

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

UNIVERSITE « Dr. TAHAR MOULAY » DE SAIDA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : PHYSIQUE

Option : Physique des matériaux

Par

Mlle Ben khedda Asma

Sur le thème

**Effet de la contrainte thermique sur l'endommagement
transversal d'un matériau hybride Lin-Chanvre/Polyéthylène**

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

Année Universitaire 2018 - 2019

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

*À celle qui a attendu avec patience les fruits
de sa bonne éducation*

*La personne la plus chère au monde à mes
yeux ...*

Ma mère

*A toutes les personnes pour lesquelles j'ai une
place dans leur cœur.*

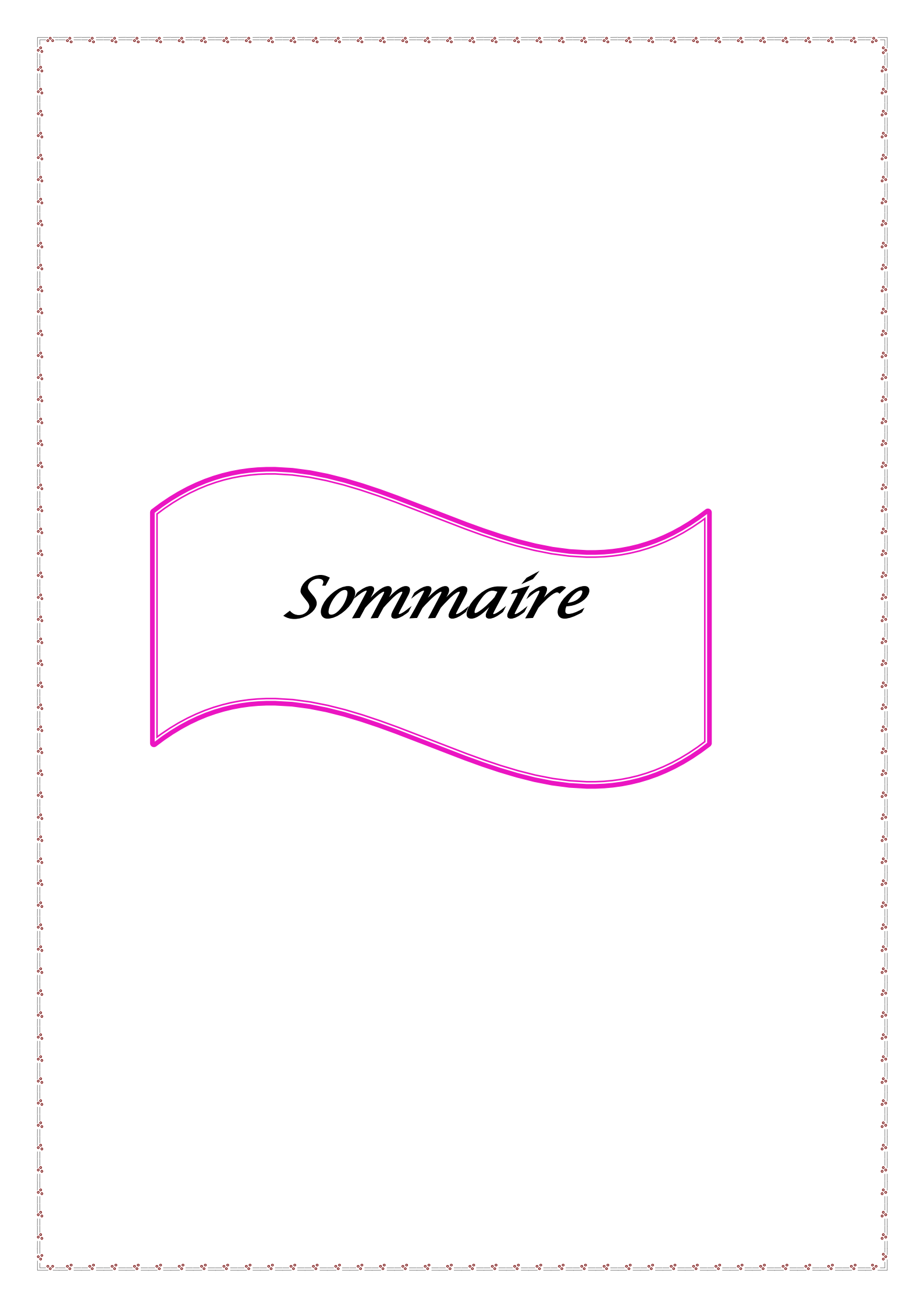
Remerciements

Nous tenons à remercier dans le premier lieu **DIEU** avoir aidé à mener jusqu'à la fin de travail, et nos parents respectés.

Je voudrais aussi remercier et témoigner tout mon respect à Monsieur **MOKADDEM Allel**, rapporteur de ce mémoire, maître de conférences au Centre universitaire Nour Bachir d'El Bayadh, et à Monsieur **DOUMI Bendouma** co-encadrant, maître de conférences à l'université Dr. Tahar Moulay de Saïda, pour ses conseils et encouragements.

Mes plus sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail. Ma profonde gratitude à 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** maîtres de conférences à l'université de Saïda, qui m'ont fait l'honneur en acceptant de faire partie de ce jury pour examiner ce mémoire de master.

Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, à ma famille.



Sommaire

Table des matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Références2

Chapitre I

(Eléments bibliographiques sur les matériaux biocomposites hybrides)

1 Introduction..... 3

2. Les matériaux composites..... 3

2.1. Définition..... 3

3. classification des matériaux composites 3

3.1 Classification des composites basée sur la matrice 4

a) Composites à matrice métallique (MMC)..... 4

b) Composite matrice céramique (CMC) 4

c) Composites a matrice polymère (PMC)..... 4

3.2 Classification des composites basée sur la structure du matériau de renforcement. 4

a) renforcement par des particules..... 4

b) composites renforcés par des fibres..... 5

4. Les caractéristique des matériaux composites6

5. Différents types de constituants de base7

5.1 Le renfort 7

5.1 .1 Fibres 7

A. Fibres de verre 7

•Les avantages de fibres de verre 8

•Les inconvénients de fibres de verre..... 8

B.	Fibres de carbone.....	8
•	Les avantages de fibres de carbone.....	9
•	Les inconvénients de fibres de carbone.....	9
C.	Les fibres de bore	9
D.	Les fibres de carbure de silicium.....	10
E.	Les fibres d'aramide (Kevlar)	10
5.1 .2	Les principaux matériaux de renfort	10
5 .2	Les matrices.....	10
a.	Les thermoplastiques.....	11
b.	Les thermodurcissables.....	11
c.	Matrices métalliques	12
d.	Matrices céramiques	12
5.3	Interface	12
5.4	Les charges et les additifs	13
a.	Charges renforçantes.....	13
b.	Charges non renforçantes.....	13
c.	Charges conductrices et antistatiques	13
d.	Les additifs.....	13
6.	Fibres naturelles	14
6.1	Définition	14
6.2	Classification des fibres naturelles	14
7 .	fibres végétales.....	14
7.1	Définition.....	14
7.2	Classification des fibres végétales	15

7.3 La fibre de chanvre.....	15
7.4 La fibre de sisal.....	17
8. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites.....	18
9. Les matériaux bio-composites	19
9.1 Définition matériaux bio-composites	19
10. les matériaux hybrides	19
10.1 Définition matériaux hybrides	19
10.2 Classement des matériaux hybrides	19
11. Les bio-composites hybrides.....	20
12. Conclusion.....	20
Références.....	21

Chapitre II (Modélisation analytique)

1. Introduction	25
2. L'interface fibre/matrice.....	26
2.1. Rôle des interfaces	27
3. Interphases	28
4. Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel.....	28
4.1. La rupture de fibre.....	29
4.2. La fissuration matricielle	30
4.3. La décohésion fibre-matrice.....	32
4. 3.1. Cas d'une interface très forte.....	32
4. 3.2. Cas d'une interface très faible.....	32
4. 3.3. Cas d'une interface ayant des propriétés intermédiaires.....	33

5. Comportement d'un composite unidirectionnel	33
5.1 Cas d'une interface très forte.....	33
5.2 Cas d'une interface très faible.....	34
5.3 Cas d'une interface relativement faible.....	34
6. Composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale	34
7. Composite unidirectionnel soumis à une traction transversale.....	36
8. Le modèle probabiliste de Weibull	37
8.1. Estimation de paramètres de Weibull.....	40
8.1.1. Méthode de régression linéaire.....	40
8.1.2. Méthode des moments	40
8.1.3. Méthode de la vraisemblance maximale.....	41
9. Modèle de COX	41
9.1 .Modèle de Cox : Transfert de charge élastique.....	41
9.1.1 .Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface	42
A/ Equilibre des forces de cisaillement	42
B/ Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre	43
B.1-Contrainte axiale dans la fibre.....	44
B.2.Contrainte de cisaillement à l'interface.....	44
10. Modèle de Fick (Modèles de diffusion d'eau)	46
11. Conclusion	47
Référence.....	48

Chapitre III (Modèles métaheuristiques)

1. Généralités sur les métaheuristiques.....	50
1.1. Classification des Métaheuristiques.....	50
1.2. Domaines d'utilisation des métaheuristiques	51
2. Les Algorithmes Monté-carlo.....	52

2.1. Simulation de lois uniformes	55
2. 2.Simulation de lois non uniformes	55
2. 3.Variable aléatoire exponentielle	56
2. 4.Lois particulières	56
2. 4.1 Loi binomiale.....	56
2. 4.2 Loi géométrique	56
2. 4.3 Loi gaussienne.....	57
2. 4.4 Loi de Poisson de paramètre λ	57
2. 5.Lois vectorielles	57
2.6 Méthode de rejet.....	58
3. Les Algorithmes génétiques.....	59
3. 1. Définition des algorithmes génétiques	59
3. 2. La mise en œuvre d'un algorithme génétique.....	60
3. 3. Principe d'Algorithme Génétique :.....	60
3. 3.1 Codage des Variables.....	60
3. 3.1.1 Codage binaire	61
3. 3.1.2 Codage Réel	61
3. 3.1.3.le codage de Gray.....	61
3. 3.2.La Sélection.....	62
La sélection par classement.....	62
La sélection par tournoi.....	62
3. 3.3.Le Croisement.....	62
A. Croisement en un point.....	63
B. Croisement en deux points.....	63
C. Croisement uniforme.....	64

3. 3.4.Mutation.....	64
Transposition de deux allèles consécutifs.....	65
Transposition de deux allèles quelconques.....	65
Inversion d'allèles.....	65
Référence	66

Chapitre IV (Résultats et Discussions)

1. Introduction.....	68
2. Présentation des matériaux utilisés.....	68
2.1 Les renforts.....	68
2.1.1 La fibre de Lin.....	68
2.1.2 La fibre de chanvre.....	70
2.2 La matrice Polyéthylène (PE).....	71
3. Modélisation et simulation numérique.....	72
3.1 Thermal stresses.....	72
3.2 Technique acoustique non linéaire.....	72
3.3 Formalisme de Weibull.....	73
3.4 Modèle de cisaillement de l'interface de Cox.....	74
4. Modélisation génétique.....	74
Organigramme.....	75
5. Résultats et interprétations.....	76
5.1. Chanvre /PE.....	76
5.2. Lin/PE	76
5.3Lin-Chanvre/PE	77
6. Conclusion	82

