

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTERE 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

Mlle Touími Amína

Sur le thème

**Etude comparative sur le comportement élastique des matériaux composites
à base des fibres végétales : Bambou /Epoxyde et Coco/Epoxyde**

Soutenu le : **12/06/2019** devant le jury composé de :

M. ELKEURTI Mohammed	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Président
M.MOKADDEM Allel	MCA	Centre Universitaire Nour Bachir El Bayadh	Encadreur
M. DOUMI Bendouma	MCA	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Co-encadreur
M. BOUDALI Abdelkader	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Examineur
Mme. HACHEMAOUI Malika	MCB	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Examineur

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*Mes très chers parents qui se sont
sacrifié pour que je puisse arriver
jusque là et qui m'ont beaucoup
soutenu durant mon cursus.*

Mes adorables frères.

*Mes adorables sœurs Karima, Kawtare et
marwa qui sont toujours à mes cotés
et n'ont jamais cessé de me soutenir.*

Toute ma famille.

Ma copine Asma .

Tous mes amis (es).

Remerciements

*Tout d'abord je tiens à remercier **Dieu** tout puissant Qui m'a donné de la force et du courage pour terminer mes études dans de bonnes conditions.*

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude et reconnaissance à mon promoteur M. MOKADDEM ALLEL maître de conférences au centre universitaire d'El Bayadh et mon co-promoteur Monsieur DOUMI Bendouma maître de conférences à l'université Dr. Tahar Moulay de Saïda, qui ont guidé mes réflexions et m'aidé à faire avancer mes analyses et de réaliser ce travail dans les délais.

Je remercie très vivement mon président de jury monsieur ELKEURTI Mohammed professeur à l'université de Saïda pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence de ce jury.

Je tiens à remercier monsieur BOUDALI Abdelkader professeur à l'université de Saïda et Mme. HACHEMAOUI Malika maître de conférences à l'université de Saïda pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail.

Aussi, je remercie tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce mémoire de master.

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre I : Etudes bibliographiques sur les matériaux composite

1. Introduction.....	5
2. Caractéristiques des matériaux composites	6
3. Classification des matériaux composites.....	6
3.1. Classification basée sur la matrice	7
3.1.1. Les composites à matrice métallique(MMC).....	8
3.1.2. Les composites à matrice céramique(CMC).....	8
3.1.3. Les composites à matrice polymère(PMC).....	9
3.2. Classification basée sur le renforcement	12
3.2.1. Composites Particulaires	12
3.2.2. Composites fibreux	13
3.2.3. Composites laminaires.....	14
4. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites.....	15
5. biocomposites.....	16
5.1. Définition.....	16
5.2. Les avantage de biocomposites	17
6. Les fibres végétales.....	17
6.1. Définition de la fibre végétale.....	17
6.2. La classification des fibres végétales.....	18
6.3. Les Caractéristiques des fibres végétales.....	19
6.4. Les différentes combinaisons possibles	19
6.5. Evolution des propriétés mécaniques des composites à renforts fibres végétales	20
6.6. Avantages et inconvénients des matériaux composites à charges végétales.....	22
7. Conclusion.....	22

Références.....	23
-----------------	----

Chapitre II : Les modèles de simulation numérique

1. Introduction.....	27
2. Endommagements des matériaux composites	27
2.1. Modèles à l'échelle microscopique de fibre/ matrice	28
2.2. Modèles à l'échelle mésoscopique (pli).....	29
2.3. Modèles à l'échelle macroscopique (stratifiés).....	30
3. Interface fibre-matrice	30
4. Modélisation de l'interface fibre-matrice	31
5. Rôle des interfaces et des interphases	31
5.1. Interface fibre matrice très forte	32
5.2. Interface fibre -matrice très faible	32
5.3. Interface fibre-matrice intermédiaire	32
6. Caractérisation mécaniques	33
7. Essai de traction sur les fibres.....	34
7.1. Modèle de statistique	34
7.2. Modèle de weibull	34
7.2.1. Méthode graphique	36
7.3. Modèle de Cox	37
7.3.1. Modèle de Cox : transfert de charge élastique.....	38
7.4. Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface.....	38
7.4.1 Equilibre des forces de cisaillement.....	38
7.4.2. Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre.....	39
8. conclusion.....	42
Références.....	43

Chapitre III : Les modèles métaheuristiques

1. Introduction	47
2. L'algorithme génétique	48
2.1. Terminologie propre aux algorithmes génétiques	48
2.2. Le fonctionnement des algorithmes génétiques	49
2.3. Génération de la population initiale.....	50
2.4 Evaluation et sélection	51
2.4.1 Sélection par roulette (Wheel)	51

2.4.2 Sélection par rang	52
2.4.3 Sélection par tournoi	53
2.4.4 Sélection Steady-State	53
2.4.5 La méthode élitiste (sélective).....	54
2.5 Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques.....	54
3. L’algorithme Monte-Carlo	55
3.1 L’algorithme Monte-Carlo de diffusion	55
3.2 Solution exactes de l’algorithme Monte-Carlo de diffusion	58
4. Conclusion	61
Référence.....	62
Chapitre IV : Résultats et interprétations	
1. Introduction.....	63
2. Présentation des constituants de nos matériaux composites.....	63
2.1. La matrice époxy (époxyde).....	63
2.1.1. La température de transition vitreuse.....	64
2.1.2. La module d’élasticité ou module d’Young.....	65
2.2. Les fibres.....	65
2.2.1. La fibre de bambou.....	65
2.2.2. La fibre de Coco.....	66
3. Méthodes et modèles théoriques de simulation.....	67
3.1. Le modèle de cisaillement de l’interface de Cox.....	67
3.2. Le formalisme probabiliste de Weibull.....	67
3.3. La modélisation génétique.....	68
3.3.1. Développement.....	68
3.3.2. L’organigramme de notre algorithme.....	69
4. Résultats de simulation.....	70
4.1. Coco / époxy.....	70
4.2. Bambou / époxy.....	73
5. Conclusion.....	77
Références.....	78
Conclusion générale.....	80

Liste des figures

Figure I.1 : Schéma illustratif d'un matériau composite.....	5
Figure I.2 : Classification des différents types de composites.....	7
Figure I.3 : Classification des composites basées sur la matrice.....	7
Figure I.4 : Représentation schématique d'un polymère thermoplastique.....	10
Figure I.5 : Les Matrices de types de thermoplastiques	10
Figure I.6 : Types de thermodurcissables.....	12
Figure I.7 : Classification des matériaux composites.....	15
Figure I.8 : Structure de la fibre végétale.....	18
Figure I.9: (a) Rigidité spécifique et (b) contrainte spécifique à la rupture en fonction de la fraction volumique des fibres	21
Figure I.10 : Perte de rigidité en fonction de la déformation pour les différents matériaux	21
Figure II.1 : échelles d'études dans le matériau composite.....	27
Figure II.2 : Schéma des différents endommagements dans les stratifiés.....	28
Figure II.3 : Fissure matricielle formée à partir de la coalescence des décohésions et microfissures matricielles.....	29
Figure II.4 : Une machine de traction.....	33
Figure II.5 : volume élémentaire représentatif.....	38
Figure II.6 : équilibres de la matrice en cisaillement.....	39
Figure II.7: Equilibre élastique d'une portion de fibre.....	40
Figure II.8: Modèle de Cox -Profils de contrainte dans la fibre (σ_f) et à l'interface (τ_i).....	41
Figure III.1 : Exemple de la Représentation génétique.....	49
Figure III.2 : Exemple de la Représentation génétique.....	49
Figure III.3 : l'organigramme d'un algorithme génétique.....	50
Figure III.4 : Exemple de roulette (Wheel).....	52
Figure III.5 : Exemple démontrant la discrétisation d'un mouvement aléatoire continu.....	56
Figure III.6 : (a) Représentation schématique d'un hydrogel. (b) Représentation d'un hydrogel à l'aide d'un réseau.....	57
Figure IV.1 : Les domaines d'application de résines époxy.....	64
Figure IV.2 : Fibres bambou non traitées (A) et traitées avec la soude (B) observées en microscopie électronique à balayage.....	65

Figure IV.3 : Les SEM de la coupe longitudinale et transversale section de brins de fibres	66
Figure IV.4 : L'organigramme de l'algorithme génétique.....	69
Figure IV.5 : L'endommagement de l'interface : $\sigma = 185 \text{ N/m}^2$	71
Figure IV.6 : L'endommagement de l'interface : $\sigma = 225 \text{ N/m}^2$	72
Figure IV.7 : L'endommagement de l'interface : $\sigma = 265 \text{ N/m}^2$	73
Figure IV.8 : L'endommagement de l'interface : $\sigma = 185 \text{ N/m}^2$	74
Figure IV.9 : L'endommagement de l'interface : $\sigma = 225 \text{ N/m}^2$	75
Figure IV.10 : L'endommagement de l'interface : $\sigma = 265 \text{ N/m}^2$	76
Figure IV.11 : La contrainte appliquée en fonction de la souche de diverses fibres.....	76

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Les caractéristiques mécaniques des résines thermoplastique et thermodurcissables.....	11
Tableau I.2 : Les Caractéristiques générales des fibres végétales	19
Tableau II.1: Types d'endommagement dans les composites stratifiés.....	28
Tableau II.2 : les résultats de weibull.....	37
Tableau III.1: Exemple de sélection par rang pour 6 chromosomes.....	53
Tableau IV.1 : les propriétés physiques des deux fibres.....	67



Introduction générale

Introduction générale

La plupart des constituants de base des matériaux composites (fibres ou matrices) utilisés dans les différents domaines d'application sont issus de l'industrie pétrochimique dont les réserves s'épuisent. A cet effet, la substitution de ses composants par des ressources renouvelables et biodégradable, encourage le développement et l'usage de nouveaux matériaux innovants.

Les fibres naturelles en particulier les fibres végétales représentent une alternative idéale et que ses fibres constituent des meilleurs remplaçants des fibres synthétiques, en sus, les fibres végétales disposent des propriétés physiques meilleures et de faible coût énergétique de production par rapport aux autres renforts issus de l'activité pétrochimique. [1-3]

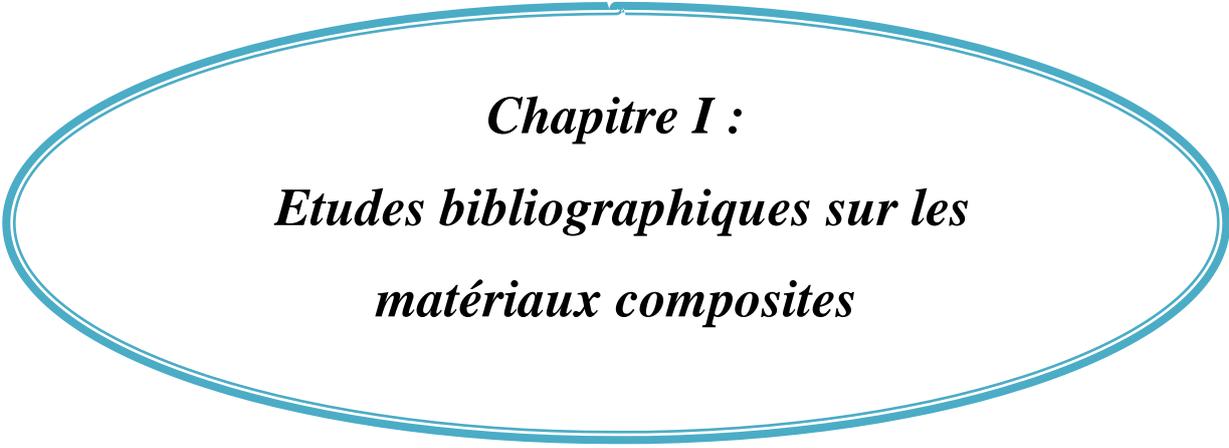
L'utilisation des fibres végétales prend de plus d'ampleur. Les propriétés mécaniques intéressantes, la faible densité et la biodégradabilité ouvrent des perspectives encourageantes. Ces nouveaux matériaux ont connu un essor très important dans toutes les activités industrielles. [4-5]. Malgré ses avantages, les concepteurs ont constaté certaines difficultés provient essentiellement de la diversité et la variabilité des fibres naturelles. Leurs caractéristiques physico mécaniques sont très délicats à maîtriser, de plus, les propriétés mécaniques des fibres d'origine végétale varient considérablement dans la même plante et d'une plante à l'autre. Pour remédier à ses contraintes, des différents traitements de types mécaniques, physiques ou chimiques ont été réalisés et pouvant améliorés l'adhésion et la maîtrise de la dispersion des fibres dans la matrice [5], mais malheureusement, ils sont insuffisants pour mieux maîtriser le comportement aléatoire de l'interface fibre-matrice.

Dans ce contexte, nos travaux visent à étudier l'endommagement de l'interface fibre-matrice et évaluer les performances physiques de composite à matrice organique renforcée par des fibres végétales. Deux fibres naturelles ont été choisies : la fibre de Bambou et la fibre de Coco.

Notre mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre est consacré à l'étude des matériaux composites, biocomposites et les fibres végétales, dans le

deuxième, nous avons traité les modèles mathématiques décrivant l'interface fibre-matrice et les différents mécanismes d'endommagement des matériaux composites au niveau de l'interface fibre-matrice. Les méthodes probabilistes d'optimisation ont été étudiées dans le troisième chapitre. Enfin, nos résultats de la modélisation génétique portés sur l'endommagement en cisaillement de l'interface fibre-matrice des deux matériaux composites Coco/époxy et Bambou/époxy ont été présentés dans le dernier chapitre.

- [1] Philp J. C., Bartsev A., Ritchie R. J., Baucher M.-A., Guy K. Bioplastics science from a policy vantage point. 30, 635-646, (2013)
- [2] Biron M. Material Selection for Thermoplastic Parts: Practical and Advanced Information. (2015)
- [3] Raquez J. M., Deléglise M., Lacrampe M. F., Krawczak P. Thermosetting (bio) materials derived from renewable resources: A critical review. 35, 487-509, (2010)
- [4] Marrot L., Bourmaud A., Bono P., Baley C. Multi-scale study of the adhesion between flax fibers and biobased thermoset matrices. 62,47-56, 2014.
- [5] Marrot L. Contribution au développement de matériaux composites à matrices thermodurcissables biosourcées et renforcées par des fibres végétales.2014.



Chapitre I :
Etudes bibliographiques sur les
matériaux composites

1. Introduction

les composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit les moins coûteux possibles, soit les plus performants, ou bien les deux à la fois. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique. Pour réduire les fibres traditionnelles de coût élevé (carbone, verre et aramide), de nouveaux composés ont été développés. Des recherches ont porté leur attention sur les composites renforcés par les fibres naturelles. Ces composites combinent de bonnes propriétés mécaniques avec une faible densité [1,2]. De tels composés offrent un certain nombre d'avantages bien connus qui incluent le coût, la disponibilité des ressources naturelles renouvelables, la biodégradabilité, etc.[3]

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 [4].le renfort apporte au matériau composite ses performances mécanique, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitation mécanique extérieures et de protéger les fibres vis –à-vis des agressions extérieures [3]

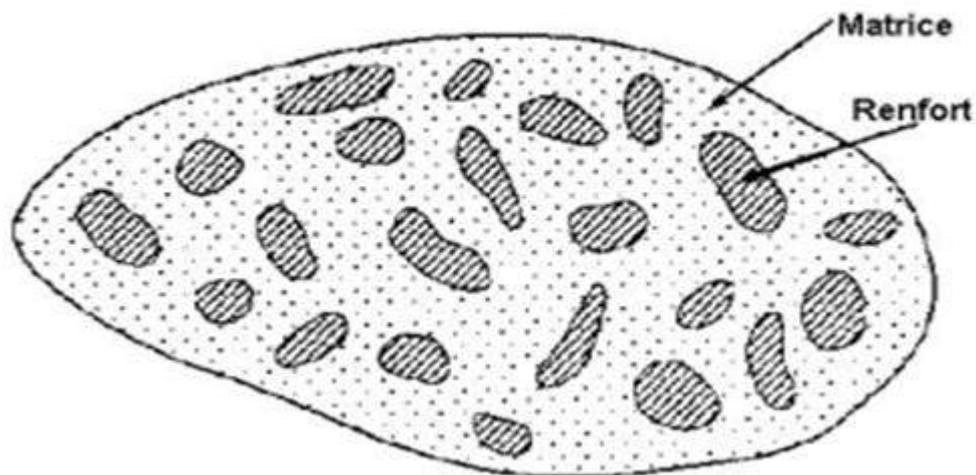


Figure I.1 : Schéma illustratif d'un matériau composite [3]

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.) [4].

2 Caractéristiques des matériaux composites

Les caractéristique mécaniques des composites sont souvent dérivées de campagnes de tests de caractérisation. De nombreux tests de caractérisation longs et couteux doivent donc être réalisés pour développer des matériaux composites conformes aux spécifications. En effet, certains tests, comme les tests de compression, sont difficiles à implémenter et à interpréter. [5]

Il existe de nombreux produits composites fabriqués avec plus de deux matières premières. Ces matériaux ne sont pas miscibles et possèdent des caractéristiques dissemblables. La quantité, la position et l'orientation des renforts ainsi que la sélection de la matrice sont des aspects critiques de la conception du produit.[6]

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- Des propriétés des matériaux constituants
- De lues distribution géométrique
- De leur interaction

Ainsi, pour accéder à la description d'un matériau composite, il sera nécessaire de spécifier :

- La géométrie du renfort, sa distribution
- La nature de l'interface matrice / renfort [6]

3 Classification des matériaux composites

On peut appliquer la classification classique des composites suivant la nature de la matrice, dans l'ordre croissant de la température d'utilisation. Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans un domaine de températures ne dépassant pas 200 à 300 °C, alors que les autres types de composites sont utilisés au-delà :jusqu'à 600 degrés pour une matrice métallique et jusqu'à 1000 degrés pour une matrice céramique. [7]

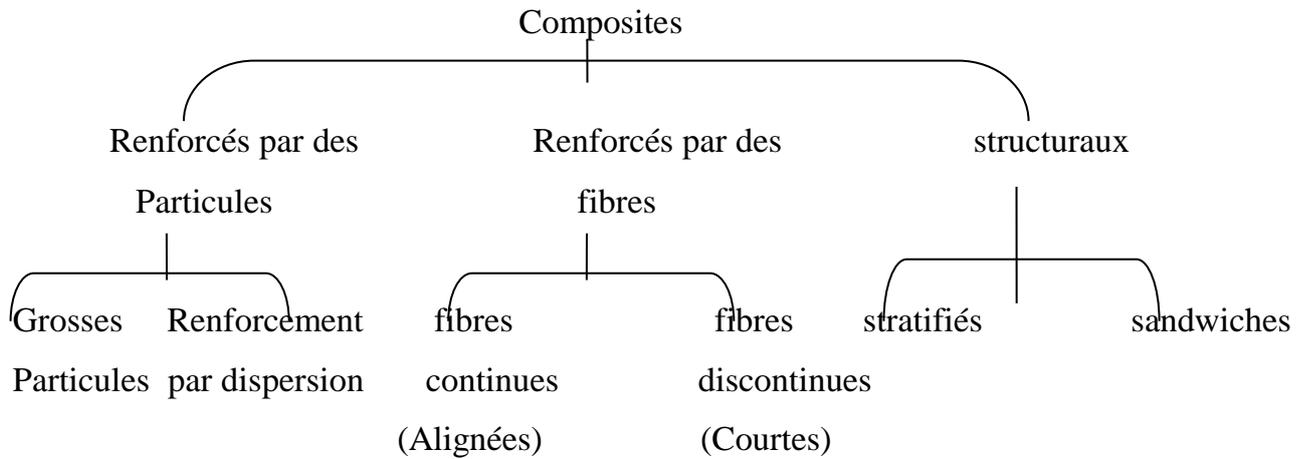


Figure I. 2: Classification des différents types de composites [8]

3.1 Classification basée sur la matrice

Selon la nature de la matrice, les matériaux composites sont classés et divers renforts sont associés à ces matrices. Seules certaines associations entre matrices et fibres sont possibles et ont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. [9]

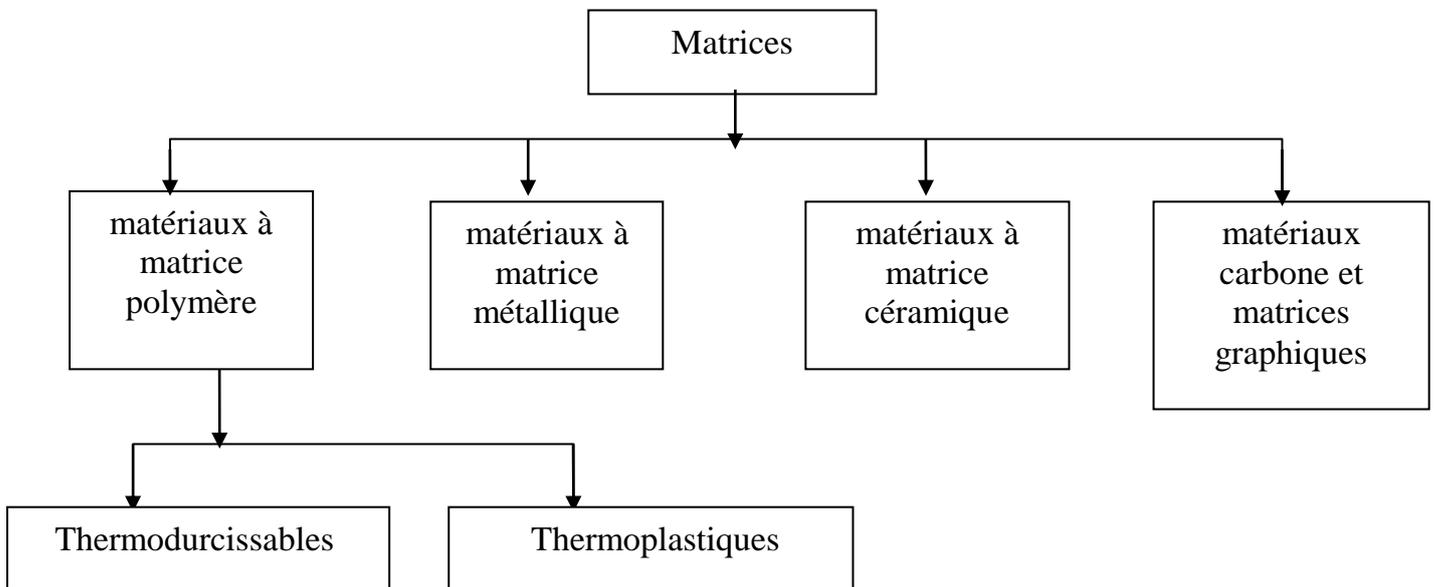


Figure I.3: classification of composites based on matrix [8]

