

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE « Dr. TAHAR MOULAY » DE SAIDA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : PHYSIQUE

Option : Physique des matériaux

Par

M. Bouaoudj Mohamed

Sur le thème

Etude de l'effet des fibres naturelles et synthétiques sur l'endommagement de l'interface des biocomposites.

Soutenu le : Mercredi 07/7/2021 devant le jury composé de :

M. ELKEURTI Mohammed	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Président
M. MOKADDEM Allel	Pr	Centre universitaire d'El Bayadh	Encadrant
M.DOUMI Bendouma	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Co-encadrant
M.MESKINE Mohammed	MCA	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Examineur

Année Universitaire 2020 - 2021

Remerciements

Je remercie **DIEU** le tout puissant de nous avoir donné la volonté et le courage d'entamer et de terminer ce mémoire de master.

Je tiens à remercier tout particulièrement le Professeur **A.Mokaddem** et le Professeur **B.Doumi** (respectivement directeur et codirecteur de ce mémoire) qui m'ont suivi et conseillé, et pour leurs générosités et la grande patience dont ils ont su faire preuve malgré leurs charges académiques et professionnelles.

J'exprime mes vifs remerciements à Monsieur le Professeur **Elkeurti Mohammed** pour avoir m'honoré et accepter de juger ce travail. Je tiens à adresser mes remerciements les plus chaleureux à Monsieur **Meskine Mohamed** Maître de conférences -A- pour m'avoir honoré et accepter d'examiner ce mémoire.

Ce mémoire n'aurait jamais pu avoir le jour sans le soutien de nos parents qu'ils ont toujours encouragé moralement et matériellement et qui je tiens à les remercier.

Je tiens à exprimer vivement mes remerciements à toutes personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.

Un mémoire académique ne peut pas être le fruit d'une seule personne.

Table des matières

Tables des figures

Liste des tableaux

Introduction général.....	01
---------------------------	----

Chapitre I : Recherche bibliographique

I.1. Les matériaux composites.....	07
Définitions	07
I.2. Les bio-composites.....	08
I.2.1. Définitions.....	08
I.2.2. Constituants d'un matériaux composite et biocomposite	08
I.2.2.1. Matrice	08
A- Les thermoplastiques	08
B- Les thermodurcissables	09
I.2.2.1. Le renfort.....	10
I.3. L'interface.....	10
I.4. Le poly (acide lactique) (PLA).....	11
I.4.1. Origine du PLA	11
I.4.2. Synthèse du PLA.....	12
A- Polycondensation directe de l'acide lactique.....	13
B- Polymérisation par ouverture de cycle	13
I.4.3. Propriétés du PLA.....	14
I.4.4. Applications du PLA.....	14
I.5. Fibres naturelles	15
I.5.1. La classification des fibres naturelles.....	15
1.5.1.1. Végétale.....	15
1.5.1.2. Minérale	15
I.5.2. Structure de la fibre naturelle.....	16
I.5.3. Fibres végétales.....	17
1.5.3.1. Types de fibres végétales	17
A- Lin.....	17
B- Sisal.....	17

C-Chanvre	18
D-Jute.....	18
1.6. Matériaux composites à fibres synthétiques	19
A- Fibres de verre.....	20
B-Propriétés des fibres de verre.....	20
A- Fibres de carbone	21
B-Propriétés des fibres de carbone.....	22
C-Composites à fibres synthétiques.....	24
Référence.....	26

Chapitre II Modélisation analytique et numérique

II.1. Introduction.....	29
II.2.Mécanismes d'endommagement des composites.....	29
A- à l'échelle microscopique.....	29
B- à l'échelle mésoscopique.....	30
C- à l'échelle macroscopique,.....	30
II.3. L'interface fibre/matrice	30
II.4.Comportement d'un composite unidirectionnel.....	31
A- Cas d'une interface très forte (interface liée)	31
B- Cas d'une interface très faible (non liée)	31
C- Cas d'une interface relativement faible	31
II.5.Rôle des interfaces et des interphases	32
A- interphases	32
B- interface	32
II.6. Le composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale	33
II.7.Modèle de Kelly-Tyson	35
I.8. Le modèle de Cox	37
II.9.Modèle de Cox : transfert de charge élastique	37
II.10. Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface	38
II.10.1. Equilibre des forces de cisaillement.	38
II.10.2. Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre	39

II.11. Modèle probabiliste de weibull	42
II.11. 1. La loi de Weibull	42
II.11. 2. Le modèle probabiliste de Weibull	42
II.12. Algorithmes génétiques	46
II.12.1 Codage d'individus.....	47
II.12.2 Opérateurs génétiques.....	47
II.12.3 Caractéristiques des algorithmes génétiques.....	50
II.12.3.1 Le codage.....	50
II.12. 3.2 La fonction d'évaluation.....	52
II.12.4 Fondements des algorithmes génétiques.....	52
Référence.....	54

Chapitre III :Résultats et Discussion

III .1 Introduction	57
III.2 Les caractéristiques des matériaux étudiés	57
III.2.1 Les renforts	57
III.2.1.1 La fibre de carbone	57
III.2.1.2 La fibre de chanvre	59
2.2 La matrice Acide Poly (lactique)-PLA	62
III.3 Modélisation et simulation numérique	64
III.3.1 Formalisme de Weibull	64
III.3.2 Modèle de cisaillement de l'interface de Cox	65
III.4 Résultats et discussion	66
III.4.1 Modélisation génétique	66
III.4.2 Résultats et discussion	67
III.4.2.1Carbone/PLA	67
III.4.2.2 Chanvre/PLA	69
III.5 Conclusion	72
Références bibliographiques.....	73
Conclusion générale.....	77

Tables des figures

I.1	Matériaux composites.....	7
I.2	Types de matrices.....	8
I.3	Différents types de renforts.....	10
I.4	Structure chimique du PLA.....	11
I.5	Obtention du monomère acide lactique.....	12
I.6	Les deux monomères optiques de l'acide lactique.....	13
I.7	Synthèse du PLA par ouverture du cycle de lactide.....	15
I.8	Structure des fibres naturelles.....	16
I.9	Lin et fibres de lin.....	17
I.10	Sisal et fibres de sisal.....	18
I.11	Chanvre et fibres de chanvre.....	18
I.12	Jute et fibres de jute.....	19
II.1	Les différents modes d'endommagement dans un stratifié à base d'unidirectionnel.....	30
II.2	Modes d'endommagement.....	32
II.3	Concepts d'interphase et d'interface.....	33
II.4	Courbe contrainte/déformation d'un composite soumis à une traction longitudinale ($\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$)	34
II.5	Courbe contrainte/déformation d'un composite soumis à une traction longitudinale ($\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$)	34
II.6	Modèle de Kelly –Tyson.....	36
II.7	Modèles de Kelly/Tyson et de Cox des profils de contraintes de tension dans la fibre et de cisaillement à l'interface.....	36
II.8	Élément d'un V.E.R.....	37
II.9	Équilibre de la matrice en cisaillement.....	38
II.10	Équilibre élastique dans une portion de fibre.....	40
II.11	Modèle de Cox : profil des contraintes fibre/interface.....	41
II.12	Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull.....	44
II.13	Calcul de la contrainte moyenne de rupture.....	45
II.14	Croisement à un point 4.....	48
II.15	Croisement à deux points 2.....	49
II.16	Illustration du principe de la mutation.....	50
II.17	Les cinq niveaux d'organisation d'une population d'un algorithme Génétique.....	51
II.18	Principe général de l'évolution d'une population d'un algorithme Génétique.....	52
III.1	Elaboration des fibres de carbone par pyrolyse du PAN.....	58

III.2	Image MEBE de fibres de carbone à partir de PAN.....	59
III.3	Coupe transversale d'une tige de chanvre vue au Microscope Electronique à Balayage (MEB).....	60
III.4	Coupe transversale de fibres de lin (a) non rouies ; (b) rouies	61
III.5	Micrographies au microscope optique polarisées de la cristallisation isotherme du film mince PLA120 obtenu à 150 ° C prises à différents moments: (a) 12 min; (b) 15 min; (c) 23 min; (d) 60 min; (e) 105 min ; (f) 140 min.....	64
III.6	L'endommagement de l'interface pour $\sigma = 900\text{N/m}^2$ Carbone/PLA.....	67
III.7	L'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1000\text{N/m}^2$ Carbone/PLA.....	68
III.8	L'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1100\text{N/m}^2$ Carbone/PLA.....	68
III.9	L'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1200\text{N/m}^2$ Carbone/PLA.....	69
III.10	L'endommagement de l'interface pour $\sigma = 900\text{N/m}^2$ Chanvre/PLA.....	70
III.11	L'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1000\text{N/m}^2$ Chanvre/PLA.....	70
III.12	L'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1100\text{N/m}^2$ Chanvre/PLA.....	71
III.13	L'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1200\text{N/m}^2$ Chanvre/PLA.....	71

Liste des tableaux

I.1	Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques.....	9
I.2	Classification des fibres naturelles.....	15
I.3	Propriétés typiques des fibres synthétiques.....	19
I.4	Différents types de fibre de verres textiles (1).....	20
I.5	Propriétés des fibres de verre.....	21
I.6	Propriétés de certaines fibres de carbone commercialisées.....	23
I.7	Propriétés comparées des composites unidirectionnels à base de résines époxydes (1) renforcées par différentes fibres.....	24
III.1	Principales propriétés de la fibre de carbone.....	59
III.2	Les différentes valeurs des propriétés mécaniques de la fibre de chanvre données dans la littérature.....	62
III.3	Les différentes propriétés physiques de la PLA.....	64



***Introduction
générale***

La protection de l'environnement est l'un des plus grands défis auxquels est confrontée le monde entier [1,2], et suite à l'augmentation des préoccupations et de la protection de l'environnement, le nombre d'études disponibles traitant l'utilisation potentielle de fibres naturelles dans le développement de composites thermodurcissables et thermoplastiques ainsi que l'amélioration de leurs performances mécaniques grâce à des traitements de surface physiques et chimiques est en croissance exponentielle. De plus, les fibres naturelles reçoivent plus d'attention en tant que substituts possibles pour fibres synthétiques, telles que les fibres de verre [2–8].

Le terme «fibres naturelles» recouvre une large gamme de fibres végétales, animales et minérales. Cependant, dans l'industrie des composites, il s'agit généralement de fibres de bois et de fibres libériennes, de feuilles, de graines et de tiges à base de plantes. Ces fibres contribuent souvent à l'amélioration des performances des matériaux traditionnels et, lorsqu'elles sont utilisées dans des composites plastiques, peuvent fournir un renforcement significatif [9-13]. Bien que les fibres naturelles soient utilisées dans les composites depuis de nombreuses années, l'intérêt pour ces fibres a diminué avec le développement des fibres synthétiques telles que les fibres de verre et de carbone. Cependant, récemment, il y a eu un regain d'intérêt, en grande partie en raison de considérations écologiques, de directives législatives et de progrès technologiques. La plupart des composites actuellement fabriqués avec des fibres naturelles sont moulés sous pression bien qu'un large éventail de procédés ait été étudié [9-14]. Le lin est la fibre naturelle la plus utilisée (à l'exclusion du bois) dans l'industrie automobile européenne, dont la majeure partie est obtenue en tant que sous-produit de l'industrie textile [14]. Cependant, d'autres fibres naturelles telles que le chanvre, jute, le kénaf, le sisal, la fibre de coco et l'abaca sont également utilisées. Les fibres naturelles sont généralement combinées avec du polypropylène, du polyester ou du polyuréthane pour produire des composants tels que des revêtements de porte et de coffre, des étagères pour colis, des dossiers de siège, des écrans de toit ouvrant intérieur et des appuie-tête [15,16]. Ils ont trouvé que les composites renforcés de fibres naturelles sont apparus plus respectueux de l'environnement, principalement pour trois raisons:

- la production de fibres naturelles avait les impacts environnementaux les plus faibles;
- les composites de fibres naturelles avaient une teneur plus élevée pour des performances équivalentes, ce qui réduit le volume et le poids de la matrice polymère de base;
- le poids inférieur des composants résultants réduit les émissions et consommation de carburant au cours de son cycle de vie. L'analyse du cycle de vie, réalisée par La Rosa et al. [16], ont montré que les fibres de chanvre en composites thermosensibles sont plus respectueuses de l'environnement que l'utilisation unique conventionnelle de fibre de verre et de carbone, en raison de la réduction de la teneur en fibre synthétique.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la fibre synthétique de carbone et de la fibre naturelle de chanvre sur l'endommagement en cisaillement de l'interface des biocomposites (carbone/Acide Poly (lactique)-PLA et chanvre /Acide Poly (lactique)). A cet effet, nous avons choisi une modélisation génétique basée sur le formalisme de Weibull [17], afin de calculer les différentes valeurs de l'endommagement à l'interface entre la matrice (PLA) et les deux fibres (carbone et chanvre), en utilisant les opérateurs génétiques sélection, croisement et mutation.

Ce mémoire est composé de trois chapitres. dans le premier chapitre, un état de l'art sur les matériaux composite et biocomposite a été présenté, le second a été consacré à la présentation des modèles analytiques et probabilistes utilisés dans notre simulation numérique. La discussion des résultats trouvés a été traitée dans le dernier chapitre. Enfin, nous terminons ce travail par une conclusion générale où les principaux résultats et conclusions ont été présentés.

Références bibliographiques

- [1] Rashid, B.; Leman, Z.; Jawaid, M.; Ishak, M.R.; Al-Oqla, F.M. Eco-Friendly Composites for Brake Pads from Agro Waste: A Review. *Ref. Modul. Mater. Sci. Mater. Eng.* 1–21, (2017)
doi:10.1016/b978-0-12-803581-8.10159-6.
- [2] João P. Manaia, Ana T. Manaia¹ and Lúcia Rodrigues. Industrial Hemp Fibers: An Overview. *Fibers.* 7, 106, (2019)
- [3] Shalwan, A.; Yousif, B.F. In State of Art: Mechanical and Tribological Behaviour of Polymeric Composites Based on Natural Fibres. *Mater. Des.* 2013, 48, 14–24.
doi:10.1016/j.matdes.07.014, (2012)
- [4] Safri, S.N.A.; Sultan, M.T.H.; Jawaid, M.; Jayakrishna, K. Impact Behaviour of Hybrid Composites for Structural Applications: A Review. *Compos. Part B Eng.* 133, 112–121, (2018)
doi:10.1016/j.compositesb.2017.09.008.
- [5] Satyanarayana, K.G.; Arizaga, G.G.C.; Wypych, F. Biodegradable Composites Based on Lignocellulosic Fibers-An Overview. *Prog. Polym. Sci.* 34, 982–1021, (2009)
doi:10.1016/j.progpolymsci.2008.12.002.
- [6] Xia, C.; Wang, K.; Dong, Y.; Zhang, S.; Shi, S.Q.; Cai, L.; Ren, H.; Zhang, H.; Li, J. Dual-Functional Natural-Fiber Reinforced Composites by Incorporating Magnetite. *Compos. Part B Eng.* 93, 221–228, (2016)
doi:10.1016/j.compositesb.2016.03.016.
- [7] Khan, T.; Hameed Sultan, M.T. Bin; Ariffin, A.H. The Challenges of Natural Fiber in Manufacturing, Material Selection, and Technology Application: A Review. *J. Reinf. Plast. Compos.* 37, 770–779, (2018)
doi:10.1177/0731684418756762.
- [8] Gurunathan, T.; Mohanty, S.; Nayak, S.K. A Review of the Recent Developments in Biocomposites Based on Natural Fibres and Their Application Perspectives. *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* 77, 1–25, (2015)
doi:10.1016/j.compositesa.2015.06.007.
- [9] Bledski, A.K. et al. Natural and Wood Fibre Reinforcement in Polymers, *Rapra Review Reports*, Rapra Technology Ltd, Shawberry, Shrewsbury, Shropshire, UK, 13 (8), 144 pp, (2002)
- [10] Rials, T.G. and Wolcott, M.P. Physical and mechanical properties of agro-based fibers, Chapter 4, in *Paper and Composites from Agro-Based Resources* (eds R.M. Rowell, R.A. Young, and J.K. Rowell), CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, pp. 63-81, (1997)
- [11] Lilholt, H. and Lawther, J.M. Natural organic fibers, Chapter 1.10, in *Comprehensive Composite Materials. Vol.1: Fiber Reinforcements and General Theory of Composites* (ed. T.-W. Chou), Elsevier, New York, pp. 303-325, (2000)
- [12] McGovern, J.N. et al. Other fibers, Chapter 9, in *Pulp and Paper Manufacture, Vol. 3: Secondary Fibers and Non-Wood Pulping*, 3rd edn (eds F. Hamilton, B. Leopold, and M.J. Kocurek), TAPPI, Atlanta, GA, pp. 110-121, (1987)
- [13] Craig M. Clemons. *Natural Fibers*. WILEY-VCH Verlag G m b H & Co. KGaA. Edited by Marino Xanthos. ISBN: 978-3-527-32361-6. (2010)
- [14] Plackett, D. The natural fiber polymer composite industry in Europe technology and markets. *Proceedings of the Progress on Woodfibre-Plastic Composites Conference 2002*, University of Toronto and Materials and Manufacturing Ontario, Toronto, ON. (2002)
- [15] Suddell, B.C. and Evans, W.J. The increasing use and application of natural fibre composites materials within the automotive industry. *Proceedings of the Seventh*

International Conference on Woodfiber-Plastic Composites, Forest Products Society, Madison, WI. (2003)

[16] La Rosa, A.D.; Cozzo, G.; Latteri, A.; Recca, A.; Björklund, A.; Parrinello, E.; Cicala, G. Life Cycle Assessment of a Novel Hybrid Glass-Hemp/Thermoset Composite. *J. Clean. Prod.* 44, 69–76, (2013)

doi:10.1016/j.jclepro.2012.11.038.

[17] W. Weibull. *Royal Swedish Academy of Eng. Sci. Proc.* 151, 1-45 (1939)



Chapitre I

Recherche bibliographique

I.1. Les matériaux composites

Définitions

Le mot « *composite* » signifie la constitution de deux ou plusieurs matériaux non miscibles. Les matériaux composites se constituent d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue, appelée *matrice*. La phase discontinue est appelée le *renfort* ou *matériau renforçant* [1]. Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des agressions extérieures. [1,2]

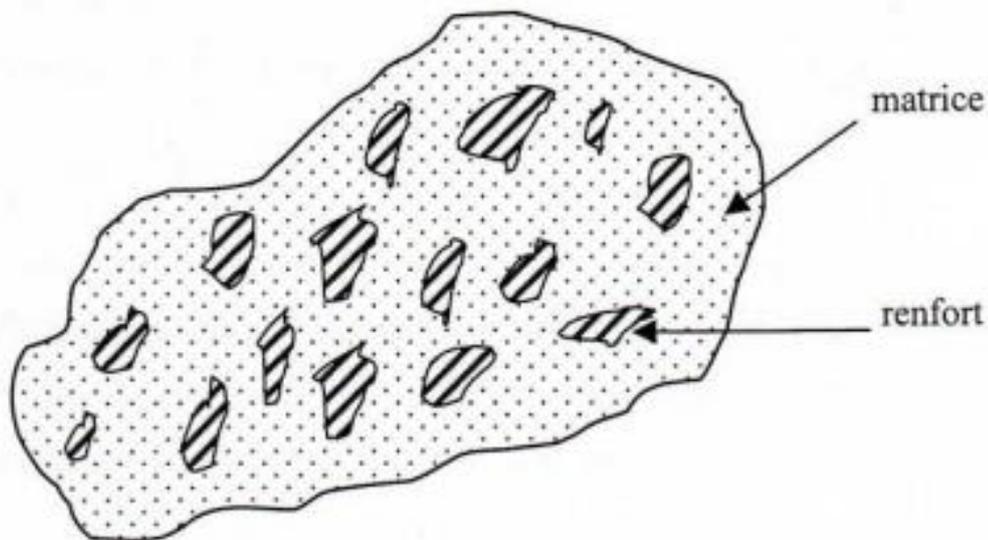


Figure I.1 matériaux composites [3]

Le matériau composite (ou composite) est présenté ici dans un sens plus restrictif. C'est-à-dire que sa matrice est une résine (polyester, époxyde, etc.) et son renfort est constitué de fibres synthétiques ou végétales (verre, carbone, lin, sisal, alfa, etc) [4]

I.2. Les biocomposites

I.2.1. Définitions

Un biocomposite est un matériau composite dont l'une des parties au moins, renfort ou matrice, est issue de ressources renouvelables. Les biocomposites sont caractérisés par le fait que :

- la résine pétrochimique est remplacée par une résine végétale ou animale.
- les renforts synthétiques (fibres de verre, fibres de carbone, ...) sont remplacés par des charges naturelles (chanvre, lin, sisal, jute, etc.) [5]

I.2.2. Constituants d'un matériaux composite et biocomposite

Un biocomposite est constitué d'une matrice et d'un renfort de type naturels. Le concept de matériau composite, par le choix des constituants et de leurs proportions respectives, ainsi que par le choix de la forme, des dimensions et de la disposition des renforts, permet donc de concevoir un matériau présentant les caractéristiques spécifiques recherchées.