Références.....83

Conclusion générale.....85

Résumé.....86

Liste des figures

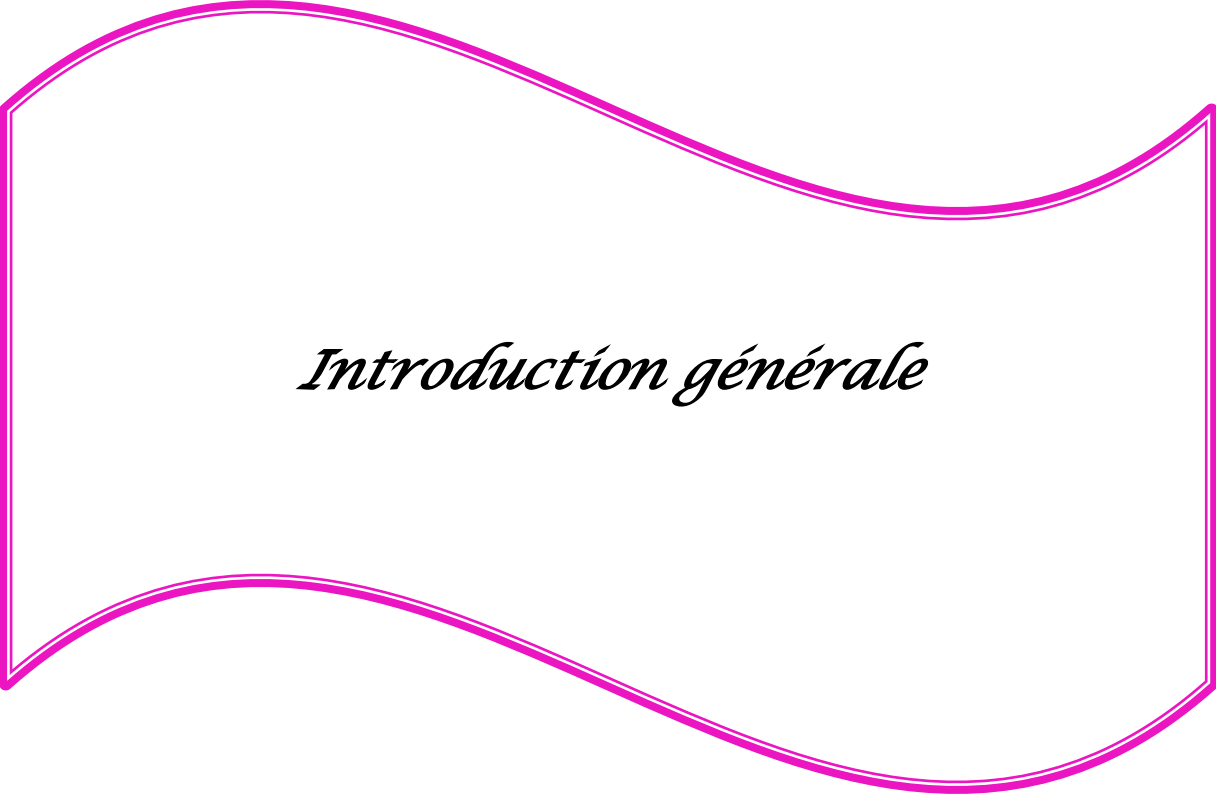
Figure I. 1 : Classification des composites basée sur la matrice.....	04
Figure I. 2 : classement des composites renforcés par des particules.....	05
Figure I. 3 : classement des composites renforcés par des fibres.....	06
Figure 1.4 : Fibre de carbone.....	09
Figure I.5 : différentes familles du renfort	10
Figure I.6 : différentes familles de matrices	11
Figure 1.7 : Présentation de l'interface, matrice et fibre.....	13
Figure I.8 : chanvre	16
Figure 1.9 : fibre de chanvre vue au microscope	16
Figure I.10 : La fibre de sisal	18
Figure II.1: Représentation schématique des différents mécanismes	26
Figure II.2 : Interface fibre/ matrice	27
Figure II.3 : concepts d'interphase (a) et d'interface (b)	28
Figure II.4 : Rupture de fibre	29
Figure II.5 : Rupture transverse de la matrice.....	30
Figure II.6 : Rupture longitudinale de la matrice.....	31
Figure II.7 : Décohésion fibre-matrice	31
Figure II.8: Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre matrice.....	32
Figure .II.9 : Modes d'endommagement.....	34
Figure II.10: courbe contrainte/déformation d'un composite soumis à une traction longitudinale ($\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$).....	35

Figure II.11: courbe contrainte/déformation d'un composite soumis à une traction longitudinale ($\epsilon_{fu} > \epsilon_{mu}$).....	36
Figure II.12 : Rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transversale.....	37
Figure II.13. Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull.....	38
Figure II.14. Calcul de la contrainte moyenne de rupture.....	39
Figure II.15: volume élémentaire représentatif.....	42
Figure II.16 : Equilibre élastique de la matrice en cisaillement.....	42
Figure II.17: Equilibre élastique d'une portion de fibre.....	43
Figure II.18: Modèle de Cox -Profils de contrainte dans la fibre (σ_f) et à l'interface (τ_i).....	45
Figure III.1 : Classes des méthaheuristiques.....	51
Figure III.2 : Organigramme de l'algorithme génétique.....	60
Figure III.3 : Représentation schématique du croisement en un point.....	63
Figure III.4 : Représentation schématique du croisement en deux points.....	63
Figure III.5 : Représentation schématique de la mutation.	65
Figure IV.1 : Vue en coupe d'une tige de lin (coloration des lignines en rouge).....	69
Figure IV.2 : Vue en coupe et longitudinale de fibres de lin.....	69
Figure IV.3 ; Coupe transversale d'une moitié de tige de chanvre.....	70
Figure IV.4 : Représentation de la polymérisation du polyéthylène.....	71
Figure IV.5 : L'organigramme de l'algorithme génétique.....	75

Figure IV.6 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 155 \text{ N/m}^2$).....	78
Figure IV.7 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 175 \text{ N/m}^2$).....	78
Figure IV.8 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 195 \text{ N/m}^2$).....	79
Figure IV.9 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 155 \text{ N/m}^2$).....	79
Figure IV.10 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 175 \text{ N/m}^2$).....	80
Figure IV.11 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 195 \text{ N/m}^2$).....	80
Figure IV.12 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 155 \text{ N/m}^2$).....	81
Figure IV.13 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 175 \text{ N/m}^2$).....	81
Figure IV.14 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 195 \text{ N/m}^2$).....	82

Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Différents types de Fibres de verre.....	08
Tableau III.1 : Exemple de croisement uniforme.....	64
Tableau IV.1 : les propriétés physiques des deux fibres Lin et Chanvre.....	70
Tableau IV.2. Les propriétés physiques de la PE.....	71



Introduction générale

Introduction générale

La finalité de la recherche scientifique dans le domaine de la physique des matériaux est d'apporter à la société des réponses, des solutions techniques et des matériaux innovants avec un prix concurrentiel très raisonnable afin de moderniser notre vie et la rendre plus pratique et plus confortable. Les matériaux composites parmi la classe des matériaux les plus utilisés de nos jours, ils sont définis par l'assemblage d'au moins de deux constituants non miscibles, généralement un renfort noyé dans une matrice. Le renfort constitue l'armature du composite et assurera ainsi la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité), à laquelle la matrice apportera les propriétés souhaitées au composite [1].

Pour des considérations environnementales et de la santé publique, les chercheurs ont trouvé que la substitution des charges minérales (le mica, le talc ou le CaCO_3) et les renforts synthétiques (fibres de verre, carbone,...) par des fibres végétales (comme le bois, le chanvre, le jute, le lin, l'alfa, le kénaf,...) dans la conception des matériaux composites est plus que nécessaire et que les propriétés physiques de ses matériaux sont améliorées, en raison de leur rigidité élevée, leurs faibles coût et densité, leur caractère écologique du fait qu'elles sont issues de ressource renouvelable et biodégradable [2]. Les fibres végétales semblent être un renfort idéal, à tel point qu'elles ont été introduites dans tous types de polymères: thermodurcissables (les polyesters insaturés, les résines époxydes, et les résines phénoliques), ou thermoplastiques (Polyéthylène, PET, PC, PP et le PVC) [3].

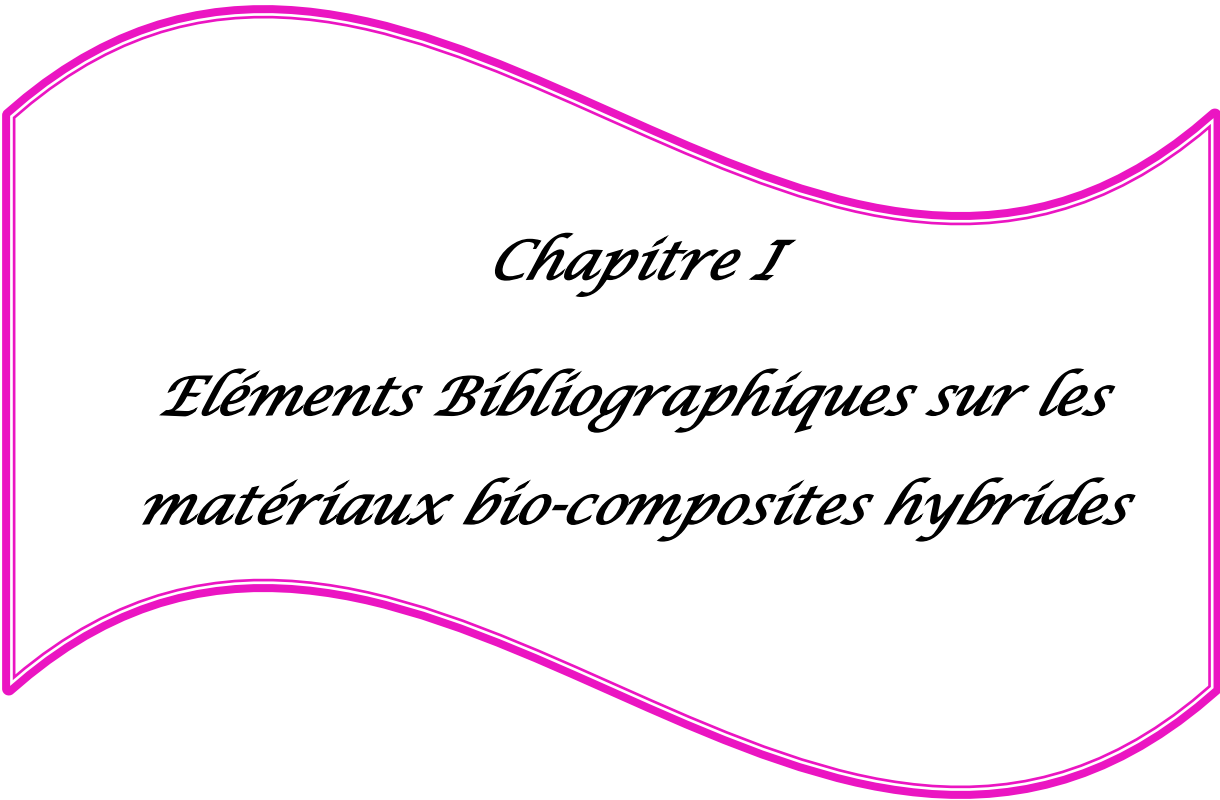
Le polyéthylène est un des polymères le plus simple, le plus utilisé et le moins dispendieux. Cependant, avec la simplicité viennent souvent des propriétés mécaniques un peu moins intéressantes [4,5]. Dans ce travail, nous avons utilisé ce polymère comme matrice de base renforcé par les fibres de chanvre et de lin pour pouvoir étudier l'effet de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface de ce matériau hybride.