3.1.1 Composites à matrice métallique (MMC)

Les composites à matrice métallique suscitent actuellement un grand intérêt pour la recherche, ne sont pas aussi largement utilisés que leurs homologues en plastique. Haute résistance, fracture la ténacité et la rigidité sont offertes par les matrices métalliques que celles offertes par leur polymère contreparties. Ils peuvent résister à une température élevée dans un environnement corrosif que composites polymères. La plupart des métaux et alliages pourraient être utilisés comme matrices et nécessitent matériaux de renforcement qui doivent être stables dans une plage de température. Toutefois l'aspect déterminant pour le choix dépend essentiellement du matériau de la matrice. [10]

Dont certains procédés de fabrication s'inspirent de la métallurgie des poudres. Les particules de seconde phase peuvent être des oxydes, borures, carbures, nitrures. Les composites à matrice métallique encore appelés MMC pour métal-matri composites se sont développés grâce à la facilité et à la maîtrise des procédés de fabrication ainsi qu'à leur faible coût.[11]

3.1.2 Composites à matrice céramique(CMC)

Les céramiques peuvent être décrites comme des matériaux solides qui présentent de très forts ions la liaison en général et dans quelques cas la liaison covalente. Points de fusion élevés, bon résistance à la corrosion, stabilité aux températures élevées et haute résistance à la compression, faire des matériaux de matrice à base de céramique un favori pour les applications nécessitant une structure matériau qui ne cède pas à des températures supérieures à 1500 °C. [12]

Ils sont utilisés pour des applications à plus haute température comme des oxydes, carbures ou nitrures. L'utilisation des céramiques est limitée notamment par leur ténacité à rupture, leur résistance à la fatigue et aux chocs thermiques. Pour résoudre ces problèmes, l'incorporation d'une seconde phase ductile dans la matrice céramique est une solution. [11]

Haut module d'élasticité et résistance à la traction, que la plupart des céramiques ont combinée pour faire échouer les tentatives de ajouter des renforts pour améliorer la résistance. En effet, aux niveaux de stress au rupture de la céramique, l'allongement de

la matrice est insuffisante pour ne pas composite de transférer un quantum effectif de la charge à l'armature et la composite peut échouer à moins que le pourcentage de volume de fibres ne soit suffisamment élevé. [11]

L'utilisation de renforts à haut module d'élasticité peut prendre en charge le problème dans une certaine mesure et présente une précontrainte de la fibre dans la matrice. La céramique est de plus en plus recourue à une option. Quand la céramique a un pouvoir thermique supérieur coefficient de dilatation que les matériaux de renforcement, il est peu probable que le composite résultant ait un niveau supérieur de force. [12]

3.1.3 Composites à matrice polymère (PMC)

Les polymères sont des matériaux idéaux car ils peuvent être traités facilement, possèdent légères et propriétés mécaniques souhaitables. [12]

Les principaux types de polymères sont les thermodurcissables et le thermoplastique. Les thermodurcissables ont des qualités telles qu'une structure moléculaire tridimensionnelle bien liée après durcissement. Ils se décomposent au lieu de fondre en durcissant. Changer simplement la composition de base de la résine suffit à modifier convenablement les conditions de durcissement et à déterminer son autre les caractéristiques. Ils peuvent également être conservés dans un état partiellement durci pendant une période prolongée, périodes rendant les thermo durcis très flexibles, ainsi ils sont les mieux adaptés en tant que matrice bases pour composites renforcés par fibres. [13]

Aussi appelés composites à matrice organique, ils sont sûrement les plus développés du fait de l'importance commerciale de ces derniers et de la maîtrise (coût et savoir-faire) de nombreux processus de fabrication. [11]

➤ Les thermoplastiques

Les thermoplastiques sont des chaînes polymères reliées entre elles par de faibles liaisons, elles se présentent sous forme solide (granulés, plaques...) qu'on met en forme en les ramollissant par chauffage, puis en les solidifiant par refroidissement.

Leur recyclabilité et leur thermo-réversibilité constituent l'un des grands avantages qui prend de plus en plus d'importance de nos jours [14]

Ces polymères peuvent cristalliser thermoplastes amorphes ou thermoplastes semi-cristallins comme le polyéthylène(PE), le poly (chlorure de vinyle) (PVC) ou le polystyrène (PS) sont 9 mis en forme par diverses techniques comme l'injection, l'injection-soufflage, l'extrusion ou le roto moulage. (Voir fig. I.4). [15,16]

Dans la majorité des cas, le polymère ayant la forme désirée récupère son état partiellement cristallin ou amorphe après refroidissement.

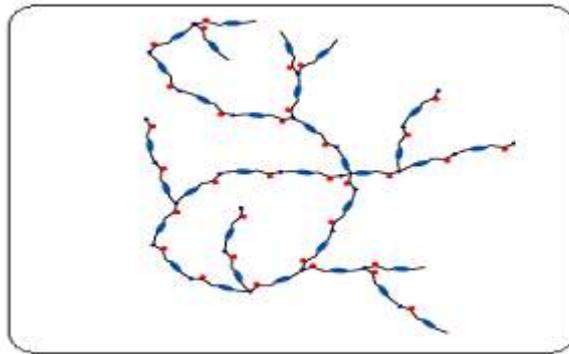


Figure. I.4 : Représentation schématique d'un polymère thermoplastique. [14]

Le thème de la plupart des expériences dans ce domaine pour améliorer les propriétés de base des résines et en tirer les plus grands avantages fonctionnels dans de nouvelles avenues compris les tentatives de remplacement des métaux dans les processus de coulée de teinture. [16]

En cristallin thermoplastiques, le renfort affecte considérablement la morphologie, incitant le renforcement à renforcer la nucléation. [13]

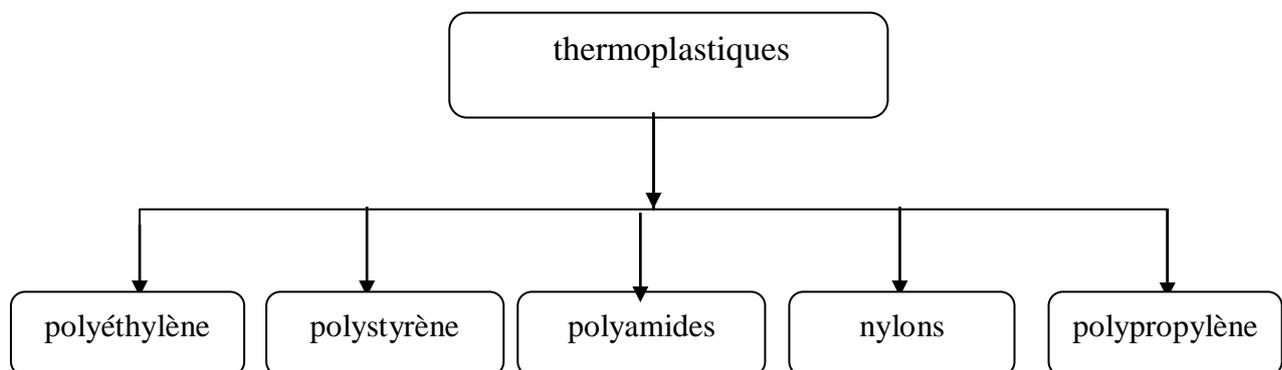


Figure I.5 : Types de thermoplastiques. [13]

Les nouveaux développements augurent de l'élargissement du champ d'application du thermoplastiques, de grandes feuilles de thermoplastiques renforcés sont maintenant

disponibles et elle ne nécessite un échantillonnage et le chauffage pour être moulé dans les formes requises, cela a facilité fabrication facile de composants volumineux, en éliminant les moulages plus encombrants composés. [13]

➤ **Les thermodurcissables**

Les thermodurcissables sont des polymères qui ne peuvent être mis en forme qu'une seule fois mais possèdent des propriétés mécaniques et thermomécaniques élevées par rapport au thermoplastique. [17] 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 [14], ils offrent beaucoup d'avantages fondamentaux importants par rapport aux thermoplastiques tels que la résistance à la fatigue et à l'impact, la longévité et la résistance à la corrosion.

	ρ (kg/m ³)	E(GPa)
Polypropylène	900	1,1-1,4
Polyamides	1140	1,2-2,5
Résine Polyesters	1200	2,8-3,5
Résine Epoxyde	1100-1500	3-5
Résine de condensa	1200	3

Tableau I.1 : les caractéristiques mécaniques des résines thermoplastique et thermodurcissables.[14]

Un thermodurcissable est un produit transformé irréversiblement par polymérisation en un réseau tridimensionnel infusible et insoluble que l'on qualifie de thermo durci. Le réactif initial peut être composé d'un monomère ou d'un mélange de monomères ou plus fréquemment d'un mélange de polymère linéaire de faible masse molaire et de monomère. [17]

Dans tous les cas, la réticulation s'effectue sous l'action de la chaleur et/ ou de catalyseurs. Ces polymères amorphes ont une température de transition vitreuse élevée

(80°C à + de 150 °C) mais, du fait de la réticulation, ne présentent pas d'état caoutchouteuse ni d'état liquide. [14]

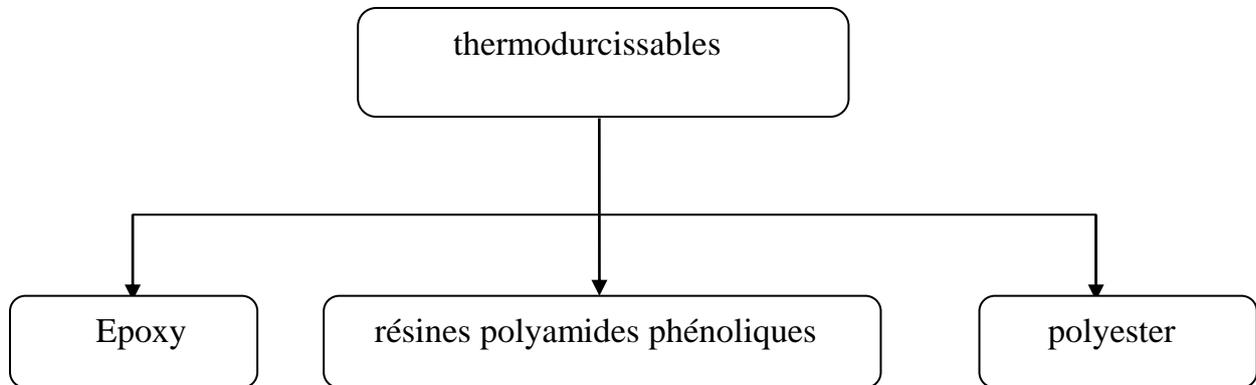


Figure I.6 : Types de thermdurcissables [14]

La mise en œuvre des thermdurcissables est donc moins aisée que celle des thermoplastiques car il faut impérativement effectuer la mise en forme en même temps que la réaction chimique de réticulation. Cependant, les thermdurcissables présentent une résistance mécanique, chimique et thermique plus élevée que les thermoplastiques. [15]

3.2 Classification basée sur le renforcement

La deuxième phase est intégrée dans la matrice sous une forme discontinue cette phase secondaire est appelée phase dispersée. La phase dispersée est généralement plus forte que la matrice, elle est donc parfois appelée phase de renforcement.

3.2.1 Composites particuliers

Une particule par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines des matrices, comme la rigidité, la tenue, la résistance à l'abrasion, la diminution de retrait etc. Dans de nombreux cas les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau sans en diminuer les caractéristiques. [18]

Microstructures de composites métalliques et céramiques présentant des particules d'une phase jonchant l'autre, sont connus comme composites renforcés par des particules. Les formes carrées, triangulaires, formes de renfort arrondies sont connues mais les

dimensions de tous leurs côtés sont observé être plus ou moins égal. La taille et la concentration en volume du dispersive le distingue des Matériaux durcis par dispersion. La taille dispersée en particules composites est de l'ordre de quelques microns et la concentration en volume est supérieure à 28% dans les composites particuliers, les particules renforcent le système par le système hydrostatique. Contrainte des charges dans les matrices et par leur dureté par rapport à la matrice.

[18]

3.2.2 Composites fibreux

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres, les fibres utilisées se présentent sous forme des fibres continues, soit sous forme des fibres discontinues, fibres courtes, fibres coupées, etc. l'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux anisotropes dans un plan. L'importance des matériaux composites à fibres justifier une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques.

[19]

Les fibres constituent l'importante classe de renforts ,car elles satisfont à la conditions et transfert de la force au constituant de la matrice influençant et améliorant leur propriétés comme vous le souhaitez ,les fibres de verre sont les fibres les plus anciennes utilisées pour renforcer matériaux , des fibres de céramique et de métal ont ensuite été découvertes et soumises à utiliser pour rendre les composites plus rigides plus résistants à la chaleur, les fibres ne sont pas idéales performances dues à plusieurs facteurs ,la performance d'un composite de fibres est jugée par son longueur, forme ,orientation, composition des fibres et propriétés mécaniques de la matrice . L'orientation de la fibre dans la matrice est une indication de la force de la composite et la résistance est maximale le long de la direction longitudinale de la fibre. [19]

Les bandes monocouches constituées de fibres continues ou discontinues peuvent être orientées unidirectionnel empilé dans des plis contenant des couches de filaments également orientés dans le même direction, des orientations plus complexes sont

également possibles et de nos jours, les ordinateurs sont utilisés pour faire des projections de telles variations en fonction de besoins spécifiques.[19]

3.2.3 Composites laminaires

Les composites laminaires sont présentes dans autant de combinaisons que le nombre de matériaux. Ils peuvent être décrits comme des matériaux composés de couches de matériaux liés ensemble. Ceux-ci peuvent être constitués de plusieurs couches, les stratifiés vêtus et sandwichs ont de nombreux domaines comme il se doit, bien qu'ils soient connus pour suivre la règle des mélanges du module et de la force point de vue. Autres valeurs intrinsèques concernant la matrice métallique, renforcée par du métal les composites sont également assez bien connus. Par exemple une feuille résistante peut utiliser plus de 92% de la structure laminaire, alors est difficile de fabriquer des fibres avec de telles compositions les stratifiés métal-métal qui ne possèdent pas la force ou la rigidité sont des couches simples qui dotent les composites avec spécial propriétés, en plus d'être rentable ils sont généralement fabriqués par pré-revêtement. [20]

Les métaux pré-revêtus sont formant une couche sur un substrat dans la forme d'un mince film continu, ceci est réalisé par trempage à chaud et parfois par placage chimique et galvanoplastie les métaux plaqués sont jugés appropriés pour plus environnements intensifs où des visages plus denses sont nécessaires il y a beaucoup de combinaisons de feuille qui fonctionnent comme des adhésifs à basse température de tels matériaux plastiques ou des métaux peuvent être matraqués avec un troisième

constituant.[20]

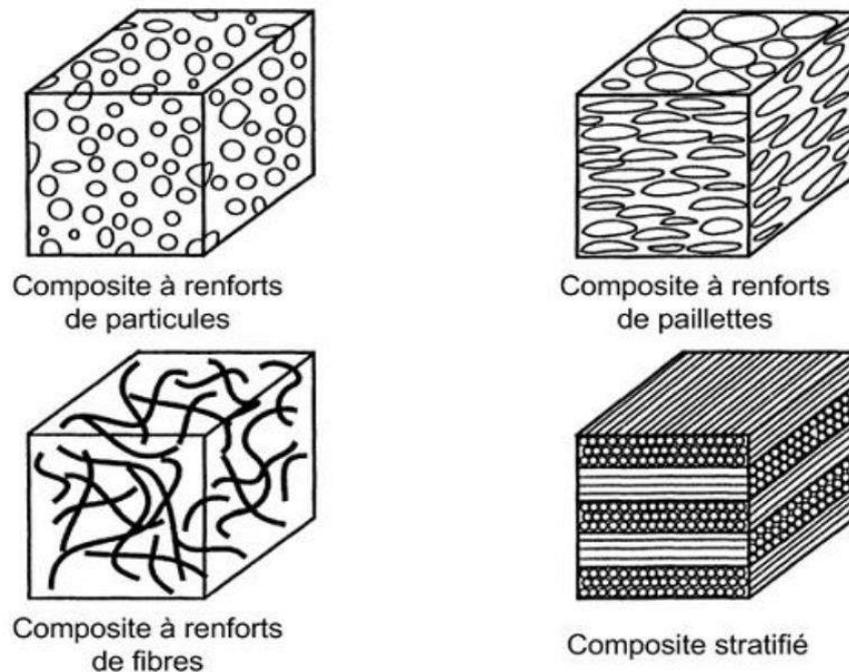


Figure I.7 : classification des matériaux composites. [21]

4 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion
- Insensibilité aux produits chimiques
- Comparez aux métaux ils présentent une résistance élevée.
- Ils ont une faible densité.
- La rigidité du matériau est améliorée à haute température, ils maintiennent aussi le poids.
- Possibilité de prendre plusieurs formes (pièces complexes).
- Bonne tenue au feu (attention aux dégagements toxiques).
- La ténacité est également améliorée.
- La production est inférieure.
- La fabrication est également moins chère.
- La résistance à la fatigue et au fluage est meilleure.

- La conductivité électrique mesurée est possible. [22]

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- Comparez avec les métaux forgés, les composites sont plus fragiles et sont facilement endommagée.
- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- Les métaux coulés ont également tendance à être fragiles pendant le transport, le matériel nécessite un refroidissement.
- Des équipements spéciaux sont nécessaires et un durcissement à chaud est également nécessaire pour le processus de durcissement, il faut du temps pour le traitement à froid ou à chaud.
- Après l'achèvement du dernier rivet, le processus est terminé.
- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.
- Les rivets sont enlevés sans causer de dommages.
- Avant de commencer la réparation, le composite doit être nettoyé. [22]

5 Biocomposites

5.1 Définition

Un biocomposite est un matériau composite dont l'une des parties au moins, renfort ou matrice, est issu de ressources renouvelables. [23]

Un matériau biocomposite n'est rien de plus qu'un matériau formé d'une matrice, généralement de la résine et d'un élément de renforcement, il est généralement constitué de fibres naturelles provenant principalement de plantes ou de cellulose, ces matériaux bio composites sont classés en trois groupes composites articulés, composites fibreux, matériaux poreux. [25]

Ces matériaux bio composites se caractérisent par le fait que la matrice de résine est essentiellement naturelle, donc biodégradable, on parle de substances telles que la fibre de verre, la fibre de carbone ou encore le talc. [24]

Il existe d'autres appellations proches comme "éco-composites" et "agrocomposites" qui s'inscrivent également pleinement dans les concepts émergents de chimie verte et de chimie durable. Il n'existe pas de définition encore officielle des bio composites,

mais il est maintenant admis que ces matériaux doivent être fabriqués impérativement à partir de ressources naturelles plus ou moins transformées mécaniquement et / ou chimiquement. Les bio composites sont ainsi composés dans le principe de renforts généralement en fibres naturelles et d'une matrice également issue préférentiellement de la biomasse. [25]

5.2 Les avantages de biocomposites

Ces matériaux sont également appelés biocomposites verts car la propagation des fibres végétales devient de plus en plus évidente, nous parlons de fibres renouvelables telles que les plastiques cellulosiques, les polyacides, les plastiques d'amidon / plastiques dérivés d'amidon, les polyhydroxyalcanoates, les plastiques à base de soja, toutes ces substances peuvent être définies comme vertes.[25]

De nombreux matériaux bio composites utilisent également des matériaux recyclés ou des fibres dérivées de plantes en croissance rapide, de cette manière vous réduisez considérablement la demande de produits dérivés de produits pétrochimiques ou d'autres combustibles fossiles aussi vous préférez les produits locaux ce qui réduit les coûts de transport, matérialisé bio composite tous ces dispositifs liés à l'utilisation de ces nouveaux matériaux bio composites ,sont sans aucun doute en mesure d'assurer une augmentation du nombre de logements sociaux , devenant ainsi résistants au feu , thermiquement efficaces, mais suffisamment perméables pour éviter la formation de moisissure à l'intérieur du bâtiment l'environnement bâti et en même temps assurer une meilleure qualité de l'air intérieur , ainsi outre l'amélioration de l'environnement le bien- être de la vie humaine s'est amélioré de toute évidence la décision de construire ne maison durable en utilisant des matériaux bio composites aide à obtenir la certification LEED ce qui en plus du prestige du bâtiment ,permet des réductions d'impôts et des incitation .[24]

6 Les fibres végétales

6.1 Définition de la fibre végétale

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose hémicelluloses et de lignine en proportion relativement faible d'extractibles non azoté,

de matière protéique brute de lipide et de matières les proportion de ces constituants dépendent énormément de l'espèce de l'âge et des organes de la plant.[26,27]

6.2 Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

- Suivant l'organe de la plante dont elles sont issues, les fibres végétales peuvent être classées en fibres de tiges (kéraf, jute, lin, ramie), et de feuilles (sisal, abace, paille, degaminée). [27]
- Suivant leur teneur en hémicellulose (cellulose et hémicellulose) et en lignine , on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigide provenant de matériels ligneux tels que le bois d'œuvre, les résidus de l'industrie du bois et les fibres non ligneuses (douces ,souples, issues de végétaux non ligneux souvent annuels relativement moins riches en lignine tels que le kéraf, le chanvre, le sisal, le jute et le lin) .[28]
- Suivant leur longueur les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories : fibres longues, dites libérienne, provenant des tiges et d'écorce de tiges de plantes annuelles elles sont douces tandis que les fibres longues issues de feuilles ou de troncs d'arbre sont plus dures et plus rigides à cause de leur richesse en lignine, et fibres courtes ou étoupes qui sont associées aux fibres longues. [27]

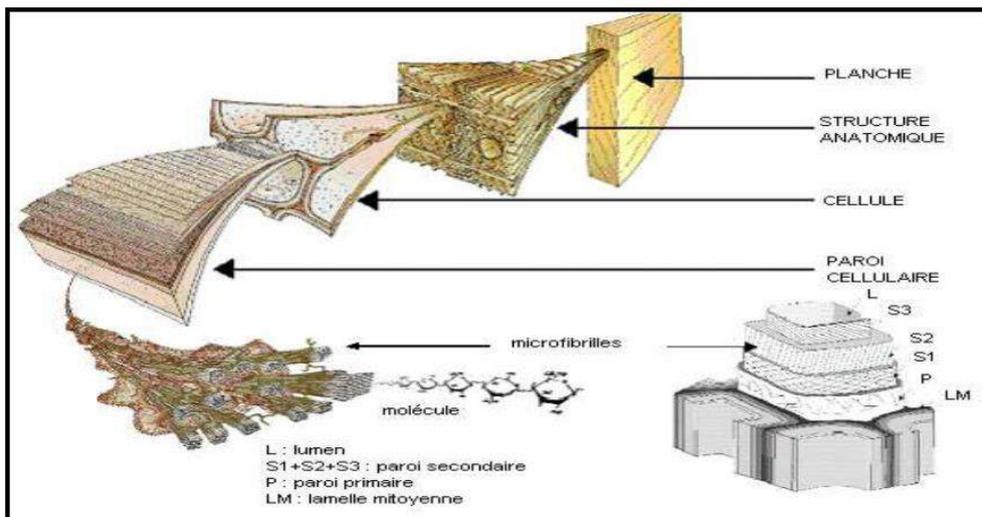


Figure I. 8: structure de la fibre végétale [26]

6.3 Caractéristiques des fibres végétales

Dans le tableau ci-après, nous présentons les différentes propriétés des fibres végétales

Fibres	Langueur de la fibre technique (mm)	Diamètre (µm)	Module de traction (Gpa)	Déformation maximale (%)
Genêt d'espane	50-120	5-10	22	2,5-12
Coton	25	12-23	6-10	6-8
Lin	4-8.5	12-30	50-70	1.3-3.3
Chanvre	5-40	16-50	30-60	1.7-2.7
Kénaf	2.5-4.5	14-33	60	1.7-2.1
Jute	2.5	5-25	20-55	1.5-2
Sisal	100-125	100-400	9-22	3-14
Banane	4.5-10	50-250	7-20	1.8-3.5
Abaca	60	50-280	-	2.1-2.4

Tableau I.2 : caractéristiques générales des fibres végétales [29,30]

6.4 Les différentes combinaisons possibles

La combinaison des composites à base d'une matrice polymère qu'elle soit thermoplastique ou thermodurcissable avec des fibres d'origine végétale a connu une révolution. En effet, ces renforts pourront se mélanger avec différents types de résine. On distingue les composites à matrice polyéthylène. On trouve par exemple beaucoup de références et de travaux de recherche [31- 34] qui se sont intéressés à l'étude de l'influence des agents de couplage sur les propriétés viscoélastiques et mécaniques du composite, ainsi que l'effet de la géométrie, de l'orientation et de la teneur en fibres. Egalement, on distingue des composites à base d'une matrice polystyrène, on trouve les travaux de Nair et Al. [33], où le comportement thermique du composite polystyrène/fibres de sisal a été traité. Ainsi que, comme dans notre cas d'étude, des composites à matrice polypropylène.