I.2.2.1. Matrice

La matrice maintient le renfort, le protège des agressions extérieures, donnant la forme désiré au matériau et assure les transferts de charge [6]. La classification des types de matrices couramment rencontrée est donnée sur la figure I.2.

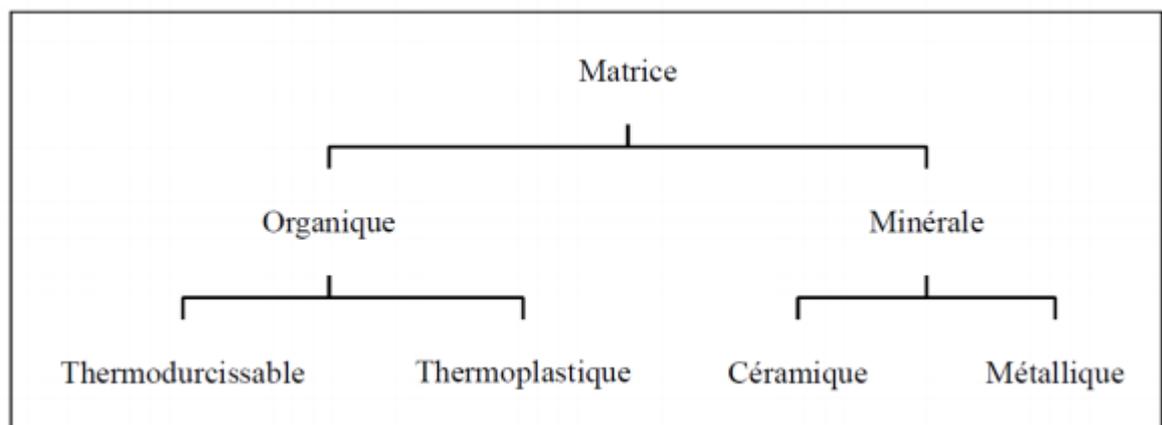


Figure I.2: Types de matrice [7].

A-Les thermoplastiques

Les thermoplastiques (TP) sont des macromolécules généralement solubles, linéaires ou légèrement ramifiées, amorphes ou semi cristallins, recyclables et fusibles à haute

température. Le thermoplastique représente le plus grand tonnage en terme de production à cause de leur facilité de mise en œuvre et des faibles couts. Les résines thermoplastiques les plus courantes sont : le polystyrène (PS), le polyéthylène (PE), le polyéthylènetéariftalate (PET), le polypropylène (pp).....) [8]. Leur recyclabilité et leur thermo-réversibilité constituent l'un des grands avantages qui prend de plus en plus d'importance de nos jours. [9].

B-Les thermodurcissables

Les thermodurcissables (TD) sont des polymères qui ont la forme d'un réseau tridimensionnel et qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport aux thermoplastiques [10]. Ils se présentent sous forme liquide visqueux et que l'on met en forme en déclenchant une réaction chimique de polymérisation par ajout d'un durcisseur, ce qui entraîne une solidification. Ils sont infusibles, donc non recyclable. Les plus connus sont les polyesters insaturés, les résines époxydes, les résines phénoliques, les aminoplastes,...etc.) [8-10].

Une comparaison entre quelques caractéristiques des résines thermodurcissables et celles des résines thermoplastiques est présentée dans le **Tableau I.1**:

Tableau I.1:Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques [11]

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

I.2.2.1. Le renfort

Le renfort est le squelette supportant les efforts mécaniques, il contribue à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet de résistance orientée [12]. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont des propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible coût [13]. En fonction de leur utilisation, les renforts peuvent être d'origines diverses (figure I.3).

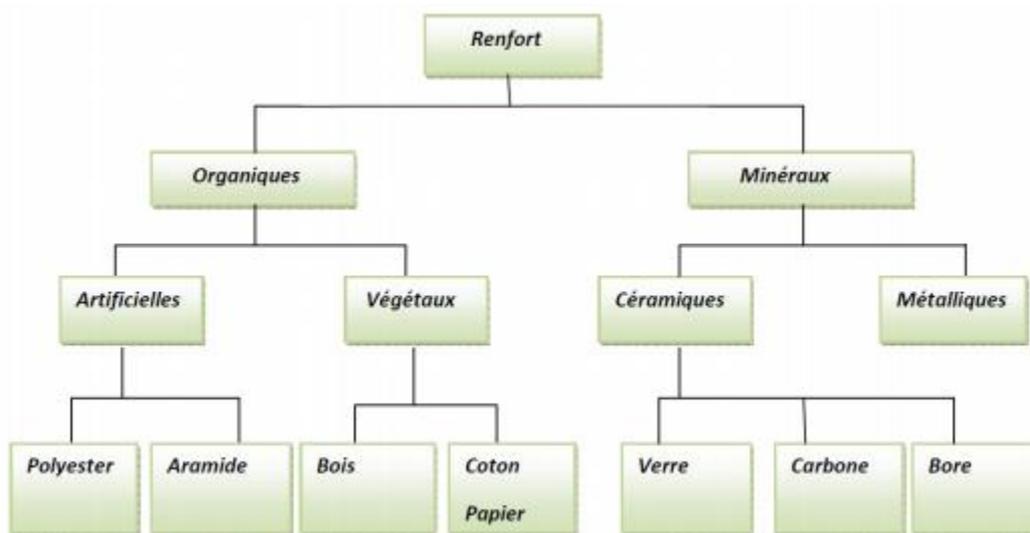


Figure I.3: Différents types de renforts [14].

Les propriétés physiques et mécaniques des composites sont fortement influencées par la nature des fibres et la forme du renfort est fonction de l'application et du volume de pièces à réaliser, elle permet de distinguer deux grandes familles [15].

I.3. L'interface:

L'utilisation d'une couche interface permet d'assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice. Qui se forme spontanément lorsque deux phase sont mises en présence l'un de l'autre au moment de l'élaboration du matériau et qui se maintient entre ces deux phases pendant toute la vie du matériau, l'interface n'est pas simplement une

simple discontinuité entre les deux phases du matériau hétérogène ou leur juxtaposition [16].

I.4. Le poly (acide lactique) (PLA)

Le poly (acide lactique) ou le polylactide (PLA) est un polyester aliphatique, linéaire et biodégradable, qui appartient à la famille des thermoplastiques, il est produit à partir d'acide lactique (monomère de base) [17]. L'intérêt de ce polymère réside dans la disponibilité et le faible coût de son monomère (l'acide lactique) [13].

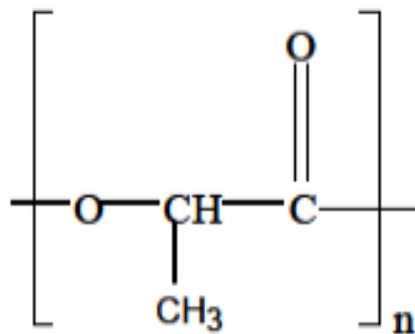


Figure I.4: Structure chimique du PLA

I.4.1. Origine du PLA

Le PLA est obtenu à partir de l'acide lactique, qui a été découvert pour la première fois en 1780 par le chimiste suédois Scheele en examinant le lait caillé puis commercialisé pour la première fois en 1881 [18]. L'acide lactique est naturellement présent dans de nombreux aliments et peut être produit par la fermentation de diverses ressources renouvelables telles que le maïs, la pomme de terre, le sucre de betterave, et la canne à sucre [18,19]. Auparavant, l'acide lactique était principalement utilisé dans les applications liées à l'alimentation, qui représentait 85% du marché en Amérique [19]. Par la suite, des progrès ont été réalisés dans la fermentation, la purification primaire et essentiellement dans la synthèse de polymère [18,19]. Ainsi, les premiers travaux réalisés sur la synthèse d'oligomères de PLA, par Pelouze, datent de 1845. Les premières macromolécules de PLA ont en revanche été obtenues vers 1932 (Carothers, 1932). En 1954, Dupont a breveté un PLA à poids moléculaire élevé et depuis de

nombreuses compagnies commercialisent le PLA. Aujourd'hui, Nature Works LLC est le leader en production et développement de l'acide lactique [20].

I.4.2. Synthèse du PLA

Le PLA est fabriqué à partir d'amidon extrait de maïs, de la betterave ou de la canne à sucre. L'amidon est transformé en sucre (glucose) par hydrolyse enzymatique, qui est soumis à une fermentation bactérienne et se transforme en acide lactique (monomère de basse du PLA) [21].

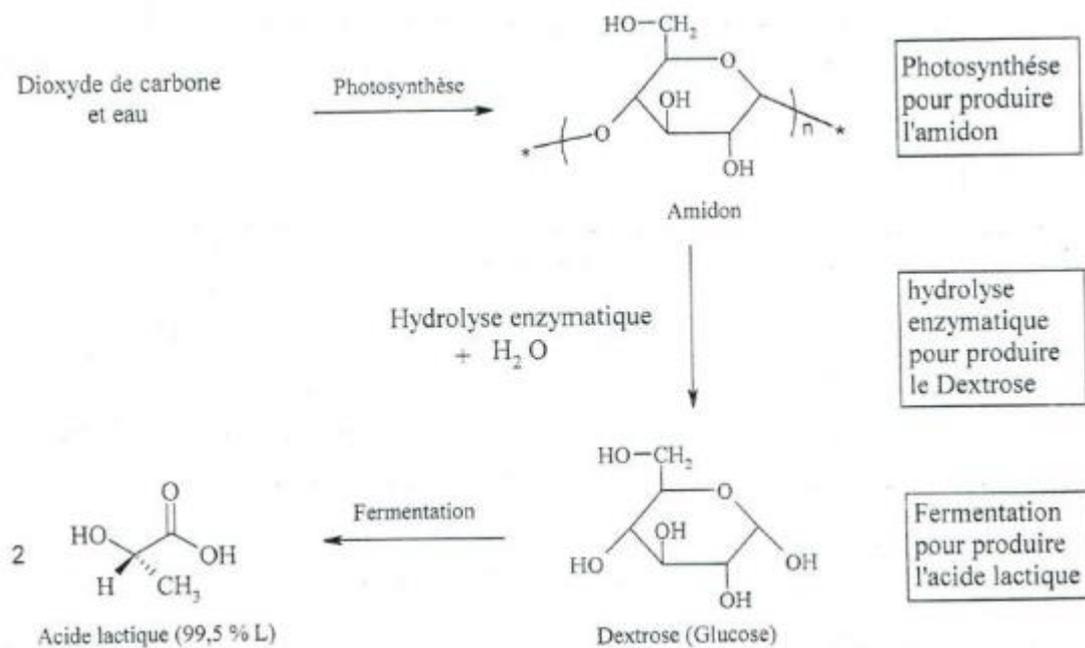


Figure I.5: Obtention du monomère acide lactique [21].

L'existence d'un carbone asymétrique dans la structure de l'acide lactique rend la molécule chirale. Il existe presque exclusivement sous de deux énantiomères forme (99.5% de l'isomère L et 0.5% de l'isomère D) [22].



Figure I.6: Les deux monomères optiques de l'acide lactique

Deux voies de synthèse du polylactide peuvent être cités: la polycondensation de l'acide lactique ou la polymérisation d'ouverture de cycle du lactique.

A-Polycondensation directe de l'acide lactique

La polycondensation directe fait intervenir une réaction d'estérification nécessitant un solvant et un système sous haute température et des monomères d'une très grande pureté afin d'éviter la formation de produits secondaires. La première synthèse du PLA a été effectuée en 1932 par Carothers et al. [23]. Comme cela est généralement le cas pour des polymères synthétisés par polycondensation, les masses molaires obtenues pour ceux-ci sont faibles. Tous ces inconvénients font que la polycondensation de l'acide lactique n'est pas utilisée pour la fabrication industrielle du PLA.

B-Polymérisation par ouverture de cycle

La polymérisation par ouverture de cycle à partir du lactide est la méthode utilisée par les grands producteurs de PLA tels que Cargill LLC (USA) ou Shimadzu (Japon). Cette méthode a été brevetée par Cargill Dow LLC en 1992 et permet de produire industriellement, en présence d'un catalyseur métallique à base d'étain par exemple, du PLA de masses molaires élevées, de pureté très satisfaisante et à moindre coût

[21-24].

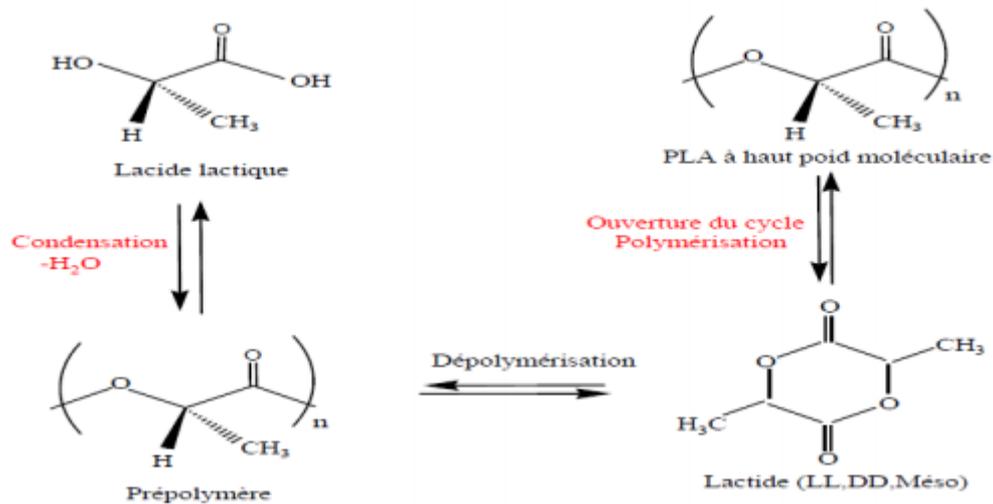


Figure I.7: Synthèse du PLA par ouverture du cycle de lactide [21].

I.4.3. Propriétés du PLA

Le PLA est un polyester aliphatique, de structure normalement linéaire, biodégradable et thermoplastique. Il possède aussi des propriétés particulières de biocompatibilité. Le PLA se transforme suivant toutes les techniques disponibles en plasturgie. Cependant, comme tous les polyesters, le PLA est sensible à l'humidité et la température. Afin de garder les propriétés intrinsèques du matériau, en particulier en termes de propriétés mécaniques, il est recommandé comme pour le PET (polyéthylène téréphtalate) de sécher le polymère avant utilisation. [21-23]

I.4.4. Applications du PLA

En raison de son coût élevé, faible disponibilité et poids moléculaire réduit, les principales utilisations du PLA ont été limitées auparavant aux applications médicales, y compris matériel de fixation osseuse, sutures internes, microsphères pour les médicaments et le génie tissulaire [25]. Aujourd'hui, grâce à une production relativement bon marché du PLA avec un haut poids moléculaire, l'utilisation de l'acide poly (lactique) s'est étendue dans plusieurs domaines, y compris l'emballage, le textile et l'agriculture [26].

I.5.Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont classées généralement en fonction de leurs origines : animale, végétale et minérale. Les fibres d'origine végétale sont constituées majoritairement de cellulose et possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles d'origine animale. Ces dernières, telles que la laine et la soie, sont largement utilisées dans le domaine du textile. Les fibres d'origines végétales peuvent être classées en sous familles selon d'où elles ont été extraites ; graines, fruits, écorce, feuilles, bois, tiges ou canne. [27]

I.5.1.La classification des fibres naturelles

1.5.1.1.Végétale

- Provenant des tiges (lin, jute, chanvre, genet, kénaf, ramie)
- Provenant des feuilles (sisal, gucca, manille)
- Provenant des graines (coton, kapok)

1.5.1.2.Minérale (amiante, métaux,..) [28]

Tableau. I.2.Classification des fibres naturelles [27,29]

Origine	Provenance	Exemples
Végétale	Graines Fruits Ecorces Feuilles Bois Tiges Cannes et roseaux	Coton, kapok, Asclépiade Noix de coco Lin, chanvre, jute, ramie, kénaf. Sisal, henequen, abaca, Ananas
Animale	Laine/poil Vers à soie	Laine, poils, Cachemire Soie de tussah, soie de mûrier
Minérale		Amiante, Wollastonite

I.5.2. Structure de la fibre naturelle

La fibre naturelle tire sa structure de l'architecture et de la composition biochimique de sa paroi, celle-ci est composée de trois couches superposées dans le sens radial et elles sont parallèles à l'axe de la fibre. Cette structure très compliquée (**Figure I.8**) qui est en fait formée par le canal central connu sous le nom de lumen et de paroi cellulaire. Cette dernière est divisée en trois parties : lamelle centrale, paroi primaire et paroi secondaire. La paroi primaire est la plus mince, de diamètre de 0.1 à 0.2 μm , constituée de cellulose désordonnée dans la pectine, l'hémicellulose et la matrice de lignine, tandis que la lamelle centrale est de 0.05 à 0.2 μm d'épaisseur. Elle assure la cohésion entre les cellules l'une avec l'autre pour former le faisceau fibrillaire et confère à la fibre ses propriétés de rigidité, alors que lumen est responsable du transport de l'eau. La paroi secondaire est divisée en trois parties : la première est externe ; paroi secondaire (S1) mince, elle forme que 10 à 20 % de toute la paroi, paroi centrale (S2) forme la partie la plus importante de la paroi cellulaire de 70 à 90 % de la paroi fibrillaire et paroi interne, (S3) c'est la couche la plus mince de 2 à 8% de toute la paroi. Donc l'épaisseur de la paroi cellulaire de la fibre dépend de la couche (S2) de la paroi secondaire [28- 31].

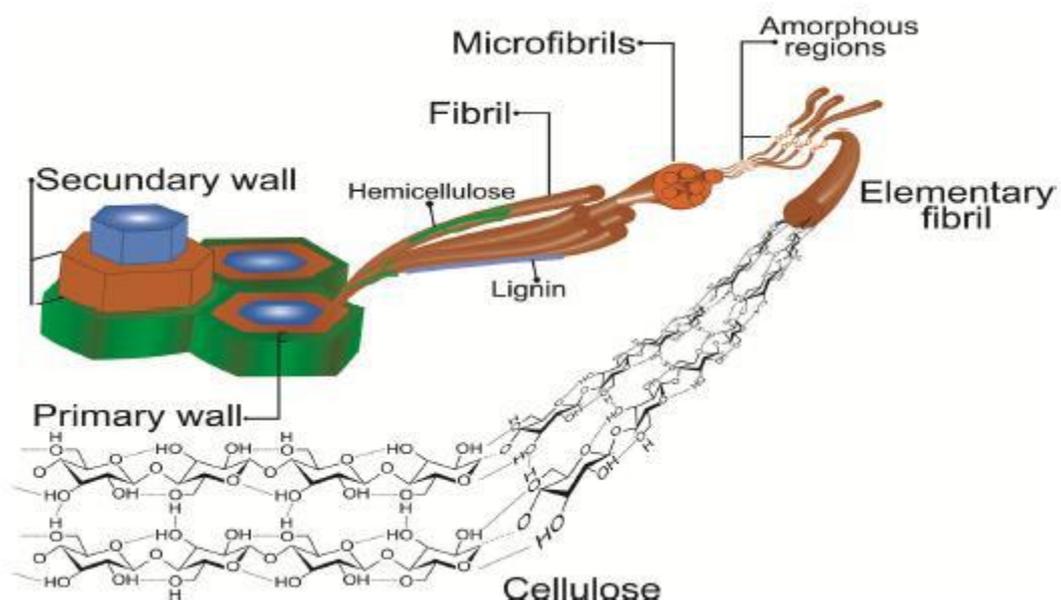


Figure I.8: Structure des fibres naturelles [30].

1.5.3. Fibres végétales

1.5.3.1. Types de fibres végétales

Les fibres végétales proviennent de 5 grandes origines dans les plantes [32] :

- Tige : chanvre, lin, jute, ramie, kénaf et bambou
- Feuille : sisal et abaca
- Graine : coton et kapok
- Fruit : coco
- Racine : rhextophyllum camerounaise

On présente ci-après les caractéristiques générales de quelques fibres végétales qui sont étudiées dans cette thèse.

A-Lin

Le lin appartient à la famille des linacées (*Linum usitatissimum*). C'est une plante annuelle dont la tige atteint de 0.60 à 1.20 m de hauteur pour un diamètre de 1 à 3 mm. Les fibres de lin sont extraites de la tige de la plante. L'avantage de cette fibre est sa longueur élevée en moyenne 25 mm et sa bonne résistance. En Europe, on trouve le lin en France, en Pologne, en Belgique et en Russie [33].



Figure I.9 : Lin et fibres de lin [33]

B-Sisal

Le sisal (*Agave sisalana*) est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2 m de long. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivée en Amérique du sud et en Afrique. La longueur moyenne de ces fibres est de 3 mm [34].