Pour présenter un mémoire ordonné et structuré, notre manuscrit est subdivisé en quatre chapitres, d'une introduction et d'une conclusion générale. Le premier chapitre

a été consacré à la présentation des éléments bibliographiques sur les matériaux biocomposites hybrides. On a réservé le deuxième chapitre à la modélisation analytique. Dans le troisième chapitre, on a traité les modèles métaheuristiques. Nos résultats de simulation analytiques et graphiques avec une interprétation plus explicite ont été discutés dans le dernier chapitre.

Références

- [1] Mortensen, A. Concise Encyclopedia of Composite Materials. Elsevier Science, Second Edition, 17 (2007)
- [2] C. Panayiotou, V. Tserki, N.E. Zafeiropoulos :F. Simon: A study of the effect of acetylation and propionylation surface treatments on natural fibres. Composites: Part A, 36, 1110–1118 (2005)
- [3] M.O.B: Faced with the danger of pollution, the government takes action in Tizi-Ouzou. Twelve mills closed and sixteen other warnings. National press: the dépêche in kabilia, 26 January (2009)
- [4] Naik, J.B., Mishra, S. Studies on electrical properties of natural fiber : HDPE composites, Polym. Plast. Tech. Eng., 44, 687-693(2005)
- [5] Mishra, S., Naik, J.B. Mechanical properties of wood polymer composites prepared from agro-waste HDPE, Polym. Plast. Tech. Eng., 44, 511-522 (2005)



Chapitre I

Eléments Bibliographiques sur les matériaux bio-composites hybrides

1. Introduction

La technologie moderne nécessite plus de propriétés mécaniques. De nouvelles perspectives ont émergé avec l'avènement des matériaux composites dont le domaine d'utilisation continue de se développer de manière significative. [1] Matériaux composites offrent de nouvelles possibilités pour combiner de plus en plus efficacement fonctionnalité, forme et matériaux, au sein de réalisation de matériaux plus légers et résistants.[2] Des efforts ont été déployés pour développer et caractériser les matériaux composites a matrices organiques (époxy, polyester,..) et à fibre tissées continues. [1]

2. Les matériaux composites

2 .1 Définition

Un matériau composite est un constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leurs association est complémentaire est permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. [3]

3 Classification des matériaux composites

Il est possible de définir les classes de matériaux composites en se référant à la nature ou à la forme es constituant.

3.1 Classification des composites basée sur la matrice

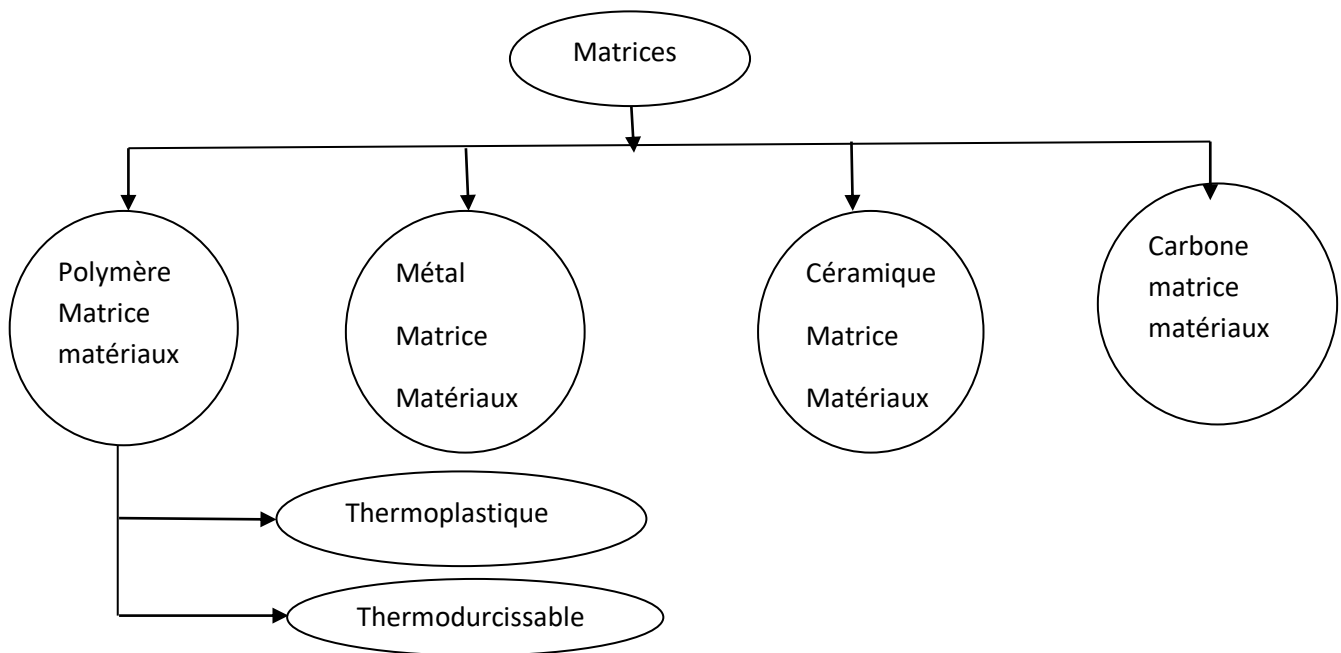


Figure I. 1 : Classification des composites basée sur la matrice [4]

a) Composites à matrice métallique (MMC)

Les composites à matrice métallique sont composés de matrice métallique (aluminium, magnésium, fer, cobalt, cuivre) et une céramique dispersée (oxydes, carbures) ou métallique (plomb, tungstène, molybdène).

b) Composite matrice céramique (CMC)

Les composites à matrice céramique sont composés de matrice céramique et de fibres noyées dans matériau céramique (phase dispersée).

c) Composites à matrice polymère (PMC)

Les composites à matrice polymère sont constitués de matrice en polyester thermodurcissable (polyester insaturé). [2]

3.2 Classification des composites basée sur la structure du matériau de renforcement

a) renforcement par des particules

Un matériau composite est dit à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension

privilegiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion,...etc. Le choix de l'association matrice/particules dépend des propriétés souhaitées du composite. [5]

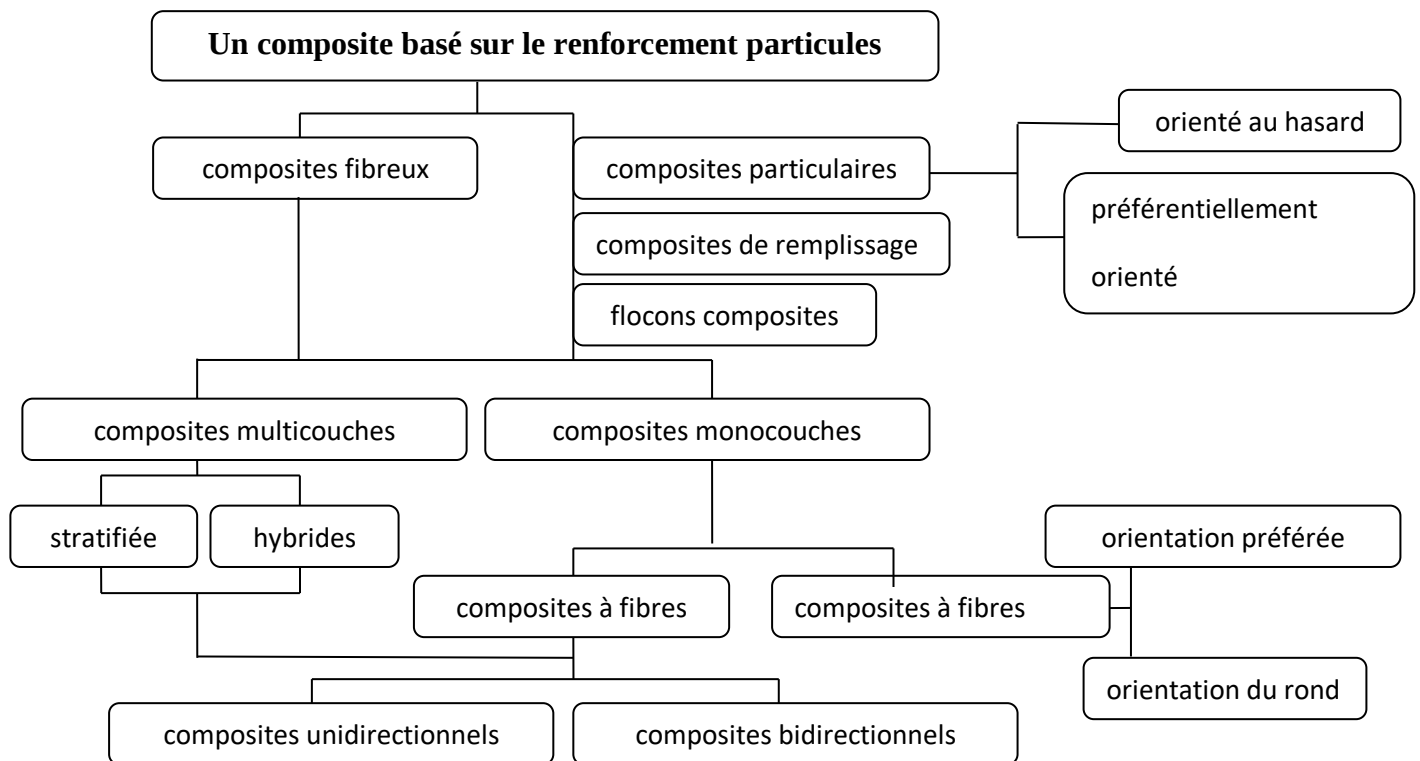


Figure I. 2 : classement des composites renforcés par des particules [6]

b) composites renforcés par des fibres

Les composites renforcés par des fibres contiennent des renforts de longueurs supérieures. Le renforcement fibreux est plutôt physique qu'un moyen chimique de charge un matériau pour l'adapter à divers travaux d'ingénierie applications. [7]

La fibre de renforcement dans un matériau composite monocouche peut être courte ou longue en fonction de ses dimensions globales. Les composites à fibres longues sont appelés fibres continus et les composites dans lesquels des fibres courtes ou discontinues qui sont noyées dans les matrices sont appelées renforcement de fibre

discontinues. Dans les composites à fibre continues, les fibres sont orientées dans une seule direction pour produire des propriétés de résistance beaucoup mieux améliorées. Dans les composites à fibre courtes, le renfort est uniforme dans le cas de composites contenant des fibres courtes bien dispersées. Il y a une différence claire entre le comportement des composites à fibre courtes et longues. [8]

