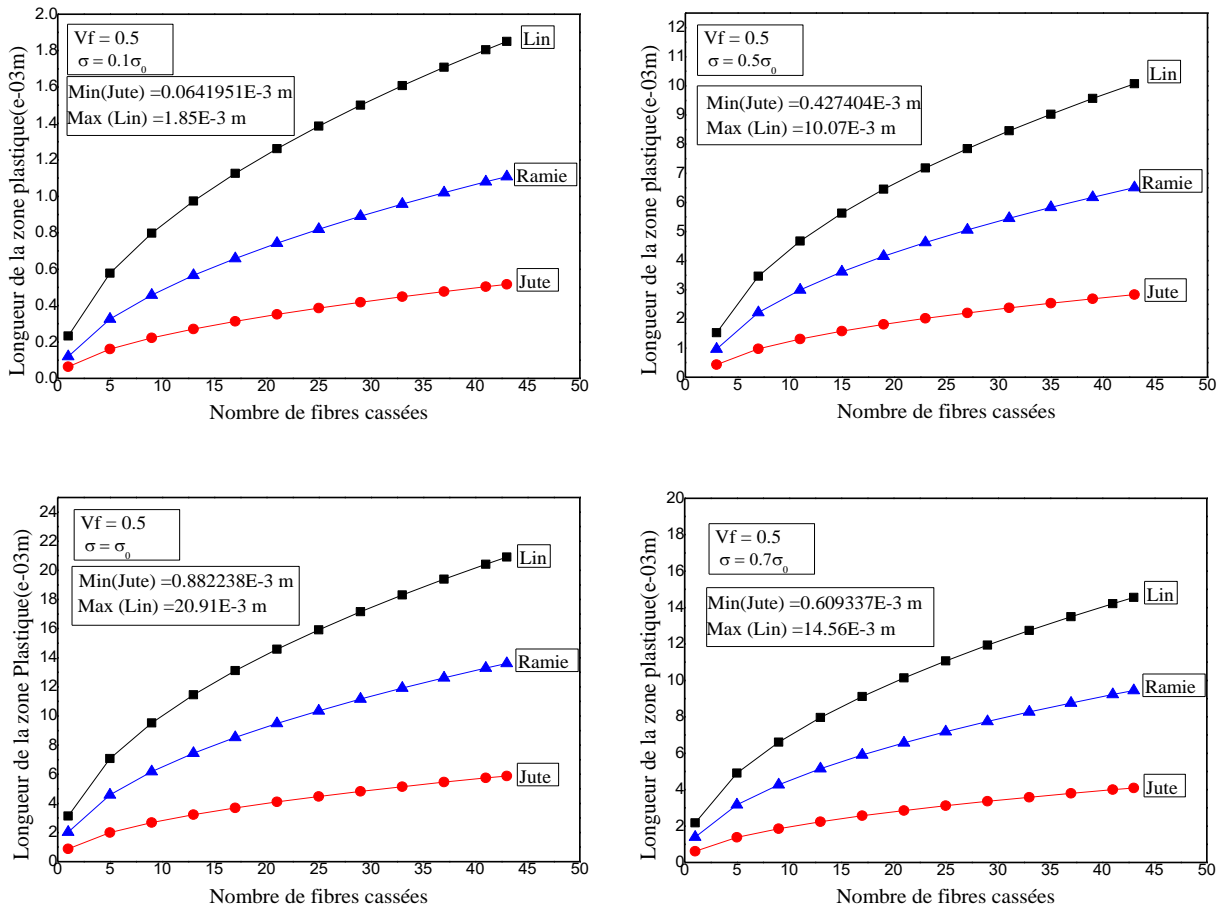


Figure IV. 13. Evolution de la zone plastique « a » des trois fibres en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante variable et pour $V_f=0.5$

Lorsque la fraction volumique est portée à 0,5 pour une charge variable croissante comme le montrent les figures IV.13 où l'on fait varier la longueur de la zone plastique « a » des trois fibres Lin, Ramie et Jute en fonction du nombre de fibres cassées. Ces quatre résultats nous montrent que la longueur de la zone plastique ou la longueur inefficace des trois matériaux devient encore plus sensible lorsque la charge est progressivement augmentée de $0.1\sigma_0$, à σ_0 . Comme nous le voyons dans la figure IV.13 où la longueur inefficace passe de $0.641 \cdot 10^{-4}$ m pour une contrainte externe $\sigma = 0.1\sigma_0$ d'une fibre en jute cassée à $20.91 \cdot 10^{-3}$ m de quarante-trois fibres en lin cassées pour un chargement complet $\sigma = \sigma_0$.