Figure I.10 : Sisal et fibres de sisal [32,34]

C-Chanvre

Présente des fibres externes longues et étroites et des fibres internes ligneuses. La longueur des fibres de chanvre est assez élevée en moyenne de 20 à 50 mm. Les fibres de chanvre sont utilisées dans les domaines du textile (tapis et vêtements), des agrotexiles (toile anti-érosion), de l'automobile (composite pour panneaux intérieurs), du papier (fibres de renfort) et du bâtiment (isolation thermique). Cultivé dans les pays à climat tempéré, on trouve le chanvre dans l'est de l'Europe, en France en Italie et en Chine [32-34].



Figure I.11 : Chanvre et fibres de chanvre [32,33]

D-Jute

Le jute (*Corchorus*) est une plante des régions tropicales appartenant à la famille des liliacées. La tige atteint une hauteur de 4 à 6 m avec un diamètre d'environ 3 cm. Le jute pousse essentiellement au Bangladesh, qui détient un quasi-monopole de son commerce. Les fibres de jute sont très courtes. Elles sont principalement utilisées pour des sacs de transport pour des produits agricoles [33].



Figure I.12 : Jute et fibres de jute

1.6. Matériaux composites à fibres synthétiques

Dans les applications composites, la plupart des fibres utilisées sont de type synthétique. Le **Tableau I.3** résume les propriétés typiques des fibres les plus utilisées. On retrouve au premier rang les fibres de verre en raison de leur isotropie, associée à de bonnes propriétés mécaniques et un faible coût [35]. Les matériaux composites à fibres de verre et de carbone dominent aujourd'hui les industries de l'aérospatiale, de l'automobile et de la construction [36].

Tableau I.3: Propriétés typiques des fibres synthétiques [37]

Fibres	Densité ρ_f (g/cm ³)	Module d'Young E_f (GPa)	Contrainte en traction σ_f (MPa)	Déformation à la rupture ε_f (%)
Alumine (FP)	3.9	380	1400	0.4
Bore	2.65	420	3500	0.8
SiC (Nicalon)	2.6	250	2200	0.9
Carbone	1.86	380	2700	0.7
Verre - E	2.54	70	2200	3.1
Aramide	1.45	130	2900	2.5

A- Fibres de verre

Il existe plusieurs types de fibres de verre qui ont des compositions chimiques différentes, des propriétés différentes et qui sont fabriqués de façons différentes. On peut les classer dans le **Tableau I.4** suivant. [38,39]

Tableau I.4 : Différents types de fibre de verres textiles (1) [38,39]

Type	Indications générales
E	Bonne propriétés électriques à usages générales
D	Hautes propriétés diélectriques
A	Haute teneur en alcali (2)
C	Bonne résistance chimique
R	Haute résistance mécanique
S	Haute résistance mécanique
AR	Résistant en milieu basique
E-CR	Pour usage en milieu acide
(1) D'après la norme NF ISO 2078	
(2) Hydroxyde d'un métal alcalin	

B-Propriétés des fibres de verre

Les fibres de verre présentent de bonnes propriétés en termes de stabilité et de résistance chimique et thermique. Elles ont une large gamme de tailles de fils et de nombreuses options de tissage permettant à l'utilisateur de choisir la meilleure association de performance de matériau et d'économie. Le **Tableau I.5** présente certaines propriétés des fibres de verre.

Tableau I.5 : Propriétés des fibres de verre [39]

Fibres	Masse volumique (g/cm³)	Allongement à la rupture en traction(%)	Résistance en traction(MPa)	Module d'élasticité en traction(GPa)
Verre E	2.54-2.61	4.6-4.8	3200-3400	72-73
Verre D	2.14	4.5	2500	55
Verre A	2.45	4.4	3100	71
Verre C	2.49	4.8	3300	70.3
Verre R	2.55	5.2	4400	86

En observant le **Tableau I.5**, on remarque que l'élongation maximum des fibres de verre à la rupture varie de 4,4 % à 5.2%. On trouve aussi que les fibres de verre présentent un ratio élevé résistance/poids, donc elles sont intéressantes pour les applications où une résistance importante et un poids minimum sont nécessaires.

Sous des influences thermiques, les fibres de verre présentent des avantages telles que : une résistance élevée et une stabilité de dimension. Elles sont un matériau inorganique et ne brûlent pas. Elles conservent environ 25 % de leur résistance initiale à 540°C. Les fibres de verre ont un faible coefficient d'expansion thermique qui conduit à une faible déformation ainsi qu'elles supportent une exposition à des températures extrêmement élevées ou basses. [38,39]

La plupart des produits chimiques ont peu ou pas d'effets sur les fibres de verre. Elles n'absorbent pas l'humidité et ne changent pas physiquement ou chimiquement si elles sont exposées à l'eau.

A- Fibres de carbone

En production industrielle, les fibres de carbone sont généralement fabriquées à partir de deux types de précurseurs : le précurseur brai de mésophase obtenu par traitement thermique de brais (un mélange d'hydrocarbures issus de résidus de houille ou de pétrole) isotropes sélectionnés et purifiés qui permet de pré-orienter axialement sa structure. [40].

En général, la méthode de fabrication du précurseur brai est identique à celle du PAN. Elles ont deux principales étapes : le filage et l'étirage qui ont pour but d'orienter la structure dans la direction axiale et d'obtenir des fibres. Le traitement thermique des fibres qui va conduire à l'oxydation, la carbonisation et la graphitisation.

La différence dans la fabrication des deux types de précurseur est dans l'étape d'oxydation. [40].

Les fibres de carbone sont, en général, classées selon leurs propriétés mécaniques, en particulier les propriétés en traction. En fonction de leur module de traction, les fibres de carbone peuvent être classées en 5 catégories suivantes :

- d'usage général ou pour applications thermiques (fibres UG) : $E < 200$ (GPa)
- de haute résistance (fibres HR) : 200 (GPa) $< E < 250$ (GPa)
- de module intermédiaire (fibres IM) : 250 (GPa) $< E < 350$ (GPa)
- de haut module (fibres HM) : 350 (GPa) $< E < 550$ (GPa)
- de très haut module (fibre THM) : $E > 550$ (GPa).

B-Propriétés des fibres de carbone

Les fibres de carbone présentent non seulement une bonne résistance et un module d'Young élevé, mais aussi une masse volumique faible d'environ $1.43-2$ g/cm³ [41]. Leurs résistances spécifiques et modules spécifiques sont beaucoup plus grands que ceux des métaux. Le **Tableau I.6** suivant présente des propriétés de certaines fibres de carbone. [41].

Tableau I.6: Propriétés de certaines fibres de carbone commercialisées [40,41]

Fabricant	Nom commercial	Module (GPa)	Résistance à la rupture en traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Kureha Chemical (Japon)	Kureca T-101	33	790	-
	Kureca T-102	33	690	-
Cytac (USA)	ThornelP 25W	160	1400	-
	ThornelP 55S	380	1900	-
	ThornelP 75S	520	2100	-
Toray (Asie) Soficar (Europe) et CFA (USA)	T 300	230	3530	1.5
	T 400 H	250	4410	1.8
	T 800 H	294	5490	1.9
	M 40	392	2740	0.7
	M 46 J	436	4210	1.0
	M 50 J	475	4120	0.8
	M 55 J	540	4020	0.8
	M 60 J	588	3920	0.7

Les propriétés de la fibre de carbone sont fortement dépendantes de sa structure notamment du degré de cristallinité, de l'espace inter-couche ou encore de la taille des cristallites. Un haut degré de cristallinité et un faible espace inter-couche conduit à une fibre de haut module.

Les couches de carbone tendent à être parallèles à l'axe de la fibre. Il en résulte que la fibre de carbone a un plus haut module parallèlement que perpendiculairement à l'axe de la fibre. De la même manière, la conductivité thermique et électrique est plus grande dans l'axe de la fibre. Plus le degré d'alignement des couches de carbone est grand, plus les propriétés de la fibre (la densité, le module en traction, les conductivités électrique et thermique) sont élevées [42]. En général, les fibres de carbone ont aussi une bonne résistance thermique, elles peuvent supporter une température de

plus de 2500°C dans un milieu sans l'oxygène. Leur coefficient de dilatation thermique est proche de zéro dans le sens longitudinal autour de la température ambiante. Sous l'impact d'environnement, les fibres de carbone présentent une inertie chimique sauf à l'oxydation [41,42].

Les fibres de carbone présentent une faible résistivité électrique par rapport aux fibres de verre, bien que leur conductivité électrique soit de deux ou trois ordres de grandeur inférieur à celle des métaux [40-42].

On trouve que les fibres synthétiques présentent de bonnes propriétés mécaniques, chimiques ainsi que thermiques. En particulier, les fibres de carbone ont une large gamme de module avec des valeurs très élevées. Pour ces raisons, elles ont été beaucoup utilisées dans les composites.

C-Composites à fibres synthétiques

Le **Tableau I.7** présente des propriétés de composites renforcés par différents types de fibres synthétiques :

Tableau I.7 : Propriétés comparées des composites unidirectionnels à base de résines époxydes (1) renforcées par différentes fibres [40,41]

Fibre	Masse volumique (g/cm ³)	Traction 0° (2)		Compression 0° (MPa) (2)
		Résistance (MPa)	Module (GPa)	
Carbone (3)				
T 400 H	1.56	2450	135	1470
T 800 H	1.56	2840	150	1570
M 40 J	1.54	2250	215	1130
M 60 J	1.64	1860	340	780
Verre				
E	2.04	1400	46	910
R	2.01	1900	52	970
Aramide (4)				
KEV 49	1.38	1380	72	276
Bore	2.01	1700	220	2400

On voit que les composites à fibres synthétiques présentent en général de bonnes propriétés mécaniques telles que : des modules élevés, des résistances importantes et des masses volumiques faibles. En comparant les propriétés des composites synthétiques dans le **Tableau I.7**, on remarque que : les composites à fibres de carbone et de bore ont des résistances et modules très élevés comparés aux composites à fibres de verre ou d'aramide. Le composite à fibres de bore possède la résistance en compression la plus élevée. En considérant les performances spécifiques, les composites à fibres de carbone sont nettement les matériaux les plus performants par rapport aux autres composites.

Sous une sollicitation de fatigue, le composite à fibres de carbone offre des capacités absolument excellentes. En effet, on ne constate une perte de propriétés mécaniques de 20%-30% pour un composite à base de carbone qu'après 10 millions de cycles tandis qu'un composite à base de fibres de verre perd 50% de ses propriétés et un alliage d'aluminium plus de 70% [40].

Comme présenté ci-dessus, les fibres synthétiques comme les fibres de carbone et les fibres de verre présentent de bonnes résistances vis-à-vis des influences de l'environnement (Température, humidité, milieu alcalin ou acide). Par contre, l'impact de l'environnement influence considérablement la résine de matrice, ce qui conduit à des diminutions de propriétés des composites telles que : perte de rigidité ou perte de la résistance [39,40].

À côté des fibres synthétiques, les fibres naturelles, en particulier les fibres végétales, intéressent de plus en plus des recherches sur leurs applications dans les renforts de matériaux composites. Donc, la section suivante présentera des généralités sur les fibres végétales et leurs composites.

Références

- [1] J.M. Berthelot. Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer New York. (1999)
- [2] P. V. Joeseph, G. Mathew, K. Joeseph, G. Groeninckx, S. Thomas, Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites, 34, 275-290, (2003)
- [3] A. Boumedienne. "Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, (2003)
- [4] Anh Vu Nguyen. Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques, (2015)
- [5] <https://fr.wikipedia.org/wiki/Biocomposite>. Consulté le 03/(2021)
- [6] Sandali A, Rabhi N. Comportement au choc des stratifiées composites renforcées par des fibres naturelles, mémoire de master, université KasdiMarbah de Ouargla, (2013).
- [7] L, Gornet. Généralités sur les matériaux composites. cel-00470296, version 1 - 6 Apr (2010)
- [8] Vijay I.R., Palmese G.R. Influence of Tetra Hydrofuran on Epoxy–Amine Polymerization Macromolecules, vol. 38, pp. 6923-6930. (2005)
- [9] El Hadji Babacar LY. Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres decellulose, thèse de doctorat, institut national polytechnique de Grenoble, 2008.
- [10] A.Richard ,Gross and BhanuKalra, Biodegradable Polymers for the Environment, Science vol 297, p 803-807, (2002)
- [11] Jules.E.J. Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites therm durcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l'hystérésis Diélectrique. Ecole nationalesupérieure d'arts et métiers, (2001)
- [12] Berthelot JM. Matériaux composites / comportement mécanique et analyse des structures. 4ème édition. Paris : Lavoisier; (2005)
- [13] A. P. Gupta and V. Kumar. New emerging trends in synthetic biodegradable polymers– Polylactide: A critique. European Polymer Journal, 43, 4053–4074, (2007)
- [14] Ademe. Identification des gisements et valorisation des matériaux biosourcés en fin de vie en France. Rapport d'étude, 169 p. (2014)
- [15] J.M. Berthelot. Composite Materials. Mechanical Behavior and Structural Analysis, New York, (1999)
- [16] A.Mokaddem. Modélisation du Comportement de L'interface Fibre-Matrice de Matériaux Composites », Mémoire de magister, USTO, (2008)
- [17] Lee.S, J.W.Characterization and processing of biodegradable polymer blends of (poly lactic acid with poly(butylenes succinate adipate)).Korea-Australia Rheology journal,17(2),71-77. (2005)
- [18] R. Datta, S-P. Tsai, P. Bonsignore, S-H. Moon, J-R. Frank, Technological and economic potential of poly(lactic acid) and lactic acid derivatives, FEMS Microbiology Reviews, 16, 221-231. (1995)
- [19] D. Garlotta, A Literature Review of Poly(Lactic Acid) , Journal of Polymers and the Environment, 9, 2, (2001)
- [20] K,M. Nampoothiri, N-R. Nair, R-P. John, An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research, Bioresource Technology, 101, 8493-8501, (2010)
- [21] Rudnik. E. Compostable Polymer Materials. Oxford, Elsevier. (2010)
- [22] Erwin T.H. Vink, Karl R. Rabago, David A. Glassner, Patrick R. Gruber. Applications of life cycle assessment to NatureWorks TM polylactide (PLA) production, Polymer Degradation and Stability 80, 403–419, (2003)

- [23] : W. H. Carothers, G. L. Dorough, and F. J. van Natta. Studies of polymerization and ring formation - The reversible polymerization of six-membered cyclic esters. *J. Am. Chem. Soc.*, 54, 2, 761–772, (1932)
- [24] Auras R, Lim LT, Selk SEM, Tsuji H. *Poly (lactic acid): synthesis structures, properties, processing and application*. John Wiley and Sons, New Jersey. (2010)
- [25] Anderson KS, Schreck KM, Hillmyer MA, Toughening polylactide, *Polymer Reviews*, 48(1):85-108, (2008)
- [26] L-T. Lima, R. Auras, M. Rubino, Processing technologies for poly(lactic acid), *Progress in polymer science*, 33, 820-852, (2008)
- [27] Sofien Bouzouita. Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel. L'École Centrale de Lyon. P : 6,7. (2011)
- [28] Les fibres textiles et leur classification, <https://textileaddict.me/les-fibres-textiles-et-leur-classification/> 18 novembre (2016)
- [29] Paul A Fowler, J Mark Hughes and Robert M Elias. Biocomposites: technology, environmental credentials and market forces. University of Wales, Bangor LL57 2UW, UK. 1781 (2006)
- [30] Eddine, A.D. Extraction, caractérisation morphologique, physico-chimique et mécanique des fibres caulinaires de *Retama monosperma* L. Boiss. (2017)
- [31] Latif, R., et al., Surface treatments of plant fibers and their effects on mechanical properties of fiber-reinforced composites: A review. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 38(1), p. 15-30, (2019)
- [32] Michel Bourgeois. Fibres agrosourcées, *Techniques de l'Ingénieur*, n2520, (2011)
- [33] Christophe Baley. Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, *Techniques de l'ingénieur*, AM5130, (2013)
- [34] Centre d'animation régional en matériaux avancés - CARMA, Glossaire des matériaux composites renforcés de fibres d'origines renouvelable. CARMA, (2006)
- [35] S. Kalia, A. Dufresne, and B. Cherian. Cellulose-Based Bio- and Nanocomposites: A Review. *International Journal of Polymer Science*, p. 35, (2011.)
- [36] P. Wambua, J. Ivens, and I. Verpoest. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics. *Composites Science and Technology*, vol. Volume 63, Issue 9, pp. 1259–1264, July, (2003)
- [37] S. C. Amico. Permeability and capillary pressure in the infiltration of fibrous porous media in resin transfer moulding. University of Surrey, (2000)
- [38] Jean Lamanche. Renforts en fibres de verre, *Techniques de l'Ingénieur*, A3237, (1988)
- [39] Daniel Guillon. Fibres de verre de renforcement, *Technique de l'Ingénieur*, A2210, (1995)
- [40] Guy Dupupet, Fibres de carbone, *Techniques de l'ingénieur*, AM 5134, (2008)
- [41] S. Petit Moussailly, V. Le Bacle, & R. Vincent. Les fibres de carbone et de graphite. *Éléments pour une évaluation du risque*. Documents pour le médecin du travail, (92), (2002)
- [42] Isabelle Giraud. Elaboration d'ensimages thermoplastiques thermostables : Influence sur le comportement mécanique des composites PEEK/Fibres de carbone, thèse de doctorat, Université de Toulouse, (2011)



Chapitre II

Modélisation analytique et numérique

II.1. Introduction

Tout processus mécanique produisant au sein d'un matériau une " discontinuité" locale de matière appelée fissure. Il est important de parler d'initiation de la rupture, l'initiation de la rupture peut être considérée comme la création des microfissures à l'échelle microscopique (celle des constituants) à partir d'un défaut, on parlera de microfissuration. [1,2]

La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelles surfaces de rupture à l'échelle macroscopique (plusieurs fois celle des constituants), à partir des microfissures existantes. On parlera également de macro- fissuration. Dans le cas des matériaux composites, l'initiation de la rupture se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique [1,2]. Les fissures transverses peuvent apparaître très tôt dans la durée de vie de la structure et elles peuvent constituer des zones d'amorçage pour d'autres mécanismes d'endommagement plus dangereux. La connaissance de la fissuration transverse est donc un préalable indispensable aux études ayant pour but d'assurer l'intégrité de la structure. [2,3]

II.2.Mécanismes d'endommagement des composites

La dégradation des matériaux composites n'est pas due à un seul mécanisme d'endommagement mais bien une accumulation de plusieurs phénomènes ayant lieu simultanément ou successivement. Ces mécanismes ont lieu à toutes les échelles du matériau :

- de la décohésion fibre matrice à l'échelle des constituants mécaniques jusqu'à la délamination à l'échelle du stratifié.

Talreja [4] proposait déjà en 1981 une succession de mécanismes d'endommagement apparaissant dans un matériau composite stratifié unidirectionnel soumis à un chargement de fatigue. Ces mécanismes d'endommagement sont aujourd'hui bien connus, et une revue de ceux-ci a été proposée par Revest [5] (voir figure II.1).

A- à l'échelle microscopique, apparaissent des ruptures d'adhérence entre les fibres et

la matrice (décohésion fibres/matrice) ou de porosité, c'est le cas étudié dans ce travail. [6]

B- à l'échelle mésoscopique, ou échelle du pli, on observe des fissures intra/laminaires transverses (perpendiculaires à la direction de sollicitation) ou longitudinales (dans la direction de l'application de l'effort) et des ruptures de fibres au stade ultime de la ruine du matériau. [6]

C- à l'échelle macroscopique, on observe le phénomène de délaminage qui correspond à une séparation locale entre deux couches liée à une concentration importante des contraintes en cisaillement s'amorçant généralement aux bords libres de la structure. [6]

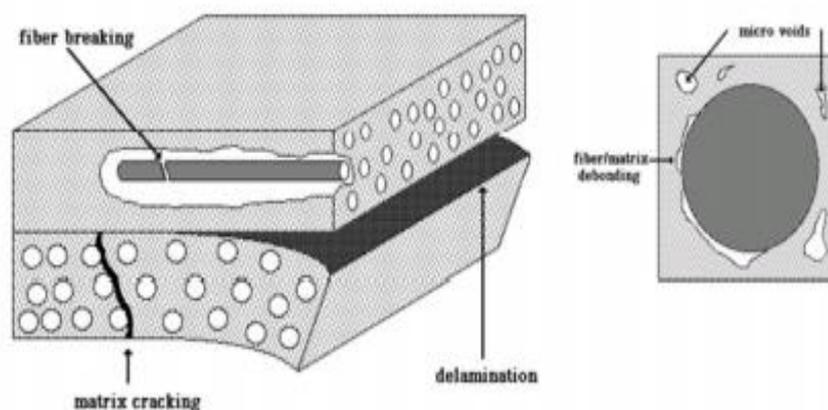


Figure II.1. Les différents modes d'endommagement dans un stratifié à base d'unidirectionnel [5]

III.3. L'interface fibre/matrice

L'interface assure la transmission des efforts entre la matrice et le renfort lors d'une sollicitation. La résistance au cisaillement de l'interface influence largement les propriétés finales du composite. En effet, un des modes d'endommagement dans les composites est la rupture à l'interface. La résistance de l'interface dépend non seulement des propriétés des composants mais aussi de sa formation. Pour ces raisons, l'étude de l'interface est indispensable.