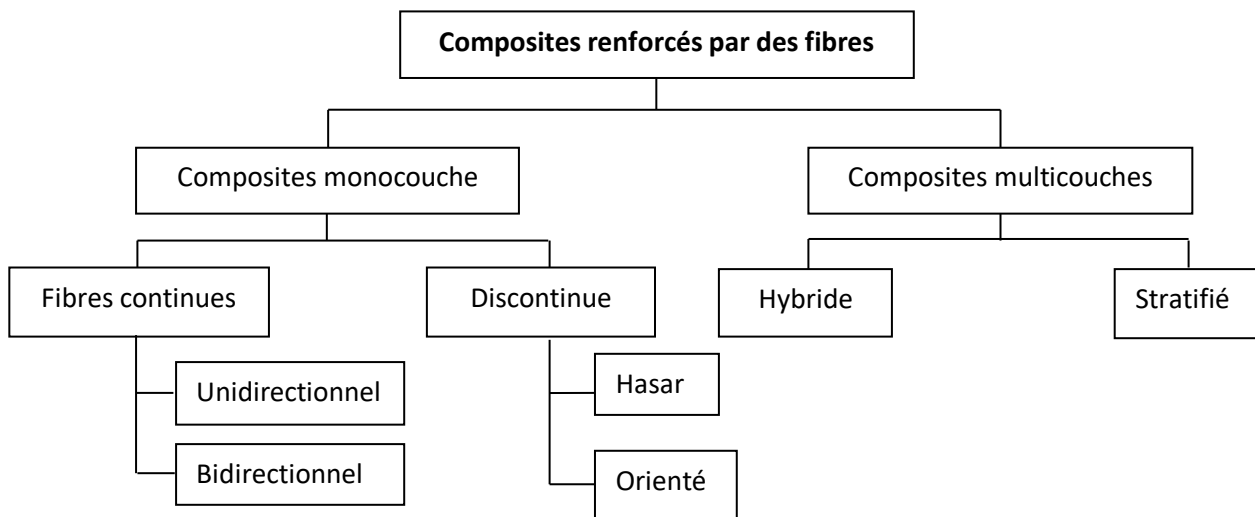


Figure I. 3 : classement des composites renforcés par des fibres [6]

4. Les caractéristiques des matériaux composites

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites.

- ✓ des propriétés de la nature et de la qualité des matériaux constitutifs.
- ✓ de la géométrie et de la distribution du renfort
- ✓ de leurs interactions et de la nature de l'interface matrice-renfort

les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- ✓ le gain de masse
- ✓ la bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée)
- ✓ l'absence de corrosion
- ✓ l'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- ✓ le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la sensibilité aux certains produits chimiques

- ✓ tenus aux impacts et aux chocs
- ✓ très forte anisotropie [9].

5 Différents types de constituants de base

Les différents constituants du composite sont les renforts, la matrice, les charges et les additifs.

5.1 Le Renfort

Le renfort est tout simplement le squelette ou l'armature du composite, il confère aux composites leurs caractéristiques mécaniques : rigidité, résistance à la rupture dureté,...etc. Il permet aussi d'améliorer certaines des propriétés physique, comportement thermique, tenue en hautes températures, tenue au feu , résistance a l'abrasion, propriétés électriques. [3] parmi ses renforts on peut citer :

5.1.1 Fibres

Les fibres sont des éléments du matériau composite qui apportent généralement les propriétés mécaniques recherchées. Elles se présentent sous forme de filaments de plus au moins longs.les fibres se présentent sous diverses formes commerciales:

- ✓ linéiques (fils, méches,...etc)
- ✓ tissus surfaciques (tissus simples , mats ,..etc)
- ✓ multidirectionnelles (tresses, tissus complexes,..etc)

Il existe également des fibres courtes de 1 à 3mm qui sont dispersées dans la matrice , ou encore des fils coupés de 15 à 50mm de longueur. Leur utilisation est encore limitée en raison des difficultés de fabrication. [3]. Les principales fibres sont :

A. Fibres de verre

Les fibres de verre sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion à 1.250°C à travers une filière en platine-rhodium, après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues.[3] Les caractéristique majeures de ces fibres de verre sont répertoriées dans le tableau 1.1

Type	Caractéristiques générales
<i>A</i>	Haute teneur en alcali
<i>B</i>	Bonne résistance chimique
<i>C</i>	Hautes propriétés diélectriques
<i>D</i>	A usage général ; bonne propriétés électriques
<i>R,S</i>	Haute résistance mécanique

Tableau 1.1 : Différents types de fibres de verre. [3]

Les avantages de fibres de verre

- ✓ Rapport performances mécaniques /prix
- ✓ Bonne résistance spécifique (pour verre R)
- ✓ Bonne adhérence avec toutes les résines (existence d'ensimage)
- ✓ Tenue à température élevée
- ✓ Dilatation et conductivité thermique faible
- ✓ Bonne propriétés électriques

Les inconvénients de fibres de verre

- ✓ Faible module (par rapport à la fibre de carbone ou d'aramide)
- ✓ Vieillissement au contact de l'eau. [3]

B. Fibre de carbone

Les fibres de carbone ont la structure du graphite. Elles proviennent de fibre acrylique et du brai. Actuellement, il existe deux procédés de préparation de la fibre de carbone : l'une des voies permet d'obtenir les fibres de types HM (Haut Module) et THM (Très Haut Module), l'autre donne les fibre HR (Haute Resistance) et HT (Haute Ténacité). Une étape de graphitisation, réalisée après les étapes d'oxydation et de carbonisation, dans le procédé de préparation des fibres HM et THM différencie les deux voies. La graphitisation permet d'obtenir les fibres HM et THM.

La figure 1.4 montre une fibre de carbone qu'on trouve dans de nombreuses applications dans l'aéronautique, le spatial ainsi que les sports et loisirs de compétitions. Le prix de ces fibres reste relativement. les modules d'élasticité de ces fibres sont de quelques centaines de GPa. [10]

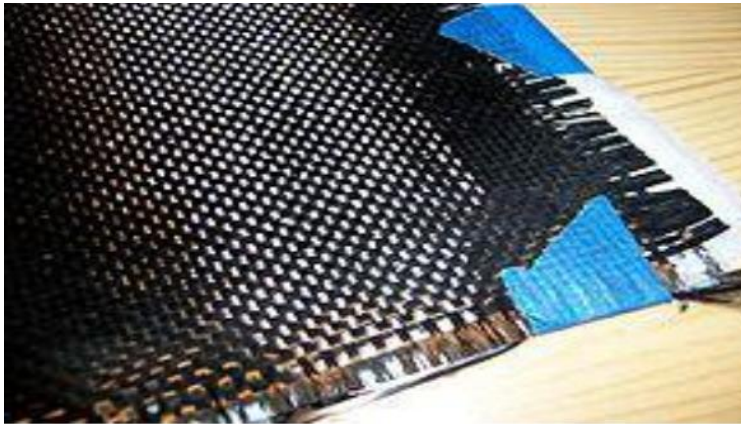


Figure 1.4 : Fibre de carbone. [10]

Les avantages de fibres de carbone

- ✓ Excellentes propriétés mécanique (R_t, R_c, E)
- ✓ Très bonne tenue en température (atmosphère non oxydante)
- ✓ Dilatation thermique nulle
- ✓ Bonne conductibilité thermique et électrique
- ✓ Bonne tenue à l'humidité
- ✓ Usinabilité aisée
- ✓ Faible densité

Les inconvénients de fibres de carbone

- ✓ Prix très élevé
- ✓ Tenue limitée aux chocs et à l'abrasion
- ✓ Mauvais comportement avec l'oxygène (à partir de 400°C), avec les acides oxygénant a chaud et avec les métaux (corrosion galvanique)
- ✓ Adhésion difficile avec les résines. [10]

C. Les fibres de bore

Obtenues par dépôt chimique de chlorure de bore (BCl) et de l'hydrogène (H₂) sur un fil de tungstène de diamètre 13m chauffé à une température comprise entre 1100 et 1300°C par effet joule. [10]

D. Les fibres de carbure de silicium

Le principe d'élaboration est analogue à celui de bore, le dépôt résulte de la décomposition, chimique à 1200°C du méthyltrichloros en présence d'hydrogène. [10]

E. Les fibres d'aramide (kevlar)

Ce sont des polyamides des aromatiques dont la structure est composée de noyaux benzéniques reliés par des groupes CO et HN. [10]

5.1.2 les principaux matériaux de renfort

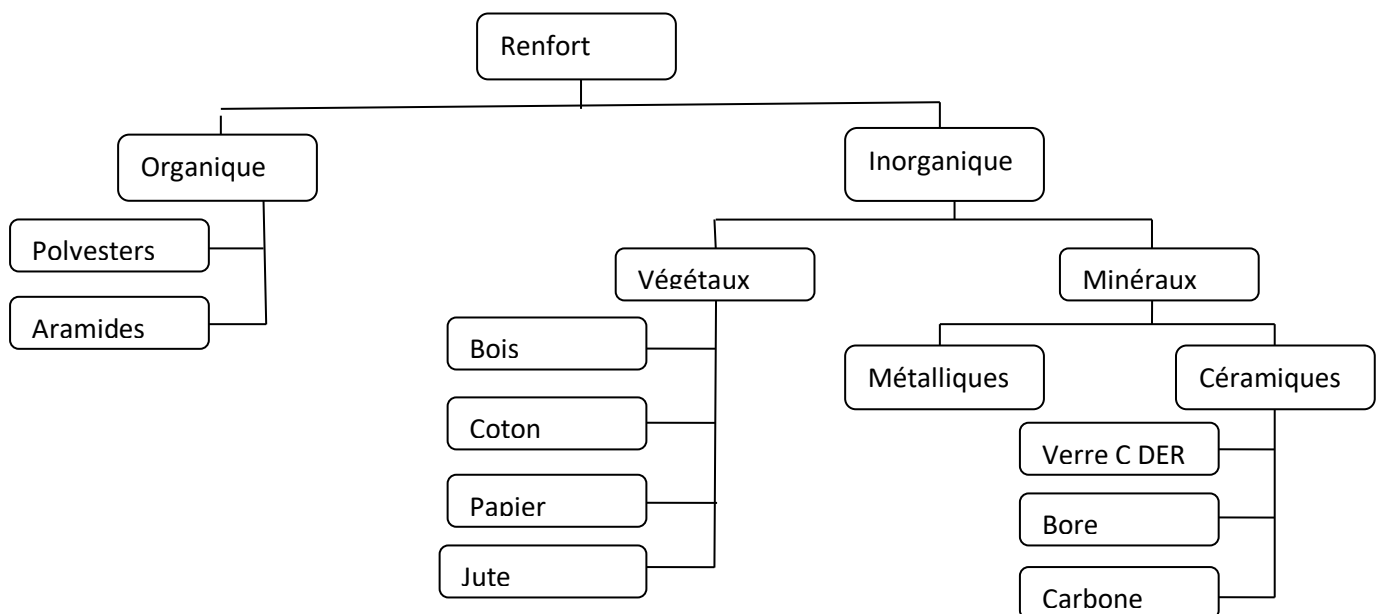


Figure I.5 : différentes familles du renfort [11]

5.2 Les matrices

Les matrices ont essentiellement pour rôle de transférer les contraintes apportées sur le matériau aux fibres, de les protéger contre les agressions extérieures et donnent la forme du matériau. Elles doivent être en outre assez déformable et présente une certaine compatibilité avec les renforts. Pour pouvoir apporter aux matériaux composites des propriétés mécaniques élevées, les résines doivent posséder des masses volumique

faibles. [10] dans la figure suivante, nous avons présenté les différentes familles des matrices.