Donc cela montre également que les longueurs des zones plastiques du lin sont toujours supérieures à celles du jute pour $V_f = 0,5$.

Dans le dernier cas, lorsque la fraction volumique atteint sa valeur extrême de 0,7, cela est illustré dans quatre cas sur la figure IV.14, où nous pouvons clairement voir que la longueur de la zone localement plastifiée atteint une valeur maximale de $22,8 \cdot 10^{-3}$ m de quarante-trois fibres en lin cassées pour un chargement complet $\sigma = \sigma_0$.

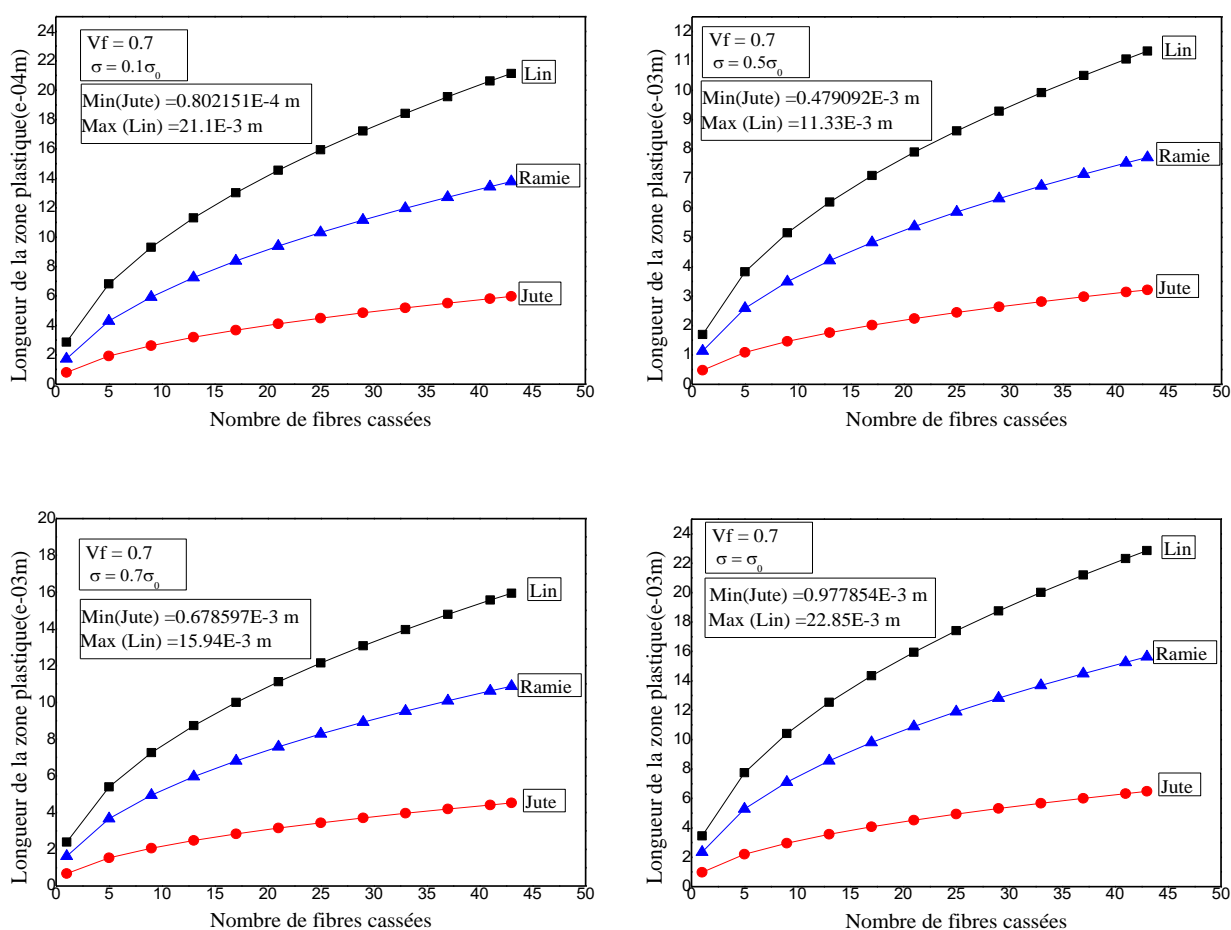


Figure IV. 14. Evolution de la zone plastique « a » des trois fibres en fonction du nombre de fibres cassées pour une contrainte extérieure croissante variable et pour $V_f=0.7$

On peut donc conclure que la longueur où l'extension de la zone localement plastifiée « a » en fonction du nombre de fibres cassées devient de plus en plus importante lorsque la contrainte externe appliquée augmente progressivement d'une part, d'autre part les matériaux lin, ramie et le jute deviennent très sensible lorsque la fraction volumique varie de 0.35 à 0.7.

Cela montre l'importance du choix de la fraction volumique pour chaque matériau utilisé, afin de définir la probabilité d'endommagement du matériau à travers la longueur de la zone localement plastifiée « a ».

IV.4 Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction du chargement appliqué.

Pour compléter cette étude et avoir une idée plus générale de l'évolution du déplacement longitudinal en fonction de la contrainte externe appliquée, nous avons présenté les figures IV.15 et IV.16. qui illustrent donc l'évolution du déplacement longitudinal de fibres cassées et intactes au voisinage de la zone endommagée des fibres pour une fraction volumique moyenne de 0.53.

Selon le nombre de fibres cassées, il est clair qu'au point de leur rupture, les courbes diffèrent les unes des autres comme le montre la figure IV.15, elles prennent ensuite la même forme jusqu'à devenir linéaires. On voit également que le déplacement augmente rapidement et progressivement en fonction du nombre de fibres cassées et que pour une fraction volumique $V_f = 0,53$.