Les méthodes de caractérisation de l'interface présentent des limites, soit dans la méthodologie (préparation des éprouvettes), soit dans la procédure expérimentale. [7,8]

II.4. Comportement d'un composite unidirectionnel

Dans un composite céramique unidirectionnelle sollicitée parallèlement aux fibres, le comportement à rupture peut être imaginé comme étant constitué des séquences suivantes : Cas des fibres et matrice subissent la même déformation : Le composite possède donc un comportement linéaire élastique jusqu'à l'apparition d'une première fissure matricielle. Cette fissure se propage et s'approche d'une fibre, ensuite on peut distinguer les cas suivants: [9-10]

A- Cas d'une interface très forte (interface liée)

Ce type de matériau possède un comportement fragile, comme une céramique monolithique. Alors la déformation des deux constituants est élastique. Il n'y a aucun déplacement relatif entre fibre et matrice, le transfert de charge s'effectue par l'intermédiaire d'une forte contrainte de cisaillement dans la matrice, dont l'intensité décroît lorsqu'on s'éloigne radialement de la fibre.

B- Cas d'une interface très faible (non liée)

Si l'interface est trop faible, la fissure matricielle est bien déviée à l'interface, mais la décohésion entre fibres et matrice s'étend sur une très grande distance sur laquelle la matrice n'intervient donc plus. Là également, la résistance du composite est très faible, mode II et III.

C- Cas d'une interface relativement faible

Si l'adhérence entre fibres et matrice est relativement faible, la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire (mode II de la rupture) en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface. Le mode II, ou mode de glissement droit, est la situation recherchée dans la déviation de fissure, avec

le mode III (glissement vis). En règle générale, la propagation de la fissure est en mode mixte combinant le mode I et les deux autres modes (II et III).

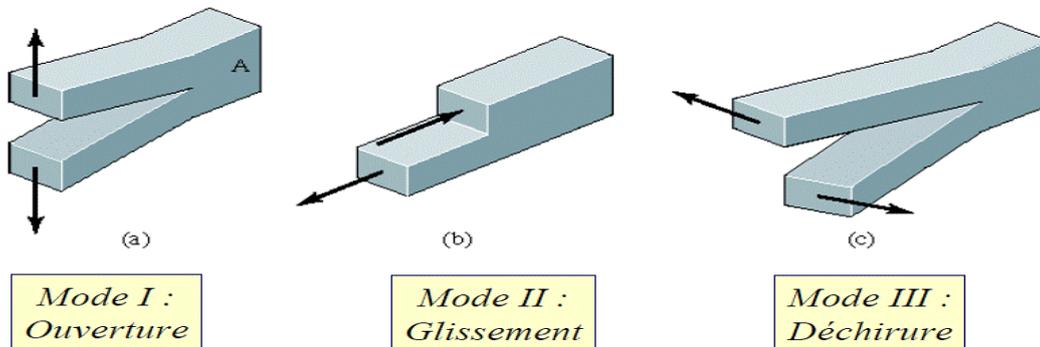


Figure II.2. Modes d'endommagement [9,10]

II.5. Rôle des interfaces et des interphases

A- interphases

C'est une zone concentrique à la fibre, d'épaisseur fine (en général quelque 10 ou 100 nm) et de nature chimique définie (formée par un ou plusieurs constituants élémentaires du composites lors de son élaboration). Elle peut être également une fine couche introduite volontairement dans le but de protéger la fibre ou de contrôler la liaison interfaciale, ou bien encore de contribuer à améliorer la compatibilité chimique fibre/matrice (voir la Figure II.3. a). [11]

B- interface

Est un terme utilisé dans le domaine des matériaux composites, pour décrire la surface ou la zone qui sépare la fibre et la matrice. (voir la Figure II.3. b). [11]

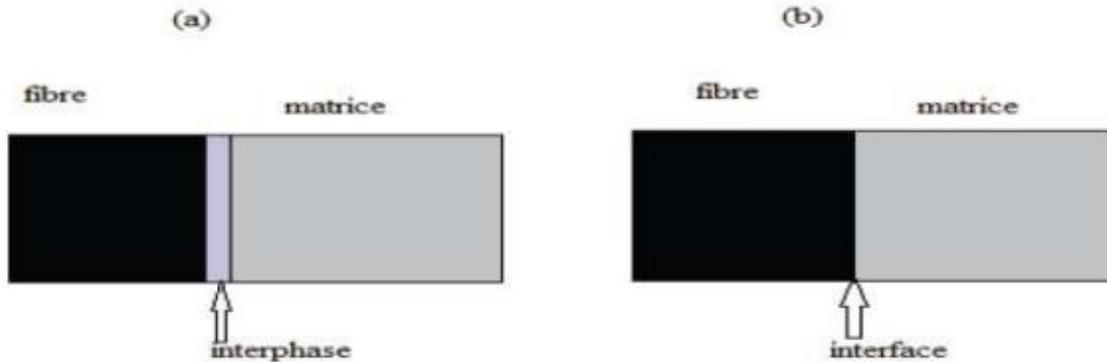


Figure II.3 .Concepts d'interphase et d'interface [11]

II.6. Le composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, l'initiation de la rupture se produit généralement soit par rupture des fibres lorsque la déformation à la rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice ($\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$), soit par rupture transverse de la matrice dans le cas contraire.[12]

Dans le cas ($\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$), les courbes contrainte-déformations sont représentés sur la figure II.4.

En admettant l'égalité des déformations dans la fibre et dans la matrice, la relation de contrainte à la rupture du composite σ_{cu} s'écrit au moment de la rupture:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} v_f + (\sigma_m) \epsilon_{fu} (1 - v_f) \quad (\text{II.1})$$

Où σ_{fu} la contrainte à la rupture des fibres et $(\sigma_m) \epsilon_{fu}$ la contrainte dans la matrice pour une déformation égale à la déformation ϵ_{fu} à la rupture des fibres.

La contrainte $(\sigma_m) \epsilon_{fu}$ est inférieure à la contrainte à la rupture (σ_{mu}) de la matrice, d'où:

$$\sigma_{cu} \leq \sigma_{fu} v_f + \sigma_{mu} (1 - v_f) \quad (\text{II.2})$$

Généralement, l'expression retenue pour la contrainte à la rupture du composite est la loi des mélanges:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} v_f + \sigma_{mu} (1 - v_f) \quad (\text{II.3})$$

Avec pour les fractions usuelles de fibres:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu}v_f \tag{II.4}$$

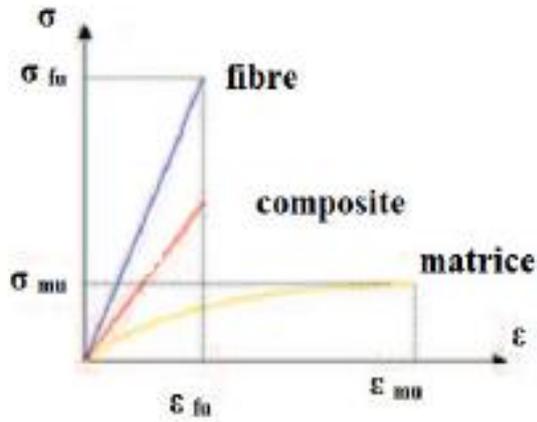


Figure II.4 .courbe contrainte/déformation d'un composite soumis à une traction longitudinale ($\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$) [13]

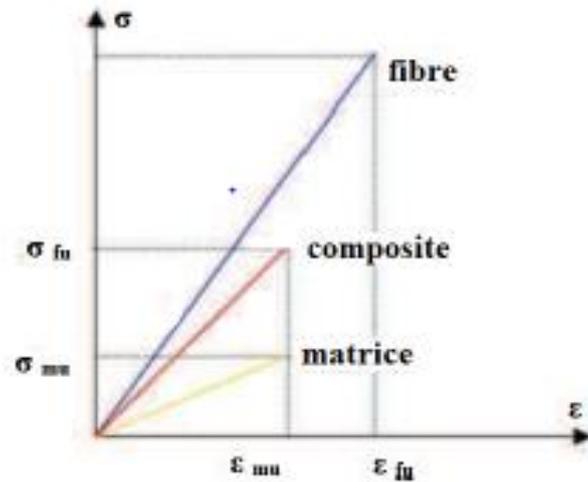


Figure II.5 .courbe contrainte/déformation d'un composite soumis à une traction longitudinale ($\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$) [13]

Dans le cas où la déformation à la rupture de la matrice est inférieure à celle des fibre, la contrainte à la rupture est donnée par l'expression :

$$\sigma_{cu} = \sigma_f v_f + \sigma_{mu}(1 - v_f) \tag{II.5}$$

Où σ_f est la contrainte dans la fibre au moment de la rupture de la matrice.

II.7. Modèle de Kelly-Tyson

Le modèle de Kelly-Tyson a initialement été développé dans le contexte de matériaux à matrice métallique pour lesquels des mécanismes de plasticité sont activés au voisinage de l'extrémité des fibres. [14]

Dans la réalité, ces concentrations de contraintes sont limitées par le seuil de plasticité de la matrice ou la mise en glissement de l'interface. Par ailleurs, l'approche élastique n'est plus valable à partir du moment que la contrainte de traction dans la matrice excède sa limite d'élasticité. [14]

- **Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface**

Afin de décrire ces processus, Kelly et al n'ont considéré que la contrainte interfaciale était constante aux extrémités de la fibre, dans la zone plastique [14,15]. L'écriture de l'équilibre élastique de la fibre dans cette portion de fibre donne :

$$\sigma_f = \frac{2\tau_i}{a} = (L - x) \quad (\text{II.6})$$

Cette relation s'applique également au cas où le mécanisme physique mis en jeu aux extrémités de la fibre correspond à un frottement à contrainte constante. En ce sens, l'utilisation du modèle de Kelly présenté sur la figure II.6 peut être étendue aux composites à matrice élastique dans lesquels le renforcement s'effectue par glissement à l'interface.

La déformation dans la fibre ne peut excéder la déformation du composite, ce qui signifie que la contrainte σ_f augmente linéairement (équation II.6) à partir de l'extrémité de la fibre, jusqu'à la valeur $E_f \varepsilon_1$ si la fibre est suffisamment longue. Cette dernière condition correspond au critère suivant :

$$Li \geq \frac{a E_f \varepsilon_1}{2\tau_i} \quad (\text{II.7})$$

Où L_i est une longueur dite inefficace correspondant à la portion de fibre dans laquelle la contrainte de traction n'a pas encore atteint sa valeur maximale $\sigma_{fmax} = E_f \varepsilon_1$

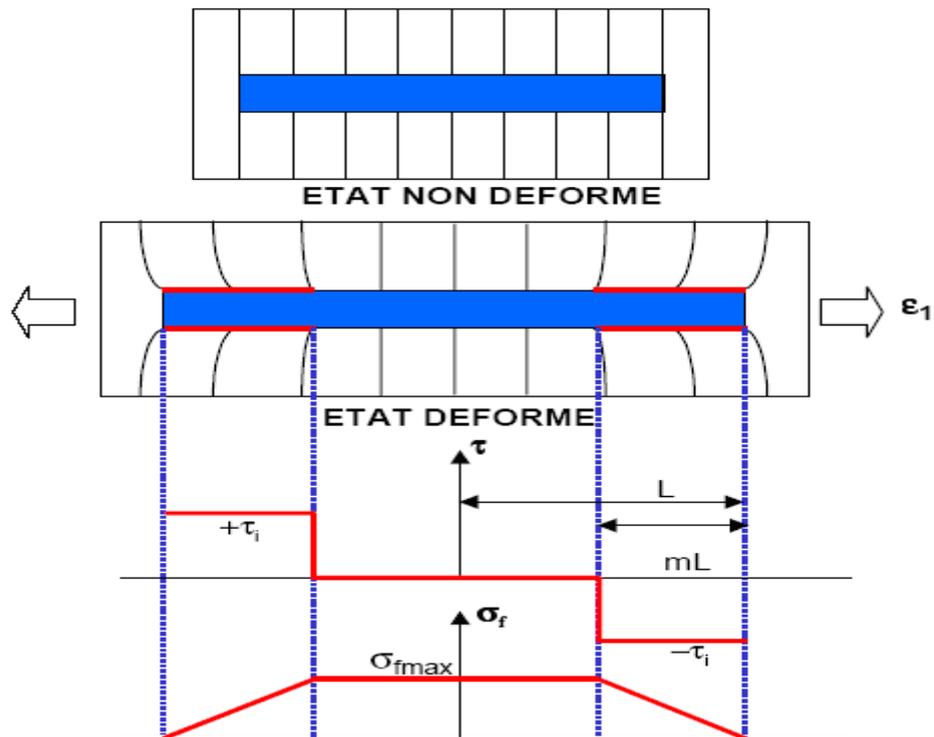


Figure II.6. Modèle de Kelly –Tyson.[15]

Il est important de noter que ce modèle prend seulement en compte le transfert de charge se produisant dans la zone plastique située aux extrémités de la fibre. Les effets de transfert de charge élastiques dans la portion centrale de la fibre sont par contre totalement négligés ($\tau_i = 0$). Cette approche n'est valable que si le seuil de plasticité de la matrice (où le seuil de glissement à l'interface) est très bas. Dans ce cas, la déformation plastique (où le glissement) intervient dès le début de la mise en charge, sans phase de mise en charge élastique préalable.

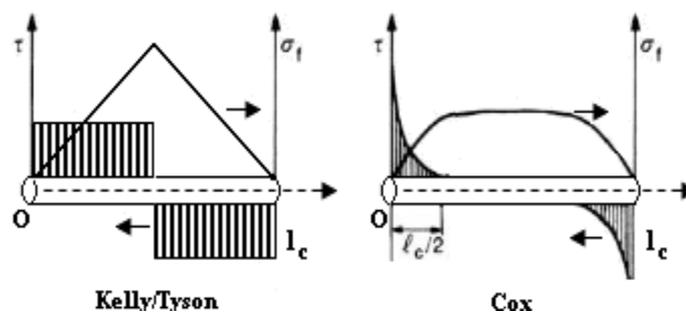


Figure II.7. Modèles de Kelly/Tyson et de Cox des profils de contraintes de tension dans la fibre et de cisaillement à l'interface.[15]

II.8. Le modèle de Cox

Il est possible de décrire les processus de transfert de charge par des modèles micromécaniques simplifiés considérant, par exemple, une V.E.R. constitué d'une fibre noyée dans un cylindre de matrice sur lequel est appliquée une contrainte de traction. L'écriture des équations d'équilibre élastique permet théoriquement de déterminer le profil de la contrainte de traction dans la fibre et celui du cisaillement à l'interface. A partir de ces données, il est possible d'évaluer la courbe contrainte déformation du composite. En fonction du comportement supposé de l'interface, différentes réponses peuvent être simulées, deux modèles pionniers dans ce domaine, ceux de Cox (1952) et de Kelly-Tyson (1964).

Dans le modèle de Cox, la liaison entre fibre et matrice est supposée parfaite et le comportement mécanique de ces constituants élastique. [16]

II.9. Modèle de Cox : transfert de charge élastique

On considère le VER constitué d'un fragment de fibre de rayon (a) enrobé dans un cylindre de matrice de rayon R fixé par la teneur en fibre V_f , en fonction des hypothèses faites sur l'arrangement des fibres. Ce V.E.R. est soumis à ses extrémités à une déformation en traction ϵ_1 . Seules les composantes axiales des contraintes générées dans la fibre et la matrice sont considérées. Il s'agit donc d'une approche monodimensionnelle dans laquelle la contrainte axiale dans une section donnée de la fibre est supposée uniforme. La fibre et la matrice sont supposées parfaitement élastiques et la liaison fibre/matrice parfaite.

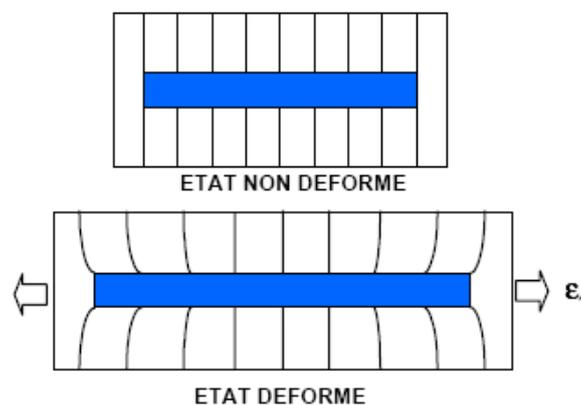


Figure II.8. Elément d'un V.E.R. [16]

II.10. Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface

II.10.1. Equilibre des forces de cisaillement.

On écrit que les forces de cisaillement générées dans la matrice à une distance (r) de l'axe de la fibre ($r > a$) sont équilibrées par la force de cisaillement à l'interface ($r = a$) soit:

$$\pi r dx = 2\pi a \tau_i dx \quad (\text{II.8})$$

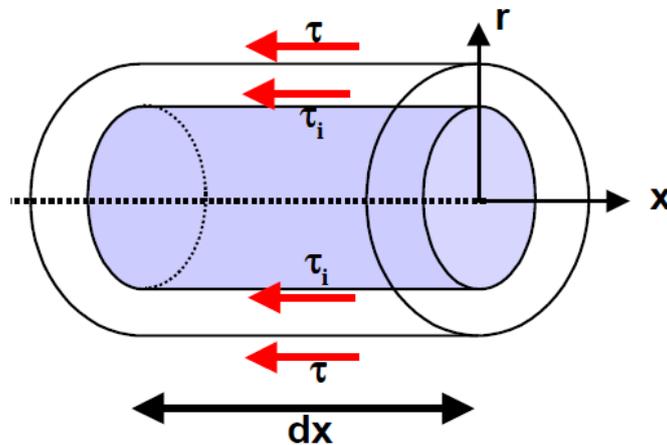


Figure II.9. équilibre de la matrice en cisaillement. [16].

τ et τ_i sont respectivement la contrainte de cisaillement dans la matrice et la contrainte de cisaillement à l'interface. Soit

$$\tau = \frac{a\tau_i}{r} \quad (\text{II.9})$$

En faisant l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire de la matrice en cisaillement ($\tau = G_m \gamma$), on peut écrire:

$$\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau}{G_m} = \frac{a\tau_i}{G_m r} \quad (\text{II.10})$$

Où w est le déplacement de la matrice selon la direction x et G_m son module de cisaillement. Par intégration, on obtient une expression de la contrainte interfaciale en fonction du déplacement de la matrice en $r = a$ (w_a) et $r = R$ (w_R):

$$\int_a^R dw = \frac{\tau_i a}{G_m} \int_a^R \frac{dr}{r} \quad (\text{II.11})$$

Soit :

$$W_R - W_a = \frac{\tau_i a}{G_m} \ln(R/a) \quad (\text{II.12})$$

$$\tau_i = \frac{G_m(W_R - W_a)}{a \ln(R/a)} \quad (\text{II.13})$$

II.10.2. Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre

On écrit que la force de traction dans une portion dx de la fibre est équilibrée par la force de cisaillement à l'interface comme suit:

$$\pi a^2 d\sigma_f = -2\pi a \tau_i dx \quad (\text{II.14})$$

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = -\frac{2 \tau_i}{a} \quad (\text{II.15})$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{d\tau_i}{dx} = \frac{G_m}{a \ln(R/a)} \left(\frac{dW_R}{dx} - \frac{dW_a}{dx} \right) \quad (\text{II.16})$$

D'après (5) on obtient :

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_i}{a} \quad (\text{II.17})$$

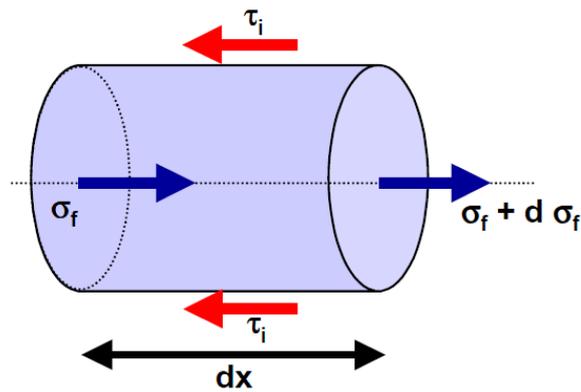


Figure II.10. Équilibre élastique dans une portion de fibre. [16].