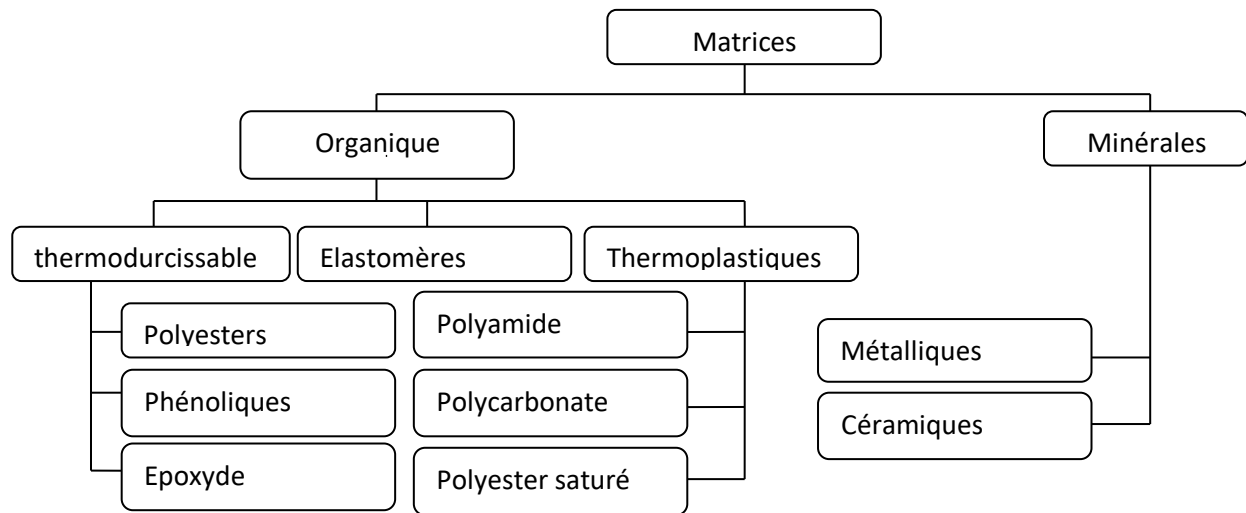


Figure I.6 : différentes familles de matrices [11]

Il existe plusieurs types de résines classées en deux grandes familles sont:

a- Les thermoplastiques

On utilise deux types de semi produits à base thermoplastiques (TP):

- ✓ **Granulé**, dit **TPR** (thermoplastiques renforcé), existe sous les formes:
- ✓ **A fibres courtes** : polymers techno-plastiques ou PP, renforcés de fibres de verre (taux de l'ordre de 30%)
- ✓ **A fibres longues** : fibre continue enrobée de polymère, la fibre à la même longueur que le granule après découpage.
- ✓ **Plaque** dit **TRE** (thermoplastiques renforcés est ampable): composé de deux feuilles de TP extrudées entre lesquelles on insère 1 ou 2 mats de renforts, l'ensemble est repris par calandrage à chaud puis refroidi et découpé à la demande. les renforts est constitués de mat de fibre de verre avec un taux d'environ 30%. [12]

b- Les thermodurcissables

Les matériaux composites thermodurcissables sont mis en forme sous des conditions normales de température puis ils sont montés en température et pression pour permettre la polymérisation et obtenir de façon irréversible la forme définitive.

Les liaisons entre macromolécules obtenues sont des liaisons chimiques fortes qui rendent la transformation irréversible: les composites à base de polymères thermodurcissables sont très difficilement recyclables. une résine époxyde liquide est le plus souvent associée à des fibres de carbone pour ses bonnes caractéristiques mécaniques. Les procédés de fabrication les plus courants sont le moulage le drapage de pré imprégnés. [13]

c- Matrices métalliques

L'utilisation des matrices métalliques est encore actuellement en grande partie à un stade préindustriel. Plusieurs matériaux composites tels que, l'aluminium et ses alliages, Nickel, Titane, présentent une bonne conductibilité électrique, une bonne tenue à des températures élevées et de plus ils possèdent de bonnes caractéristiques mécaniques transverses. Leur fabrication conduit a des cout très élevés.[14]

d- Matrices céramiques

Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone.ils sont utilisés pour la fabrication des pièces qui subissent des contraintes d'origine thermique et leur coût est très élevé. [14]

5.3 Interface

L'interface renfort-matrice est souvent considérée comme une surface de contact, mais ce n'est pas une surface au sens géométrique du terme. Elle assure la compatibilité renfort-matrice et l'adhésion, en transmettant les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif.

A cause de sa structure, l'interface peut être considérée d'un point de vue mécanique, comme un point faible du composite.[15] dans le transfert d'efforts orientés dans le sens de l'axe de la fibre, l'interface est considérée comme une couche de cisaillement. Lorsqu'il n'y a pas de décohésion interfaciale, le comportement est élastique: le cisaillement d'interface est linéairement proportionnel à la différence de déplacement entre la matrice et la fibre au niveau de leurs parois. [10]

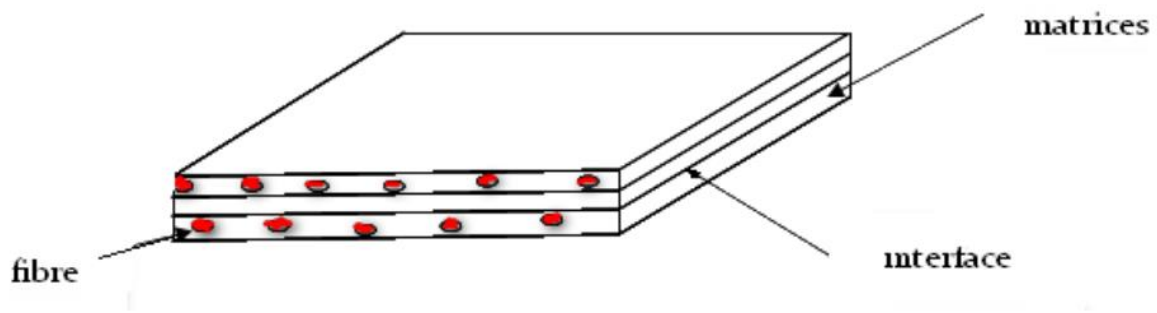


Figure 1.7 : Présentation de l'interface, matrice et fibre [10]

5.4 Les charges et les additifs

Les charges et les additifs sont utilisés pour améliorer les caractéristiques physiques et pour faciliter la mise en œuvre. [12]

a. Charges de renforcement

Des sphères pleines ou creuses généralement en verre, en carbone ou en époxydes, non sphériques ou des écailles de dimension transversal 100 à 500 μm et d'épaisseur de 10 à 20 μm . généralement elles sont ajoutées à des résines des applications électriques ou électroniques.

b. Charges non renforçantes

Permettent de diminuer le coût des résines tout en gardant les performances. Les principales charges sont en carbonates et silicates. On a aussi les charges ignifugeantes qui ont pour rôle de réduire ou d'empêcher les phénomènes de combustion. [12]

c. Charges conductrices et antistatiques

Poudre ou paillettes métallisées en cuivre, fer, aluminium ; Des microbilles de verre métallisées (cuivre argent) ; Des particules de carbone (noir de carbone) et Des filaments métalliques

d. Les additifs

Les additifs, se trouvent en faible quantité et interviennent comme : Lubrifiants et agents de démoulage, Pigments et colorants, Agents anti-retraits et Agents anti-ultraviolets [12]

6 Fibres naturelles

6.1 Définition

Les fibres naturelles sont obtenues par transformations physiques et mécaniques d'une matière naturelle, sans modifier sa composition. [17] les fibres naturelles ont récemment attiré l'attention des scientifiques et ingénieurs en raison des avantages qu'elles fournissent par rapport aux fibres de renforcement classiques comme les fibres de verre.

Le développement des composites comportant des fibres naturelles est donc un sujet d'intérêt depuis les l'an deux mille. Ces fibres naturelles sont des fibres à faible cout biodégradables et non abrasives. [18,19]

6.2 La classification des fibres naturelles (qui existent à l'état naturel)

- **Végétale**
 - ✓ Provenant des tiges (lin, jute, chanvre, genet, kénafe, ramie)
 - ✓ Provenant des feuilles (sisal, gucca, manille)
 - ✓ Provenant des graines (coton, kapok)
- **Minérale** (amiante, métaux,..) [17]

7 Fibres végétales

7.1 Définition de la fibre végétale

Les fibres végétales sont couramment utilisées car ce sont les fibres les plus disponibles. Leur structure complexe est assimilable à celle de matériaux composites renforcés par des fibres de cellulose disposées en hélice. Pour comprendre l'origine de leur comportement, il est nécessaire de connaître leur microstructure, présentée de manière simplifiée. [20]

Sur le plan morphologique, la fibre végétale présente une variabilité très importante en fonction de son origine. En effet, les dimensions des fibres végétales dépendent de

l'état de maturité et aussi des conditions environnementales de croissance de la plante. La variabilité du diamètre peut être très importante le long de la même fibre végétale. [21] la fibre végétale se caractérise aussi par la variabilité de l'épaisseur de sa paroi cellulaire qui découle de celle de la porosité des fibrilles. [22]

7.2 Classification des fibres végétales

Il existe plusieurs critères de différenciation des fibres :

- ✓ Suivant l'origine 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, abaca, paille de graminée) [23]
- ✓ Selon leur teneur en holocellulose (cellulose et hémicelluloses) et en lignine, on peut distinguer les fibres ligneuses (dures et rigides provenant de matériaux 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). [24]
- ✓ Selon leur longueur, les fibres végétales peuvent être groupées en deux catégories: fibres longues, dites libériennes, 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. [23]

7.3 La fibre de chanvre

Le chanvre, *cannabis* sp, famille des *cannabaceae*, est une plante annuelle herbacée à feuilles palmées. *Cannabis sativa* est cultivée pour sa tige (fibres textiles), ses graines (chènevis pour les oiseaux et les huiles). *cannabis* India est utilisée comme drogue ou entre dans la fabrication de médicaments analgésiques. La différence entre ces 2 variétés est la teneur en substances psychotropes. [25]



Figure I.8 : chanvre [25]

Le chanvre est originaire d'Asie centrale mais on trouve sa trace en chine 5000 ans avant JC. Au tour du bassin méditerranée sa culture a été prospère pendant plusieurs siècles. On l'utilise pour faire des toiles de maison, des cordages maritimes, des vêtements et plus tard du papier. [25]

Actuellement, sur fond de polémique, les écologistes prônent l'avènement du chanvre dans la construction, la pharmacopée, les tisanes. Formes à partir es tiges et est constitué de cellulose.