L'utilisation des fibres végétales ne se limite pas uniquement aux matrices thermoplastiques et thermodurcissables mais elle a connu d'autres utilisations plus vastes, à savoir : les matrices élastomères qui ont prouvé des bonnes propriétés mécaniques et les matrices biodégradables, on cite comme résultats les travaux de

Bismarck et Al. [35]. Cette nouvelle famille de matrices biodégradables offre une alternative possible aux polymères traditionnels non-biodégradables, dont le recyclage est impossible ou peu rentable. Des travaux comme celles de Shibata et Al. [36,37] se sont penchés sur l'étude des composites combinant des fibres naturelles/ bio fibres avec des résines biodégradables et ont montré des bonnes propriétés de traction et de flexion avec une remarquable augmentation des propriétés mécaniques des composites dont les fibres ayant subi un traitement par l'ajout d'un comptabilisant type (PEA-g-GMA). [35,36]

6.5 Evolution des propriétés mécaniques des composites à renforts fibres végétales

Le comportement mécanique des composites est très complexe. En effet, dans le cas d'un composite à renforts fibres courtes réparties aléatoirement dans le plan, on peut observer macroscopiquement un comportement quasi-isotrope. Par contre, localement le comportement est très anisotrope, résultat de plusieurs facteurs tels que : [37]

- La longueur des fibres : qui est un paramètre difficile à maîtriser surtout dans le cas des fibres végétales,
- Le rapport d'aspect = longueur/diamètre,
- La concentration locale des fibres,
- La distribution spatiale et la qualité de l'interface fibre/matrice,

Une étude menée sur des mats de composites à matrice polyester insaturé isophtatique renforcée par différents types de fibres courtes de verre, de Lin et de Chanvre, afin de déterminer l'influence de la fraction volumique en fibres sur le comportement en statique. La figure 9, ci-dessous montre l'évolution de la rigidité spécifique et de la contrainte à la rupture des différents matériaux. [38]

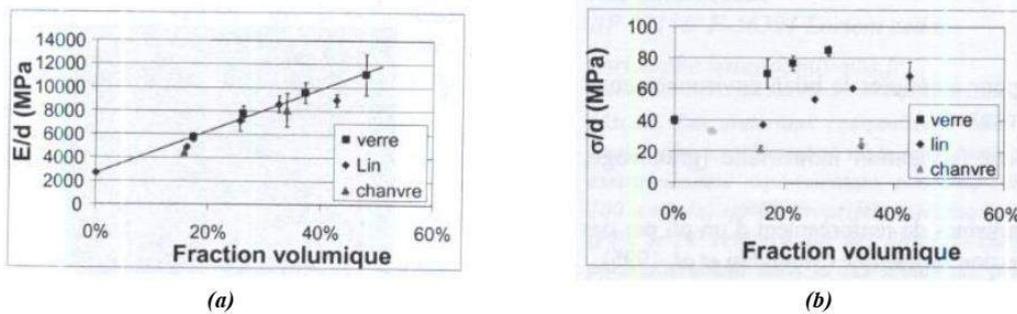


Figure I.9 : (a) Rigidité spécifique et (b) contrainte spécifique à la rupture en fonction de la fraction volumique des fibres [38]

La figure.9.(a), montre que la rigidité spécifique en traction des composites en fonction du taux volumique de fibres est identique pour les différents composites. Alors que dans le cas de contrainte spécifique à la rupture figure.9.(b), le comportement dépend de la nature de la fibre.[38]

L'étude de l'endommagement sous des cycles de charge-décharge pour les différents matériaux et pour un taux de renforcement volumique est donnée sur la figure .10.

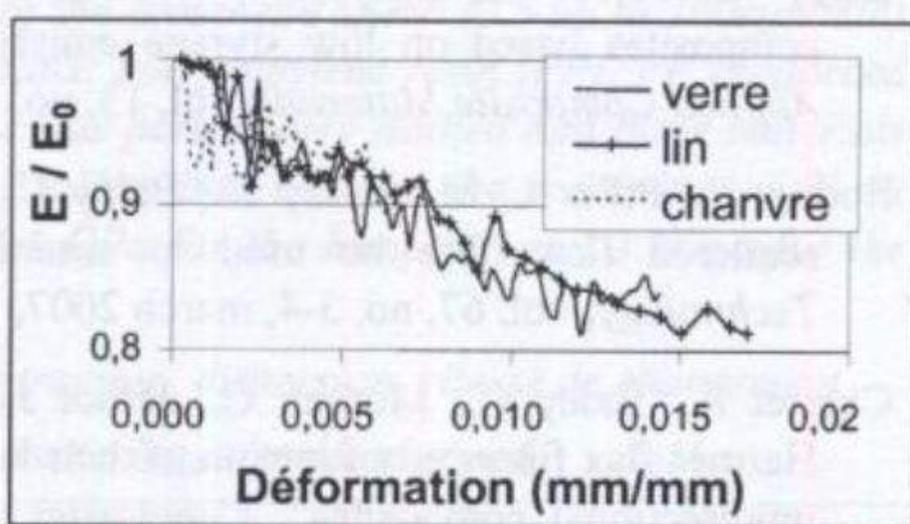


Figure I.10 : Perte de rigidité en fonction de la déformation pour les différents matériaux [38].

La chute de rigidité relative en fonction de la déformation est similaire pour les 3 matériaux. Donc ; les mécanismes d'endommagement sont indépendants de la nature des fibres.[38]

6.6 Avantages et inconvénients des matériaux composites à charges végétales :

L'utilisation des matériaux composites à fibres végétales sous différentes conditions environnementales est devenue populaire ces dernières années, beaucoup de fibres végétales ont été employée en tant que renfort efficace dans des matrices polymériques.[39-41]

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- Leur légèreté.
- Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- Leur possibilité d'acquies plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit.

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- Les coûts des matières premières et procédés de fabrication.
- La gestion des déchets engendrés et réglementation de plus stricte.
- Faible stabilité dimensionnelle.
- Absorption de l'eau.

7. Conclusion

La biomasse végétale est constituée de plusieurs macromolécules étroitement liées entre elles au sein de la paroi végétale. L'incorporation de fibres végétales à base de cellulose (coton, lin, chanvre, jute, ramie, sisal, kenaf, coco, abaca, bois...) dans des matériaux thermoplastiques ou thermodurcissables en remplacement des fibres de verre est un concept déjà industrialisé et commercialisé. On trouve ces composites dans des objets aussi variés que des pièces d'habillage intérieures d'automobiles, des coques de bateau, des meubles, des pièces de capotage, des bardages, etc.

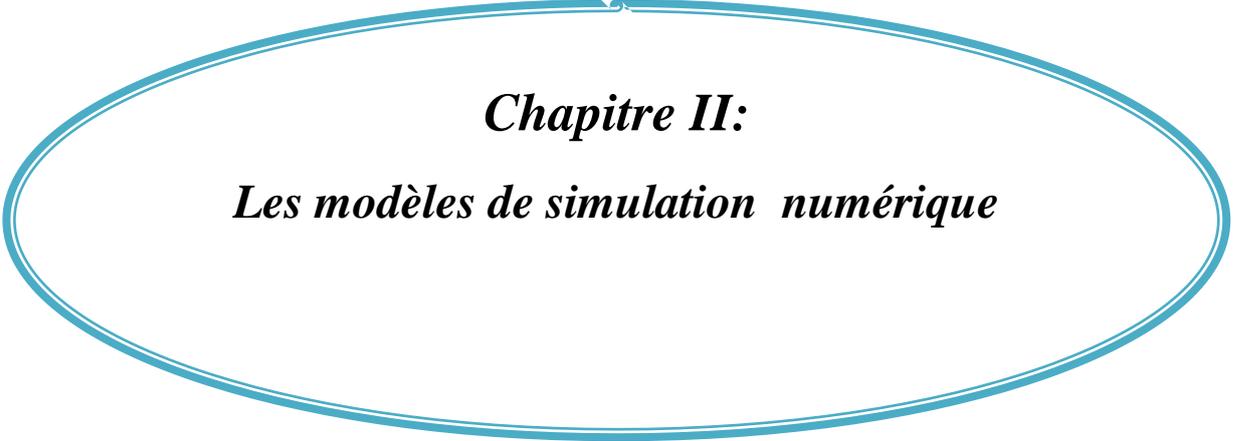
Cependant, les propriétés mécaniques des matériaux composites à charges végétales sont très sensibles à différents paramètres notamment : la nature et la quantité des constituants, leur morphologie, le taux de fibres, ainsi que leur orientation et leur état de dispersion dans la matrice, en plus de l'humidité et de la température. [42]

Références

- [1] A. R. Blythe, Electrical resistivity measurements of polymer materials, . 4, 195-209 (1984)
- [2] Y. Li, Y. W. Mai, L. Ye, Sisal fibre an dits composites: a review of recent developments, 60, 2037-2055 (2000)
- [3] P. V. Joeseeph, G. Mathew, K. Joeseeph, G. Groeninckx, S. Thomas, Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites, 34, 275-290, (2003)
- [4] Anh Vu Nguyen. Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances de systèmes robotiques, (2015)
- [5] Avner Friedman. predicting properties of composite material. Mathematics in Industrial Problems pp 99-111 (1992) https://doi.org/10.1007/978-1-4615-7405-7_10
- [6] F. Dalmaso, J. Mézières, Calcul des propriétés élastiques des tissus utilisés dansles matériaux composites, Institut Français du Pétrole. (1998)
- [7] Maurice Reyne. Les plastiques. Edition Hermès, paris. 189 (1990)
- [8] W.D. Calliste Jr., Science et Génie des matériaux, Edition Dunod, Mont-Royal, Québec, 463 (2001)
- [9] Gay D. Matériaux composites. 3éme édition. Paris : Hermès (1991)
- [10] N. Chawla, K. K. Chawla ,Metal Matrix composites. (2006)
- [11] HASSANI Dhiba, Etude de l'effet des Nanoparticules sur l'endommagement de l'interface d'un Bio-Nanocomposite, mémoire master, Université Dr. Tahar Moulay saida 6 (2017).
- [12] .K. K. Chawla. Ceramic Matrix Composites, (2003)
- [13] R.E. Shalin ,Polymer Matrix Composites, Chapman & Hall, (1995)
- [14] El Hadji Babacar LY. Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose, (2008)
- [15] Renard J. Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère (2005)

- [16] Y. Li, Y. W. Mai, L. Ye, Sisal fibre an dits composites: a review of recent developments. 60, 2037-2055 (2000)
- [17] Gornet L. Généralités sur les matériaux composites (2010)
- [18] Roger Rethon, Particulate-filled Polymer Composites. (2003)
- [19] P.K. Mallick, Fiber-Reinforced Composites: Materials (1993)
- [20] G. H. Staab, Laminar Composites. (1999)
- [21] Prombut. P. Caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiées composites multidirectionnels. (2007).
- [22] Sandali A, Rabhi N. comportement au choc des stratifiées composites renforcées par des fibres naturelles (2013)
- [23] Cutter AG. Development and Characterization of Renewable Resource-based Structural Composite Materials. (2008)
- [24] Błędzki A. K, Jaszkiwicz A, Urbaniak M, Stankowska-Walczak D, Biocomposites in the Past and in the Future , 20 (96), 15-22 (2012)
- [25] Błędzki A. K, Jaszkiwicz A, Urbaniak M, Stankowska-Walczak D, Biocomposites in the Past and in the Future , 20 (96), 15-22 (2012)
- [26] F. Michaud. Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage, (2003)
- [27] A. Y. Nenonene. Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kéraf et de bio adhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage (2009)
- [28] David Violeau. Une stratégie de calcul pour l'analyse à l'échelle micro des endommagements jusqu'à rupture des composites stratifiés (2007)
- [29] A. Mahfoudh. Étude de la production et de la caractérisation de composites bois /plastiques, 101 (2013)
- [30] S. Nekkaa. Etude des propriétés d'un nouveau matériau composite à base de polypropylène renforcé par des fibres végétales locale le Genêt d'Espagne, 148 (2007)
- [31] R.G. Raj, B.V. Kokta, D. Maldas, C. Daneault, Use of wood fibers in thermoplastics. VII. The effect of coupling agents in polyethylene-wood fiber composites». 37, 1089-1103 (1989)

- [32] J. George, K. Joseph, S.S. Bhagawan, S. Thomas. Influence of short pineapple fiber on the viscoelastic properties of low density polyethylene. 18 163-170 (1993)
- [33] K.C.M. Nair, S.M. Diwan, S. Thomas, Tensile properties of short sisal fiber reinforced polystyrene composites».60, 1483-1497 (1996)
- [34] X. Chen, G. Qipeng, M. Yongli. Bamboo fiber-reinforced polypropylene composites: a study of the mechanical properties».69, 1891-1899 (1998)
- [35] D.K. Ray, B.K. Sarkar, N. Bose. The mechanical properties of vinylester resin matrix composites reinforced with alkali-treated jute fibers. 32, 119-127 (2001)
- [36] A. Bismarck, S. Mishra, T. Lampke, in Natural Fibers, Biopolymers and Biocomposites, 37 (2005)
- [37] S. Shibata, I. Fukumoto, Y. Cao. Effects of fiber compression and length distribution on the flexural properties of short kenaf fiber-reinforced biodegradable composites, 27, 170-176 (2006)
- [38] F. Roussière, L. Vrévin, D. Burr, C. Baley, « Etude du comportement mécanique en traction de composites polyester/mats de fibres végétales (lin et chanvre) 18 (2008)
- [39] A. Fadel et H. Hazam. Etude des propriétés d'agromatériaux composites PEBD/farine de Genêt d'Espagne avant et après mercerisassent. 74 (2010)
- [40] D. El Hadji Babacar LY. Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose. 218 (2008)
- [41] C. Zamprogno et P. Hourçourigaray. Nautisme et Composites BioSourcés. 31, (2012)
- [42] Marrot L., Bourmaud A., Bono P., Baley C. Multi-scale study of the adhesion between flax fibers and biobased thermoset matrices. 62,47-56, (2014)



Chapitre II:

Les modèles de simulation numérique

1. Introduction

Pour étudier le comportement de l'interface fibre/matrice dans un matériau composite, des méthodes classiques sont spécialement conçues. Elles utilisent souvent l'adhésion d'une fibre unitaire et s'appliquent à des échantillons, dits « composites modèles », contenant une seule fibre entourée de résine. En plus, des modèles micromécaniques ont été établies pour décrire le transfert de charge entre la fibre et la matrice au niveau de l'interface [1].

La plupart des études considèrent que la réponse d'un matériau composite suite à un essai d'indentation est en fonction des caractéristiques mécaniques des éléments constituant le matériau global et essentiellement les caractéristiques de l'interface.

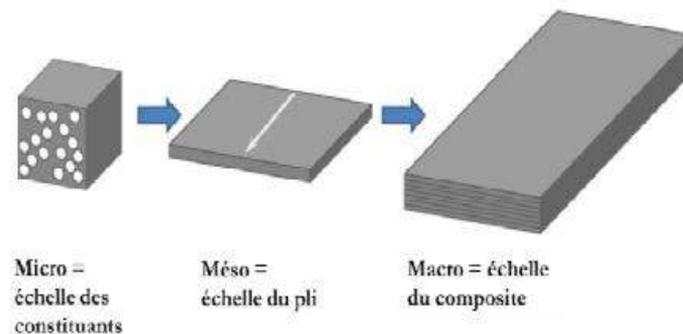


Figure II.1 : échelles d'études dans le matériau composite.

2. Endommagements des matériaux composites

La ruine des matériaux composites est un phénomène très complexe où plusieurs mécanismes d'endommagement différents apparaissent et interagissent. Ces phénomènes prennent naissance à l'échelle microscopique (micro-fissuration matricielle, apparition de micro-vides) et conduisent à des mécanismes macroscopiques (délaminage, macro-fissures matricielles, décohésion fibre-matrice, rupture des fibres). Chaque constituant (fibre,

matrice) ou interface peut être affecté par un mécanisme d'endommagement (tableau 1) [2]

Fibre	matrice	Interface	
		Inter-ply	Fibre-matrice
Rupture des fibres	Micro- fissuration Micro- vides Macro fissuration	délaminage	Décohésion fibre- matrice

Tableau II.1 : Types d'endommagement dans les composites stratifiés [2]

Ces phénomènes sont schématisés sur la figure II.2. De nombreux facteurs ont une influence sur l'apparition puis l'évolution des différents mécanismes d'endommagement. ces facteurs peuvent être le type de sollicitation (statique/fatigue), la direction du chargement, le type d'empilement, la température, l'humidité... la suite de cette section passe en revue d'une manière plus détaillée les différents modes d'endommagement [2]

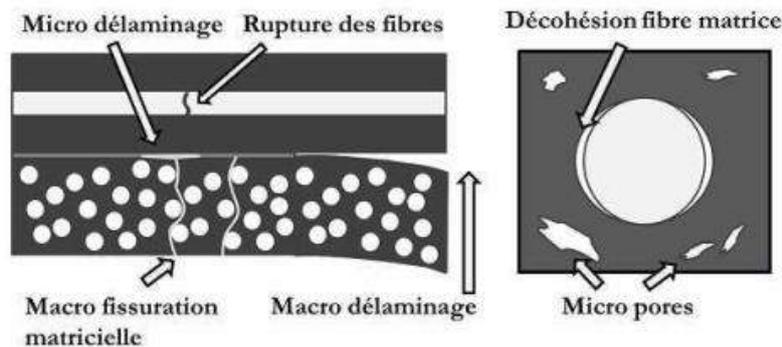


Figure II.2 : Schéma des différents endommagements dans les stratifiés.

2.1 Modèles à l'échelle microscopique de fibre/ matrice

La micro fissuration et la décohésion fibre-matrice sont les premiers endommagements qui apparaissent si la matrice subit un chargement important. Ces défauts à l'échelle microscopique sont le lieu privilégié pour l'amorçage

des endommagements à l'échelle supérieure, notamment des microfissures, par coalescence [3].

Les causes de ces décohésions sont variées. On peut citer, par exemple, la présence de micro-défauts au niveau de l'interface fibre – matrice (comme des micro-vides) qui entraîne l'amorçage des décohésions, mais aussi les contraintes d'origine thermique (pendant la cuisson) ou l'état de contrainte local induit par la répartition aléatoire des fibres [4].

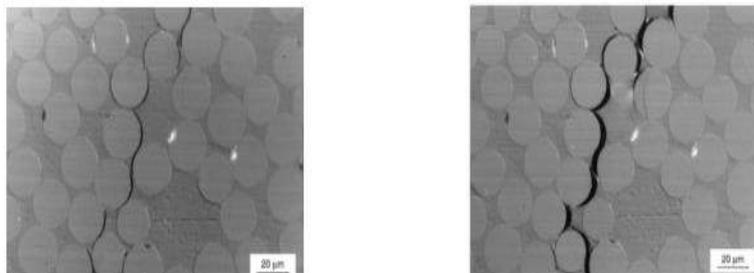


Figure II.3: fissure matricielle formée à partir de la coalescence des décohésions et microfissures matricielles.

2.2 Modèles à l'échelle mésoscopique (pli)

L'échelle mésoscopique est l'échelle de travail le plus communément utilisée, probablement parce qu'elle combine un bon niveau de finesse de description du comportement et une souplesse suffisante pour rendre possible le calcul de structures de grande taille. L'exemple le plus connu de cette catégorie est le « méso- modèle » [5,6].