- Pour $r = R$, on suppose que la déformation de la matrice soit égale à la déformation appliquée ϵ_1 :

$$\frac{dW_R}{dx} = \epsilon_m = \epsilon_1 \quad (\text{II.18})$$

- Pour $r = a$, la déformation de la matrice est égale à celle de la fibre (liaison fibre/matrice parfaite) soit:

$$\frac{dW_a}{dx} = \epsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (\text{II.19})$$

Ce qui permet de décrire l'équilibre élastique du système par l'équation différentielle suivante:

$$\frac{d^2\sigma_f}{dx^2} = \frac{\beta^2}{a^2} (\sigma_f - E_f \epsilon_1) \quad \text{Avec} \quad \beta^2 = \frac{2G_m}{E_f \ln(R/a)} \quad (\text{II.20})$$

En supposant la contrainte σ_f nulle aux extrémités de la fibre (en $x=-L$ et $x=L$), il est possible de résoudre (4). On obtient les solutions suivantes:

Contrainte axiale dans la fibre:

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \{1 - \cos h(\beta x/a) : \cos h(\beta s)\} \quad (\text{II.21})$$

Contrainte de cisaillement à l'interface :

$$\tau_i = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_1 \sin h(\beta x/a) : \cos h(\beta x) \quad (\text{II.22})$$

Où : $s=L/a$ est le rapport d'aspect de la fibre.

Les profils de contrainte d'un V.E.R correspondant aux équations (21) et (22) sont représentés ci-dessous sur la figure II.11:

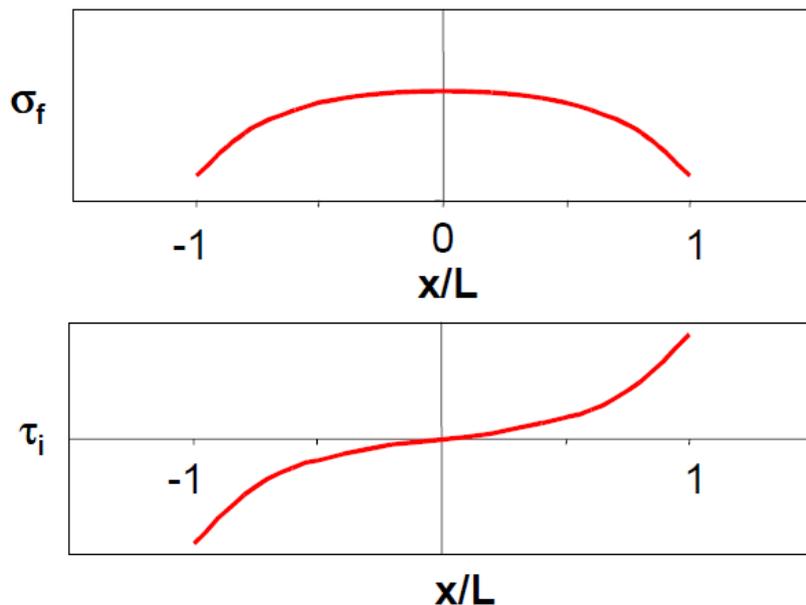


Figure II.11.Modèle de Cox : profil des contraintes fibre/interface [16]

Sur ce schéma, on voit que le développement de contraintes de cisaillement aux extrémités du fragment de fibre se traduit par une mise en charge progressive de la fibre en traction. Les efforts sont donc bien transférés de la matrice vers la fibre.

Cette note décrit les approches statistiques couramment employées pour décrire la rupture de renforts fibreux fragiles. Celles-ci sont appliquées au cas de la rupture de fibres. [16]

Où :

G_m : Le module de cisaillement de la matrice,

E_f : Le module de Young de la fibre,

ϵ : La déformation,

a : Un rayon de la fibre,

R : La distance entre les fibres,

τ : La contrainte de cisaillement de l'interface.

II.11. Modèle probabiliste de weibull

II.11. 1. La loi de Weibull

L'expression loi de Weibull recouvre en fait toute une famille de lois, certaines d'entre elles apparaissant en physique comme conséquence de certaines hypothèses. C'est en particulier, le cas de la loi exponentielle ($\beta = 1$) et de la loi normale ($\beta = 3$).

Sa fonction de fiabilité est :

$$R(t) = e^{-(t-\gamma/\eta)^\beta} \quad (\text{II.23})$$

Avec les paramètres de signification :

γ, β, η définissent la distribution de Weibull.

On utilise trois paramètres :

β : Paramètre de forme ($\beta > 0$)

η : paramètre d'échelle ($\eta > 0$)

γ : Paramètre de position ($-\infty > \gamma > +\infty$)

II.11. 2. Le modèle probabiliste de Weibull

La fibre est supposée d'un assemblage de maillons ayant chacun leur résistance propre à la rupture. La fracture de la fibre intervient quand le maillon le plus faible se rompt.

On divise la fibre en N segments dans lesquels la contrainte est supposée uniforme est égale à σ_i . La probabilité pour qu'un segment soit rompu à la contrainte σ_i est $F(\sigma_i)$. A $F(\sigma_i)$, on associe la fonction de densité de probabilité $f(\sigma)$ définie par : [17]

$$F(\sigma_i) = \int_0^{\sigma_i} F(\sigma) d\sigma \quad (\text{II.24})$$

Si σ_r est la résistance théorique à rupture du matériau :

$$F(\sigma_r) = \int_0^{\sigma_r} F(\sigma) d\sigma = 1 \quad (\text{II.25})$$

La probabilité qu'un maillon ne soit pas rompu à la contrainte σ_i est égale à $1-F(\sigma_i)$ la probabilité, R que toute la fibre ne soit pas rompue est donnée par :

$$R = \prod_{i=1}^N (1 - F(\sigma_i)) \quad (\text{II.26})$$

Si l'on suppose que la contrainte dans la fibre est uniforme et égale à σ .

$$R = (1-F(\sigma))^N \quad (\text{II.27})$$

La probabilité pour que la fibre soit rompue à la contrainte σ est alors :

$$P_r(\sigma) = 1 - (1 - F(\sigma))^N \quad (\text{II.28})$$

En utilisant l'approximation de poisson, $\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 - \frac{x}{n}\right)^n = \exp(-x)$ on obtient

$$(1-F(\sigma))^N = \exp(-NF(\sigma)) \quad (\text{II.29})$$

Nombre de maillon est supposé proportionnel à la longueur L de la fibre, ce qui permet d'écrire $NF(\sigma) = L\Phi(\sigma)$ où la fonction Φ reste à déterminer. Weibull a proposé pour cette fonction la forme empirique suivante :

$$\Phi(\sigma) = \frac{(\sigma - \sigma_u)^m}{\sigma_0} ; \sigma > \sigma_u \quad (\text{II.30})$$

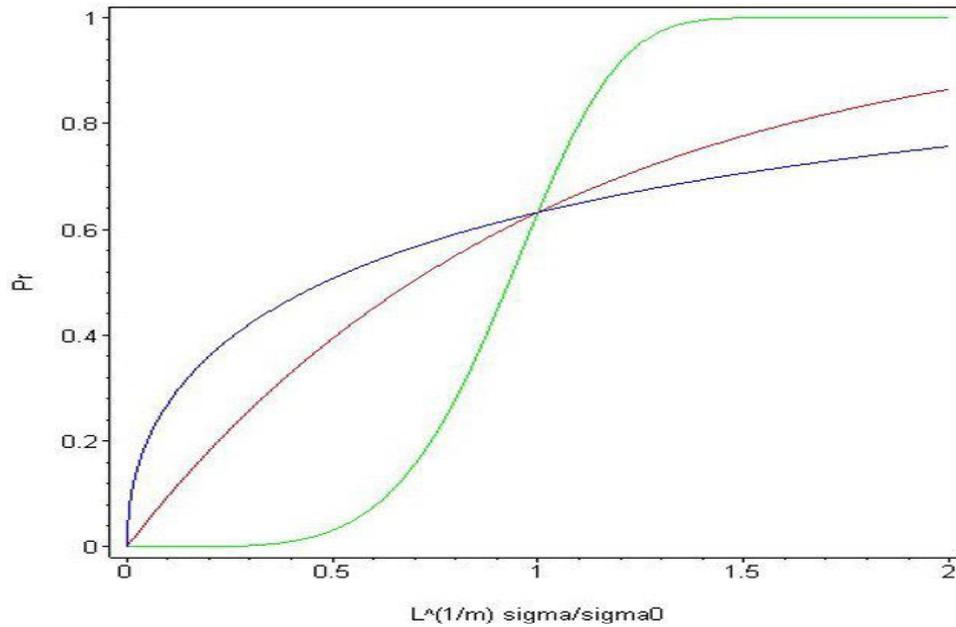
$$\Phi(\sigma) = 0 ; \sigma \leq \sigma_u \quad (\text{II.31})$$

Avec

σ_u : Contrainte seuil en dessous de laquelle il n'y a pas de rupture possible.

σ_0 : Facteur d'échelle.

m : paramètre rendant compte de la largeur de la distribution



Bleu : $m = 0.5$;

Rouge : $m = 1$;

Vert : $m = 1$.

Figure II.12. Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull [17]

Dans la plupart des cas pratiques, le seuil de rupture est très faible et l'on peut considérer que $\sigma_u \approx 0$. La probabilité de rupture d'une fibre subissant une contrainte σ est alors donnée par :

$$P_r(\sigma) = 1 - \exp \left[-L \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (\text{II.32})$$

La contrainte moyenne de rupture d'une population statistique de fibres peut s'écrire:

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^1 \sigma dP_r \quad (\text{II.33})$$

Cette intégrale correspond à l'aire hachurée sur la figure ci-dessous. On peut également l'exprimer sous la forme suivante :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty (1 - P_r) d\sigma \quad (\text{II.34})$$

Soit à partir de l'équation : (II.32) :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty \exp \left[-L \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] d\sigma \quad (\text{II.35})$$

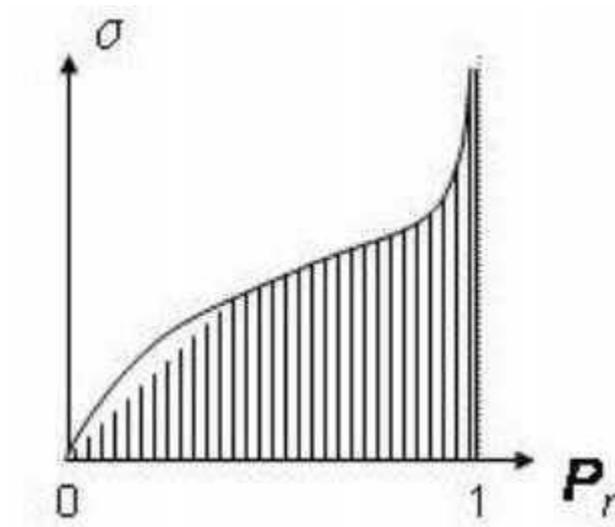


Figure II.13. Calcul de la contrainte moyenne de rupture [17]

On effectue les changements de variables suivantes :

$$t = L \left[\frac{\sigma}{\sigma_m} \right]^m$$

$$\sigma = \sigma_0 \left(\frac{t}{L} \right)^{(1/m)}$$

$$d\sigma = \frac{\sigma_0}{mL^{1/m}} t^{\frac{1-m}{m}} dt$$

L'équation (II.32) devient :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty e^{-t} t^{\frac{1-m}{m}} \frac{\sigma_0}{mL^{1/m}} dt \quad (\text{II.36})$$

Soit :

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_0}{L^{1/m}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (\text{II.37})$$

Où Γ est la fonction Gamma définie comme suit :

$$\Gamma = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (\text{II.38})$$

II.12. Algorithmes génétiques

L'algorithme génétique (AG) est un algorithme de recherche basé sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Il combine une stratégie de survie des plus forts avec un échange d'information aléatoire mais structuré. Pour un problème pour lequel une solution est inconnue, un ensemble de solutions possibles est créé aléatoirement.

On appelle cet ensemble; la population. Les caractéristiques (ou variables à déterminer) sont alors utilisées dans des séquences de gènes qui seront combinées avec d'autres gènes pour former des chromosomes et par après des individus. Chaque solution est associée à un individu, et cet individu est évalué et classifié selon sa ressemblance avec la meilleure, mais encore inconnue, solution au problème. Il peut être démontré qu'en utilisant un processus de sélection naturelle inspiré de Darwin, cette méthode convergera graduellement à une solution.

Comme dans les systèmes biologiques soumis à des contraintes, les meilleurs individus de la population sont ceux qui ont une meilleure chance de se reproduire et de transmettre une partie de leur héritage génétique à la prochaine génération. Une nouvelle population, ou génération, est alors créée en combinant les gènes des parents. On s'attend à ce que certains individus de la nouvelle génération possèdent les meilleures caractéristiques de leurs deux parents, et donc qu'ils seront meilleurs et seront une meilleure solution au problème. Le nouveau groupe (la nouvelle génération) est alors soumis aux mêmes critères de sélection, et par après génère ses propres rejetons. Ce processus est répété plusieurs fois, jusqu'à ce que tous les individus possèdent le même héritage génétique. Les membres de cette dernière génération, qui sont habituellement très différents de leurs ancêtres, possèdent de l'information génétique qui correspond à la meilleure solution au problème.

L'algorithme génétique de base comporte trois opérations simples qui ne sont pas plus compliquées que des opérations algébriques :

- Sélection
- Reproduction (croisement)
- Mutation

L'algorithme génétique fut développé par Holland. [18]

II.12.1 Codage d'individus

Avant de passer à l'explication des différents processus génétiques, il faut tout d'abord expliquer le codage des individus. La procédure normale pour coder un algorithme génétique ayant plusieurs paramètres est de coder chaque paramètre comme une séquence de bits.

Les séquences sont ensuite tronquées l'une après l'autre pour former une grande séquence, le chromosome, qui représente le vecteur des paramètres. Chaque séquence du vecteur total représente un gène, et la valeur de chaque gène est un allèle.

Exemple : Soit un vecteur x composé de trois paramètres x_1 , x_2 , et x_3 , codés à 4 bits.

$$x_1=0011$$

$$x_2=1010$$

$$x_3=0100$$

La séquence totale serait la suivante :

$$\bar{x} = \left(\overbrace{0011}^{x_1} \mid \overbrace{1010}^{x_2} \mid \overbrace{0100}^{x_3} \right)$$

Un chiffre codé en binaire dans ce cas ne représente pas une valeur spécifique mais plutôt un intervalle. Par exemple, si on code des valeurs de 0 à 1 à l'aide de 5 bits, le chiffre 11111 représente l'intervalle de $31/32$ à $32/32$, plutôt que la valeur de $31/32$ exactement.

II.12.2 Opérateurs génétiques

A- Sélection : processus où les individus sont copiés selon la valeur de leur fonction objective f . On peut décrire la fonction f comme une mesure de profit, utilité ou qualité que l'on veut maximiser (minimiser). Si on copie des individus selon leur valeur f , ceci implique que les individus ayant des valeurs plus élevées ont une plus grande probabilité de contribuer des rejetons à la prochaine génération. Ceci correspond à une version artificielle de la survie des plus forts (*survival of the fittest*) de Darwin. [18]

L'implantation de la sélection peut se faire de plusieurs façons. La plus facile est peut-être la roue de roulette biaisée, où la probabilité de reproduction d'un individu dépend de sa valeur par rapport au total des valeurs de la population.

B- Reproduction (croisement) : L'opération de croisement (crossover) est une opération de reproduction qui permet l'échange d'information entre les chromosomes (individus). Il utilise deux parents pour former un ou deux enfants. Les deux parents sont choisis par l'opération de sélection. Le croisement permet l'innovation (les enfants sont différents de leurs parents) et repose sur l'idée que deux parents performants produiront des enfants plus performants. Dans le cas d'une représentation binaire, le croisement de deux chromosomes peut se faire en un seul point de coupure (figure II.14) ou en deux points de coupure (figure II.15). Le taux de croisement détermine la proportion des individus qui sont croisés parmi ceux qui remplaceront l'ancienne génération

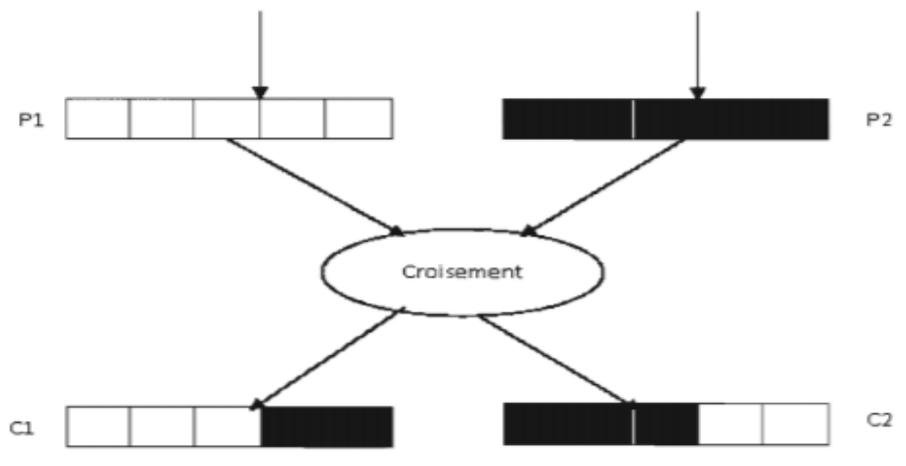


Figure II.14. Croisement à un point 4

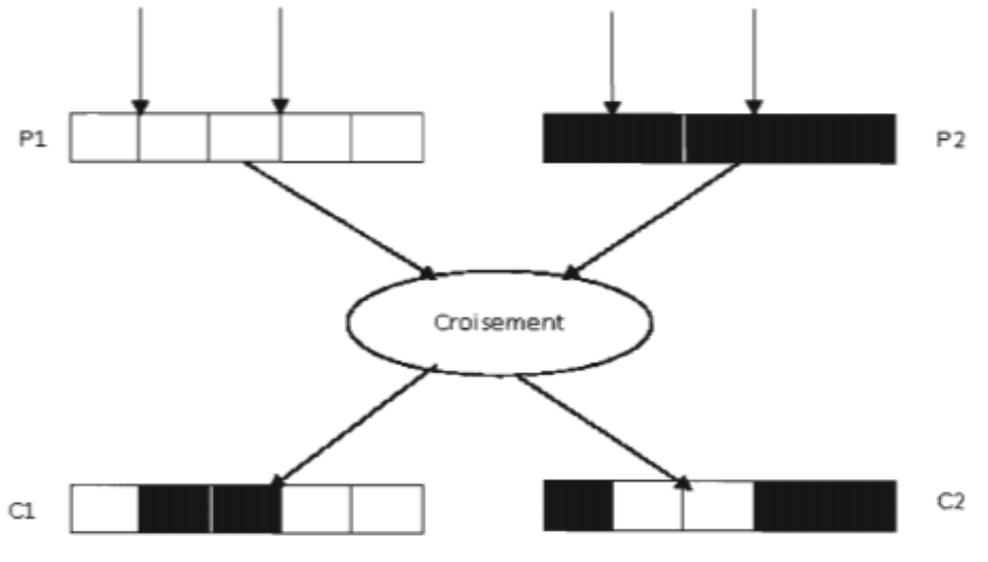


Figure II.15. Croisement à deux points 4. [19]

C- Mutation : processus aléatoire où un bit change de valeur. Ce processus joue un rôle secondaire dans l'algorithme génétique, mais il est quand même important. La mutation assure qu'aucun point dans l'espace de recherche n'a une probabilité é nulle d'être atteint.

Exemple : mutation du bit 2.

$$X_I = 00101 \quad X'_I = 01101$$

Une explication plus complète de ces phénomènes ainsi qu'une preuve théorique de leur performance sont disponibles dans le livre de Goldberg ; [20]

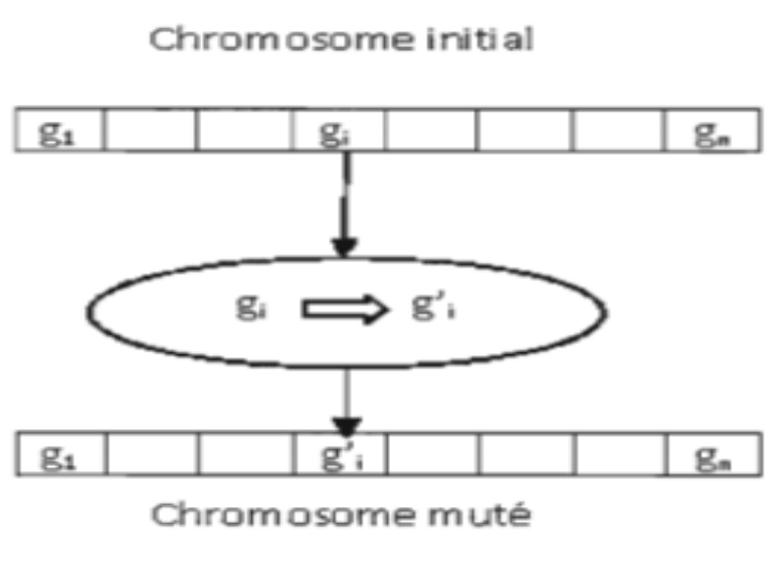


Figure II.16. Illustration du principe de la mutation. [21]

II.12.3 Caractéristiques des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques, en tant qu'approche de résolution de problèmes, se caractérisent par certains aspects particuliers: le codage des paramètres du problème à traiter, l'espace de recherche et la fonction d'évaluation qui permet de déterminer la pertinence d'une solution trouvée et l'évolution d'une génération à une autre par la sélection des chromosomes qui participent à la reproduction et les chromosomes à disparaître. [22]

II.12.3.1 Le codage

Le codage est une fonction qui permet de passer de la donnée réelle du problème traité à la donnée utilisée par l'algorithme génétique (figure II.17). Le choix du codage est l'élément le plus important dans la conception de l'algorithme puisqu'il permet d'une part de représenter les données, les paramètres et les solutions et d'autre part il influe sur la mise en œuvre des opérations génétique telles que le croisement et la mutation qui influent directement sur le bon déroulement de l'algorithme génétique et de leur convergence vers la bonne solution. Généralement on a trois types de codage les plus utilisés: Représentation binaire: Chaque gène dispose du même alphabet binaire 0, 1. Un gène est alors représenté par un entier, les chromosomes, qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de l'espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes.