Structure

Constitué 85% de cellulose,8% de lignine et 7% de cire et e pectine. [26]

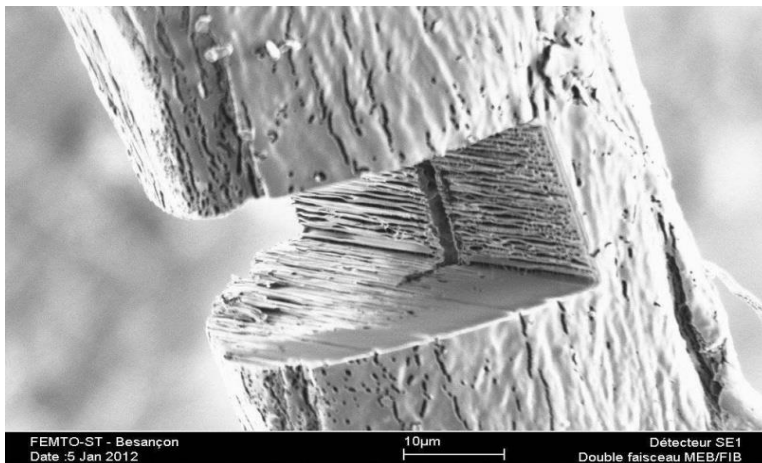


Figure 1.9 : fibre de chanvre vue au microscope [26]

Propriétés physiques et textiles

Hydro régulateur : Il dispose d'une forte perméabilité à la vapeur d'eau ce que le rend particulièrement adapté aux constructions ouvertes à la diffusion.

-Thermo régulateur: conserver une température constante.

-Isolant acoustique.

-Ecologique.

-Bonne capacité d'absorption de l'humidité. [26]

7.4 La fibre de sisal

Le sisal provient d'une agave originaire du Mexique dont les feuilles possèdent de longues fibres très résistantes utilisées pour la fabrication de cordages, tissus grossiers, tapis, sacs et autres objets artisanaux ou à usage domestique, destinés le plus souvent à l'exportation. Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique. Le Sud Malgache est une zone de culture de cette plante. Les conditions climatiques font que ces fibres de sisal sont bien classées sur le marché international des fibres dures. Son nom provient de la ville de Sisal, située dans l'état mexicain du Yucatán. C'est à partir du port de Sisal qu'étaient expédiées les fibres dans le monde entier. Elle était jusque dans les années 1970 bien connue des agriculteurs européens sous forme de ficelle servant à lier les bottes de foin. Elle a, depuis l'apparition des presses à bottes haute densité, été remplacée par de la ficelle en polypropylène. Actuellement encore, les mouvements scouts et éclaireurs utilisent beaucoup ce type de ficelle pour assembler les constructions du mobilier de camp, assemblage selon la méthode Froissart où ni clous ni vis ne sont utilisés. Elle est également utilisée dans la fabrication des cibles traditionnelles de jeu de fléchettes ou de tir à l'arc. On l'utilise également pour fabriquer des disques de polissage. Elle trouve aussi son utilité dans le bâtiment (construction), en effet les fibres de cette plante sont utilisées comme stabilisateurs (par armature) dans le béton de terre (terre crue). Le sisal peut être teint et on le trouve parfois associé à d'autres fibres végétales. Il absorbe l'humidité des pièces dans lequel il se trouve. Il convient particulièrement aux chambres. Très doux, le tissage du sisal est très agréable. Les Aztèques savaient déjà utiliser le sisal pour en faire du papier, du fil à coudre, des cordes, des nattes et des chaussures. [25]



Figure I.10 : La fibre de sisal [25]

8 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites

L'usage des matériaux composites ne cesse de croître dans différents domaines : automobile, naval, pétrolier, aéronautique et aérospatial. En effet, ces matériaux présentent de nombreux avantages :

- ✓ Ils sont beaucoup plus légers ce qui donne un gain énorme au niveau du poids de l'avion qui est nettement réduit. l'avion consomme donc moins de carburant.
- ✓ Ils sont insensibles aux produits chimiques tels que les huiles, les liquides hydrauliques ...
- ✓ On peut créer des matériaux de toutes les formes et de toutes les épaisseurs, en fonction de la demande.
- ✓ Ils se déforment moins en fonction de la température et de la pression ce qui est un des gros enjeux des matériaux utilisés en aviation commerciale. Ils sont peu sensibles à l'humidité, à la chaleur et à la corrosion ...

Toutefois, certains désavantages sont associés aux matériaux composites :

- ✓ Ils sont beaucoup plus sensibles à tous les impacts .une petite faille peut engendrer de grosses déformations.
- ✓ La détection de problèmes est difficile ce qui entraîne une rigueur extrême dans leur fabrication et dans leur assemblage.

- ✓ La mise en œuvre des réparations est beaucoup plus complexe. [16]

9. Matériau bio-composite

9.1 Définition

Elle est apparue que certaines applications composites avec des fibres naturelles ont démontré une performance compétitive comparativement à la fibre de verre et consécutivement, une nouvelle ère de bio-composites a été ouverte. Le comportement des fibres naturelles intriguent les chercheurs du monde entier se demandent comment le lotus peut conserver l'eau, créer une barrière sans détruire la feuille ou comment il serait possible de réduire l'épuisement des ressources en pétrole grâce aux substituts de matériaux biologiques. Un bio composite est un matériau composite comprenant une ou plusieurs phases d'origine biologique .en termes de renforcement, cela inclut des fibres végétale telles que le coton, le lin, alfa, sisal, cellulose et autres. [27]

Ce rapport se veut une vue d'ensemble des fibres naturelles et des résines dans les matériaux composites, principalement appelées bio-composites.

10 Les matériaux hybrides

10.1 Définition matériaux hybrides

Un matériau hybride est un matériau constitué d'au moins d'une phase organique et d'une phase inorganique, dans lequel au moins l'une de ces phases à une dimension comprise entre le dixième et la centaine de nanomètre. Il apparaît donc que l'hybride de Sanchez est un nanocomposite organique/inorganique de Kelly. [28]

10.2 Classement des matériaux hybrides

La structure des matériaux hybrides peut être divisée en deux classes et cela en fonction des niveaux d'interaction entre la phase organique (O) et la phase inorganique (I).

- **Les hybrides de classe I** sont des matériaux dans lesquels les interactions organique/inorganique sont faibles (de type Van der Waals, ou électrostatiques)

- **Les hybrides de classe II** sont des matériaux dans lesquels les interactions organique/inorganique sont fortes (de type covalentes, ou iono-covalentes). [29]

Il existe deux façons de fabriquer un matériau hybride de classe I :

La première consiste en une distribution aléatoire d'un réseau minéral à travers un réseau organique, sans qu'il y ait des liaisons chimiques ou de fortes interactions : cette configuration forme un copolymère. Les réactions de formation de chaque réseau doivent se faire simultanément sans amener d'inhomogénéité.

La deuxième possibilité consiste à introduire la partie minérale ou organique sous forme de particules colloïdales. Il y a formation d'un nanocomposite particulière avec une liaison matrice-particule faible. La synthèse de type de matériaux est réalisée à l'état liquide. La synthèse d'un matériau hybride de classe II peut se faire soit en créant un pontage entre les deux réseaux après leur formation soit en utilisant des précurseurs déjà porteurs d'une partie organique et d'une partie minérale. [29]

11 Les bio-composites hybrides

Un matériau bio-composite hybride est une combinaison de "hybride" et "bio-composite". Ce matériau est simplement une hybridation de matériaux bio-composites. La signification de "hybride" dans les matériaux bio-composites hybrides est l'hybridation dans la structure macroscopique à l'échelle métallographique. [30]

12 Conclusion

Le choix d'une association entre un renfort et une matrice est très délicat. En effet, 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. En raison de cette interaction, un matériau composite présente une certaine tolérance à l'endommagement. Plusieurs mécanismes interviennent et contribuent au travail de rupture : fissuration matricielle, décohésion interfaciale. Ces mécanismes qui mettent en jeu les propriétés physiques et mécaniques de chaque constituant soulignent dès à présent le rôle déterminant joué par la liaison fibre/matrice.

Références

- [1] Bleay S. M , Humbertone L :Mechanical and electrical assessment of hybrid composites containing hollow glass reinforcement , Composites Sciences and Technology, 59(9), 1321-1329 (1999).
- [2] Louis Berreur, Bertrand de Maillard,Stanislas Nösperger :L’industrie française des matériaux composites,08-10(2001)
- [3] B. Agoudjil, L. Ibos, J. C. Majesté, Y. Candau, and Y. P. Mamunya, "Corrélation between transport properties of Ethylene Vinyl Acetate/glass, silver-coated glass spheres composites," Composite: Part A, 39, 342-351(2008)
- [4] R.E. Shalin : Polymer Matrix Composites, Chapman & Hall, London, (1995)
- [5] Jean-Marie BERTHLOT :Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures 4eme édition, Ed TEC&DOC, Lavoisier,(2005).
- [6] Richardson T. :Composites-a design guide, Industrial Press Inc.,200 Madison Avenue,Newyork, (1987)
- [7] Warner S.B., Fibre Science., Prentice Hall, Engle wood Cliffs, New Jersey(1995)
- [8] H. Schmidt, J. Non-Cryst : Solids, 73 (1985)
- [9][surduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/6570/6570-materiaux-composites-et-structure s-composites-ens.docx](http://surduscol.education.fr/sti/sites/eduscol.education.fr.sti/files/ressources/pedagogiques/6570/6570-materiaux-composites-et-structure%20s-composites-ens.docx)
- [10] Toufik achour, étude des techniques de réparation des structures composites endommagées, mémoire de magister, Université mentouri constantine,8-20 (2011)
- [11] DJEBLOUN Youcef , Chapitre I : Généralité sur les matériaux composites. (2004)
- [12] Etude de la filière des matériaux composites thermoplastiques ,_France ,Mai (2014)
- [13] Nodal consultants, l’industrie française des matériaux composites.23(2002)
- [14] Laarej Merad , etude par spectroscopie raman et modelisation d’une resine composite rtm,thèse doctorat ,Université de Tlemcen,14-15(2010)
- [15] H.Mao,S.Mahadevan :Fatigue damage modelling of composite materials , Composite Structures ,58,405–410(2002).