Dans le cadre de l'étude des composites, la tomographie X est essentiellement utilisée pour caractériser l'endommagement correspondant à des « zones de fracture » apparaissant au sein du matériau à l'échelle mésoscopique. Par exemple, Shilling et al ont observé les porosités, les fissures et les zones de décohésion qui se sont développées dans un composite unidirectionnel verre/époxy préalablement sollicité en fatigue [7]

2.3. Modèles à l'échelle macroscopique (stratifiés)

Dans leur forme « usuelle », ces essais sont associés à une métrologie ne pouvant fournir que des observables macroscopiques. La qualité de l'adhésion de la matrice ne peut donc être estimée que de façon indirecte. Il faut alors comprendre comment les caractéristiques de la zone interfaciale influent sur les propriétés mécaniques macroscopiques mesurées. Pour étudier ces propriétés macroscopiques, il existe essentiellement trois grandes familles d'essais normalisés : traction, flexion et cisaillement. Tous ces essais permettent de quantifier des grandeurs macroscopiques : un module d'élasticité et une propriété ultime du matériau, par exemple la résistance au cisaillement ou à la traction. De nombreuses études ont montré que le module d'élasticité ne dépend pas de la qualité de l'adhésion fibre-matrice [8,9]. En revanche, pour certaines configurations d'essais : essais de cisaillement ou essais de traction transverse aux fibres, il a été vérifié que la qualité d'adhésion influe sur les propriétés ultimes du matériau [8-10]

3. Interface fibre-matrice

La notion d'adhésion ne peut être dissociée de la nature des surfaces impliquées. Ces dernières présentent des propriétés qui les rendent plus ou moins idéales.

Les phénomènes d'adhésion aux interfaces fibre-matrice jouent un rôle essentiel sur les propriétés des matériaux composites. Les interfaces sont le siège de phénomènes physico-chimiques complexes. Ces derniers sont dus aux interactions moléculaires entre deux matériaux de nature et de propriétés différentes.

Ces interfaces doivent être en mesure de supporter toutes contraintes mécaniques, résiduelles ou externes, et les transmettre de matrice à la fibre pour que les matériaux

composites présentent les propriétés mécaniques requises [11]

Selon Bantus et al, la taille de la section des fibres influence considérablement sur la microstructure de l'interface fibre-matrice [12]

- Pour les micros fibres :

Les fibres ont des diamètres inférieurs ou égaux à celui des particules de ciment ($\leq 70\mu\text{m}$). Les diamètres des fibres et des particules de ciment sont du même ordre de grandeur. Donc la microstructure de l'interface est dense et peu différente à celle de la matrice.

- Pour les macros fibres :

Les fibres ont des diamètres supérieurs à celui des particules de ciment. La microstructure de l'interface ressemble à celle de l'auréole de transition de granulats dans le béton. Sa formation est entre autre due à un effet de paroi et de ressuage au niveau de l'interface. Elle peut se composer d'un film duplex, d'une couche discontinue de cristaux issus de l'hydratation de ciment et d'une zone poreuse.

L'adhésion inter faciale est une combinaison de trois phénomènes agissant simultanément à des degrés différents :

- Interpénétration mécanique entre la pâte de ciment et la surface de la fibre
- Adhésion physique moléculaire
- Adhésion chimique

4. Modélisation de l'interface fibre-matrice

Afin d'assurer une bonne compatibilité des fibres végétales avec la matrice, il existe de nombreuses techniques. Ces dernières permettant la mise en place de liaisons chimiques au niveau de l'interface. Ces diverses techniques peuvent être divisées en deux catégories : les méthodes de modification physiques et les méthodes chimiques. Le but de ces modifications est l'amélioration de l'adhésion par la création de liaisons qui n'existaient pas au paravent. La surface est donc au cœur de l'action et subit des modifications [11].

5. Rôle des interfaces et des interphases

Cette liaison est constituée d'une ou plusieurs interphases et interfaces. L'interphase est une zone concentrique à la fibre, d'épaisseur fine et de nature

chimique définie. 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 [13,14].

Le problème qui se pose lors de la conception d'un composite est de savoir quelle doit être l'intégrité de la liaison fibre-matrice sur le plan physico-chimique et sur le plan mécanique [15-17].

5.1. Interface fibre matrice très forte

Dans ce cas, l'adhésion entre la fibre et la matrice est parfaite et la déformation des deux constituants est élastique. Il n'y a aucun déplacement relatif entre fibre et matrice, et donc 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 et de la discontinuité, une fissuration matricielle peut se propager de différentes façons, qui correspondent à des modes de propagation définis.

Dans le cas d'une liaison fibre-matrice forte, une fissure se propageant en mode différent de celui de la matrice, sans consommation d'énergie importante. Il en suit une rupture prématurée de la fibre, qui ne peut plus jouer son rôle de renfort. Ce type de matériau possède un comportement fragile [18].

5.2. Interface fibre matrice très faible

Dans les cas des liaisons fibre-matrice faibles, les modèles supposent que les fibres et la matrice ne sont pas ou plus physiquement liés sur une certaine distance, et le déplacement relatif entre les deux se fait avec un frottement interfacial constant [19]. Dans le cas des composites à matrice céramique, l'intensité de cette contrainte (σ^*) résulte de la superposition de plusieurs phénomènes intervenant à l'interface fibre-matrice [20].

5.3. Interface fibre-matrice intermédiaire

Dans le cas d'une force de liaison fibre-matrice intermédiaire, le composite présente un comportement dit pseudo-ductile, provenant de la multi fissuration

progressive de la matrice et du transfert des efforts des zones rompues vers les zones plus rigides. La rigidité du matériau diminue alors progressivement en cours de la sollicitation. Le type de comportement permet au composite d'avoir une contrainte à la rupture plus élevée. Ce dernier cas est bien entendu celui souhaité pour un composite optimal [21].

6. Caractérisation mécaniques

Les deux types d'essai mécaniques (traction et flexion 3 points) sont effectués à l'aide d'une machine universelle ZWICK/ROELL. Le banc d'essai est équipé de mors auto serrant et d'une cellule de force ayant une capacité de 5KN. Son pilotage se fait par le logiciel TESTEXPERT qui permet à la fois de consigner les paramètres d'essais, d'acquérir et de traiter les données [21]



Figure II.4 : une machine de traction [21]

7. Essai de traction sur les fibres

Pour l'étude du comportement à la traction des fibres nous nous sommes amenés à introduire la notion de distribution des contraintes à la rupture (statistique de Weibull).

7.1. Modèle de statistique

Les fibres reprennent presque la totalité de l'effort axiale, par conséquent, contrôlent la rupture du composite. Etant donné que ces dernières sont constituées de matériaux fragiles (verre, alfa, graphite, par exemple), la rupture s'initie habituellement à la racine d'une fissure ou d'un défaut. [22]

La fibre peut être modélisé par une chaîne dont les différents maillons partagent la même charge mais ont des résistances ultimes différentes.

Il y aura rupture de la chaîne ou de la fibre lorsque la contrainte axiale aura atteint la valeur de la contrainte ultime du lien le plus faible. Ce concept est souvent désigné par la théorie du lien faible (TLF). De plus, la répartition et la taille des défauts, ou plutôt la résistance ultime d'un lien, suit une certaine distribution statistique. En effet, les défauts sont généralement introduits par des causes inconnues ou hors conte) à rôle dont la somme des effets peut être modélisée par une distribution statistique [22].

7.2. Modèle de Weibull

L'analyse semi-empirique de Weibull est souvent utilisée dans le cas d'un état de contrainte uni axial et pour les matériaux fragiles. Elle consiste à relier la probabilité d'une population échantillon survivants à un essai de chargement on divise la fibre en N segments dans lesquels la contrainte est supposée uniforme est égale à σ_u . La probabilité pour qu'un segment soit rompue à la contrainte σ_u est $F(\sigma_u)$.

$F(\sigma_u)$ est la fonction de densité de probabilité définie par :

$$F(\sigma_i) = \int_0^{\sigma_i} f(\sigma) d\sigma \quad (1)$$

Si σ_R est la résistance théorique à rupture du matériau :

$$F(\sigma_r) = \int_0^{\sigma_R} f(\sigma) d\sigma = 1 \quad (2)$$

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

$$R = \prod_{i=1}^N (1 - F(\sigma_i)) \quad (3)$$

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

$$R = (1 - F(\sigma_i))^N \quad (4)$$

La probabilité pour que la fibre soit rompue est alors :

$$P_r(\sigma) = 1 - R = 1 - (1 - F(\sigma_i))^N \quad (5)$$

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

$$(1 - F(\sigma_i))^N = \exp(-NF(\sigma)) \quad (6)$$

Le nombre de maillons 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 :

$$\Phi(\sigma) = \frac{(\sigma - \sigma_u)^m}{\sigma_1}, \sigma > \sigma_u \quad (7)$$

$$\Phi(\sigma) = 0, \sigma \leq \sigma_u \quad (8)$$

Avec :

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

σ_0 : facteur d'échelle. C'est la contrainte pour laquelle la probabilité de rupture est de 0.63 pour un volume c'est une contrainte de normalisation sans signification scientifique.

σ : la contrainte appliquée.

m : paramètre de Weibull rendant compte de la largeur de la distribution.

Ce paramètre caractérise la dispersion de la taille des défauts. Une valeur élevée du paramètre m indique que les défauts le long de la fibre ont une taille relativement similaire. Une faible valeur de m révèle que les défauts présents à la surface de la fibre ont des dimensions très diverses et donc entraînent la rupture pour des valeurs de contraintes très différentes [23,24].

Dans la pluparts 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 un contrainte σ est alors donnée par :

$$Fr(\sigma) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (9)$$

Plusieurs méthodes pour déterminer les paramètres de Weibull m et σ_0 à partir des données expérimentales. Elles peuvent être réparties en deux catégories :

- Celles qui consistent à linéariser l'équation (9) appelées linéarités méthodes ;
- Celles basées sur l'ajustement des données expérimentales avec l'équation (9) appelée non linéaire équation méthodes [25].

7.2.1. Méthode graphique

La méthode graphique peut être dérivée à partir de l'équation :

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-p_i}\right)\right) = m \ln(\sigma) - m \ln(\sigma_0) + \ln(l) \quad (10)$$

Le problème principal de la méthode réside dans l'estimation des valeurs de l'estimateur p_i de telle manière que les valeurs de m et σ_0 calculées à partir des estimateurs impartiaux des valeurs réelles.

Généralement la valeur de p_i est estimée par une fonction connue sous le nom d'indice de probabilité (ou estimateurs). Quatre fonctions différentes des indices ont :

$$p = \frac{i}{n+1} \quad (11)$$

Avec :

n : le nombre total d'échantillons testés

i : le numéro d'ordre de l'éprouvette

Le tableau II.2 illustre les résultats obtenus par l'estimateur de Weibull :

Module de Young Estimé par le modèle Weibull [MPa]	Déformation estimé par le modèle Weibull [%]	Contrainte estimé par le modèle Weibull [MPa]
8.875	2.67	165.20

Le tableau II.2 : les résultats de Weibull [25]

7.3. Modèle de Cox

Un composite ne peut remplir pleinement sa fonction mécanique que si les charges appliquées au matériau peuvent être transmises de la matrice à la fibre. [26]

Ce transfert de charge est bien entendu largement conditionné par la réponse mécanique de la zone de contact entre la fibre et la matrice, autrement dit de l'interface ou de l'interphase. [27]

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 de cisaillement à l'interface. A partir de ces données, il est possible d'évaluer la courbe contrainte-déformation du composite. [27]

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.

7.3.1 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 . Il s'agit donc d'une approche monodimensionnelle dans laquelle la contrainte axiale dans une section donnée de la fibre est supposée uniforme. [27]

La fibre et la matrice sont supposées parfaitement élastiques et la liaison fibre/matrice parfaite.

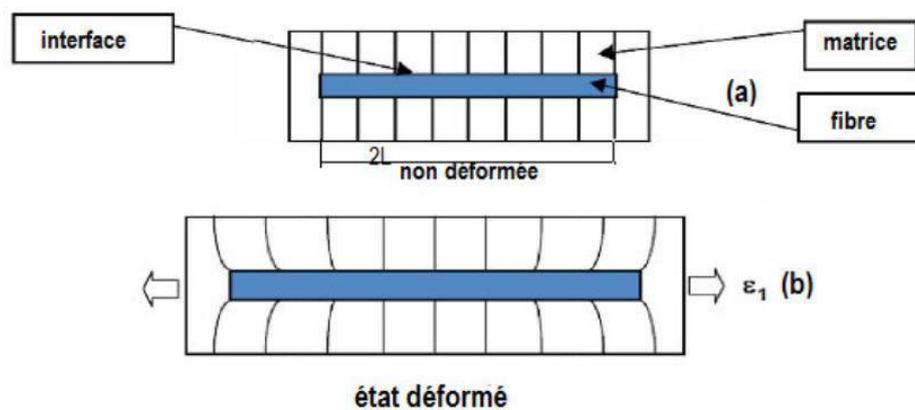


Schéma simplifié du champ de contrainte autour de la

fibre.

(a) Sans chargement; (b) chargé.

Figure II.5 : volume élémentaire représentatif. [27]

7.4 Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface

7.4.1 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:

$$2\pi r dx = 2\pi a \tau_i dx \quad (12)$$

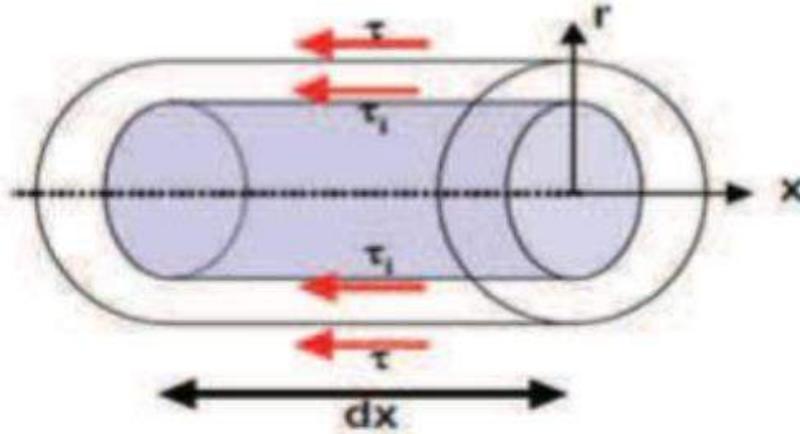


Figure. II.6 : équilibres de la matrice en cisaillement [27]

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

$$\tau = \frac{a\tau_i}{r} \quad (13)$$

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

$$\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau}{G_m} = \frac{a\tau_i}{G_m r} \quad (14)$$

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):

$$\int_a^R dw = \frac{\tau_i a}{G_m} \int_a^R \frac{dr}{r} \quad (15)$$

Soit :

$$w_R - w_a = \frac{\tau_i}{G_m} \ln\left(\frac{R}{a}\right) \quad (16)$$

$$\tau_i = \frac{G_m(w_R - w_a)}{a \ln\left(\frac{R}{a}\right)} \quad (17)$$

7.4.2 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:

$$\pi a^2 d\sigma_f = -2\pi a \tau_i dx \quad (18)$$

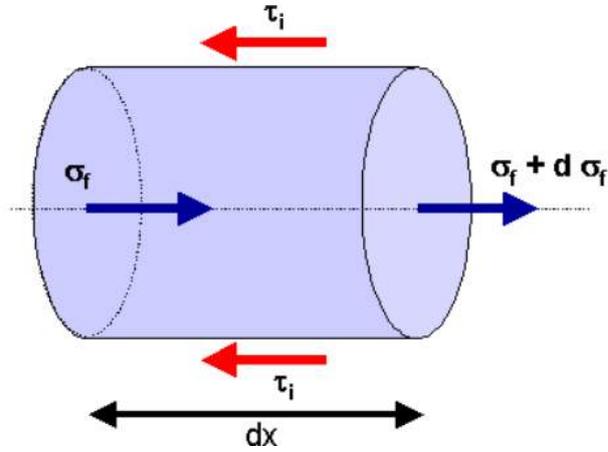


Figure II.7: Equilibre élastique d'une portion de fibre. [27]

Ce qui permet d'écrire:
$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_i}{a} \quad (19)$$

$$\frac{d^2\sigma_f}{dx^2} = -\frac{2}{a} \frac{d\tau_i}{dx} \quad (20)$$

on obtient :
$$\frac{d\tau_i}{dx} = \frac{G_m}{a \ln(R/a)} \left(\frac{awR}{dx} - \frac{dwa}{dx} \right) \quad (21)$$

Pour $r = R$: on suppose que la déformation de la matrice est égale à la déformation appliquée
$$\frac{dwR}{dx} = \varepsilon_m = \varepsilon_1 \quad (22)$$

Ce qui permet de décrire l'équilibre élastique du système par l'équation différentielle suivante:
$$\frac{d^2\sigma_f}{dx^2} = \frac{\beta^2}{a^2} (\sigma_f - E_f \varepsilon_1) \quad (23)$$

Avec:
$$\beta^2 = \frac{2G_m}{E_f \ln(R/a)}$$

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

B.1 Contrainte axiale dans la fibre

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \left\{ 1 - \frac{\cosh(\beta x / r)}{\cosh(\beta s)} \right\} \quad (24)$$

B.2 Contrainte de cisaillement à l'interface

$$\tau_i = \frac{1}{2}\beta E_f \varepsilon_1 \sinh(\beta x/r) / \cosh(\beta s) \tag{25}$$

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

$$\tau_i = \frac{1}{2}\beta E_f \varepsilon_1 \sinh(\beta x/r) / \cosh(\beta L/a) \tag{26}$$

Les profils de contrainte correspondant aux équations de contrainte axiale dans la fibre et contrainte de cisaillement à l'interface sont représentés ci-dessous:

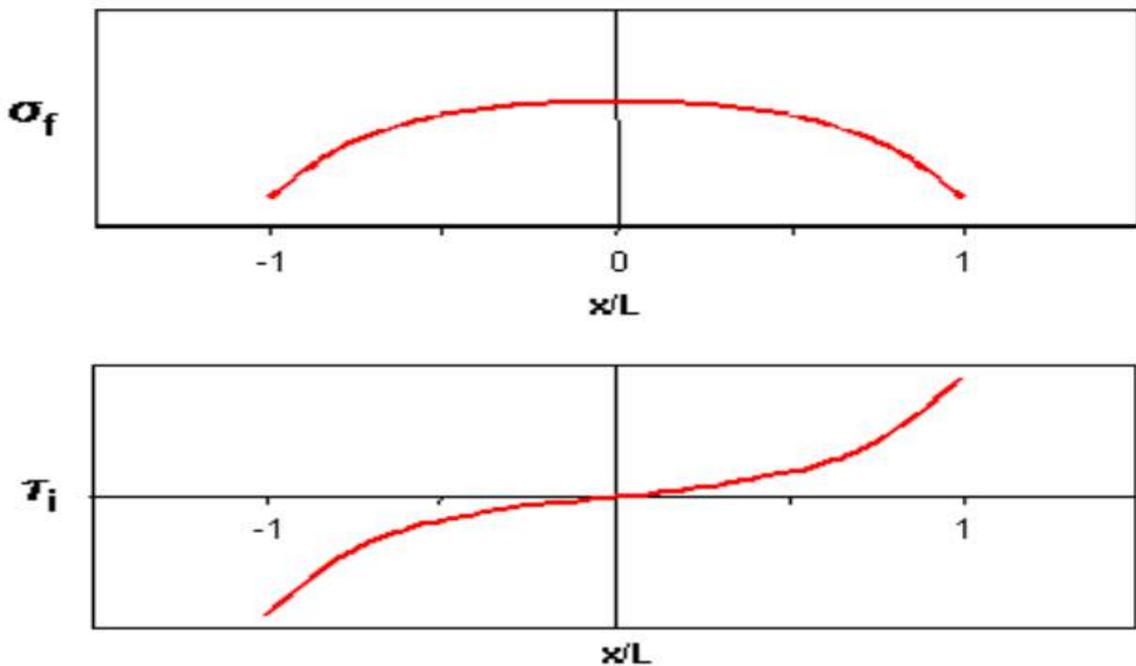


Figure II.8: Modèle de Cox -Profils de contrainte dans la fibre (σ_f) et à l'interface (τ_i). [27]

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 d'un écheveau de fibres Pour une seule fibre entourée par la matrice, de nombreuses solutions analytiques ont été intéressant de voir l'influence du contraint thermique sur les dégâts de l'interface proposés par Cox [27], ce qui

donne la forme de la contrainte de cisaillement le long de la longueur fibre que

$$\text{la forme suivante: } \tau = \frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta_1 \text{th}(\beta_1 l/2) \quad (27)$$

$$\text{Pour simplifier les calculs, nous prenons } \beta_1^2 = \frac{2G_m}{E_f r_f^2 \ln(\frac{R}{r_f})} \quad (28)$$

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.