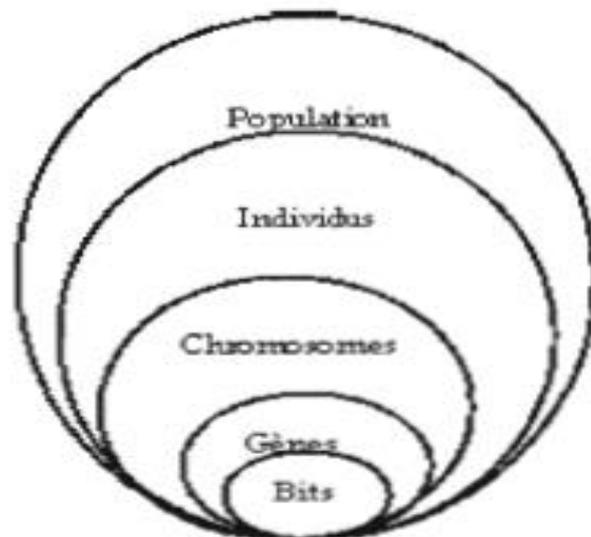


Figure II.17. Les cinq niveaux d'organisation d'une population d'un algorithme génétique [23].

Représentation avec réels: Contrairement au codage binaire, un gène est représenté par une suite de bits (un bit dans le code binaire) qui est associé à un réel. Ce type de codage peut être utile notamment dans le cas où l'on recherche le maximum d'une fonction réelle.

Exemple:

10010011	11101011	00011010
gene1	gene2	gene3
$x_1=3,256$	$x_2=0,658$	$x_3=10,26$

Représentation à l'aide d'arbres syntaxiques: Ce type de codage utilise une structure arborescente (une racine de laquelle peuvent être issus un ou plusieurs fils eux mêmes des arbres). Un arbre syntaxique est un arbre contenant deux types de nœuds. [24]

1. les nœuds internes ou « symboles non terminaux »
2. Les feuilles ou « symboles terminaux » Ce type de codage peut être utilisé lorsque la taille du problème ou de la solution n'est pas finie. Son inconvénient est qu'on peut trouver des arbres de solutions de taille importante difficile à analyser.

II.12. 3.2 La fonction d'évaluation

La fonction de performance qu'on appelle aussi fonction d'adaptation, fonction objectif ou fonction fitness - associe une valeur de performance à chaque individu ce qui offre la possibilité de le comparer à d'autres individus et permet à l'algorithme génétique de déterminer qu'un individu sera sélectionné pour être reproduit ou pour déterminer s'il sera remplacé. [25]

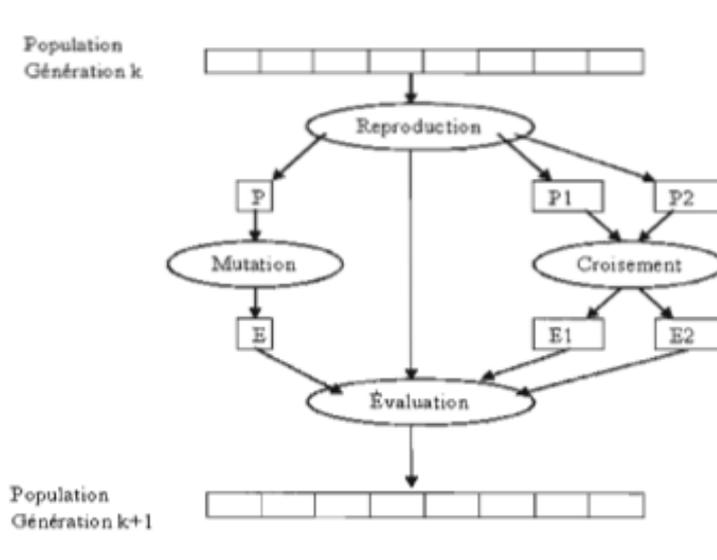


Figure II.18. Principe général de l'évolution d'une population d'un algorithme génétique [26]

II.12.4 Fondements des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques sont fondés sur :

- Une représentation chromosomique des solutions du problème.
- Une méthode pour générer une population initiale de solutions.
- Une méthode d'évaluation qui classe les solutions selon leurs aptitudes.
- Des opérateurs génétiques, qui définissent la manière dont les caractéristiques des parents sont transmises aux descendants. [27]

Il est donc clair qu'un AG manipule un ensemble d'individus à la fois, où chaque individu est caractérisé par une empreinte génétique, c.-à-d., un ensemble de chromosomes.

L'évolution des AGs se fait par deux mécanismes : la sélection naturelle et la reproduction ; la sélection naturelle fait que seuls les individus les mieux adaptés survivent et se reproduisent ; quant à la reproduction sexuée, elle assure un brassage de l'ensemble des solutions. Ce phénomène (sélection/reproduction) réitéré plusieurs fois sur une population produit après plusieurs générations des individus très bien adaptés au milieu dans lequel ils vivent.

Références

- [1] Frédéric Laurin, N. Carrière, C. Huchette, J.-F. Maire. Proposition d'une approche hybride d'endommagement et de rupture pour la prévision de la tenue de structures composites. (1). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00598107> Poitiers, 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Juin (2011)
- [2] Houideg, A. Transfert de charge et frottement fibre /matrice d'un Matériau composite (T300/914). Université de science et de la technologie d'Oran Mémoire de Magister, (2012)
- [3] Anh Thang Vu. Endommagement de stratifiés aéronautiques à fibres de carbone et matrice polymères soumis à des chargements monotones ou cycliques à plusieurs températures. Expériences et modélisation. Sciences de l'ingénieur [physics]. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, (2010)
- [4] Talreja, R. Fatigue of composite materials: Damage mechanisms and fatigue life diagrams. Proc Roy Soc Lond, Ser A: Math Phy Sci, vol. 378, no. 1775, p. 461-475. (1981)
- [5] Revest, N. Comportement en fatigue de pièces épaisses en matériaux composites, Thèse de doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris, Paris. (2011)
- [6] Sandhu R.S. Non linear of unidirectionel angle-ply laminates. Journal Aircraft, vol.13, pp 104-111, (1975)
- [7] Duy Cuong Nguyenf. Caractérisation de l'interface fibre/matrice. Application aux composites polypropylène/chanvre. Thèse, le 11 mai (2016)
- [8] M. Ragoubi, Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, (2010)
- [9] Berthelot, J. M. Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures. Paris, Masson, 615 p, (1992)
- [10] B.Kacimi. Comportement aux chocs des composites a renfort verre et matrice organique. Mémoire de magister, UMMTO, (2010)
- [11] Ahlstrom, C. Interface fibre de verre/matrice poly époxyde. Introduction d'une interphase à propriétés contrôlées, Thèse de doctorat, 296p. (1991)
- [12] Kaouche N: Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites, Thèse en vue d'obtention du diplôme de Magister, 28 (2016)
- [13] L, Gornet. Généralités sur les matériaux composites. cel-00470296, version 1 - 6 Apr (2010)
- [14] Tadjedit S. Optimisation par un algorithme génétique de l'endommagement de l'interface fibre/ matrice d'un nano composite graphite/époxy. (2014).
- [15] Pascal Reynaud ET Jean-François Gérard. Interfaces dans les composites à fibres longues, Edition HERMES, Paris (1997)
- [16] Cox H.L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials, British journal of applied physics.12,72-79. (1952)
- [17] Weibull. W, «A statistical distribution function of wide applicability », Journal of Applied Mechanics, 18, 293-296, (1951)
- [18] Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press :Ann Arbor, (1975)
- [19] Jean-Marc Alliot and Nicolas Durand. Algorithmes génétiques. Technical report, Laboratoire d'Optimisation Globale de ENAC, <http://www.recherche.enac.fr/opti/GA/FAG/ag.pdf>, Mars (2005)
- [20] Goldberg, D.E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley : Reading, MA, (1989)

- [21] Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning. Addison-Wesley : Reading, MA, (1989)
- [22] Gisèle Legault. Un algorithme génétique pour la conception topologique de réseaux téléinformatiques à commutation de paquets. Mémoire de maîtrise en mathématique, Université du Québec à Montréal, Décembre (2004)
- [23] Souquet Amédée. Algorithmes génétiques. Master's thesis, University of Nice, (2004)
- [24] Philippe Laublet et Chantal Reynaud Jean Charlet. Le Web sémantique. Cépaduès-Éditions, Avril (2005)
- [25] Eric Taillard Patrick Siarry Johann Dréo, Alain Petrowski. Métaheuristiques pour l'optimisation difficile. Eyrolles, Juillet (2003)
- [26] Jean-Marc Alliot and Nicolas Durand. Algorithmes génétiques. Technical report, Laboratoire d'Optimisation Globale de ENAC, <http://www.recherche.enac.fr/opti/GA/FAG/ag.pdf>, Mars (2005)
- [27] Abdulghafour.M, Fella .A, « A hybrid approach of genetic algorithms and fuzzy logic applied to feature extraction from multisensory images », international Conference on systems, man, and cybernetics, vol. 1, p 199-204, (1997)



Chapitre III

Résultats et Discussion

III.1 Introduction

Ce travail porte sur l'étude de l'effet des fibres naturelles et synthétiques sur l'endommagement en cisaillement de l'interface des biocomposites (carbone/Acide Poly (lactique)-PLA et chanvre /Acide Poly (lactique)). A cet effet, nous avons choisi une modélisation génétique basée sur le formalisme de Weibull [1], afin de calculer les différentes valeurs de l'endommagement de l'interface entre la matrice (PLA) et les deux fibres (carbone et chanvre), en utilisant les opérateurs génétique sélection, croisement et mutation.

III.2 Les caractéristiques des matériaux étudiés

III.2.1 Les renforts

Les fibres synthétiques produites industriellement entrent maintenant en concurrence avec des fibres issues de matériaux naturels (fibre de lin, de chanvre,..) qui ont une faible impact environnemental. Cependant, les performances des fibres naturelles ne sont pas suffisantes pour concurrencer les composites renforcés par des fibres synthétiques particulièrement la fibre de verre et/ou de carbone. Avec le développement des matériaux de haute technicité, en particulier pour l'allègement des structures tout en conservant une très grande résistance mécanique, la production de fibres de carbone s'est rapidement développée. La demande mondiale des fibres de carbone a augmenté d'une manière considérable de 18 000 tonnes en 2001 jusqu'à 40 000 tonnes en 2010 [2] et est estimée en 2020 à 140 000 tonnes [3]. Cependant, ces fibres restent réservées aux composites nécessitant une grande résistance mécanique du fait de leur coût de production élevé.

III.2.1.1 La fibre de carbone

Les fibres de carbone ont été développées à partir des années 1960 en utilisant le polyacrylonitrile (PAN) comme précurseur [4,5] (voir la figure III.1).

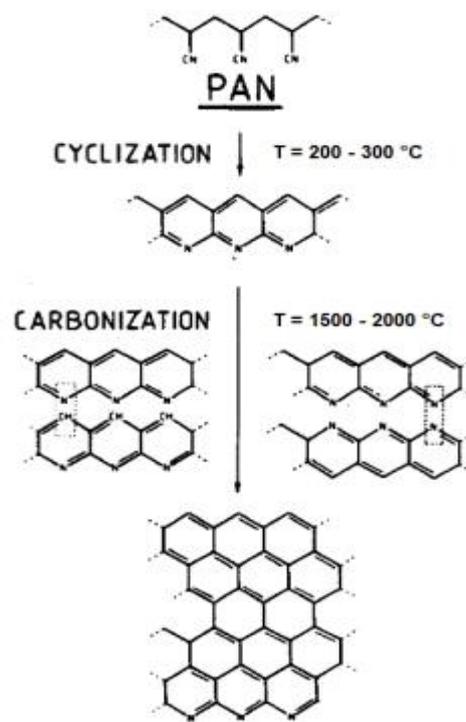


Figure III.1. Elaboration des fibres de carbone par pyrolyse du PAN [5,6]

Crawford et al [7] ont mis en évidence la structure graphitique tridimensionnelle des fibres de carbone à base PAN. Johnson et al [8] ont montré que ces mêmes fibres contenaient des hétérogénéités, avec des zones graphitiques et non graphitiques. Des variations dans les structures fibreuses ont été décrites en termes d'homogénéité de la fibre [8-9], avec certaines fibres contenant une structure noyau-gaine et d'autres apparemment homogènes, en plus des variations d'orientation des cristallites individuels [10]. Industriellement, les fibres de carbone obtenues par le précurseur PAN sont technologiquement plus faciles à produire car les filaments de PAN donnent directement les fibres de carbone. Ce procédé continu est aussi très stable ce qui permet d'obtenir une qualité de fibre stable au cours de la production. De ce fait, les fibres sont principalement produites par ce procédé. Les fibres issues du précurseur brai de mésophase sont réservées exclusivement à la production de fibres de hauts modules d'élasticité mais ayant une résistance à la traction limitée (voir la figure III.2). [11].

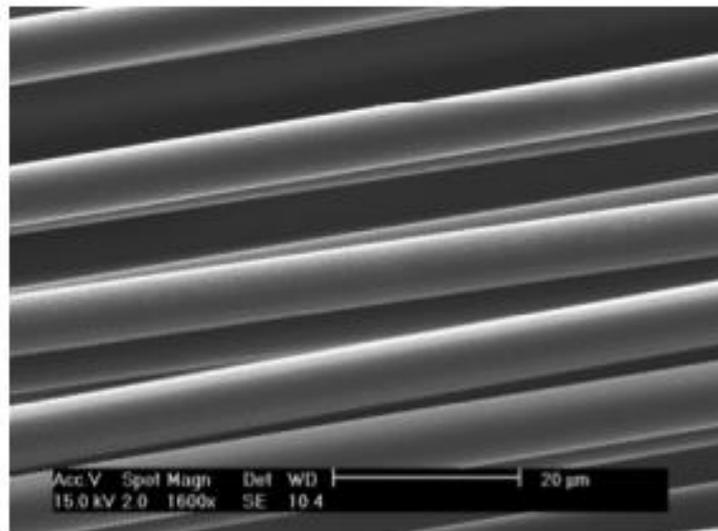


Figure III.2. Image MEBE de fibres de carbone à partir de PAN [11,12].

Le tableau III.1 résume les principales propriétés de la fibre de carbone [12].

Propriétés	Diamètre	Densité	Résistance à la traction	Module de Young
Valeurs	5-7 (µm)	1.8 (g/cm ³)	2410-5790 (MPa)	230-825 (GPa)

Tableau III.1 Principales propriétés de la fibre de carbone [12].

III.2.1.2 La fibre de chanvre

Le chanvre comme matière première industrielle semble être un bon candidat au remplacement de certaines matières pétrosourcées [13]. En effet, sa culture est peu exigeante et la totalité de ses parties aériennes peut être valorisée. Porté par une très importante industrie automobile, le secteur des matériaux composites est maintenant en plein essor et a des besoins de plus en plus importants en fibres végétales utilisées comme renforts. L'industrie textile, après avoir boudé les fibres végétales au profit des fibres synthétiques (nylon, polyester...), se tourne également de nouveau vers le chanvre [13].

Le chanvre est une plante annuelle, angiosperme dicotylédone de l'ordre des Rosales et qui appartient à la famille des Cannabacées. Le genre Cannabis est

l'unique genre de cette famille. Il est associé à une unique espèce (*Cannabis sativa* L) regroupant trois sous-espèces [13, 14] :

- *Cannabis ruderalis*, forme dite sauvage
- *Cannabis indica* L., aussi appelé « chanvre indien », caractérisé par son taux élevé en tétrahydrocannabinol (THC), composé psychotrope
- *Cannabis sativa*, correspondant au chanvre industriel.

La figure III.3 présente une coupe transversale d'une tige de chanvre, permettant l'observation de la disposition de la chènevotte et des fibres au sein de la tige [15].

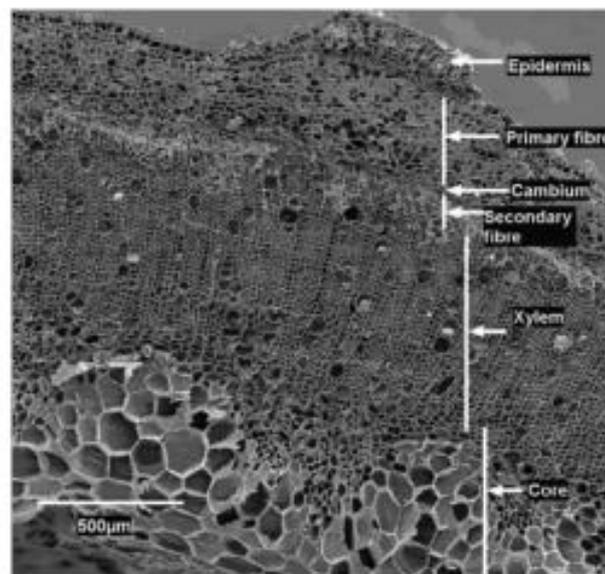


Figure III.3. Coupe transversale d'une tige de chanvre vue au Microscope Electronique à Balayage (MEB) [13,15].

Afin de pouvoir valoriser les fibres de chanvre indépendamment des autres parties de la plante, il faut commencer par l'isoler. Cela se fait par un procédé en deux étapes : le rouissage, puis la séparation mécanique de la paille [13]. Le rouissage a donc pour but de dégrader partiellement les pectines, mais aussi les hémicelluloses ainsi que les liaisons inter polymères qui composent la matière lignocellulosique. Ce phénomène est causé par l'activité de micro-organismes, ou parfois des enzymes isolées, sous conditions contrôlées [16]. Les images présentées en figure III.4 montrent l'effet du rouissage sur la séparation des faisceaux de fibres [17].

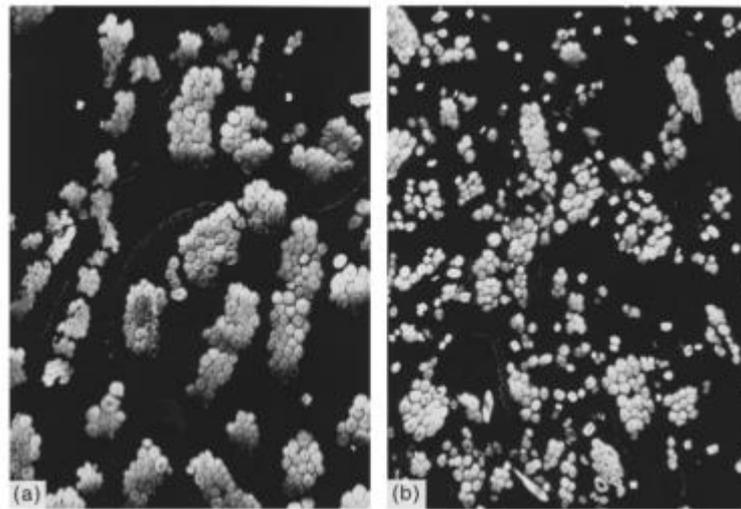


Figure III.4 Coupe transversale de fibres de lin (a) non rouies ; (b) rouies [17].

A l'issue du rouissage, on récolte le chanvre sous forme de paille. Il est alors temps de séparer les fibres de la chènevotte. Généralement, cela se fait selon des procédés mécaniques. Cette chaîne de défibrage est le plus souvent constituée de plusieurs étapes [13] :

1-La balle de paille est tout d'abord amenée sur un tapis devant une « guillotine ». Il s'agit d'une lame horizontale, actionnée par pression hydraulique, qui sectionne la paille en brins de 30 à 50 cm de long.

2-La paille tombe ensuite sur un tapis incliné qui l'amène dans une chargeuse.

Celle-ci permet d'éliminer, par gravité, les cailloux et autres objets indésirables, mais aussi d'étaler la paille en un lit homogène et régulier. Un dispositif d'aspiration permet d'éliminer au fur et à mesure les poussières. Généralement, un détecteur de métaux est placé en sortie de la chargeuse.