- [16] B Guerira. Généralités sur les matériaux composites sur <http://thesis.univ-biskra.dz/2282/3/ChapI.PDF>. (2005)
- [17] Les fibres textiles et leur classification , <https://textileaddict.me/les-fibres-textiles-et-leur-classification/> 18 novembre (2016)
- [18] D. Nabi Saheb, J. P. Jog, Natural Fiber Polymer Composites: A Review Advances in Polymer Technology, 18(4), 351-363(1999).
- [19] Xue Li, Lope G. Tabil, Satyanarayan Panigrahi, Chemical Treatments of Natural Fiber for Use in Natural Fiber-Reinforced Composites: A Review, 15, 25-33 (2007).
- [20] Christophe Baley :Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites, 2(130), (2013)
- [21] K.Charle, C.morvan, J.Bréard, JP.Jernot, M.Gomina, Etude morphologique d'un composite naturel la fibre de lin, revue des composites et des matériaux avancées,16,11-24 (2006).
- [22] C.Ververis, K.Georgiou, N.Christodoulakis, P. Santas, R.Santas, Fiber dimensions, lignin and cellulose content of various plant materials and their Suitability for paper production, Industrial Crops and Products ,19, 245–254 (2004).
- [23] A. Y. Nenonene,Elaboration et caractérisation mécanique de panneaux de particules de tige de kénaf et de bioadhésifs à base de colle d'os, de tannin ou de mucilage, thèse de doctorat de l'université de Toulouse, Institut National Polytechnique de Toulouse, Sciences des Agro ressources,(2009).
- [24] F. Michaud, Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique: Aptitude post formage’’ thèse Phd, univ Laval,(2003).
- [25] Les fibres végétales sur le lien :
<http://laboitadoc.majeloc.ch/Page2/Docs/fibres%20vegetales.pdf>
- [26] Les fibres textiles naturelles sur
<http://www.snv.jussieu.fr/bmedia/textiles/index.html>
- [27] Ewa Rudnik, Compostable Polymer Materials. Elsevier.21 (2008)
- [28] C. Sanchez, F. Ribot, Design of organic-inorganic materials synthesized via sol-gel Chemistry, new journal of chemistry,18, 1007 (1994).

[29] Ouahida boubekka, Synthèse et caractérisation de matériaux hybrides, Organique-inorganique, thèse doctorat, université mentouri Constantine, 4 (2011)

[30] A. R. SANADI, M. R. PIGGOTT : Strength and modulus with short aligned fibres: Part 1, Journal of materials Science 20, 421- 430 (1985)



Chapitre II

La modélisation analytique

1. Introduction

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui conduit à l'apparition de défauts locaux. Contrairement aux matériaux métalliques, pour lesquels l'endommagement dépend du chargement imposé, les composites présentent toujours les mêmes endommagements. Usuellement, on définit trois échelles de travail nécessaires à la description des matériaux composites. [1]

A l'échelle microscopique apparaissent des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice ce sont des décohésions fibres/matrice ou alors dues aux porosités, permettant d'observer les dimensions et l'arrangement des fibres dans la matrice, ainsi que les hétérogénéités les plus fines. Le diamètre de la fibre est de l'ordre de 5 μm . [1]

A l'échelle mésoscopique, l'apparition au sein de la matrice, de fissures dites intralaminaires, parallèles à la direction des fibres ne permettant pas d'observer les hétérogénéités, elle considère le pli d'une stratification comme une couche élémentaire et homogène.

A l'échelle macroscopique, le phénomène de décollement inter-ply (c'est le délaminage).

Evidemment, ces mécanismes d'endommagement ne sont pas uniformément présents au sein du matériau. Ils dépendent notamment de la sollicitation, de l'architecture des constituants et de l'orientation des plis.

La rupture des fibres, induite essentiellement par une traction axiale, intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint la contrainte de rupture de la fibre. Ces ruptures de fibres entraînent des concentrations de contraintes de cisaillement à l'interface fibre-matrice. Elles favorisent la multiplication des ruptures des fibres voisines intactes, combinant l'aspect statistique de la rupture de la fibre et les capacités de report de charge dans la matrice. Sous chargement constant, l'augmentation de charge n'étant plus le facteur d'activation de l'accumulation de ruptures de fibres, il faut envisager les propriétés viscoélastiques de la matrice pour justifier de sa poursuite. La ruine des stratifiés est le résultat de la combinaison de l'ensemble des mécanismes élémentaires d'endommagement du pli unidirectionnel

(décohésion fibre-matrice, fissures intralaminaires, rupture de fibres), auquel s'ajoute le mécanisme de rupture entre couches (délaminage). Ces mécanismes sont initiés, entre autres, par la présence des fissures intralaminaires en raison des concentrations de contraintes induites, des discontinuités des champs de contrainte entre les plis, des défauts initiaux liés au procédé de fabrication et des effets de bords (négligeables dans le cas de structure tubulaire). [2]

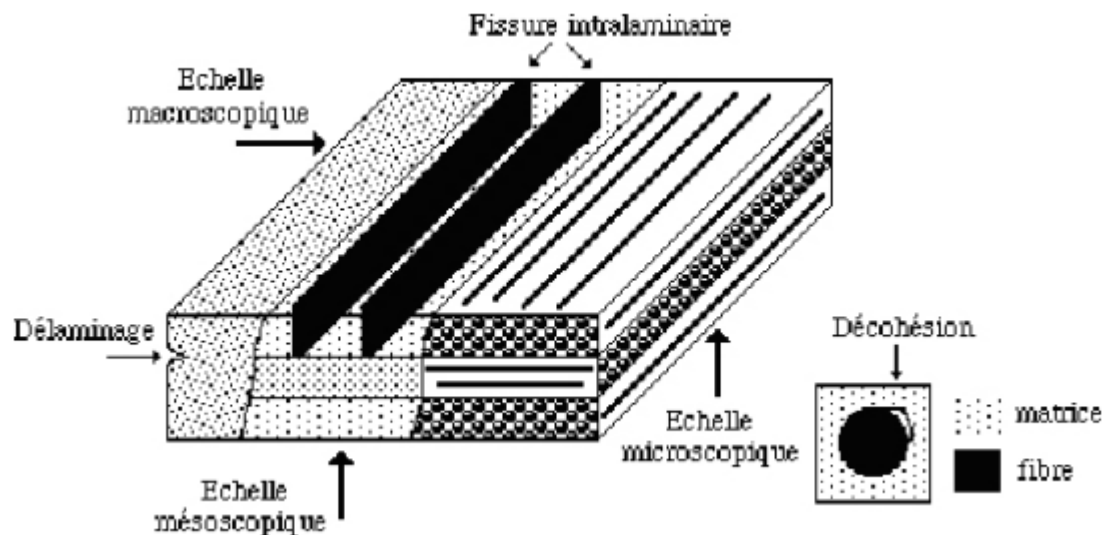


Figure II.1: Représentation schématique des différents mécanismes d'endommagement [3]

2. L'interface fibre/matrice

Les propriétés mécaniques de l'interface fibre-matrice sont des facteurs importants pour comprendre le comportement des matériaux composites. Entre une interface idéale où l'adhésion totale ou chimique et le contact unilatéral, il existe une liste complète des caractéristiques de l'interface qui doivent être identifiées et contrôlées afin d'obtenir le comportement optimal du matériau composite selon l'utilisation souhaitée. Il est reconnu que la puissance d'interface permettra un transfert important de restrictions entre la matrice endommagée et les fibres qui restent intactes.

les caractéristiques individuelles des champs de contraintes aux points de fissure seront relativement faibles. C'est la capacité d'absorber les distorsions imposées par une personne sur des matériaux. L'interface puissante donne une plus grande rigidité à

tous. Une fois que la matrice est endommagée, l'effort se concentre sur les fibres au lieu de se détendre par l'interface. Il est peu probable que les fibres résistent longtemps à ce traitement et à tous les matériaux susceptibles de se briser. En revanche, l'interface est faible. [4]

Ainsi, les matériaux composites sont flexibles et peuvent absorber de grandes distorsions lors d'effets.

Le niveau de résistance d'un matériau composite est souvent critique à travers une matrice qui reste inférieure à celle des fibres en général. Dans ce cas, la fibre matricielle ne se renforce pas et réduit la résistance globale de la structure [4]



Figure II.2 : Interface fibre/ matrice [5]

2.1. Rôle des interfaces

Il existe plusieurs rôles essentiels sont attribués aux interfaces pour un bon comportement du composite :

- Assurer la continuité physique d'un constituant à l'autre à travers tous le matériau, en empêchant, par exemple, la formation de porosités.
- Transmettre les efforts : en effet, la matrice répartit et transmet les efforts aux fibres par l'intermédiaire des interfaces.
- Protéger l'une des deux phases : les fissures peuvent ainsi être déviées, l'humidité arrêtée par l'ensimage (fibre de verre) ou à

la réaction chimique de la matrice sur le renfort ralentie (matrice métallique). [6]

3. Interphases

L'interphase est un milieu continu qui peut être une zone de réaction chimique formée par les constituants du composite lors de son élaboration, ou une couche d'épaisseur fine (en général de quelques 10 ou 100 nm) et de nature chimique définie, introduite volontairement dans le but de protéger la fibre ou de contrôler la liaison inter-faciale, ou bien encore de contribuer à améliorer la compatibilité chimique fibre/matrice. Elle joue un rôle fondamental dans le comportement mécanique des composites car elle est le siège des mécanismes d'interaction entre les fibres et la matrice. Elle permet d'optimiser les phénomènes de déviation de fissures, de transfert de charge fibre/matrice et parfois même de ralentir l'accès de l'oxygène jusqu'à la fibre. La figure II.3(a) présente le concept d'interphase et II.3(b) d'interface. [7]

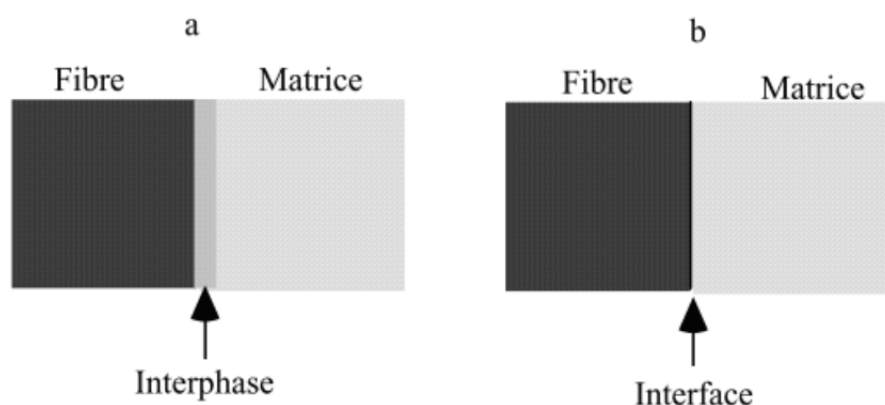


Figure II.3 : concepts d'interphase (a) et d'interface (b)

4. Les divers mécanismes de rupture dans un composite unidirectionnel

L'identification des dommages par la microscopie a permis de développer l'analyse d'endommagement. La perte de rigidité du matériau endommagé permis de définir et de déterminer un seuil critique de déformation ou de contraintes qui amorce les mécanismes d'endommagement. Il a été montré que la température, la vitesse de sollicitation, les chocs, la nature chimique d'un environnement agressif, le chargement

monotone ou cyclique influencent l'évolution de l'endommagement. La ténacité de la matrice et la qualité de l'interface influence la résistance aux dommages [8].

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires :

- la rupture des fibres ;
- la rupture transverse de la matrice ;
- la rupture longitudinale de la matrice ;
- la rupture de l'interface fibre-matrice ;

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées [9].

4.1. La rupture de fibre

Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction σ_f dans une fibre atteint la contrainte à la rupture σ_{fu} de la fibre (figure. II.4). La rupture de la fibre produit une concentration de contraintes au voisinage de la rupture [10].