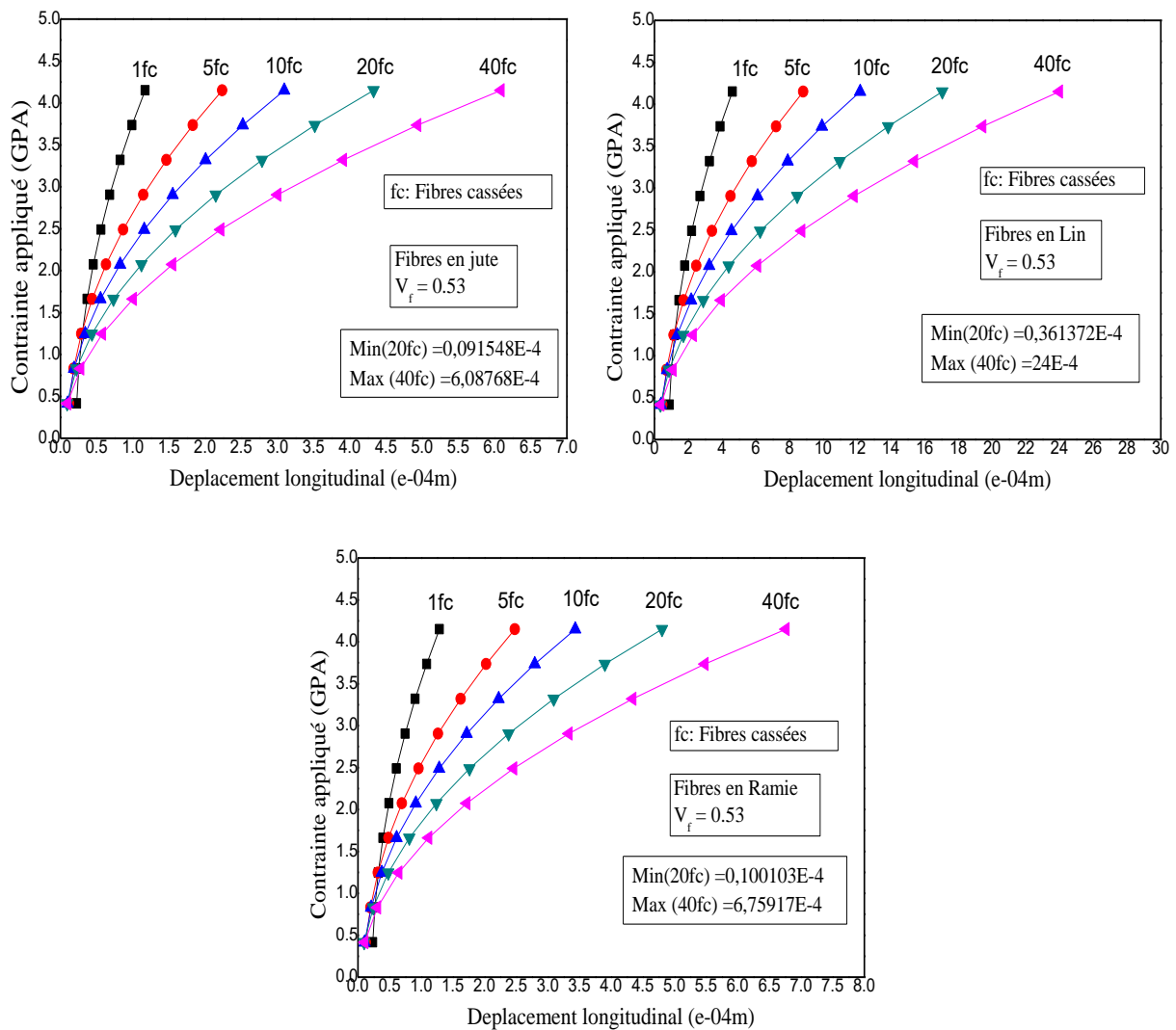


Figure IV. 15. Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée avec une fraction volumique moyenne de 0.53.

D'autre part, nous remarquons également qu'à chaque fois que le nombre de fibres cassées augmente, le déplacement de ces fibres cassées devient plus important au voisinage de la zone endommagée des fibres. Par exemple le déplacement longitudinal maximum (cas pour 40 fibres cassées) pour le matériau jute est de $6.0876 \cdot 10^{-4}$ m, puis il passe à $6.759 \cdot 10^{-4}$ m pour la fibre ramie, puis il rebondit directement à $24 \cdot 10^{-4}$ m pour la fibre de lin. Cela nous montre que les matériaux en jute et ramie sont plus résistants au déplacement longitudinal au point de rupture des fibres, cependant le lin est très sensible en raison de son grand déplacement. Cela reflète le phénomène de non-linéarité dans la zone endommagée qui se caractérise par une plasticité locale.

La dernière figure IV.16 représente la variation du déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction du chargement appliquée et fonction d'une progression croissante des nombres de fibres cassées et cela toujours pour une fraction volumique moyenne de 0.53.