Ces variables relatives à des composants d'un matériau composite (fibre et matrice)

II.8.Conclusion

Les modèles tentent à prédire des phénomènes physiques. Ils ne sont fondés que sur une succession d'hypothèses plus ou moins fortes et sont basés sur une certaine forme d'idéalisation de la réalité. Leurs précisions sont fortement dépendantes du degré d'idéalisme choisi. Mais, tenter de se rapprocher de la réalité a fortement un coût (alimenter le modèle de plus de paramètres pourra parfois compliquer dans certains cas le calcul). [28]. L'avantage des méthodes d'homogénéisation est qu'elles permettent d'estimer les propriétés macroscopiques d'un matériau hétérogène à partir des propriétés des différentes phases qui le constituent et de certains paramètres caractérisant leurs répartitions spatiales, elles permettent d'autre part d'analyser l'influence du taux de résine et de la géométrie des renforts sur le comportement macroscopique. [28]

Références

- [1] Moez frikha, Neila Masmoudi, Chedly Bradaï. Comportement de l'interface dans un matériau composite », Laboratoire des Systèmes Electromécaniques, Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax. 16, (2006)
- [2] Juan Pedro berro Ramirez. Caractérisation et modélisation de l'endommagement des composites bobines. Application a la prédiction de l'éclatement des réservoirs bobines Hyperbares., thèse pour l'obtention du grade de docteur de l'école nationale supérieure de mécanique et d'aérotechnique,33 (2014)
- [3] Gamstedt EK, Sjögren BA. Micromechanisms in tension-compression fatigue of composite laminates containing transverse plies. *Composite Science and Technology*, 59,167–78, (1999)
- [4] Gentz M, Armentrout D, Rupnowski P, Kumosa L, Shin E, Sumter JK, et al. Inplane shear testing of medium and high modulus woven graphite fiber reinforced/polyimide composites. *Composites Science and Technology*, 64,203–20, (2004)
- [5] Gasser a., Ladeveze P, Peres P. Damage modelling for a laminated ceramic composite. *Materials Science and Engineering*, 250,249–55, (1998)
- [6] Lubineau G, Ladeveze P. An enhanced mesomodel for laminates based on micromechanics. *Composite Science and Technology*, 62,533–41, (2002)
- [7] P. J. Schilling, B. R. Karedla, A. K. Tatiparthi, M. A. Verges, and P. D. Herrington, "X-ray computed microtomography of internal damage in fiber reinforced polymer matrix composites," 65. 2071–2078 (2005)
- [8] M. S. Madhukar and L. T. Drzal. Fiber-matrix adhesion and its effect on composite mechanical properties: I. Inplane and interlaminar shear behavior of graphite/epoxy composites. 25. 932–957 (1991)
- [9] M. S. Madhukar and L. T. Drzal. Fiber-matrix adhesion and its effect on composite mechanical properties. III. Longitudinal (0) compressive properties of graphite/epoxy composites. 26. 310–333 (1992)
- [10] M. S. Madhukar and L. T. Drzal. Fiber-matrix adhesion and its effect on composite mechanical properties: II. Longitudinal (0) and transverse (90) tensile and flexure behavior of graphite/epoxy composites 2.958–991 (1991)

- [11] F. Michaud, Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage (2003)
- [12] A.Bentur, N .Bentia, J.D.Baggot, "Fiber-matrix interface pre –proceeding of international Workshop on high performance fiber reinforced composite " vol 2.416 (1995)
- [13] Bertrand, S., Pailler, R., and Lamon, J., SiC/SiC minicomposites with nanoscale multilayered fibre coatings. *Composites Science and Technology*, 61 363-367 (2001)
- [14] Kerans, R.J., et al., The role of the fiber-matrix interface in ceramic composites. 68. 429-442 (1989)
- [15] Cherouali, H., et al., Influence of Serrated Sliding on Subsequent Steady Slip in Single Filament Model Composite SiC/Pyrex. *Scripta Materialia*, 36,. 1283-1288 (1997)
- [16] Kalton, A.F., et al., Measurement of interfacial fracture energy by single fiber push-out testing and its application to the titanium-silicon carbide system., 46 3175-3189 (1998)
- [17] Rouby, D., et al. Rugosité interfaciale et test d'indentation sur composite à matrice céramique. 21-25 (2002)
- [18] Marshall, D.B. An Indentation Method for Measuring Matrix-Fiber Frictional Stresses in Ceramic Composites. *Am. Ceram. Soc*,67, 259-260(1984)
- [19] Marshall, D.B., An Indentation Method for Measuring Matrix-Fiber Frictional Stresses in Ceramic Composites. *Am. Ceram. Soc.* 67 259-260 (1984)
- [20] Marshall, D.B. and Oliver, W.C., Measurement of interfacial mechanical properties in fiber-reinforced ceramic composites. 70 542- 548 (1987)
- [21] M. Lévesque. L'essai de traction de matériaux composite à fibre continue, (2000)
- [22] A.Bendahou, Y.Habibi, H. Kaddafi et A, Duferesne"Composite Material based on lingo-cellulosique fiber and thermoplastic matrices (IPP and LDPE),54(7), 557–563,(2009)

- [23] A.Bendahou, Y.Habibi, H. Kaddafi et A, Duferesne. Composite Material based on lingo-cellulosique fiber and thermoplastic matrices (IPP and LDPE) 54 (7) 557–563 (2009)
- [24] P. Zinck, M. F. PaysR. Rezakhanlou, J. F. Gerard. Mechanical characterization of glass fibers as an indirect analysis of the effect of surface treatment. 34 2121- 2133 (1999)
- [25] I. J. DAVIES. Best estimate of Weibull modulus obtained using linear least squares analysis: An improved empirical correction factor. Journal of Material Science 39, 1441 – 1444, (2004)
- [26] HOUIDEG Abdellah. 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)
- [27] H.L.Cox, L'élasticité et la résistance du papier et d'autres matières fibreuses. 12, 72-79 (1952)
- [28] N. Huy-Gia, O. Sophie, G. Elhem. Une application des méthodes d'homogénéisation pour le comportement élastique de Bétons à Matrices Organiques.http://oldgc.iut-nimes.fr/internet/augc/Papiers/045_ngu.pdf, consulté Mai (2019).



Chapitre III :
Les modèles métaheuristiques

1. Introduction

Les algorithmes génétiques (AG) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils ont été initialement développés par John Holland (1975) [1]. Leurs champs d'application sont très vastes, les raisons de ce grand nombre d'application sont la simplicité et l'efficacité de ces algorithmes. Les AG s'inspirent des mécanismes de l'évolution biologique et les transposent à la recherche de solutions adaptées au problème qu'on cherche à résoudre. [1]

L'avantage majeur des algorithmes génétiques est qu'ils ne nécessitent aucune condition sur la structure du problème ou de sa fonction objective comme la modularité, la continuité ou la différentiabilité : ce qui les rend convenables pour la résolution des problèmes combinatoires non convexes [1].

Le terme Monte-Carlo fut popularisé dans les années 1940 par des physiciens travaillant sur un projet d'armes nucléaires au laboratoire national de Los Alamos, le projet Manhattan de la deuxième Guerre Mondiale. Parmi ceux qui ont contribué à l'utilisation de ce nom, notons Stanislaw Ulam, Enrico Fermi, John Von Neumann ainsi que Nicholas Metropolis. Le nom fait référence au Monte-Carlo Casino de Monaco où l'oncle d'Ulam avait l'habitude d'aller jouer. Le nom Monte-Carlo fut inspiré des similarités entre les simulations stochastiques et les jeux de hasard du casino [2].

La justesse et l'exactitude des résultats obtenus par la méthode Monte-Carlo reposent sur deux caractéristiques importantes :

- La première est la qualité des nombres aléatoires utilisés. En effet, un générateur de nombres aléatoires uniforme et sans corrélation est essentiel à l'exactitude des résultats.
- Deuxièmement, les méthodes Monte-Carlo reposent sur la loi des grands nombres, c'est-à-dire que la précision et la fiabilité des résultats obtenus augmentent avec le nombre de données échantillonnées.

Les méthodes Monte-Carlo furent utilisées au cours des dernières décennies dans un large éventail de domaines, de la physique à la chimie, en passant par la finance [3].

2. Les algorithmes génétiques

2.1 Terminologie propre aux algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques étant basés sur des phénomènes biologiques, il convient de rappeler au préalable quelques termes de génétique [4]

- Le codage: de l'élément de population : cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques.
- Individu : dans le cadre d'un algorithme génétique, l'individu est réduit à son chromosome constitué d'un ensemble de variables. C'est une solution potentielle au problème que l'algorithme génétique traite.
- Chromosome : un algorithme génétique traite des individus constitués d'une seule séquence de gènes appelée chromosome, alors que les organismes biologiques peuvent en avoir plusieurs. L'approche informatique idéalise le chromosome en le réduisant à un vecteur de gènes.
- Gène : c'est un segment de base de chromosome. Il caractérise la valeur d'une variable de la solution au problème que traite l'algorithme génétique.
- Population : ensemble d'individus artificiels ou naturels.
- Mutation : changement aléatoire d'un allèle au cours de la phase de reproduction.
- Croisement : échange de position entre des allèles de deux gènes de deux individus différents.
- Reproduction : duplication par croisement et mutation des chromosomes pour donner naissance à de nouveaux individus.
- Fonction objectif (fitness) : fonction quantifiant les performances d'un objectif visé : masse minimum, résistance maximum,
- Fonction d'adaptation ou fonction de performance : fonction regroupant plusieurs fonctions objectives et quantifiant les performances d'un individu avec une valeur numérique [4]

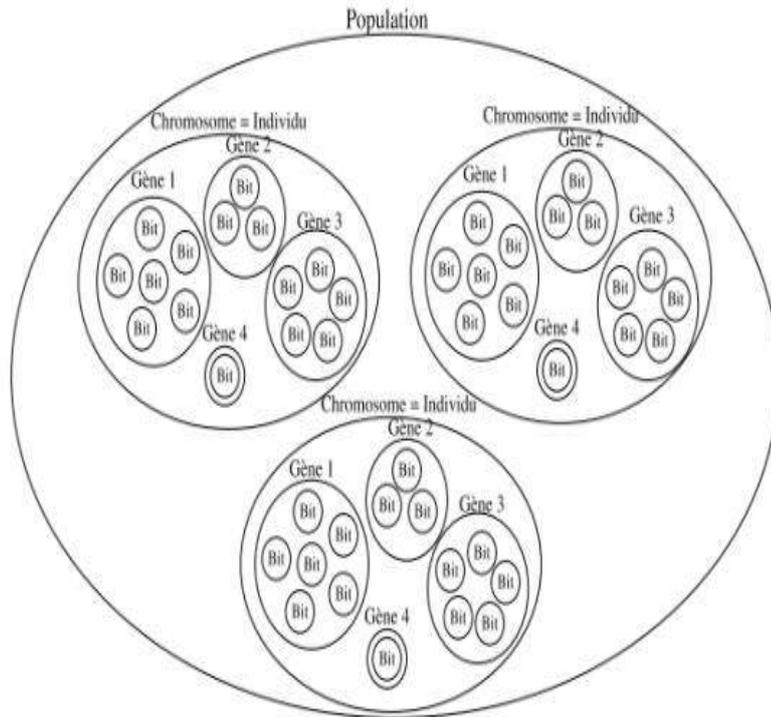


Figure III.1 : Exemple de la représentation génétique [1]

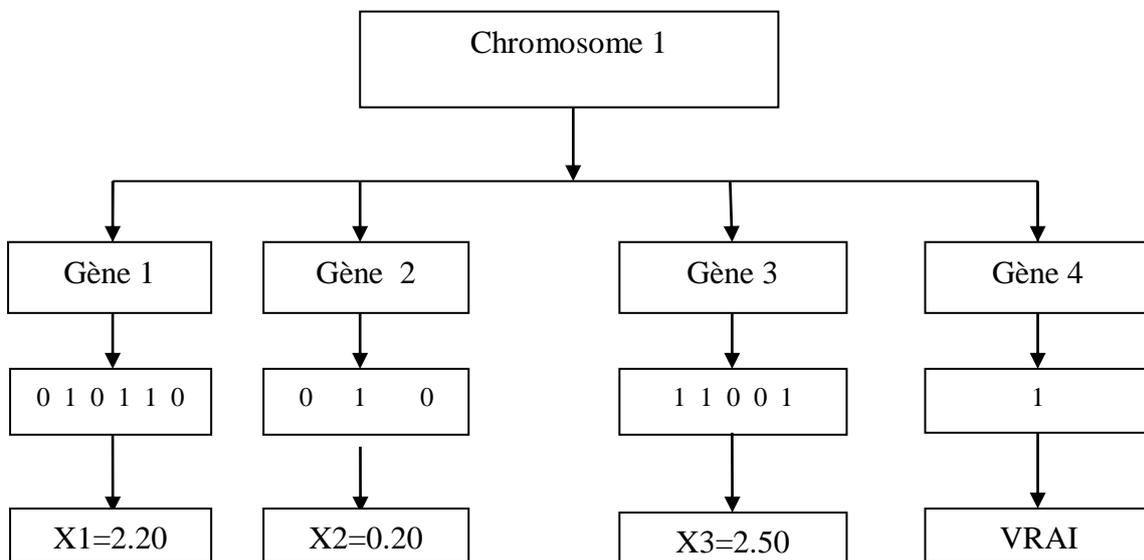


Figure III.2 : Exemple de la représentation génétique [1]

2.2 Le fonctionnement des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques ont une structure commune, AG opèrent de la même manière et suivent la même méthodologie. Chaque algorithme génétique est déterminé

par son cycle de base, qui est représenté par la figure III.3. Tout d'abord, un ensemble de solutions ou d'individus est généré afin de former la population initiale. Par la suite, les individus de la population sont évalués et sont classés dans la population. Ensuite, un sous-ensemble de parents est créé de façon à favoriser les meilleures solutions et à partir de cet ensemble, un groupe d'enfants est généré par des mécanismes de reproduction (mutation et croisement). Après avoir créé l'ensemble d'enfants, la performance de ceux-ci est évaluée, afin de comparer leur degré de performance par rapport au reste de la population et ainsi guider la construction de la nouvelle génération. Ensuite, le processus se répète à partir de cette nouvelle génération jusqu'à ce que soit atteint l'un des critères d'arrêts qui sont définis au départ [5]

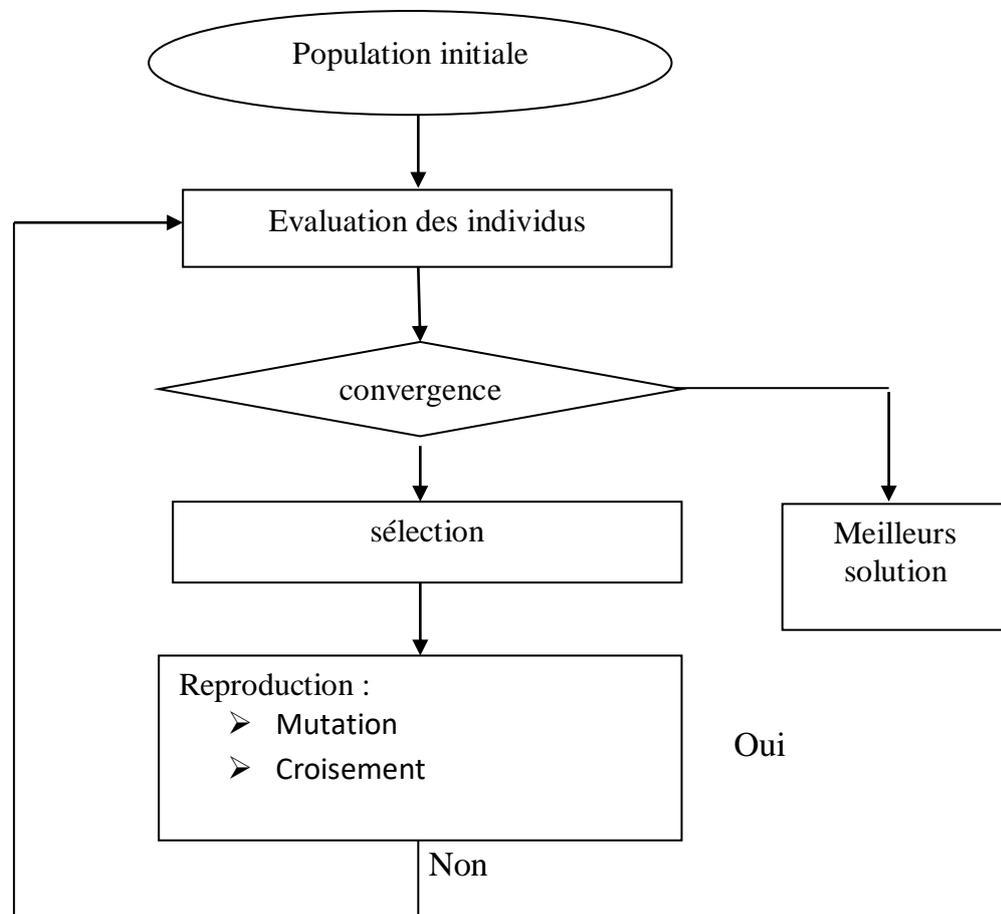


Figure III. 3 : l'organigramme d'un algorithme génétique

2.3 Génération de la population initiale

Le processus de l'optimisation par AG commence par choisir aléatoirement dans l'espace de recherche un nombre fini d'individus qui vont constituer la population initiale.

2.4 Evaluation et sélection

L'évaluation d'un individu ne dépend pas de celle des autres individus. Le résultat fourni par la fonction d'évaluation va permettre de sélectionner ou de refuser un individu pour ne garder que les individus ayant le meilleur coût en fonction de la population courante, c'est le rôle de la fonction de fitness. Cette méthode permet de s'assurer que les individus performants seront conservés, alors que les individus peu adaptés seront progressivement éliminés de la population. En d'autres termes, elle permet, à partir d'un chromosome, de calculer le coût d'un point de l'espace de recherche, de quantifier numériquement la validité de la solution qu'il représente et de mesurer la santé et le degré d'adaptation d'un individu à son environnement. Traditionnellement, cette fonction est croissante avec la qualité de la solution.

La sélection permet d'identifier statistiquement les meilleurs individus de la population courante qui seront autorisés à se reproduire. Cette opération est fondée sur la performance des individus, estimée à l'aide de la fonction d'adaptation. Il existe différents principes de sélection [6].

2.4.1 Sélection par roulette (Wheel)

Elle consiste à associer à chaque individu un segment dont la longueur est proportionnelle à sa fitness. Ces segments sont ensuite concaténés sur un axe gradué que l'on normalise entre 0 et 1. On tire alors un nombre aléatoire de distribution uniforme entre 0 et 1, puis on regarde quel est le segment sélectionné, et on reproduit l'individu correspondant. Avec cette technique, les bons individus seront plus souvent sélectionnés que les mauvais, et un même individu pourra avec cette méthode être sélectionné plusieurs fois. Néanmoins, sur des populations de petite taille, il est difficile d'obtenir exactement l'espérance mathématique de sélection à cause du faible nombre de tirages. Le cas idéal d'application de cette méthode est bien évidemment celui où la population est de taille infinie. On aura donc un biais de sélection plus ou moins fort suivant la dimension de la population. Un autre problème rencontré lors de l'utilisation de la sélection par roulette est lorsque la valeur d'adaptation des

chromosomes varie énormément. Si la meilleure fonction d'évaluation d'un chromosome représente 90% de la roulette alors les autres chromosomes auront très peu de chance d'être sélectionnés et on arriverait à une stagnation de l'évolution.

La répartition des probabilités de sélection des individus selon la méthode de roulette sera exprimée par l'équation (1) [7]

$$p_s(x_i) = \frac{f(x_i)}{\sum_{k=1}^N F(x_k)} \quad (1)$$

La figure III.4. Illustre une roulette dans laquelle chaque individu se voit attribuer un secteur dont l'angle est proportionnelle à sa performance :

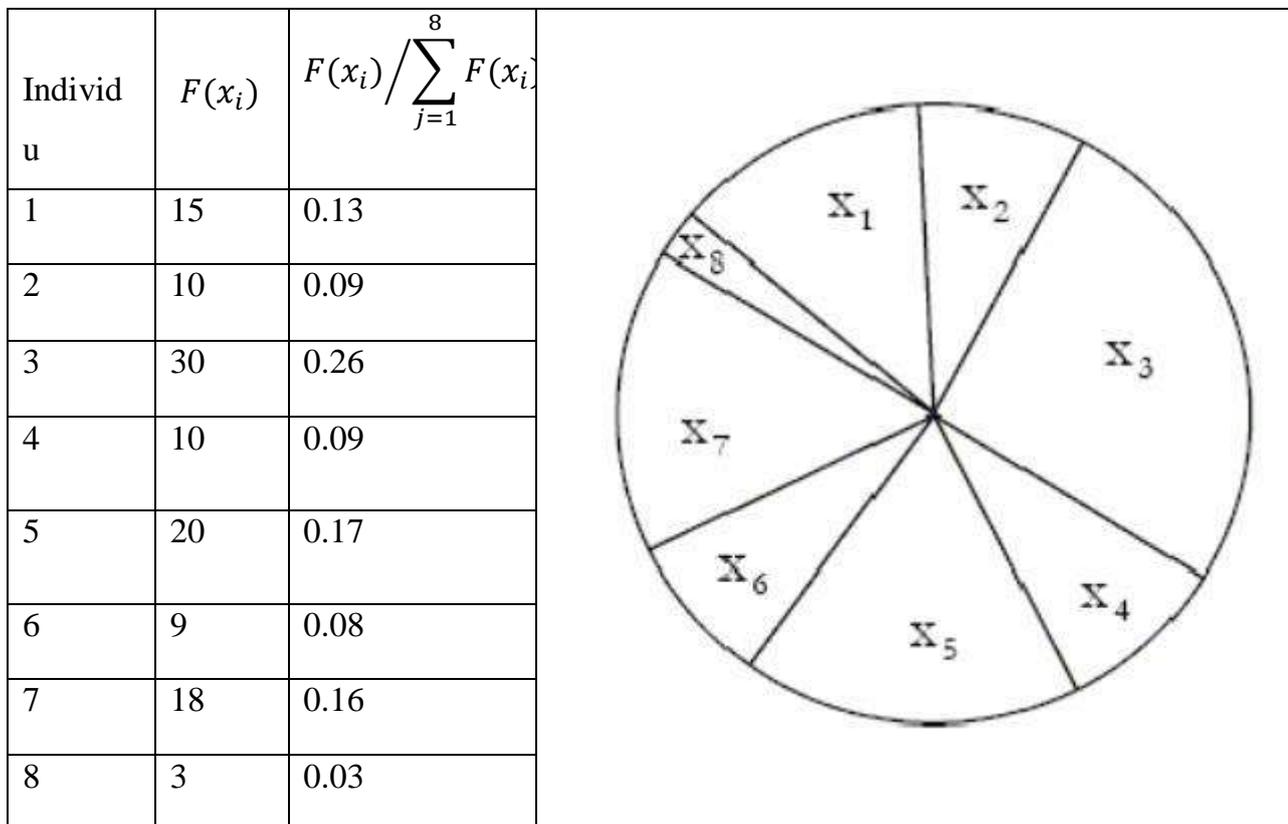


Figure III .4 : exemple de roulette (Wheel) [7]

2.4.2 Sélection par rang

La sélection par rang trie d'abord la population après évaluation. Ensuite, chaque individu se voit associé un rang en fonction de sa position. Ainsi le meilleur individu

aura le rang 1, le suivant 2, et ainsi de suite jusqu'au mauvais individu qui aura le rang N, pour une population de N individus. La sélection par rang d'un individu est identique à la sélection par roulette, mais les proportions sont en relation avec le rang plutôt qu'avec la valeur d'évaluation. La probabilité p_s de l'individu x_i selon son rang k est définie par: [7]

$$p_s(x_i) = \frac{2(N-k+1)}{N(N+1)} \quad (2)$$

Avec cette méthode de sélection, tous les individus ont une chance d'être sélectionnés. Cependant, elle conduit à une convergence plus lente vers la bonne solution. Ceci est dû au fait que les meilleurs individus ne diffèrent pas énormément des plus mauvais.