Les propriétés mécaniques des fibres découlant directement de leurs caractéristiques biochimiques, nous obtiendrons également des variations importantes d'une espèce à l'autre, d'un individu à l'autre, et même d'une fibre à l'autre au sein d'une même plante. Outre cette variabilité naturelle des fibres de chanvre, on retrouve une forte variabilité liée à la diversité des méthodes d'analyse employées. Celles-ci ne sont pas toujours précisément détaillées et il est difficile

de reproduire les conditions de caractérisations de certains travaux [13]. Le tableau III.2 présente les différentes valeurs des propriétés mécaniques de la fibre de chanvre données dans la littérature

Propriétés mécaniques	Références
Module d'Young (GPa): 17,2-70	[14, 18-23]
Résistance à la traction (MPa) (%) 231-1110	[18-28]
Allongement à la rupture (%) 1,3-4,7	[28]
Diamètre (um) 10-50	[29]
Longueur (mm) 10-40	[29]

Tableau III.2 les différentes valeurs des propriétés mécaniques de la fibre de chanvre données dans la littérature.

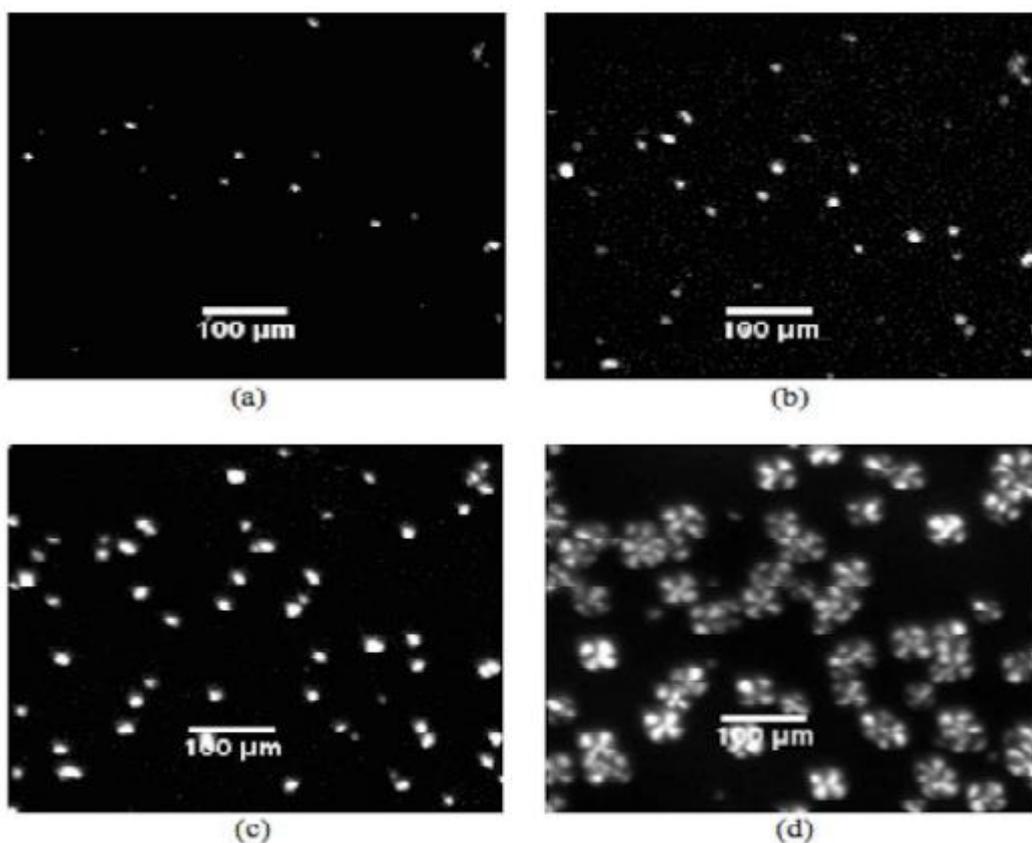
2.2 La matrice Acide Poly (lactique)-PLA

Le PLA est synthétisé par la polymérisation de l'acide lactique, qui a été découvert pour la première fois en 1780 par le chimiste suédois Scheele en examinant le lait caillé puis commercialisé pour la première fois en 1881[30,31]. L'acide lactique est naturellement présent dans de nombreux aliments et peut être produit par la fermentation de diverses ressources renouvelables telles que le maïs, la pomme de terre, le sucre de betterave, et la canne à sucre [30,31]. Auparavant, l'acide lactique était principalement utilisé dans les applications liées à l'alimentation, qui représentait 85% du marché en Amérique [30,32]. Par la suite, des progrès ont été réalisés dans la fermentation, la purification primaire et essentiellement dans la synthèse de polymère [30,31]. Ainsi, les premiers travaux réalisés sur la synthèse d'oligomères de PLA, par Pelouze, datent de 1845. Les premières macromolécules de PLA ont en revanche été obtenues vers 1932 (Carothers, 1932). En 1954, Dupont a breveté un PLA à poids moléculaire élevé et depuis de nombreuses compagnies

commercialisent le PLA. Aujourd'hui, Nature Works LLC est le leader en production et développement de l'acide lactique [31].

Le PLA a reçu beaucoup d'attention grâce à ses ressources renouvelables, sa biocompatibilité, sa biodégradation, de bonne performance mécanique, et la transparence du matériau final [30,33-34]. Aussi, un large spectre de propriétés d'écoulement est disponible par simple modification architecturale du PLA, permettant ainsi l'utilisation de ce bio-polymère dans beaucoup de procédé de transformation [30,32,34]. Le PLA est alors largement répandu dans le domaine du biomédicale, de l'emballage et du textile [30,32,34]. Ainsi, l'acide poly (lactique) est prévu pour concurrencer les polymères pétrochimiques tel que le PET, PP et le PS. Malheureusement, le coût élevé, le manque de stabilité thermique et hydrolytique ainsi que la faible résilience limitent l'utilisation de ce bio-polymère. Ces défauts sont pour la plupart surmontés par mélangeage du PLA avec d'autres polymères, des charges, ainsi que la modification chimique du polymère [30,34].

La figure III.5 présente des micrographies au microscope optique polarisées de la cristallisation isotherme du film mince PLA120 obtenu à 150 ° C prises à différents moments: (a) 12 min; (b) 15 min; (c) 23 min; (d) 60 min; (e) 105 min ; (f) 140 min



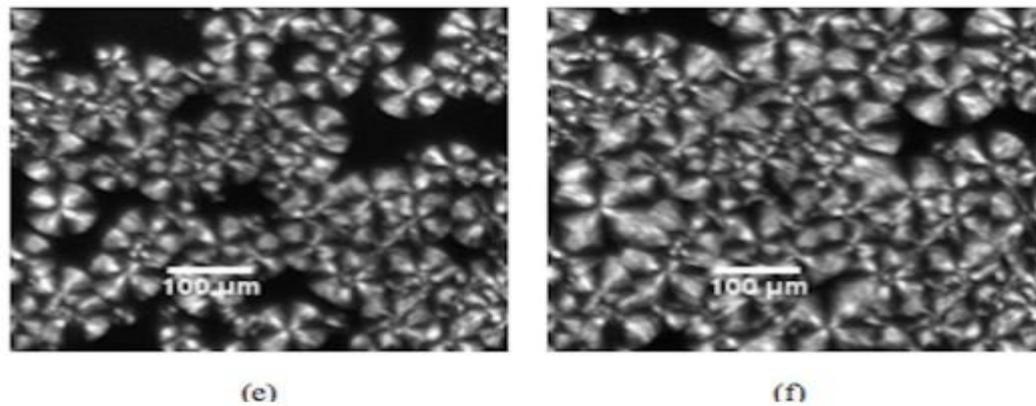


Figure III.5 Micrographies au microscope optique polarisées de la cristallisation isotherme du film mince PLA120 obtenu à 150 ° C prises à différents moments: (a) 12 min; (b) 15 min; (c) 23 min; (d) 60 min; (e) 105 min ; (f) 140 min [30].

Nous présentons dans le tableau III.3, les différentes propriétés physiques de la PLA [30].

Propriétés	Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction σ (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Valeurs	1988	71	6

Tableau III.3 les différentes propriétés physiques de la PLA [30].

III.3 Modélisation et simulation numérique

III.3.1 Formalisme de Weibull

Lorsque la contrainte est uniforme, l'endommagement de la matrice, est donné par la formule (1) de Weibull [1] :

$$D_m = 1 - \exp \left\{ - \frac{V_{eff}}{V_0} \left[\frac{\sigma_f}{\sigma_0} \right]^m \right\} \quad (III.1)$$

Avec :

- (σ) : la contrainte appliquée
- (σ_m^r) : la contrainte thermique

- (V_m) : le fraction volumique de la matrice
- $(m_m \text{ et } \sigma_{0m})$: les paramètres de Weibull

Une fibre rompue est déchargée sur toute sa longueur. C'est-à-dire qu'elle ne peut se rompre qu'une fois. La rupture obéit à une loi similaire à celle décrite pour la matrice.

$$D_f = 1 - \exp \left\{ -A_f * L_{equi} * \left[\frac{\sigma_{\max}^f}{\sigma_{0f}} \right]^{m_f} \right\} \quad (\text{III.2})$$

Avec :

- (σ_{\max}^f) : la contrainte maximale appliquée
- (L_{equi}) : est la longueur qu'auraient les fibres pour la même rupture sous répartie de manière uniforme.

III.3.2 Modèle de cisaillement de l'interface de Cox

Pour l'interface leur endommagement se basant sur le modèle de Cox [35] qu'est défini par la relation suivante :

$$\tau = \frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta t h(\beta l/2) \quad (\text{III.3})$$

$$\beta^2 = \frac{2G_m}{E_f r_f^2 \ln\left(\frac{R}{r_f}\right)}$$

Avec :

- (G_m) : module de cisaillement de la matrice ;
- (E_f) : module de Young de la fibre ;
- (ε) : la déformation ;
- (a) : rayon de la fibre ;
- (R) : la demi distance ;

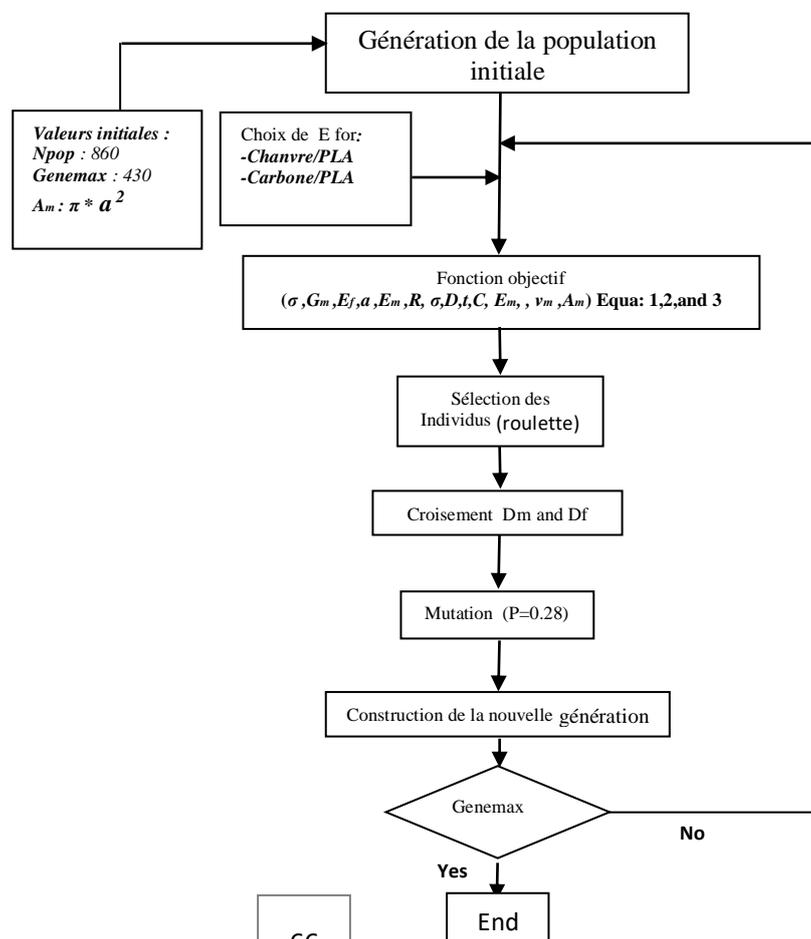
- (τ) : la contrainte de cisaillement de l'interface;

III.4 Résultats et discussion

III.4.1 Modélisation génétique.

L'endommagement en cisaillement de l'interface fibre-matrice, des deux matériaux biocomposite étudiés carbone-PLA et chanvre-PLA, a été calculé à base de l'opérateur génétique croisement des deux endommagements de la fibre et de la matrice donnés par l'équation (1) et équation (2). La fonction objectif déterminée à chaque itération par le modèle analytique de Cox, nous a permis d'introduire les différentes valeurs des matériaux (Tableau III.1, III.2 et III.3), qui comprennent toutes les variables définies au début de l'algorithme (propriétés mécaniques de chaque constituant (fibres et matrice, module de Young, longueur, diamètre,...). Enfin, nous déterminons l'endommagement de l'interface en fonction de la longueur de chaque fibre pour les deux matériaux étudiés sous l'effet des différentes valeurs de la contrainte mécanique ($\sigma = 900N/m^2, 1000N/m^2, 1100N/m^2$ et $1200N/m^2$). Les calculs numériques sont effectués à l'aide du logiciel Matlab R2014a. L'organigramme de notre programme est présenté ci-après).

Organigramme



III.4.2 Résultats et discussion

Nous avons examiné la résistance des matériaux étudiés sous l'effet de différentes contraintes mécaniques ($\sigma=900 \text{ N/m}^2$), ($\sigma=1000 \text{ N/m}^2$), ($\sigma=1100 \text{ N/m}^2$) et ($\sigma=1200 \text{ N/m}^2$) ce qui nous a permis de calculer l'endommagement de l'interface fibre matrice des biocomposites en fonction de la longueur de chaque fibre.

Les figures III.6, III.7, III.8, III.9 et III.10, III.11, III.12, III.13 montrent le niveau de l'endommagement à l'interface des carbone/PLA et Chanvre /PLA respectivement en fonction de la longueur de fibre.

III.4.2.1 Carbone/PLA

Les figures III.6, III.7, III.8 et III.9 montrent que l'endommagement "D" de l'interface du biocomposite carbone/PLA commence au niveau de 0.33 ($\sigma=900 \text{ N/m}^2$), puis augmente jusqu'à une valeur maximale de 0.55 quand ($\sigma=1200 \text{ N/m}^2$). on remarque la présence d'une symétrie de l'endommagement faible au milieu et très fort aux extrémités de la fibre. On peut dire que l'augmentation de niveau de l'endommagement signifie la concentration des contraintes mécaniques qui montrent une forte dégradation de l'interface.

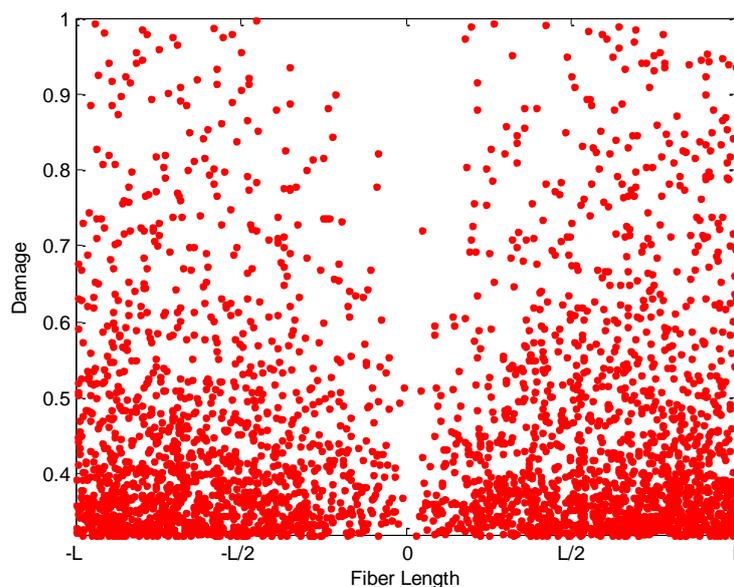


Figure III.6 : l'endommagement de l'interface pour $\sigma=900 \text{ N/m}^2$

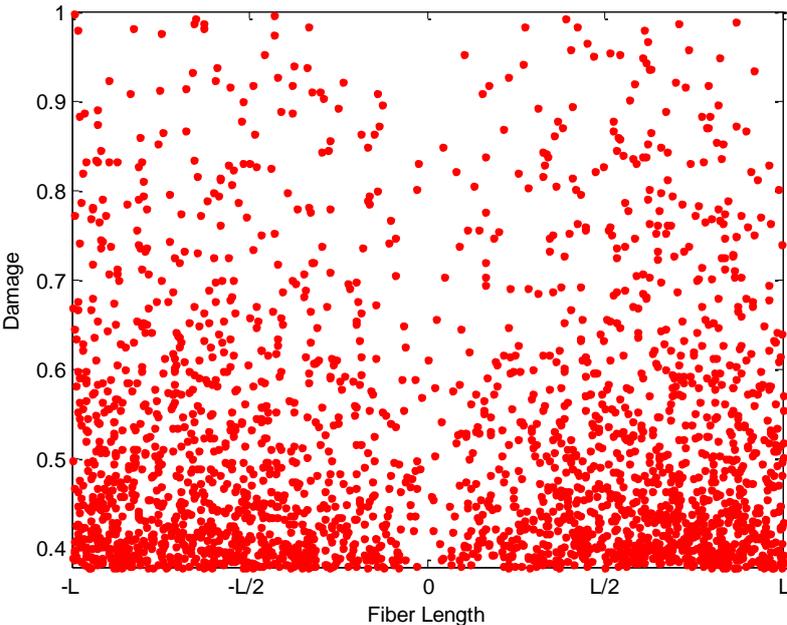


Figure III.7 : l'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1000 \text{ N/m}^2$

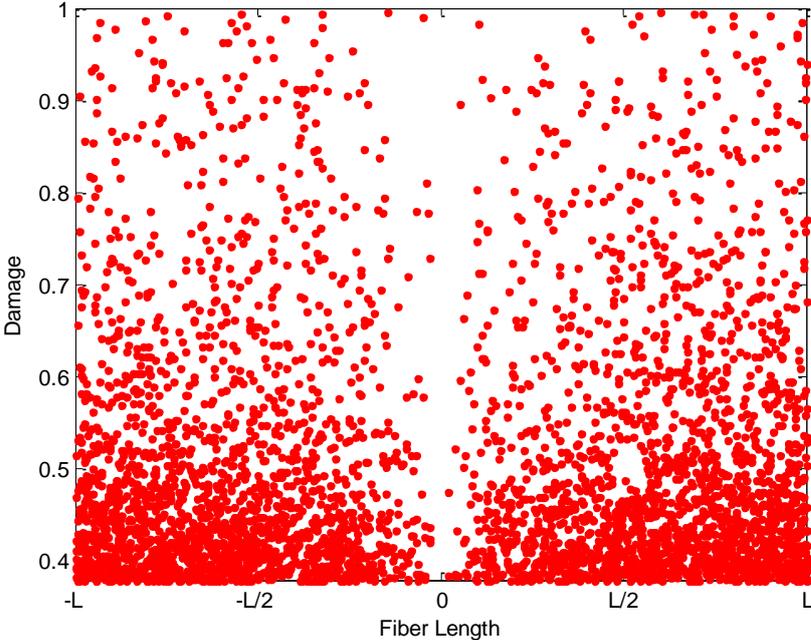


Figure III.8 : l'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1100 \text{ N/m}^2$

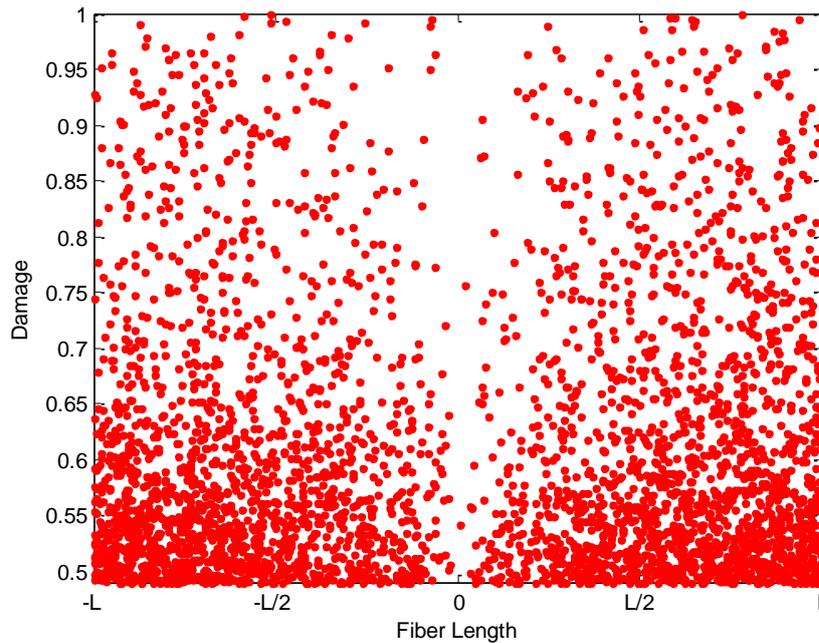


Figure III.9 : l'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1200 \text{N/m}^2$

III.4.2.2 Chanvre/PLA

Les figures III.10, III.11, III.12 et III.13 montrent que l'endommagement "D" de l'interface commence au niveau de 0.11. ($\sigma = 900 \text{N/m}^2$), puis augmente jusqu'à une valeur maximale de 0.41 quand ($\sigma = 1200 \text{N/m}^2$). On remarque la présence d'une symétrie de l'endommagement faible au milieu et très fort aux extrémités de la fibre. On peut dire que l'augmentation de niveau de l'endommagement signifie la concentration des contraintes mécaniques qui montrent une dégradation de l'interface moins sévère par rapport au matériau biocomposite Carbone/PLA.