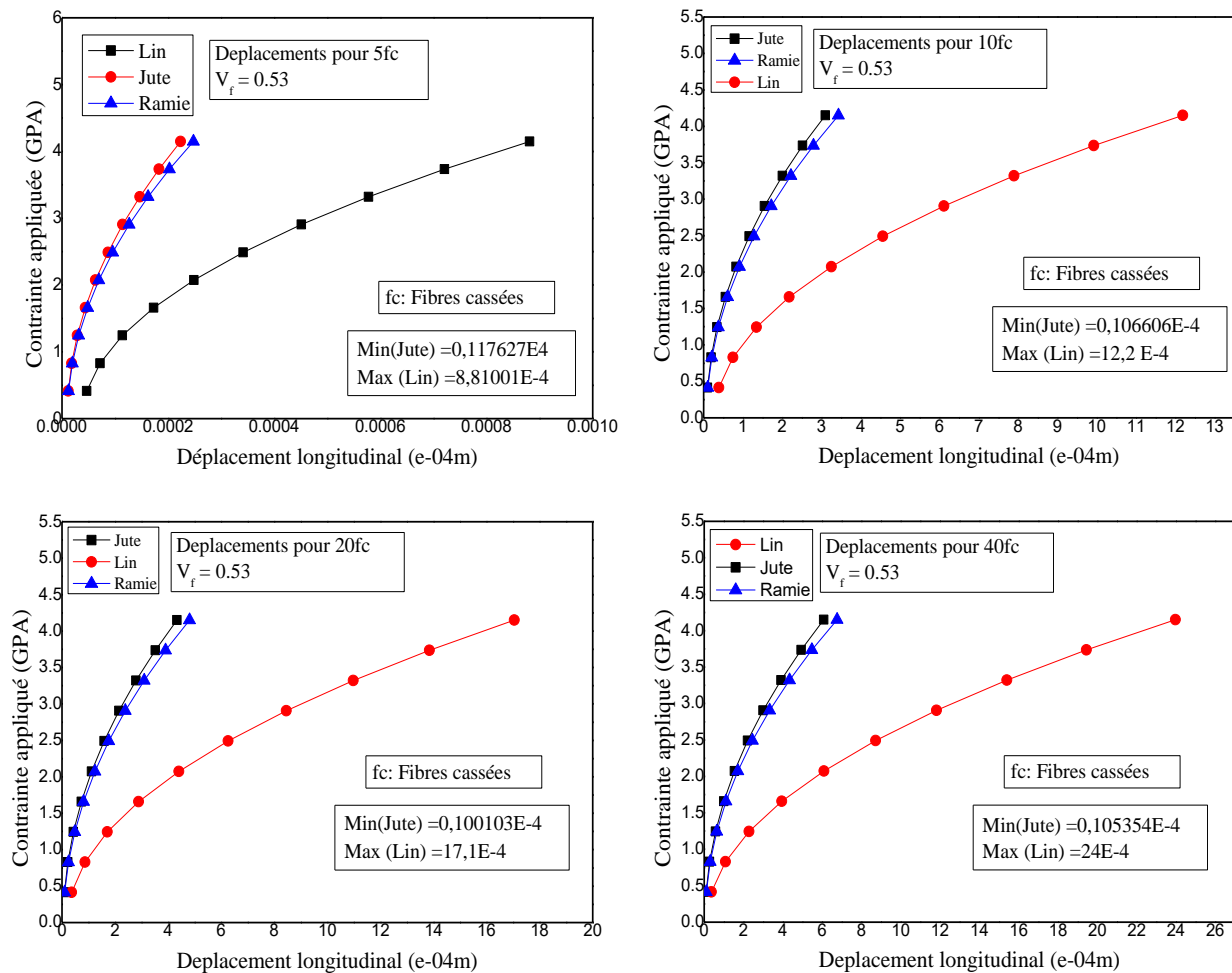


Figure IV. 16. Déplacement longitudinal au point de la rupture des fibres en fonction de la contrainte extérieure appliquée et en fonction des nombres de fibres cassées, pour $V_f = 0.53$.

Sur ces dernières figures IV.16, on peut dire que le déplacement augmente sous une forme exponentielle en fonction de la contrainte de traction appliquée aux bords de l'échantillon. Le déplacement croît plus rapidement avec l'augmentation du nombre de fibres cassées (5, 10, 20 et 40). Cette croissance est marquée par une divergence assez particulière entre les différentes courbes de ces figures là encore pour le cas d'une fraction volumique moyenne de 0.53.

Cela confirme clairement ce que nous avons précédemment interprété selon lequel les matériaux de jute et de ramie sont plus résistants au déplacement longitudinal au point de rupture des fibres. Par exemple, le déplacement longitudinal maximum (cas pour 5 fibres cassées) pour les matériaux en jute et ramie est d'environ $2,5 \cdot 10^{-4}$ m, puis il passe à $8,81 \cdot 10^{-4}$ m pour la fibre de lin. Pour le cas de 40 fibres cassées le déplacement longitudinal passe directement à $24 \cdot 10^{-4}$ m pour la fibre en lin. Vue l'importance de ces déplacements, ceci nous ramène à écarter le choix du lin pour le renforcement du matériau composite évitant ainsi l'endommagement rapide causés par son déplacement important.