Chromosomes	1	2	3	4	5	6
$F(x_i)$	80	5	1	4	3	2
Rang	1	2	6	3	4	5
Probabilités	29 %	24 %	5 %	19 %	14 %	9 %

Tableau III.1 : Exemple de sélection par rang pour 6 chromosomes.

2.4.3 Sélection par tournoi

Cette méthode est celle avec laquelle on obtient les résultats les plus satisfaisants. Elle consiste à choisir aléatoirement k individus (le nombre de participants à un tournoi) et à les confronter entre eux par le biais de la fonction fitness, et de sélectionner ensuite le meilleur parmi eux. On répète ce processus autant de fois de manière à obtenir les N individus de la population qui serviront de parents. La variance de cette méthode est élevée et le fait d'augmenter ou de diminuer la valeur de k permet respectivement de diminuer ou d'augmenter la pression de la sélection. [7]

2.4.4 Sélection Steady-State

L'idée principale est qu'une grande partie de la population puisse survivre à la prochaine génération. L'algorithme génétique marche alors de la manière suivante. A

chaque génération quelques chromosomes sont sélectionnés parmi ceux qui ont le meilleur coût, afin de créer des chromosomes enfants. Ensuite les chromosomes les plus mauvais sont retirés et remplacés par les nouveaux. Le reste de la population survit à la nouvelle génération. [7]

2.4.5 La méthode élitiste (sélective)

A la création d'une nouvelle population, il y'a de grandes chances que les meilleurs chromosomes soient modifiés, et donc perdus après les opérations d'hybridation et de mutation. Pour éviter cela, on utilise la méthode élitiste.

L'élitiste consiste à conserver à chaque génération un certain nombre des meilleurs chromosomes de la population qui pourraient disparaître par les opérations de mutation, croisement ou sélection. De plus, elle s'occupe à copier un ou plusieurs des meilleurs chromosomes dans la nouvelle génération. Ensuite, on génère le reste de la population selon l'algorithme de reproduction usuel. Cette méthode améliore considérablement les algorithmes génétiques, car elle permet de ne pas perdre les meilleures solutions. [7]

2.5 Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques

Parmi les plus importants avantages des algorithmes génétiques ce sont ceux qui autorisent la prise en compte de plusieurs critères simultanément, et qu'ils parviennent à trouver de bonnes solutions sur des problèmes très complexes. Le principal avantage des algorithmes génétiques par rapport aux autres techniques d'optimisation consiste en une combinaison de : [7]

- L'exploration de l'espace de recherche, basée sur des paramètres, grâce à une recherche parallèle. Cette méthode permet de traiter des espaces de recherche importants.
- L'exploration de meilleures solutions disponibles à un moment donné. Elle doit simplement déterminer la meilleure des deux solutions, afin d'opérer leurs sélection. Leur utilisation se développe dans divers domaines tels que l'économie, la bioinformatique ou la programmation des structures mécaniques des robots...

- L'élimination de solutions non valides.
- Nombre de solutions important.
- Relativité de la qualité de la solution selon le degré de précision demandé.

Néanmoins, ils présentent, aussi, un certain nombre de limitation :

- Choix délicat de la fonction d'évaluation.
- Les nombreux paramètres qui les contrôlent sont délicats à régler.
- Afin de garantir la robustesse des algorithmes génétiques, le calcul d'un très grand nombre de fitness parfois de l'ordre de plusieurs centaines de milliers est généralement nécessaire avant l'obtention d'une bonne solution. Ce nombre important de calcul peut s'avérer problématique quand le coût de calcul de la fitness est important surtout, lorsqu'on travaille par exemple en grande dimension sur des fonctions à complexité importante.
- Ils peuvent éprouver des difficultés à gérer des contraintes nombreuses et complexes.
- Ils ne peuvent pas assurer que la solution trouvée est la meilleure, mais juste une approximation de la solution optimale.
- Problèmes des optimums locaux.

3 L'algorithme Monte-Carlo

L'utilisation de la méthode de Monte-Carlo est devenue possible grâce à l'amélioration des performances des ordinateurs car pour obtenir des estimations suffisamment exactes de la grandeur recherchée, il faut réaliser le calcul d'un très grand nombre de cas particuliers et dépouiller ensuite la statistique d'un volume énorme de données. Le grand avantage de cette méthode est sa simplicité. Or son inconvénient est le temps de calcul. Les méthodes Monte Carlo permettent une bonne exploration puisque tout point à une probabilité identique d'être atteint, toutefois, elles ne permettent pas d'exploitation des résultats déjà obtenus [8].

3.1 L'algorithme Monte-Carlo de diffusion

La présente section a pour but de démontrer comment on peut utiliser une méthode de type Monte-Carlo afin de déterminer des coefficients de diffusion.

Il faut d'abord et avant tout se rappeler la définition du coefficient de diffusion D présentée plus tôt :

$$D = \frac{\langle x^2 \rangle}{2t} \quad (3)$$

$\langle x^2 \rangle$ Représente la variance du déplacement et t le temps total écoulé. Ainsi, pour déterminer expérimentalement le coefficient de diffusion d'une particule, il suffit de noter la position d'une particule au temps 0, de la laisser effectuer un mouvement brownien pendant un intervalle de temps t et noter la position finale.

La même méthode est utilisée pour trouver des coefficients de diffusion de façon numérique. On simule généralement la diffusion d'une particule par une marche aléatoire. [8]

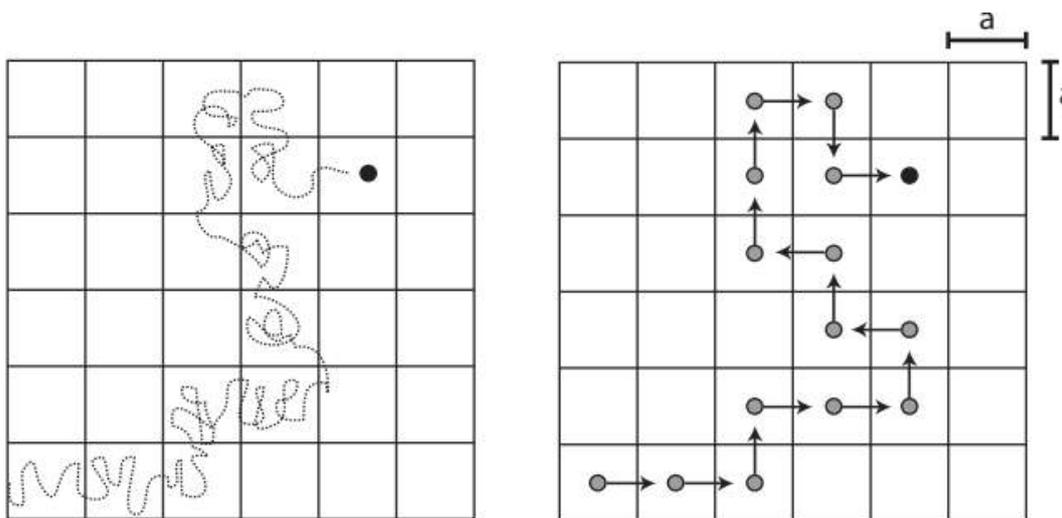


Figure III.5 : exemple démontrant la discrétisation d'un mouvement aléatoire continu. [8]

La particule (point noir) effectue un mouvement continu sur un réseau à deux dimensions. Le même mouvement est discrétisé sur le réseau de droite. La particule est vue comme effectuant des sauts de longueur a , qui est le pas du réseau. Lorsqu'un temps de saut constant est utilisé, la moyenne du temps passé sur chaque site du réseau est utilisée. La variance du temps de saut doit être considérée seulement en présence d'une force externe non négligeable [9].

Cette méthode est souvent utilisée pour simuler la diffusion d'une particule dans une quelconque structure, comme par exemple un hydrogel. Un hydrogel est un réseau de

polymères naturels ou synthétiques. Bien que ces hydrogels soient composés majoritairement d'eau, la structure reste présente et doit être prise en compte lors d'études numériques de diffusion.

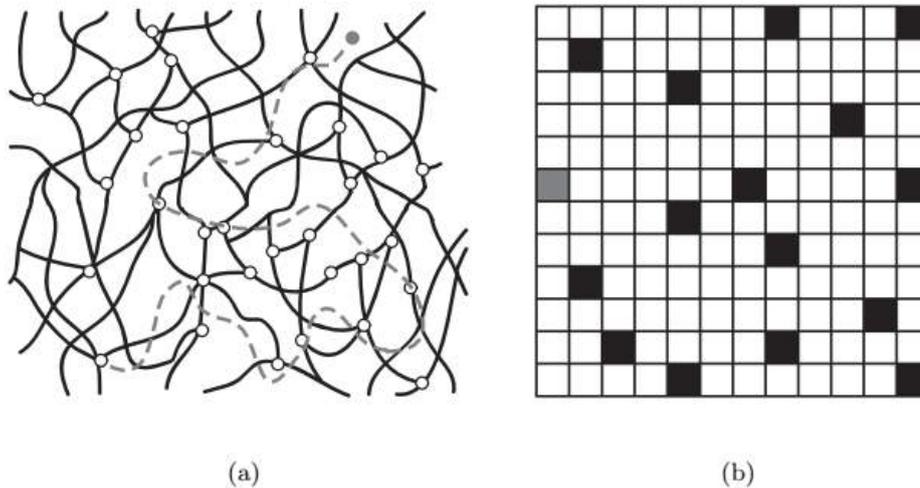


Figure III.6 (a) Représentation schématique d'un hydrogel.

(b) Représentation d'un hydrogel à l'aide d'un réseau.

(a) : Les lignes noires représentent les polymères réticulés. La particule se déplace aléatoirement à travers les fibres du gel.

(b) : la zone composée d'eau de l'hydrogel est représentée par les cases blanches, accessibles à la particule. Les carrés noirs représentent les fibres de gel et sont des obstacles impénétrables pour la particule.

Le principal inconvénient des méthodes Monte-Carlo, et spécialement celle-ci utilisée pour calculer un coefficient de diffusion, est le **temps requis pour effectuer les simulations**.

En effet, afin d'obtenir des résultats précis et significatifs, il est nécessaire d'effectuer des simulations sur de longs intervalles de temps et de répéter la mesure sur un grand nombre de fois pour assurer la fiabilité de la variance $\langle x^2 \rangle$. Ces répétitions donneront une valeur du coefficient de diffusion pour une configuration d'obstacles donnée. Cette procédure doit être répétée pour chaque configuration que l'on désire étudier.

3.2 Solution exactes de l'algorithme Monte-Carlo de diffusion

Mercier et al. [10,11] ont trouvé une alternative à ces longues simulations en développant une méthode de calcul exacte de l'algorithme Monte-Carlo pour calculer le coefficient de diffusion d'une particule ponctuelle.

Au lieu de simuler la marche aléatoire non-biaisée d'une particule en utilisant un processus stochastique, nous utilisons la relation de Nernst-Einstein entre son coefficient de diffusion D en absence d'une force externe et sa vitesse v en présence d'une force externe très faible F [12] :

$$D = \frac{k_B T}{F} v \quad (4)$$

Dans cette dernière équation, k_B et T ont la même signification que précédemment soit la constante de Boltzmann et température absolue. Sous l'effet d'une force très faible. On peut donc écrire :

$$\frac{D}{D_0} = \lim_{F \rightarrow 0} \frac{v(F)}{v_0(F)} \quad (5)$$

Le principe général de la méthode consiste tout d'abord à calculer la probabilité de présence de la particule sur chacun des sites d'un réseau fait de sites libres et d'obstacles.

Slater et al. ont calculé exactement ces probabilités en solutionnant un problème de premier passage : [13,14]

$$P_{\pm} = \frac{1}{d(1+e^{\mp 2\epsilon})} \quad (6)$$

Dans cette dernière équation, P_+ est la probabilité d'effectuer un saut dans la direction parallèle à la force externe, P_- dans la direction anti-parallèle, d est la dimensionnalité de l'espace en question et ϵ est la force externe non-dimensionnalité :

$$\epsilon = \frac{Fa}{2k_B T} \quad (7)$$

Il est peut être utile ici de rappeler que F est la force externe absolue, a est le pas de réseau, k_B est la constante de Boltzmann et T est la température absolue. En effectuant un développement en série de l'équation (6), on obtient :

$$P_{\pm}(\epsilon) = \frac{1}{a} \left(\frac{1}{2} \pm \frac{\epsilon}{2} \mp \frac{\epsilon^3}{6} \pm \frac{\epsilon^5}{15} + O(\epsilon^6) \right) \quad (8)$$

En ne considérant que les termes du premier ordre en ϵ , nous obtenons finalement les probabilités de saut au premier ordre en ϵ :

$$P_{\pm} = \frac{1 \pm \epsilon}{2a} \quad (9)$$

Pour illustrer la méthode complète du calcul exact, le coefficient de diffusion d'une particule ponctuelle sera calculé pour le réseau. Ainsi, les probabilités de saut pour ce réseau sont :

$$P_{\pm x} = \frac{1 \pm \epsilon}{4}; P_{\pm y} = \frac{1}{4} \quad (10)$$

En additionnant les probabilités de toutes les directions possibles nous obtenons 1, comme il se doit :

$$P_{+x} + P_{-x} + P_{+y} + P_{-y} = \frac{1+\epsilon}{4} + \frac{1-\epsilon}{4} + \frac{1}{4} + \frac{1}{4} = 1 \quad (11)$$

Toujours en solutionnant un problème de premier passage, le temps d'un saut dans une direction selon l'axe du champ peut être exprimé par [13] :

$$\tau(\epsilon) = \frac{\tanh(\epsilon)}{\epsilon} = 1 - \frac{\epsilon^2}{3} + O(\epsilon^4) \quad (12)$$

Afin d'éliminer le besoin de poser une valeur pour ϵ , on peut exprimer les composantes de notre équation matricielle en termes des puissances de ϵ . Dans notre cas, nous négligeons les termes plus élevés que le premier ordre en ϵ . Chaque composante de l'équation est donc exprimée en fonction des termes constants ϵ^0 et du premier ordre ϵ^1 :

$$A = A_I + \epsilon A_{\epsilon}, \quad (13)$$

$$|n\rangle = |n_I\rangle + \epsilon |n_{\epsilon}\rangle, \quad (14)$$

$$|b\rangle = |b_I\rangle, \quad (15)$$

En utilisant les équations (13).(14).et (15), l'équation matricielle $A |n\rangle = |b\rangle$ devient :

$$A_I |n_I\rangle + \epsilon(A_I |n_\epsilon\rangle + A_\epsilon |n_I\rangle) + \epsilon^2 A_\epsilon |n_\epsilon\rangle = |b_I\rangle \quad (16)$$

Cependant, pour des systèmes de plus grande taille, il est normalement nécessaire d'utiliser des méthodes numériques établies.

Pour notre exemple, la solution de $|n\rangle$ est:

$$|n\rangle = \begin{pmatrix} n(1) \\ n(2) \\ n(3) \\ n(4) \\ n(5) \\ n(6) \\ n(7) \end{pmatrix} = \frac{1}{7} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} + \frac{\epsilon}{28} \begin{pmatrix} -4 \\ 1 \\ 1 \\ -1 \\ 0 \\ 4 \\ -1 \end{pmatrix} \quad (17)$$

Maintenant que nous avons les probabilités de présence sur chacun des sites à l'état stationnaire, nous devons trouver la vitesse pour chacun des sites. Celle-ci, mesurée selon l'axe de la force externe, est donnée par :

$$v(i) = P_{+x}L_+(i) - P_{-x}L_-(i) \quad (18)$$

Où $L_\pm = 1$ s'il n'y a pas d'obstacle dans la direction donnée, et 0 le cas échéant.

En suivant la même logique qu'auparavant, on dénote le vecteur vitesse en fonction des ordres en ϵ : $|v\rangle = |v_I\rangle + \epsilon |v_\epsilon\rangle$.

Notre exemple nous mène au vecteur suivant pour les vitesses locales :

$$|v\rangle = \begin{pmatrix} v(1) \\ v(2) \\ v(3) \\ v(4) \\ v(5) \\ v(6) \\ v(7) \end{pmatrix} = \frac{1}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ -1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ -1 \\ 1 \end{pmatrix} + \frac{\epsilon}{4} \begin{pmatrix} 1 \\ 1 \\ 2 \\ 2 \\ 2 \\ 1 \\ 1 \end{pmatrix} \quad (19)$$

La vitesse moyenne globale pour le réseau est donnée par la moyenne pondérée des vitesses de chaque site selon la probabilité pour la particule de s'y trouver. Cette quantité est trouvée simplement en effectuant le produit scalaire $\langle v|n\rangle$:

$$v = \langle v|n\rangle = \sum_{i=1}^J n(i)v(i) \quad (20)$$

$$= (\langle v_I| + \epsilon \langle v_\epsilon |) \cdot (|n_I\rangle + \epsilon |n_\epsilon\rangle) \quad (21)$$

$$= \langle v_I|n_I\rangle + \epsilon(\langle v_I|n_\epsilon\rangle + \langle v_\epsilon |n_I\rangle) + \epsilon^2 \langle v_\epsilon |n_\epsilon\rangle \quad (22)$$

Cependant, afin de relier la vitesse au coefficient de diffusion, nous devons calculer la vitesse normalisée par rapport à v_0 . Celle-ci est la vitesse globale d'une particule en

solution libre, c'est-à-dire sur un réseau sans obstacle. La vitesse moyenne est alors la même pour tous les sites, celle-ci est égale à $P_{+x} - P_{-x} = \epsilon/2$. Nous pouvons maintenant déterminer le coefficient de diffusion normalisé dans la direction +x pour le réseau de notre exemple : [14]

$$\frac{D}{D_0} = \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \frac{v}{v_0} = \frac{15\epsilon/56}{\epsilon/2} = \frac{15}{28} \approx 0.535714 \quad (23)$$

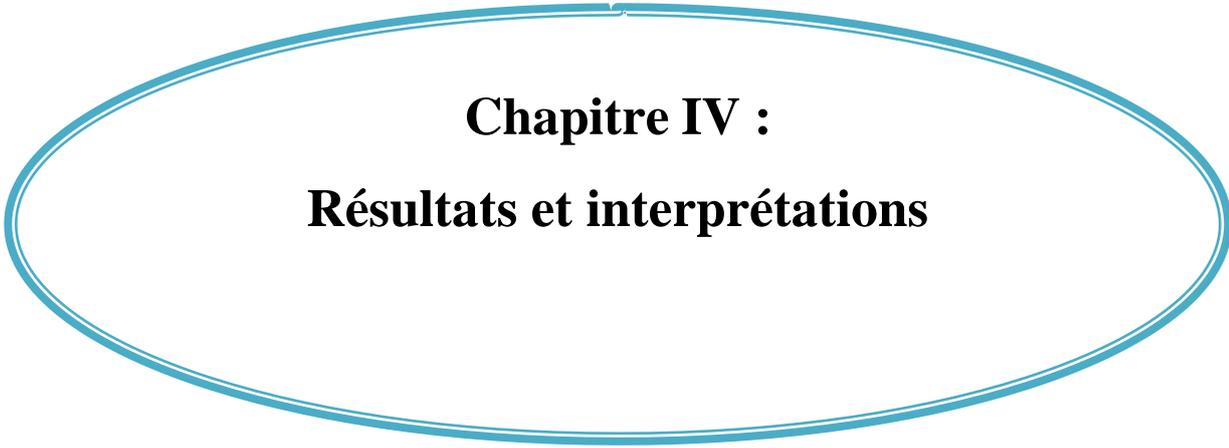
Il est important de noter que cette méthode permet de calculer des coefficients de diffusion sans connaître la valeur de ϵ . [14]

4. Conclusion

Les méthodes déterministes peuvent avoir le minimum global de la fonction sous certaines hypothèses comme la convexité et la différentiabilité, mais souvent convergent vers un des minimums locaux de la fonction objectif. Par contre avec les méthodes stochastique on n'est pas obligé de satisfaire les hypothèses de continuités ; malgré le nombre important d'évaluations, les algorithmes stochastiques présentent le grand avantage par rapport aux méthodes déterministes, d'avoir la capacité de trouver l'optimum global. Les méthodes Monte-Carlo sont une classe d'algorithmes qui utilisent les nombres aléatoires pour trouver la solution à un problème spécifique. Ces algorithmes sont des méthodes dites stochastiques. Les méthodes stochastiques les plus prometteuses sont les algorithmes génétiques. Nous pouvons conclure que les algorithmes génétiques sont des algorithmes simples de conception et peuvent résoudre des problèmes assez complexes.

Références

- [1] Philippe JAUFFRET „Une introduction aux algorithmes génétiques, 5-6 (2002)
- [2] N Metropolis. The beginning of the Monte-Carlo method, 15, 125–130 (1987)
- [3] TN Herzog, Graham Lord. Applications of Monte Carlo methods to finance and insurance. (2002)
- [4] Goldberg, D. E., Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning, (1989)
- [5] Michel Van Caneghem. Le voyageur de commerce, Algorithme branch and bound. Algorithme Glouton, Méthode de recherche locale. December (2002)
- [6] Michalewicz Z, Janikow C, Krawczyk J, A modified genetic algorithm for optimal control problems. 23 83- 94 (1992)
- [7] Hajji Omessaad. Contribution au développement de méthodes d’optimisation stochastiques application à la conception des dispositifs électrotechniques. (2003)
- [8] NAIMA ZERARI. Les algorithmes génétiques en maintenance (2006)
- [9] MG Gauthier, GW Slater. Building reliable lattice Monte-Carlo models for real drift and diffusion problems, 70, 015103 (2004)
- [10] Hickey, O. A., J.-F. Mercier, M.G. Gauthier, F. Tessier, S. Bekhechi, and G.W. Slater. Effective molecular diffusion coefficient in a two-phase gel medium. J. Chem. Phys. 124, 204 903 (2006)
- [11] JF Mercier, GW Slater, HL Guo. Numerically exact diffusion coefficients for lattice systems with periodic boundary conditions. 110, 6050–6056 (1999)
- [12] RK Pathria. *Statistical mechanics*. Butterworth- (1996).
- [13] GW Slater, J Rousseau, J Noolandi. On the stretching of dna in the reptation theories of gel electrophoresis, Biopolymers 26, 863–872 (1987).
- [14] GW Slater. Theory of band broadening for DNA gel electrophoresis and sequencing, Electrophoresis 14, 1–7 (1993)



Chapitre IV :
Résultats et interprétations

1. Introduction

La sécurisation des sources d’approvisionnement devient un enjeu stratégique majeur au monde d’entier, notamment dans les pays à forte densité de population où la consommation est toujours en croissance et qui entraîne une raréfaction des ressources (énergies fossiles, eau, terres rares,...) [1-3]. Par conséquent, il convient de réduire l’utilisation de matières non renouvelables au devenir incertain (pétrole, minerais,...) mais également de les substituer par des matières bio sources produites localement [3-4], et avant tout d’avoir la volonté de ne plus dépendre d’une ressource dont les réserves s’épuisent et dont le prix peut rapidement fluctuer [1, 2]. Les constituants de base des matériaux composites tels que les fibres et les matrices sont issues de l’industrie pétrochimique. Les fibres naturelles en particulier les fibres végétales sont des alternatives indispensables pour remplacer les fibres synthétiques.