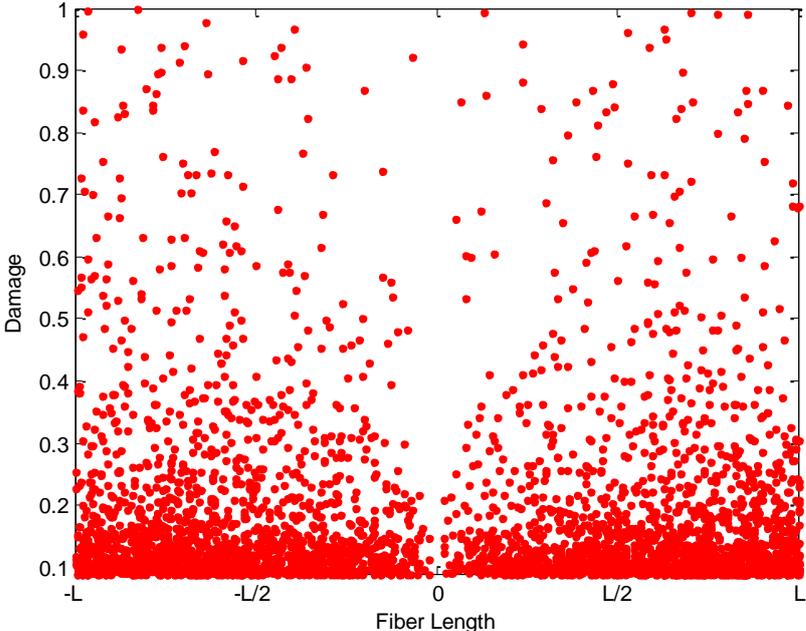


Figure III.10 : l'endommagement de l'interface pour $\sigma = 900\text{N/m}^2$

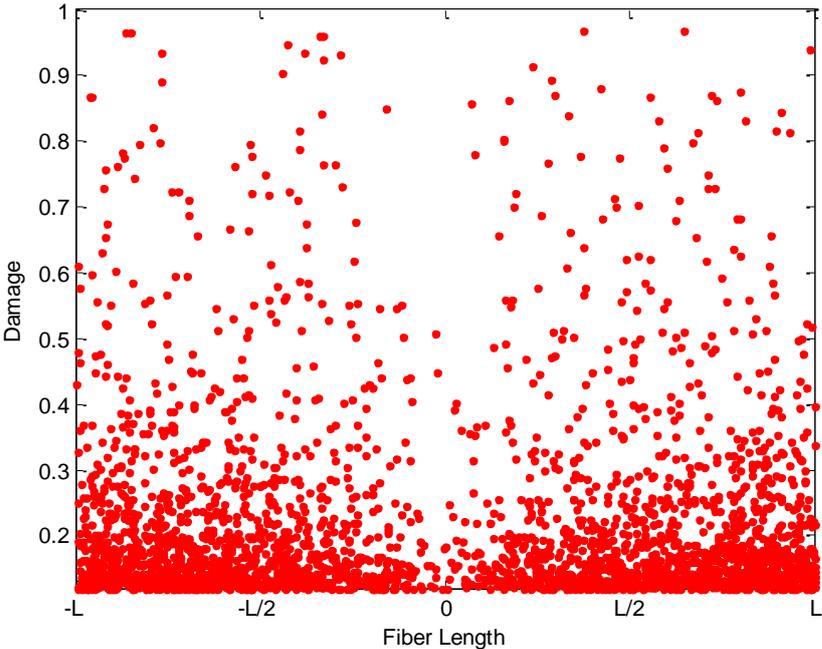


Figure III.11 : l'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1000\text{N/m}^2$

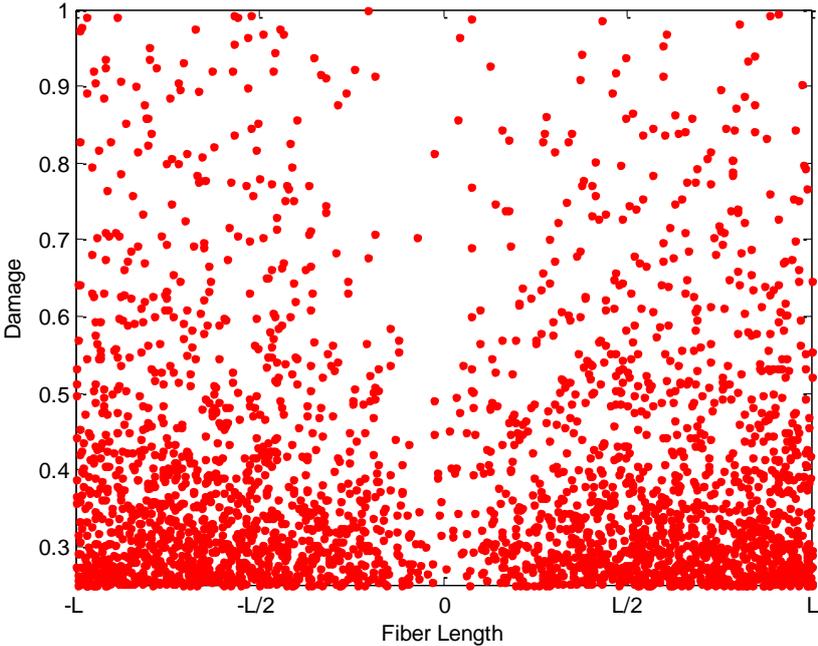


Figure III.12 : l'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1100\text{N/m}^2$

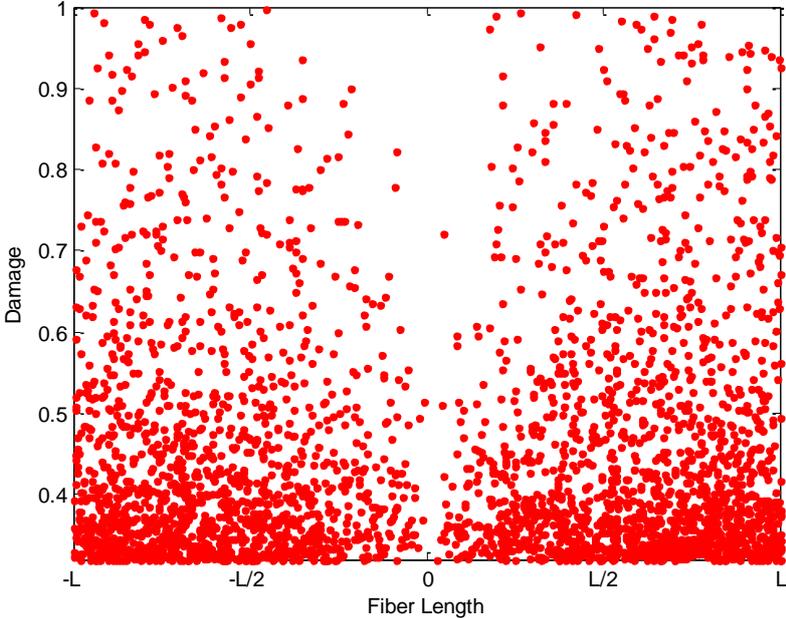


Figure III.13 : l'endommagement de l'interface pour $\sigma = 1200\text{N/m}^2$

III.5 Conclusion

Les différentes contraintes mécaniques appliquée sur les deux matériaux étudiés ont engendré une dégradation importante de l'interface pour le biocomposite carbone/PLA, et une faible abaissement pour le biocomposite Chanvre/PLA, et montrent, aussi, une bonne concordance entre la simulation numérique et le comportement réel des deux matériaux. La simulation numérique fait ressortir que le biocomposite Chanvre/PLA a une résistance supérieure aux contraintes mécaniques comparant au matériau carbone/PLA. Les résultats trouvés ont montré que notre matériau biocomposite Chanvre/PLA est résistant, notamment, ce matériau est d'origine végétale et qui présente plus d'avantage environnementale.

Les résultats obtenus dans notre étude coïncident parfaitement avec les résultats trouvés par Pinto et al. [36] et Sarasini et al. [37] qui ont montré que les fibres de chanvre sont des bons renforts pour les matériaux composite et qu'ils ont un effets positif pour ces matériaux, et ceci à cause de la compatibilité de l'interface fibre / matrice. L'analyse du cycle de vie, réalisée par La Rosa et al. [38], ont montré que les fibres de chanvre en composites thermodurcissables renforcés de fibres de verre sont plus respectueuses de l'environnement que l'utilisation unique conventionnelle de fibre de verre, en raison de la réduction de la teneur en fibre de verre et en résine

Références

- [1] W. Weibull. Royal Swedish Academy of Eng. Sci. Proc. 151, 1-45 (1939)
- [2] Michel Brisson. Principaux procédés de transformation. Technical report, Soficar, 8, 9, (2006)
- [3] Roberts Tony. The carbon Fibre Industry Worldwide 2011-2020 : An evaluation of current market and future supply and demand, xv, 8, 10, (2011)
- [4] Delhaes, P.; Olry, P. L'Act. Chim. 295, 42, (2006)
- [5] Mike Coulson. Conductivité, diffusivité, émissivité thermiques de composites Poly (EtherKetoneKetone) / Charges Carbonées :Fibres continues et particules. Thèse de doctorat, université de Toulouse, Paul Sabatier, décembre 2018
- [6] Fitzer, E. Carbon N. Y. 27, 621, (1989)
- [7] Crawford, D.; Johnson, D. J. J. Microsc. 21, 51, (1971)
- [8] Johnson, D. J.; Crawford, D.; Jones, B. F. J. Mater. Sci. 8, 286, (1973)
- [9] Wicks, B. J.; Coyle, R. A. J. Mater. Sci. 11, 376, (1976)
- [10] Donnet, J. B.; Bansel, R. C. Carbon N. Y. 360, 5, (1984)
- [11] Elmar Witten and Bernhard Jahn. Composites Market Report. Technical Report September, Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe, 1, 12, (2013)
- [12] Chayma Chaabani. Composites à fibre sd ecarbon e :récupératio des fibres par solvolyse hydrothermale. Impact sur la qualité des fibres et valorisation de la phase liquide. université de Toulouse, Paul Sabatier, Aout, (2018)
- [13] Thibaud Sauvageon. Caractérisation et valorisation de fibre sd echanvre issues de sols et de matériels délaissés : cas du traitement par explosion à la vapeur. université de Lorraine, novembre, (2019)
- [14] Bouloc, P. Le chanvre industriel - Production et utilisations, Editions France Agricole. ed. (2006)
- [15] Mutjé, P., Lòpez, A., Vallejos, M.E., Lòpez, J.P., Vilaseca, F. Full exploitation of Cannabis sativa as reinforcement/filler of thermoplastic composite materials. Compos. Part Appl. Sci. Manuf. 38, 369–377, (2007)
doi:10.1016/j.compositesa.2006.03.009
- [16] Akin, D.E., Foulk, J.A., Dodd, R.B., McAlister, D.D. Enzyme-retting of flax and characterization of processed fibers. J. Biotechnol. 89, 193–203, (2001)
- [17] Kessler, R.W., Becker, U., Kohler, R., Goth, B. Steam explosion of flax - A superior technique for upgrading fibre value. Biomass Bioenergy 14, 237–249, (1998)
- [18] Beaugrand, J., Berzin, F. Lignocellulosic fiber reinforced composites: Influence of compounding conditions on defibrization and mechanical properties. J. Appl. Polym. Sci. 128, 1227–1238. (2013). doi:10.1002/app.38468
- [19] Garcia-Jaldon, C., Dupeyre, D., Vignon, M.R., 1998. Fibres from semi-retted hemp bundles by steam explosion treatment. Biomass Bioenergy 14, 251–260. (1998)
- [20] Ilczyszyn, F. Caractérisation expérimentale et numérique du comportement mécanique des agro-composites renforcés par des fibres de chanvre. Thèse. Troyes. (2013)
- [21] Ilczyszyn, F., Cherouat, A., Montay, G., 2012. Caractérisation des propriétés mécaniques de fibres de chanvre. Matér. Tech. 100, 451–457. (2012)
doi:10.1051/mattech/2012015

- [22] Pickering, K.L., Beckermann, G.W., Alam, S.N., Foreman, N.J. Optimising industrial hemp fibre for composites. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 38, 461–468. (2007)
doi:10.1016/j.compositesa.2006.02.020
- [23] Summerscales, J., Dissanayake, N.P.J., Virk, A.S., Hall, W. A review of bast fibres and their composites. Part 1 – Fibres as reinforcements. *Compos. Part Appl. Sci. Manuf.* 41, 1329–1335. (2010)
doi:10.1016/j.compositesa.2010.06.001
- [24] Amigó, V., Salvador, M.D., Sahuquillo, O., Llorens, R., Martí, F. Valorización de residuos de fibras vegetales como refuerzo de plásticos industriales. Presented at the I Simposio Iberoamericano de Ingeniería de Residuos, Castellon. (2008)
- [25] Dai, D., Fan, M. Characteristic and performance of elementary hemp fibre. *Mater. Sci. Appl.* 1, 336–342. (2010)
- [26] Ringuette, B. Matériaux composites à base de fibres de chanvre. Thèse. Université Laval. (2011)
- [27] Thygesen, A., Thomsen, A.B., Daniel, G., Lilholt, H.. Comparison of composites made from fungal defibrated hemp with composites of traditional hemp yarn. *Ind. Crops Prod.* 25, 147–159. (2007) doi:10.1016/j.indcrop.2006.08.002
- [28] Lewin, M. (Ed.). Handbook of fiber chemistry, 3rd ed. ed, International fiber science and technology series. CRC/Taylor & Francis, Boca Raton. ()2007
- [29] Masset, X. De la fibre végétale à la fibre textile. Thèse. Université Montpellier I. (2008)
- [30] Hikmet Houichi Mani. Etude de la mise en oeuvre de l'acide poly (lactique) par le procédé d'extrusion fil m :Relatio nstructure-procédé. Thèse de doctorat. Université de Lyon. Mars 2016
- [31] R. Datta, S-P. Tsai, P. Bonsignore, S-H. Moon, J-R. Frank, Technological and economic potential of poly(lactic acid) and lactic acid derivatives, *FEMS Microbiology Reviews*, 16, 221-231, (1995)
- [32] D. Garlotta, A Literature Review of Poly(Lactic Acid) , *Journal of Polymers and the Environment*, 9, 2, (2001)
- [33] K-M. Nampoothiri, N-R. Nair, R-P. John, An overview of the recent developments in polylactide (PLA) research, *Bioresource Technology*, 101, 8493-8501, (2010)
- [34] L.-T. Lim, Kevin Cink, Tim Vanyo, Poly(lactic acid): Synthesis, Structures, Properties, Processing, and Applications, Wiley, New Jersey, 69, (2010)
- [35] Cox H.L. *British journal of applied physics.* 12 72–79 (1952)
- [36] Fulvio Pinto, Luca Boccarusso, Dario De Fazio, Stefano Cuomo, Massimo Durante, Michele Meo. Carbon/hemp bio-hybrid composites: Effects of the stacking sequence on flexural, damping and impact properties. *Composite structures.* 242, 112148, (2020)
- [37] Fabrizio Sarasini, Jacopo Tirillò, Claudia Sergi, Maria Carolina Seghini, Luca Cozzarini, Nina Graupner. Effect of basalt fibre hybridisation and sizing removal on mechanical and thermal properties of hemp fibre reinforced HDPE composites. *Composite structures.* doi: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.01.046>. (2018)

[38] La Rosa, A.D. Cozzo, G. Latteri, A. Recca, A. Björklund, A. Parrinello, E. Cicala, G. Life Cycle Assessment of a Novel Hybrid Glass-Hemp/Thermoset Composite. *J. Clean. Prod.* 2013, 44, 69–76, (2013)
doi:10.1016/j.jclepro.2012.11.038.



***Conclusion
générale***

Conclusion générale

Les fibres synthétiques produites industriellement entrent maintenant en concurrence avec des fibres issues de matériaux naturels (fibre de lin, de chanvre,..) qui ont une faible impact environnemental. Cependant, les performances des fibres naturelles ne sont pas suffisantes pour concurrencer les composites renforcés par des fibres synthétiques particulièrement la fibre de verre et/ou de carbone. Les fibres naturelles en particulier les fibres végétales, lorsqu'elles sont utilisées comme renforts dans les matériaux composites ou biocomposites, améliorent les propriétés physiques et mécaniques de ses matériaux.

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet des fibres naturelles et synthétiques sur l'endommagement en cisaillement de l'interface des biocomposites carbone/Acide Poly (lactique)-PLA et chanvre /Acide Poly (lactique). A cet effet, nous avons choisi une modélisation génétique basée sur le formalisme de Weibull, afin de calculer les différentes valeurs de l'endommagement de l'interface entre la matrice (PLA) et les deux fibres (carbone et chanvre), en utilisant les opérateurs génétique sélection, croisement et mutation.

Les contraintes mécaniques appliquée sur les deux matériaux étudiés ont causé une dégradation importante de l'interface pour le biocomposite carbone/PLA, et une faible abaissement pour le biocomposite Chanvre/PLA. La simulation numérique montre aussi que le biocomposite Chanvre/PLA a une résistance supérieure aux contraintes mécaniques comparant au matériau carbone/PLA. Les résultats trouvés ont montré que notre matériau biocomposite Chanvre/PLA est résistant, notamment, que ce matériau est d'origine végétale et qui présente plus d'avantage environnementale.

Les résultats obtenus dans notre étude coïncident parfaitement avec les résultats trouvés par Pinto et al. et Sarasini et al. qui ont montré que les fibres de chanvre sont des bons renforts pour les matériaux composite et qu'ils ont un effets positif pour ces matériaux, et ceci à cause de la compatibilité de l'interface fibre / matrice.

ملخص

في هذا العمل ، درسنا ، من خلال النمذجة الجينية ، مقاومة المواد المركبة الحيوية على أساس مصفوفة PLA والكربون والقنب مع نفس الكسر الحجمي الذي يساوي 25٪ لكل ألياف مختارة. تُظهر المحاكاة العددية أن المركب الحيوي Hemp / PLA يتمتع بمقاومة فائقة للضغوط الميكانيكية مقارنةً بمواد الكربون PLA أظهرت النتائج التي تم العثور عليها أن مادة المركب الحيوي Hemp / PLA لدينا مقاومة ، على وجه الخصوص ، أن هذه المادة من أصل نباتي ولها فوائد بيئية أكثر. تتوافق النتائج التي تم الحصول عليها في دراستنا تمامًا مع النتائج التي توصل إليها Pinto et al. و Sarasini et al. الذين أظهروا أن ألياف القنب هي تعزيزات جيدة للمواد المركبة وأن لها تأثير إيجابي على هذه المواد ، وذلك بسبب توافق واجهة الألياف / المصفوفة

الكلمات المفتاحية: الكربون ، القنب ، الضرر ، الخوارزمية الجينية.

Résumé

Dans ce travail, nous avons étudié, par modélisation génétique, la résistance des matériaux biocomposites à base de la matrice PLA et des renforts carbone et chanvre avec la même fraction volumique égale à 25% pour chaque fibre choisie. La simulation numérique montre que le biocomposite Chanvre/PLA a une résistance supérieure aux contraintes mécaniques comparant au matériau carbone/PLA. Les résultats trouvés ont montré que notre matériau biocomposite Chanvre/PLA est résistant, notamment, que ce matériau est d'origine végétale et qui présente plus d'avantage environnementale. Les résultats obtenus dans notre étude coïncident parfaitement avec les résultats trouvés par Pinto et al. et Sarasini et al. qui ont montré que les fibres de chanvre sont des bons renforts pour les matériaux composite et qu'ils ont un effets positif pour ces matériaux, et ceci à cause de la compatibilité de l'interface fibre / matrice.

Mots clés: carbone, chanvre, PLA, Weibull, endommagement, algorithme génétique.

Abstract

In this work, we have studied, by genetic modeling, the resistance of biocomposite materials based on the PLA matrix and carbon and hemp reinforcements with the same volume fraction equal to 25% for each chosen fiber. Numerical simulation shows that the Hemp / PLA biocomposite has a superior resistance to mechanical stresses compared to carbon / PLA material. The results found have shown that our Hemp / PLA biocomposite material is resistant, in particular, that this material is of plant origin and which has more environmental benefits. The results obtained in our study coincide perfectly with the results found by Pinto et al. and Sarasini et al. who have shown that hemp fibers are good reinforcements for composite materials and that they have a positive effect for these materials, and this because of the compatibility of the fiber / matrix interface.

Keywords: carbon, hemp, PLA, Weibull approach, damage, genetic algorithm.