CONCLUSION GÉNÉRALE

L'objectif de ce travail était d'assurer un moyen très explicite pour comparer les travaux déjà fait par nos camarades sur l'endommagement progressif d'un composite unidirectionnel des fibres naturelles tel que le Lin, Jute et Ramie, et d'analyser le phénomène de transfert de charges qui a lieu lors de la rupture longitudinale de ces matériaux composites.

Pour cela, nous nous sommes concentrés, en premier lieu, sur le processus de rupture des composites unidirectionnels à renforts naturels moins chers est disponible et à matrice ductile (largement utilisés dans les applications industrielles). En se plaçant à l'échelle micromécanique et en analysant le processus d'endommagement de ces composites, certains paramètres influant sur la propagation de la rupture ont pu être identifiés tel que le déplacement longitudinal en fonction du chargement appliqué, 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 concentration de contrainte, nous a permis d'avoir une idée plus claire sur l'évolution de la rupture des trois fibres utilisées 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 naturelle. Cette dernière devient moins importante en s'éloignant de la zone plastique.

D'autre part l'augmentation de la fraction volumique des fibres a un effet double, parce qu'elle augmente d'une part le déplacement longitudinal dans la zone plastique ce qui favorise le passage rapide de l'endommagement d'une fibre cassée à une autre, et d'autre part elle réduit le déplacement dans la zone élastique ce qui nous permettra d'être en conformité avec les lois de la micromécanique.

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 et plus précisément l'utilisation des fibres naturelles disponible et moins chers dans les domaines industriels

Pour futures recommandations, nous apprécions poursuivre cet axe de recherche pour toucher d'autres composites à fibres naturelles qui répond aux exigences mécaniques tel que le comportement non linéaire caractérisé par la viscoélasticité (matrice viscoélastique)

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [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] Case, S. W., Carman, G. P., Lesko, J. J., Fajardo, A. B., Reifsnider, K. L. “Fiber Fracture in Unidirectional Composites,” Journal of Composite Materials, Vol. 29, No. 2, 1995, pp. 208-228.
- [6] Case, S. W., Reifsnider, K. L. “Micromechanical Analysis of Fiber Fracture in Unidirectional Composite Materials,” International Journal of Solids and Structures, Vol.33, No. 26, 1996, pp. 3795-3812.
- [7] Foster G. C., Tensile and Flexure Strength of Unidirectional Fiber-Reinforced Composites: Direct Numerical Simulations and Analytic Models, Master of Science in Engineering Mechanics, Virginia Polytechnic Institute and State University, 1998.
- [8] 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
- [9] GHARBAOUI Asma Master 2 Génie Mécanique, thème : Effet De L'Orientation Des Fibres Naturelles Sur La Résistance Locale D'un composite Partiellement Endommagé, Soutenu le 16 Juin 2015
- [10] BOUDEBZA Taha Yacine et BAMOUNE Sofiane Master 2 Génie Mécanique, thème : Prédiction de la résistance micromécanique et l'évolution thermomécanique d'un composite Ramie/Epoxyde unidirectionnels en milieu humide, Soutenance le 28 Mai 2018
- [11] ABASSINI Sahar et GUENOUNA Mokhtaria, Master 2 Génie Mécanique, thème : Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans les matériaux composites Jute/Époxyde unidirectionnels pour des températures variable, Soutenance le 28 Mai 2018