Dans ce contexte, nous allons modéliser l’endommagement de l’interface fibre-matrice en utilisant la même matrice époxy (ou époxyde) et deux fibres Bambou et la fibre de coco, pour nous permettre de comparer la fiabilité et la résistance de chaque renfort utilisé. La contrainte appliquée sur le volume élémentaire représentatif est une contrainte de traction uni-axiale. Notre simulation génétique est basée sur le modèle probabiliste de weibull [5] et le modèle de cisaillement de Cox [6].

2. Présentation des constituants de nos matériaux composites

2.1 La matrice époxy (époxyde)

Les résines époxy sont largement utilisées dans les différents secteurs en raison de leur polyvalence dans les applications industrielles. Elles sont utilisées en tant que matériau de surface ou de structure. De nombreuses applications font appel aux propriétés particulières de ces résines comme leur résistance à la corrosion ou leur caractère adhésif. Les résines époxy sont des polymères thermodurcissables ayant la particularité de durcir irréversiblement sous l’effet de la température ou par adjonction d’un réactif [7]. Le diagramme suivant résume les applications industrielles diverses des résines époxy dans l’industrie :

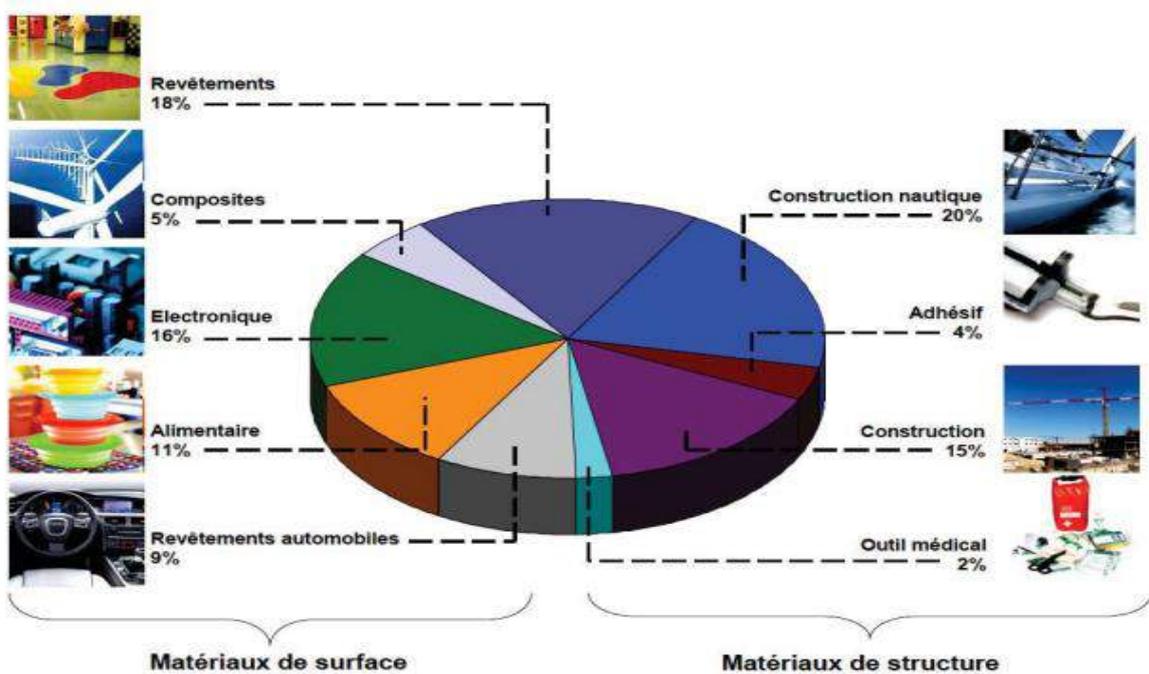


Figure IV.1 Les domaines d'application de résines époxy [7]

Parmi les propriétés physiques d'une résine époxy, on peut citer les plus utilisées :

2.1.1 La température de transition vitreuse

La transition vitreuse est le changement d'état d'un polymère ou d'un matériau sous l'action de la température et entraîne des variations importantes de leurs propriétés mécaniques et physiques. La transition vitreuse est caractérisée par une température de transition vitreuse notée T_g [7]. Lorsque la température d'un polymère est inférieure à sa T_g , le polymère est dit **vitreux** et possède le comportement d'un corps **solide**. Au dessus de sa T_g le polymère passe à l'état **caoutchouteux**.

La transition vitreuse est réversible et s'observe sur les polymères thermoplastiques. Elle est aussi déterminée sur les résines époxy dont la densité de réticulation n'est pas très élevée. La T_g d'une résine époxy dépend de sa formulation et du durcisseur employé. Néanmoins elle peut se situer à des températures négatives mais aussi à des températures avoisinant **150°C** [7-8]

2.1.2 Le module d'élasticité ou module d'Young

Le module d'élasticité appelé aussi module d'Young ou encore module de traction est le rapport entre la contrainte de traction appliquée au matériau et la déformation qui en résulte. Il est constant tant que cette déformation n'atteint pas la limite d'élasticité du matériau (avant la rupture). Un matériau dont le module d'Young est particulièrement élevé est dit rigide. Le module d'Young d'une résine époxy dans l'application de moulage est voisin De **9000 MPa** tandis que celui d'une résine appliquée en tant que colle est de l'ordre de **2800 MPa**.

2.2 Les fibres

2.2.1 La fibre de Bambou

Les composites renforcés de fibres naturelles ont donc attiré une attention de plus en plus grande en raison de leur faible coût, leur densité peu élevée, leur biodégradabilité et leur disponibilité, parmi ses fibres, le bambou qui se trouve en grande quantité au Viet Nam et dans les pays tropicaux, leur facilité de mise en œuvre, leur haut module spécifique, et leur capacité à être recyclé, etc. [9-11]. Le bambou est une herbe dont le nom scientifique est Graminée (Poaceae). Il fait partie de la sous-famille des Bambusoideae et de la branche des Bambuseae [12]. Les changements morphologiques des fibres Bambou peuvent également être observés par microscopie électronique à balayage. La Figure IV.2 présente des images obtenues en microscopie optique sur des fibres non traitées et des fibres traitées pendant 3 jours dans la solution de soude à température ambiante [12].

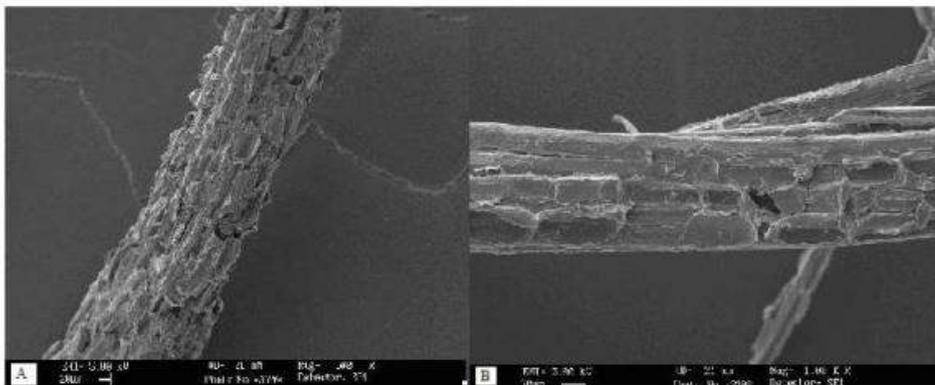


Figure IV.2 Fibres Bambou non traitées (A) et traitées avec la soude (B) observées en microscopie électronique à balayage.

2.2.2 La fibre de Coco

La fibre de coco est une fibre naturelle extraite de la balle de coco. A partir de cette fibre et particulièrement dans l'industrie du logement, on peut produire des appareils électroménagers tels que des paillassons, des brosses, des vases de plantes, des cordes et des textiles. Il reste encore beaucoup de déchets de l'industrie du coprah de coco sous forme brute. L'Indonésie est l'un des pays ayant le plus grand potentiel de ressources naturelles de noix de coco au monde. Environ 87% des terres de coco sont situées dans les pays membres de la noix de coco pour l'Asie et le Pacifique [12]. Les tendances actuelles en matière d'utilisation accrue de bioproduits respectueux de l'environnement ont ouvert la voie à des applications plus diversifiées de fibres de coco et de produits à valeur ajoutée, offrant ainsi un potentiel d'amélioration de l'économie rurale dans les principaux pays producteurs de fibres de coco. La fibre de coco est écologique, naturelle, biodégradable, produit durable, renouvelable, à faible coût et durable. [12].

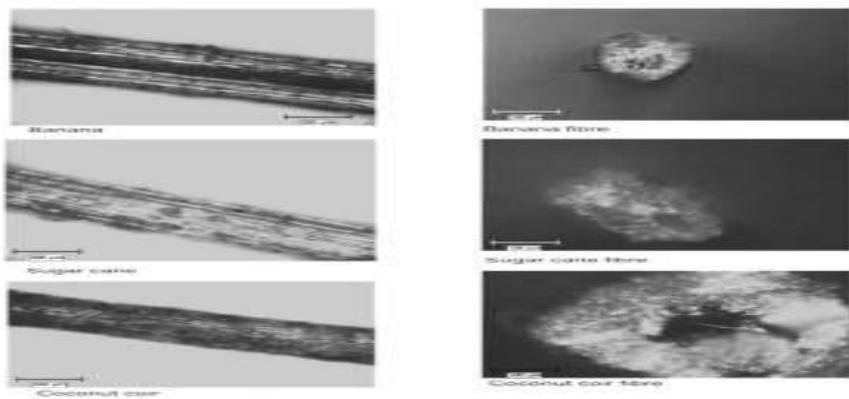


Figure IV.3 : Les SEM de la coupe longitudinale et transversale section de brins de fibres [12]

Dans le tableau IV.1, nous avons présenté les propriétés physiques des deux fibres Bambou et la fibre de Coco.

Fibres	Contrainte à la rupture (MPa)	Module d'Young (GPa)	Déformation (%)	Densité (g/cm ³)
Bambou	500-740	30-50	~2	1,4
Fibre de coco	150-180	4-6	20-40	1,2

Tableau IV.1 : les propriétés physiques des deux fibres [13]

3. Méthodes et modèles théoriques de simulation

3.1 Le modèle de cisaillement de l'interface de Cox

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

$$\tau = \frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta \tanh(\beta l/2) \quad (1)$$

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

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;

IV .3.2 Le formalisme probabiliste de Weibull :

Lorsque la contrainte est uniforme, l'endommagement de la matrice, est donné par la formule (1) de Weibull [5] :

$$D_m = 1 - \exp \left\{ - \frac{V_{eff}}{V_0} \left[\frac{\sigma_f}{\sigma_0} \right]^m \right\} \quad (2)$$

Avec :

- (σ) : la contrainte appliquée ;
- (σ_m^T) : 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 [5]. 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.

$$D_f = 1 - \exp \left\{ - A_f * L_{equi} * \left[\frac{\sigma_{max}^f}{\sigma_{0f}} \right]^{m_f} \right\} \quad (3)$$

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.

3.3 La modélisation génétique

3.3.1 Développement

Notre étude porte essentiellement sur la modélisation de l'endommagement de l'interface fibre-matrice des deux matériaux composites à base de fibres végétales (Bambou/époxy et Coco/époxy), afin de comparer la résistance mécanique aux différentes contraintes appliquées sur ses deux matériaux ($\sigma=185 \text{ N/m}^2$, $\sigma=225 \text{ N/m}^2$ et 265 N/m^2). Notre algorithme génétique est basé sur l'approche probabiliste de Weibull pour calculer l'endommagement de l'interface et sur le modèle de Cox pour trouver et initialiser les différentes valeurs utilisées dans notre simulation. Le principe de cet algorithme repose sur l'utilisation d'opérateurs génétiques (sélection, croisement,

mutation) pour prévoir une population de 420 d'individus générés de manière aléatoire avec une production maximum de 210 en tant que critère d'arrêt. Les gènes du chromosome représentent les variables suivantes définies par le modèle analytique de cisaillement de l'interface de Cox : modules de Young des deux fibres, module de cisaillement de la matrice, rayon de la fibre, la distance entre fibre,.... L'endommagement de l'interface est produit par le croisement des deux endommagements des deux constituants; la fibre et de la matrice, en utilisant une probabilité de mutation de 0.22. Les individus trouvés sont classés et positionnés pour obtenir le meilleur d'entre eux, ces individus sont insérés dans la première rangée, en construisant une nouvelle génération, le processus est répété jusqu'à convergence. Les calculs numériques sont effectués à l'aide du logiciel Matlab R2012a.

3.3.2 L'organigramme de notre algorithme

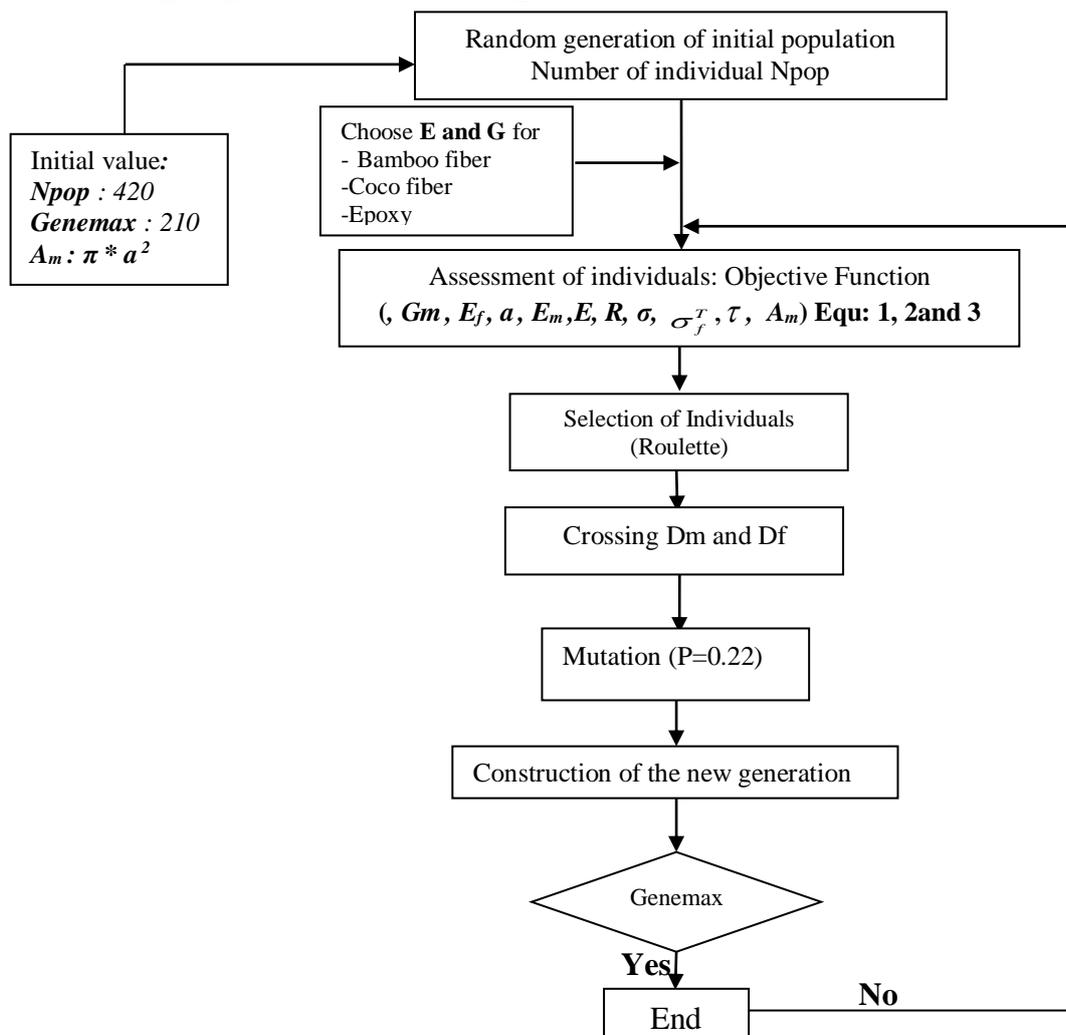


Figure. IV.4 L'organigramme de l'algorithme génétique

4. Résultats de simulation

Pour affirmer notre approche, un calcul a été réalisé sur deux types de matériaux composites Bambou/époxy et Coco/époxy. D'après les résultats de simulation par un Algorithme génétique. Nous avons comparé et examiné la résistance de notre matériau par l'application de différentes contraintes ($\sigma=185 \text{ N/m}^2$, $\sigma=225 \text{ N/m}^2$ et 265 N/m^2), ce qui nous permis de calculer l'endommagement en cisaillement de l'interface fibre matrice de composite en fonction de la longueur de la fibre. Les figures IV.5, IV.6, IV.7 et IV.8, IV.9, IV.10 montrent le niveau de l'endommagement à l'interface pour les deux matériaux étudiés.

4.1. Coco /époxy

La figure IV.5 représente le niveau d'endommagement en cisaillement lorsqu'on a appliqué la contrainte de traction $\sigma=185 \text{ N/m}^2$, la figure montre que le niveau d'endommagement en cisaillement a une valeur $D=0.26$ et il atteint une valeur maximale $D=0.31$. On a observé la présence d'une symétrie de l'endommagement au milieu de la fibre, les variables aléatoires représentées graphiquement par les points bleus ont montré une concentration importante de l'endommagement aux extrémités par rapport au milieu de la fibre. Ces résultats sont similaires aux résultats prouvés analytiquement par Cox [6].

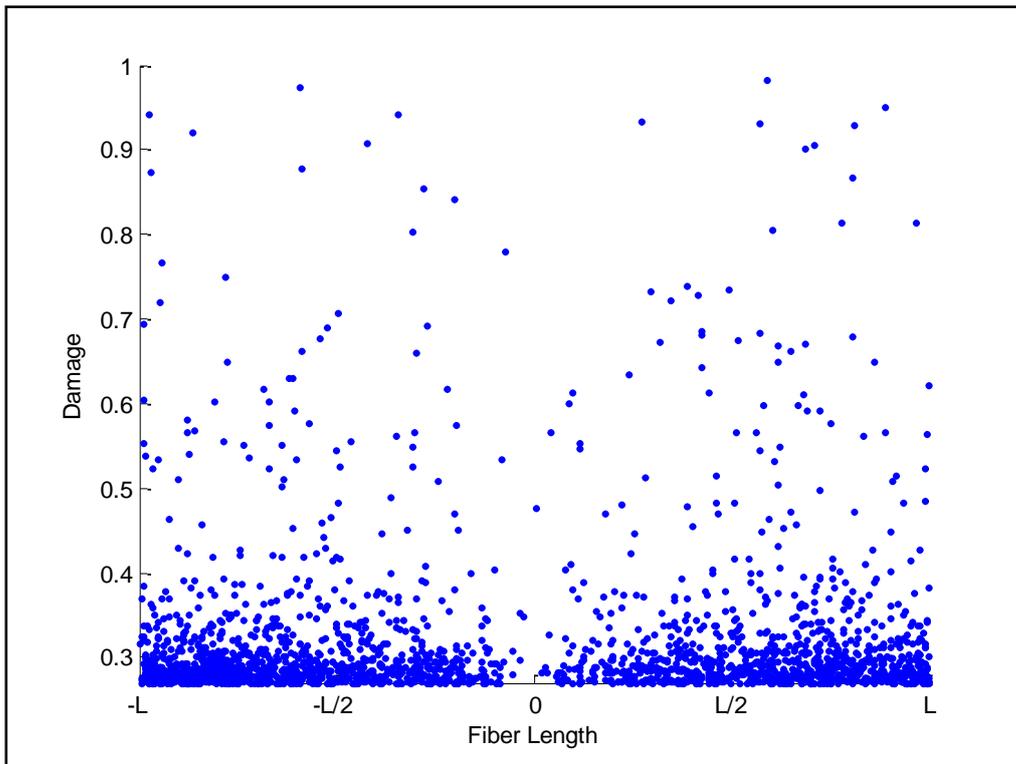


Figure. IV.5 : l'endommagement de l'interface : $\sigma=185 \text{ N/m}^2$

La figure IV.6 représente le niveau d'endommagement en cisaillement lorsqu'on a appliqué la contrainte de traction $\sigma=225 \text{ N/m}^2$, la figure montre que le niveau d'endommagement en cisaillement a une valeur $D=0.33$ et il atteint une valeur maximale $D=0.38$. On a observé la présence d'une symétrie de l'endommagement au milieu de la fibre, les variables aléatoires représentées graphiquement par les points bleus ont montré une concentration importante de l'endommagement aux extrémités par rapport au milieu de la fibre. Ces résultats sont similaires aux résultats prouvés analytiquement par Cox [6].