- [12] L.Belgacem. "Contribution à l'étude de l'endommagement des pipes en matériaux composites hybrides sollicités au flambement," Thèse Doctorat En-Sciences, Université de Mostaganem, 2018
- [13] <http://www.bloomoon.eu/fr/actualites/lettres-de-veille-et-white-papers/materiaux-composites-tendances>
- [14] Gay D. « Matériaux Composites ». lavoisierhermes. 2015.
- [15] Sethi S, Ray B C. Environmental effects on fibre reinforced polymeric composites: Evolving reasons and remarks on interfacial strength and stability, *Advances in Colloid and Interface Science* (2014), doi: 10.1016/j.cis.2014.12.005.
- [16] Min YU. Elaboration de composites à matrice métallique d'alliages d'aluminium par projection à froid. Thèse 2013, Université de Technologie de Belfort-Montbéliard.
- [17] Berthelot JM. Matériaux composites - Comportement mécanique et analyse des structures. (5^e Éd.) Lavoisier. 2012.
- [18] <https://www.techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archivesth12/archives-materiaux-fonctionnels-materiaux-biosources-tian0/archive-1/fibres-naturelles-de-renfort-pour-materiaux-composites-n2220/>
- [19] A. Y. Nenonene, "Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kéraf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage", thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources, 2009.
- [20] F. Michaud, "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage" thèse Phd, univ Laval, 2003
- [21] <http://www.fao.org/natural-fibres-2009/about/15-natural-fibres/fr/>
- [22] https://www.hashtap.com/@anissa.lawing/global-abaca-fiber-market-size-2020-trends-evaluation-comprehensive-research-study-market-share-and-revenue-expectation-to-2025-YdKp8KDYPM_n
- [23] <https://media.croquetteland.com/media/catalog/product/cache/1/thumbnail/9df78eab33525d08d6e5fb8d27136e95/f/i/fibres-de-coco.jpg>
- [24] <https://www.ventedetissus.com/editeur/media/cotonnier2ok.jpg>
- [25] <https://www.jardinsdefrance.org/wp-content/uploads/2016/11/rouissage-ausol.jpg>

- [26] https://img.over-blog-kiwi.com/0/96/56/92/20181010/ob_55cade_chanvre-cultive.jpg
- [27] https://lh3.googleusercontent.com/proxy/yaqlNE5Zar2OnnLXiOIV84WdOc9NZNjp56Ncei0JbGXYrSfXW30EjB3j1Vptl_c1m2Jb8rC2Cjv9DRqDly7GoTXE3dvuvQK5Mt2ZrrYEWPPpQQ
- [28] <https://cdn.shopify.com/s/files/1/2618/6980/files/ramie-3.png?v=1522752286>
- [29] https://cdn.manomano.com/corde-en-sisal-au-rouleau-50-m-4-6-mm-P-3393681-9347317_1.jpg
- [30] https://static.wixstatic.com/media/312f56_71fba8ba22cb462ca24be95240e65682~mv2_d_5184_3456_s_4_2.jpg/v1/fill/w_489,h_326,al_c,q_80,usm_0.66_1.00_0.01/LAINE3_JPG.webp
- [31] https://www.rosemouton.com/12682-thickbox_alysum/laine-angora-super-anny-blatt.jpg
- [32] <https://www.aboutdefil.com/images/pages/poil-de-chameau-camel.jpg>
- [33] <https://cataleya.fr/wp-content/uploads/2016/09/cachemire1.jpg>
- [34] <https://monpetitrouet.com/wp-content/uploads/2018/08/Superkid-Mohair1.jpg>
- [35] <https://cdn.britannica.com/97/158197-050-CB4AA5EA/silk-cocoons-silkworm-caterpillars.jpg>
- [36] <https://www.laine-et-tricot.com/media/catalog/product/cache/3/image/300x/040ec09b1e35df139433887a97daa66f/s/h/shetland-supreme-lace-weight.jpg>
- [37] Camata G., Corotis R., Spacone E., Simplified stochastic modeling and simulation of unidirectional fiber reinforced composites, *Probabilistic Engineering Mechanics* 19 (2004) 33–40
- [38] Koichi G., «A strength reliability model by Markov process of unidirectional composites with fibers placed in hexagonal arrays», Department of Mechanical Engineering, Yamaguchi University, Tokiwadai, Ube 755-8611, Japan., *International Journal of Solids and Structures* 40 (2003) 6813-6837.
- [39] RAMAN, M. R., Wisnom, M. R. “Three-dimensional Finite Element Analysis of the Stress Concentration at a Single Fiber Break,” *Composites Science and Technology*, Vol. 51, 1994, pp. 517-524.
- [40] Rosen, B.W., 1964. Tensile failure of fibrous composites. *AIAA J.* 2, 1985–1991.
- [41] H. L. Cox. « The elasticity and strength of paper and other fibrous materials».