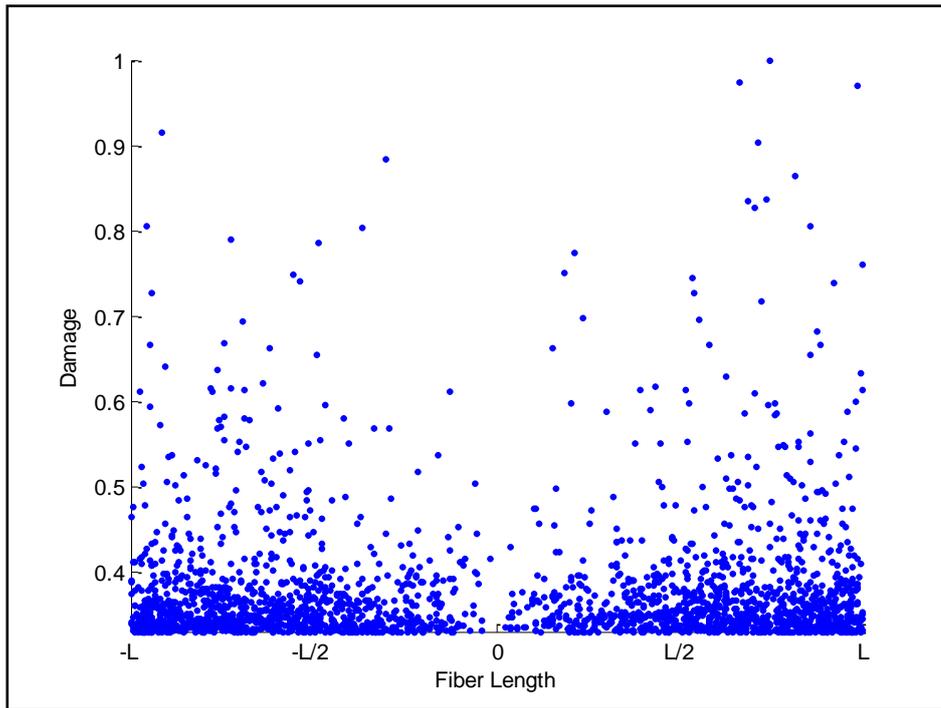


Figure. IV.6 : l'endommagement de l'interface : $\sigma=225 \text{ N/m}^2$

La figure IV.7 représente le niveau d'endommagement en cisaillement lorsqu'on a appliqué la contrainte de traction $\sigma=265 \text{ N/m}^2$, la figure montre que le niveau d'endommagement en cisaillement a une valeur $D=0.35$ et il atteint une valeur maximale $D=0.41$. On a observé la présence d'une symétrie de l'endommagement au milieu de la fibre, les variables aléatoires représentées graphiquement par les points bleus ont montré une concentration importante de l'endommagement aux extrémités par rapport au milieu de la fibre. Ces résultats sont similaires aux résultats prouvés analytiquement par Cox [6].

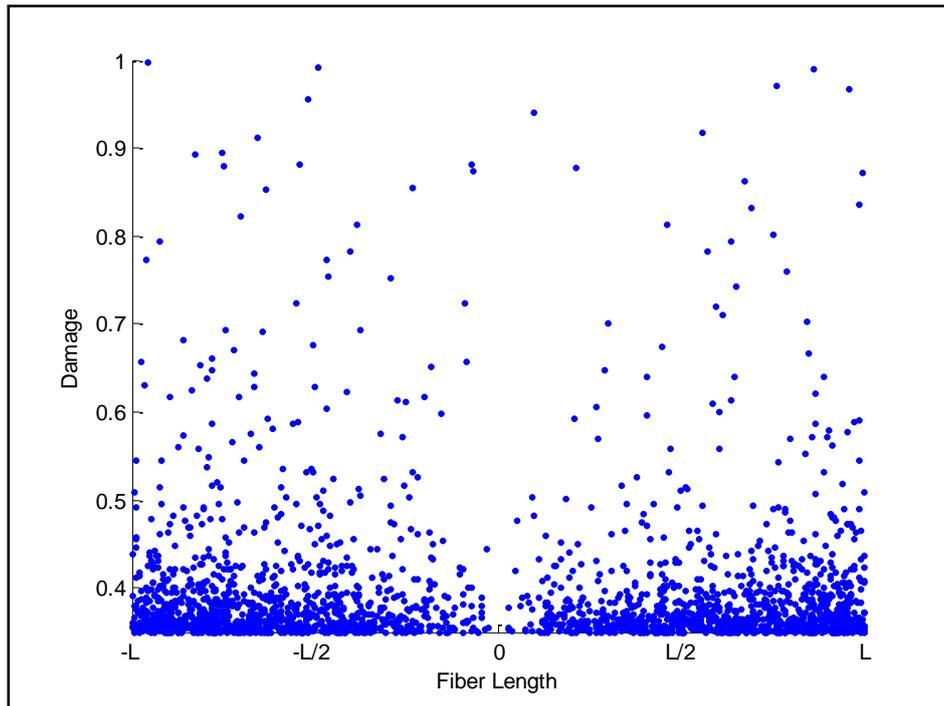


Figure. IV.7 : l'endommagement de l'interface : $\sigma=265 \text{ N/m}^2$

4.2. Bambou /époxy

La figure IV.8 représente le niveau d'endommagement en cisaillement lorsqu'on a appliqué la contrainte de traction $\sigma=185 \text{ N/m}^2$, la figure montre que le niveau d'endommagement en cisaillement a une valeur $D=0.15$ et il atteint une valeur maximale $D=0.22$. On a observé la présence d'une symétrie de l'endommagement au milieu de la fibre, les variables aléatoires représentées graphiquement par les points bleus ont montré une concentration importante de l'endommagement aux extrémités par rapport au milieu de la fibre. Ces résultats sont similaires aux résultats prouvés analytiquement par Cox [6].

La figure IV.9 représente le niveau d'endommagement en cisaillement lorsqu'on a appliqué la contrainte de traction $\sigma=225 \text{ N/m}^2$, la figure montre que le niveau d'endommagement en cisaillement a une valeur $D=0.15$ et il atteint une valeur maximale $D=0.22$. On a observé la présence d'une symétrie de l'endommagement au

milieu de la fibre, les variables aléatoires représentées graphiquement par les points bleus ont montré une concentration importante de l'endommagement aux extrémités par rapport au milieu de la fibre. Ces résultats sont similaires aux résultats prouvés analytiquement par Cox [6].

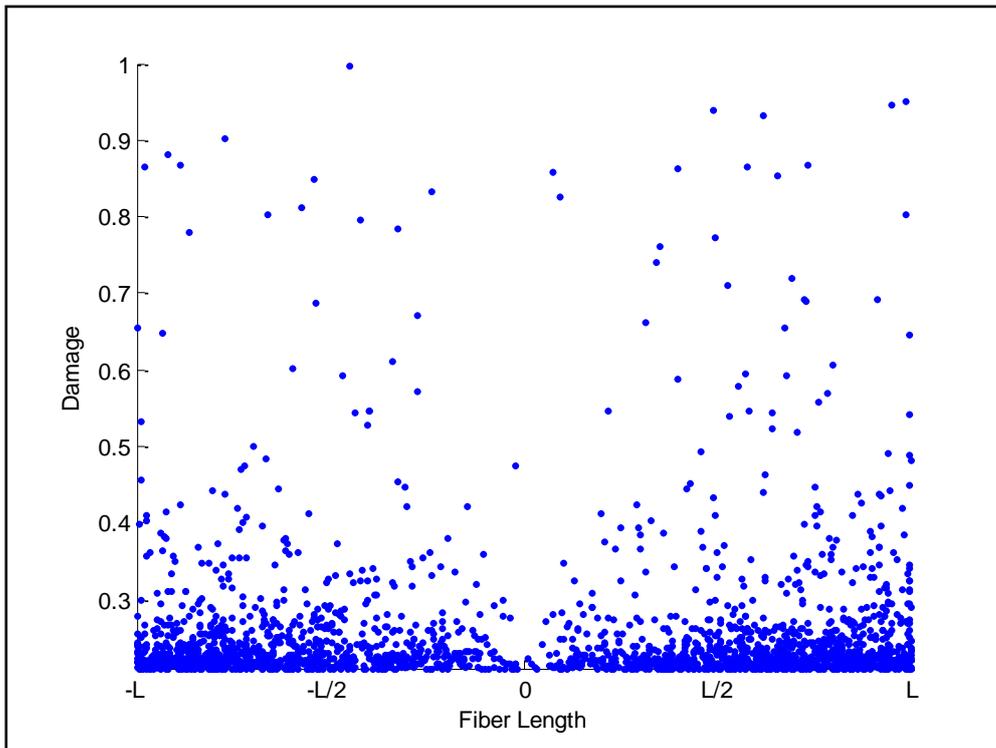


Figure. IV.8 : l'endommagement de l'interface : $\sigma=185 \text{ N/m}^2$

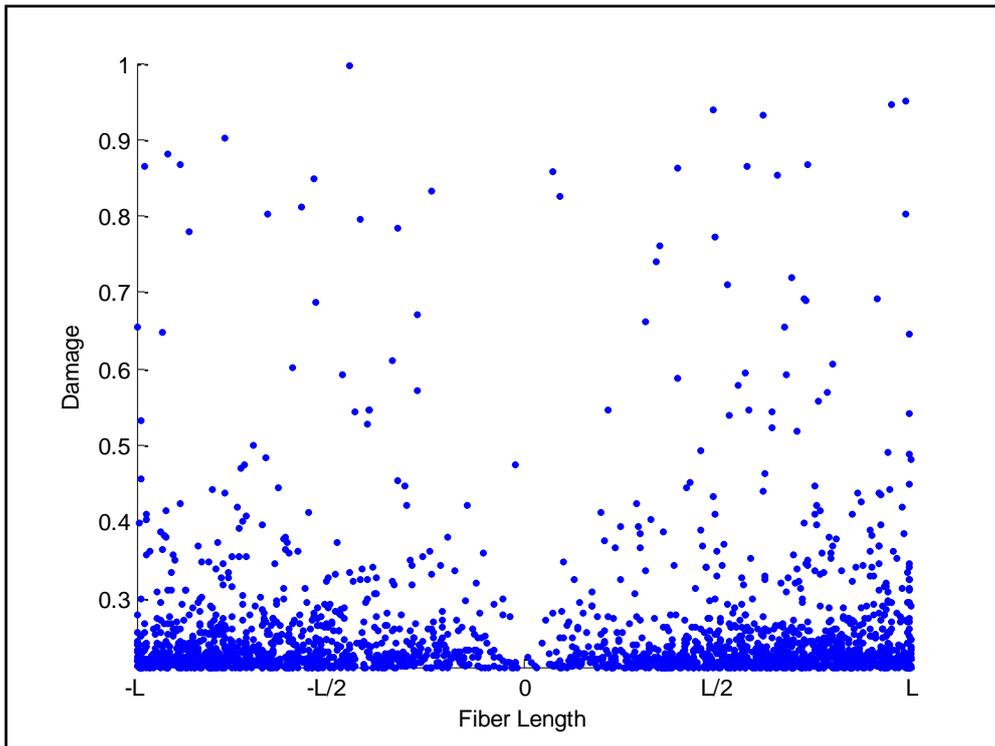


Figure. IV.9: l'endommagement de l'interface : $\sigma=225 \text{ N/m}^2$

La figure IV.10 représente le niveau d'endommagement en cisaillement lorsqu'on a appliqué la contrainte de traction $\sigma=265 \text{ N/m}^2$, la figure montre que le niveau d'endommagement en cisaillement a une valeur $D=0.23$ et il atteint une valeur maximale $D=0.29$. On a observé la présence d'une symétrie de l'endommagement au milieu de la fibre, les variables aléatoires représentées graphiquement par les points bleus ont montré une concentration importante de l'endommagement aux extrémités par rapport au milieu de la fibre. Ces résultats sont similaires aux résultats prouvés analytiquement par Cox [6].

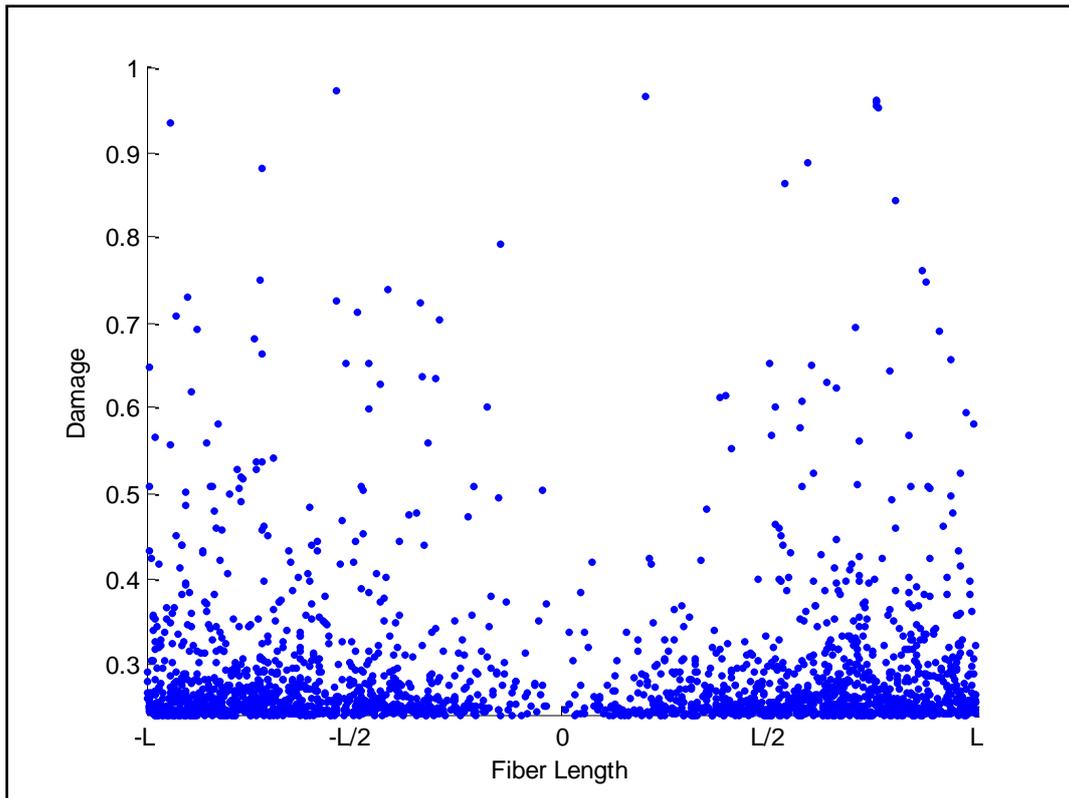


Figure. IV.10: l'endommagement de l'interface : $\sigma=265 \text{ N/m}^2$

Nos résultats génétiques ont montré fidèlement le comportement réel des deux matériaux suivant ses deux modules de Young, et ont été similaires aux résultats trouvés par Rao KMM [14] où il a montré par des essais expérimentaux que la fibre bambou est plus résistante que la fibre de Coco. (Voir la figure IV.11).

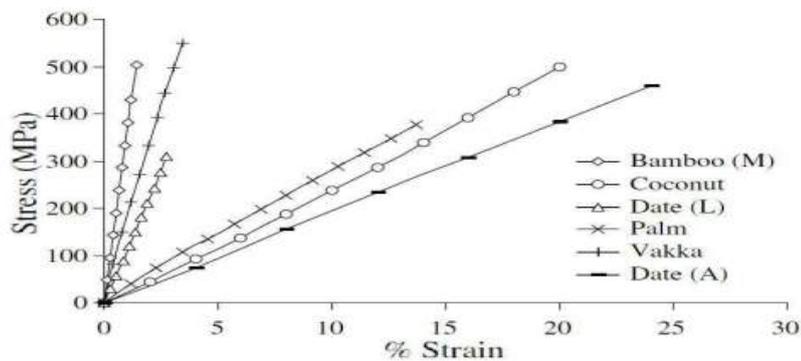


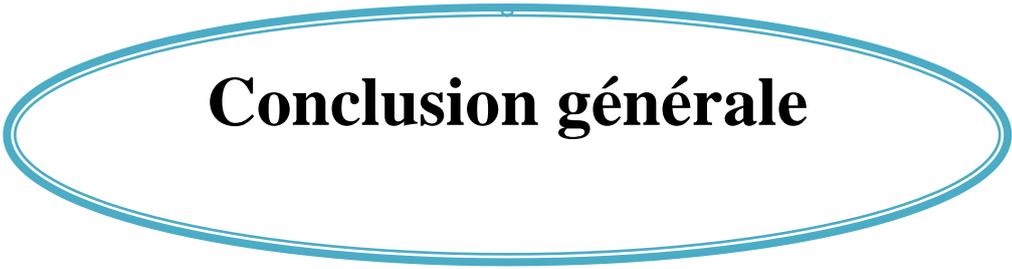
Figure IV.11 : La contrainte appliquée en fonction de la souche de diverses fibres [14]

5. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons essayé de comparer la résistance aux contraintes mécaniques de traction appliquées sur deux matériaux composites à base de deux fibres végétales Bambou et Coco. Les résultats de notre simulation génétiques ont montré que le Bambou/époxy est plus résistant que le Coco/époxy et que l'endommagement en cisaillement de Bambou/époxy est inférieur à celui du Coco/époxy de 11 à 12.5%. Nos résultats sont en bon accord avec les résultats trouvés par Rao KMM [14] où il a montré par des essais expérimentaux que la fibre Bambou est le plus résistant comparant avec la fibre de Coco

Références

- [1] Philp J. C., Bartsev A., Ritchie R. J., Baucher M.-A., Guy K. "Bioplastics science from a policy vantage point". *New Biotechnology*, Vol. 30, pp. 635-646, (2013)
- [2] Biron M. "Material Selection for Thermoplastic Parts: Practical and Advanced Information": William Andrew; (2015).
- [3] Gourrier C. Contribution à l'étude de matériaux biocomposites à matrice thermoplastique polyamide -11 et renforcée par des fibres de Lin. Thèse de doctorat à l'université de Bretagne Sud. 13/10/2016.
- [4] Marrot L., Bourmaud A., Bono P., Baley C. "Multi-scale study of the adhesion between flax fibers and biobased thermoset matrices". *Materials & Design*, Vol. 62, pp. 47-56, (2014)
- [5] W. Weibull "Theory of the strength of materials", *Royal Swedish Academy of Eng. Sci. Proc.*, 151, 1-45. (1939)
- [6] Cox H.L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *British journal of applied physics*, 12, 72-79, (1952)
- [7] Guo-Hua Delmas. La Biolignine, structure et application de résines époxy. Thèse de doctorat à l'université de Toulouse, 30/06/2011.
- [8] P. Bardonnnet, "Résines époxy - Composants et propriétés", *Techniques de l'Ingénieur*, traité Plastiques et Composites. (1992)
- [9] Vi Vi Do Thi. Matériaux composites à fibre naturelle s /polymère biodégradables ou non Alimentation et Nutrition. Université de Grenoble, Français. NNT : 2011GRENA012 (2011)
- [10] D. Nabi Saheb, J. P. Jog,; *Natural Fiber Polymer Composites: A Review Advances in Polymer Technology*; Vol. 18, No. 4, 351-363. (1999)
- [11] Xue Li, Lope G. Tabil, Satyanarayan Panigrahi, ; *Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review*; *J Polym Environ* 15, 25-33. (2007)
- [12] Riana Herlina Lumingkewas Development of materials for construction with low environmental Impact made with low content of cement and with natural fibers. .Matériau xcomposite se tconstruction. Université de Bretagne Sud, English. NNT : 2015LORIS383. (2015)
- [13] Maya Jacob John, Sabu Thomas, ; *Biofibres and biocomposites*; *Carbohydrate Polymers* 71, 343-364. (2008)
- [14] Rao KMM. Extraction and tensile properties of natural fibres: Vakka, date, and bamboo. *Compos. Struct.*, 77(3): 288-295. (2007)



Conclusion générale

Conclusion générale

Les fibres naturelles en particulier les fibres végétales présentent une alternative essentielle et indispensable pour substituer progressivement les fibres synthétiques afin de sécuriser les sources d'approvisionnement des pays de forte consommation et qui entraîne une raréfaction des ressources (énergies fossiles, eau, terres rares,...).

Dans cette étude, nous avons comparé la résistance aux contraintes mécaniques de traction appliquées sur deux matériaux composites à base de deux fibres végétales Bambou et le Coco. Les résultats de notre simulation génétiques ont montré que le Bambou/époxy est plus résistant que le Coco/époxy et que l'endommagement en cisaillement de Bambou/époxy est inférieur à celui du Coco/époxy de 11 à 12.5%. Nos résultats sont en bon accord avec les résultats trouvés par Rao KMM où il a montré par des essais expérimentaux que la fibre Bambou est le plus résistant comparant avec la fibre de Coco. La simulation numérique montre, aussi, une concordance avec le comportement réel des matériaux étudiés.

Les études expérimentales et théoriques portées sur les matériaux composites à base des fibres végétales ont montré que ces matériaux disposent une résistance exceptionnelle aux contraintes mécaniques et thermiques, par conséquent, nos résultats génétiques coïncidents parfaitement avec cette conclusion.

Finalement, nous pouvons donc dire que notre modèle est bien fonctionné par rapport au phénomène de l'endommagement d'un composite en fonction de son renforcement par des nouvelles fibres végétales.

Analyse comparative du comportement élastique des matériaux composites à base des fibres végétales : Bambou /Epoxyde et Coco/Epoxyde

Résumé

L'exploitation par les industriels des fibres végétales dans le domaine des matériaux composites a permis de réduire la dépendance vis-à-vis du pétrole grâce à leurs propriétés mécaniques, leur résistance thermique et leur biodégradabilité. Dans ce mémoire, nous avons effectué une étude comparative par une simulation génétique sur deux matériaux à base de différents renforts naturels (Bambou et Coco) pour voir l'influence de ses fibres sur le comportement élastique des matériaux bio-composites. Les résultats de notre simulation génétique ont montré que le Bambou/époxy est plus résistant que le Coco/époxy et que l'endommagement en cisaillement de Bambou/époxy est inférieur à celui du Coco/époxy de 11 à 12.5%. Nos résultats sont en bon accord avec les résultats trouvés par Rao KMM où il a montré par des essais expérimentaux que la fibre Bambou est le plus résistant en comparant avec la fibre de Coco.

Mots clés : Bambou/époxy ; Coco/époxy, endommagement en cisaillement, interface, algorithme génétique

Comparative analysis of the elastic behavior of composite materials based on plant fibers: Bamboo / Epoxy and Coco / Epoxy

Abstract

The exploitation by the industrials of vegetable fibers in the field of composite materials has made it possible to reduce the dependence on oil and this as a result of their mechanical properties, their thermal resistance and their biodegradability. In this work, we carried out a comparative study by a genetic simulation on two materials based on different natural reinforcements (Bamboo and Coco) to see the influence of its fibers on the elastic behavior of bio-composite materials. The results of our genetic simulation showed that Bamboo / Epoxy is more resistant than Coco / Epoxy and that shear damage of Bamboo / Epoxy is lower than that of Coco / Epoxy by 11 to 12.5%. Our results are in good agreement with the results found by Rao KMM where he showed by experimental tests that Bamboo fiber is the most resistant when compared with Coco fiber.

Keywords : Bamboo / epoxy; Coco / epoxy, shear damage, interface, Genetic algorithm