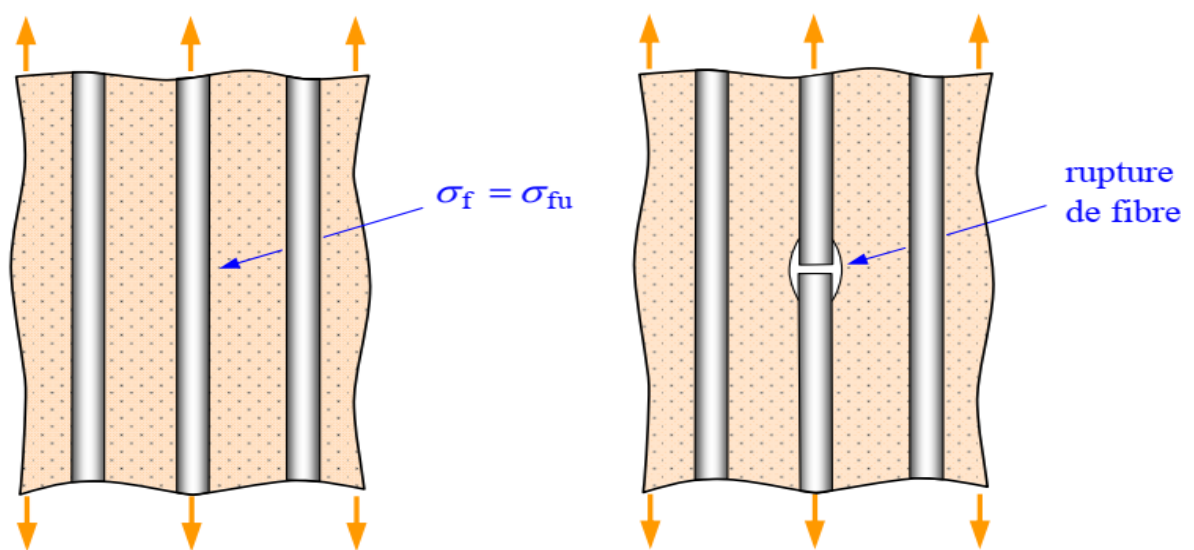


Figure II.4 : Rupture de fibre [9]

4.2. Fissuration matricielle

La complexité des matériaux composites introduit plusieurs types d'endommagements à l'échelle microscopique. La fissuration de la matrice peut se produire, soit par fissuration (figure. II.5), lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice, soit par fissuration longitudinal (la figure. II.6) lorsque la contrainte de cisaillement σ_m dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture σ_{mu} , généralement au voisinage d'une fibre. Ce dernier mode de rupture, appelé « splitting », par les anglosaxons, se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice:

$\sigma_d > \sigma_{mu}$. Dans le cas contraire ou $\sigma_d < \sigma_{mu}$, il se produit une rupture par décohésion de l'interface fibre-matrice (figure. II.6).

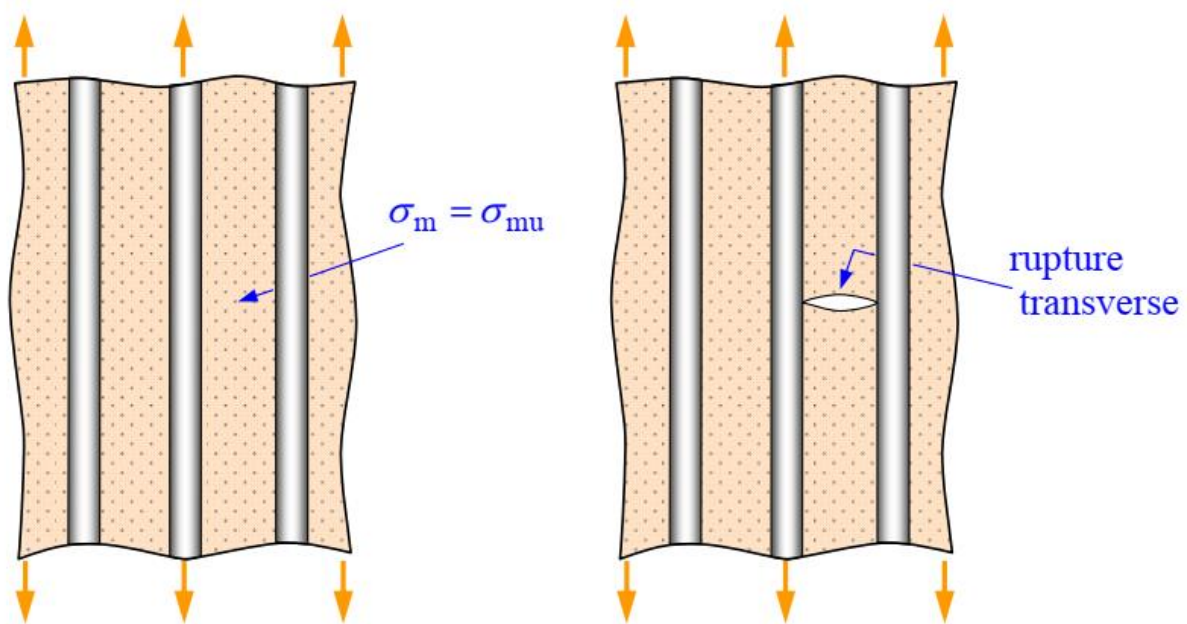


Figure II.5 : Rupture transverse de la matrice [9]

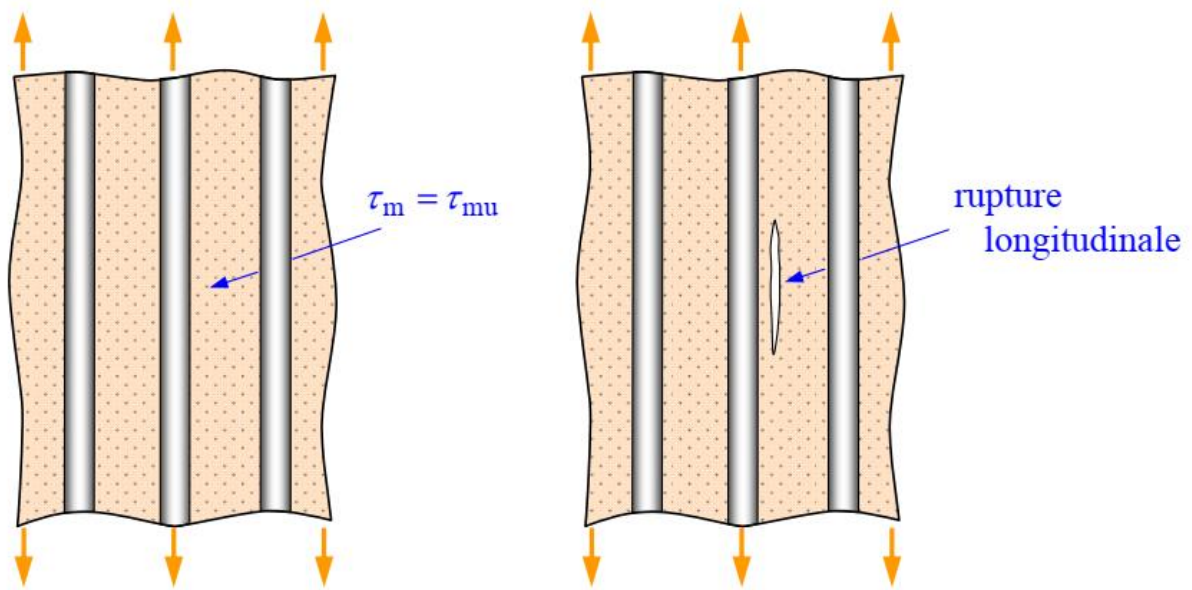


Figure II.6 : Rupture longitudinale de la matrice [10]

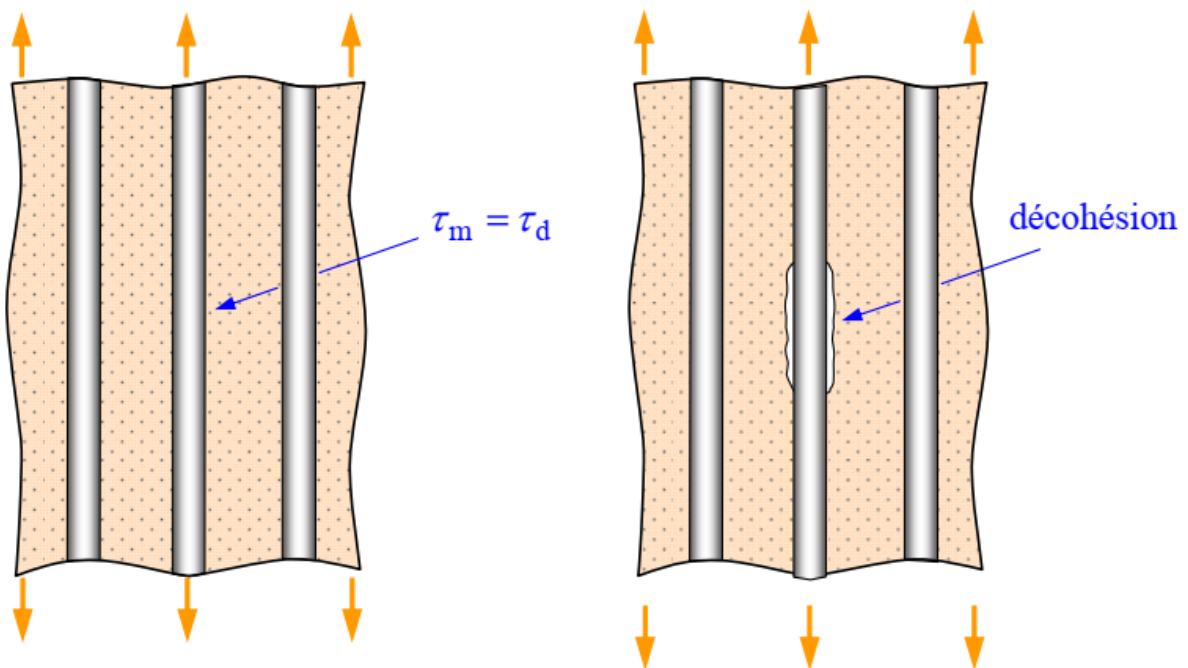


Figure II.7 : Décohésion fibre-matrice [10]

4.3. La décohésion fibre-matrice

La propagation de la rupture diffère suivant la nature de l'interface fibre-matrice. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres, on peut distinguer les cas suivants : [9]

4.3.1. Cas d'une interface très forte

La rupture initiée, soit par rupture des fibres, soit par rupture de la matrice, induit en front de fissure des concentrations de contraintes conduisant à une propagation de la rupture successivement dans les fibres et dans la matrice (figure II.8.a) . La rupture observée est de type fragile (figure II.8.b). Il est également possible d'observer un pontage, par rupture longitudinale de la matrice ou par décohésion fibre-matrice, de deux fissures initiées dans des zones différentes (figures II.8.c et II.8.d). [9]

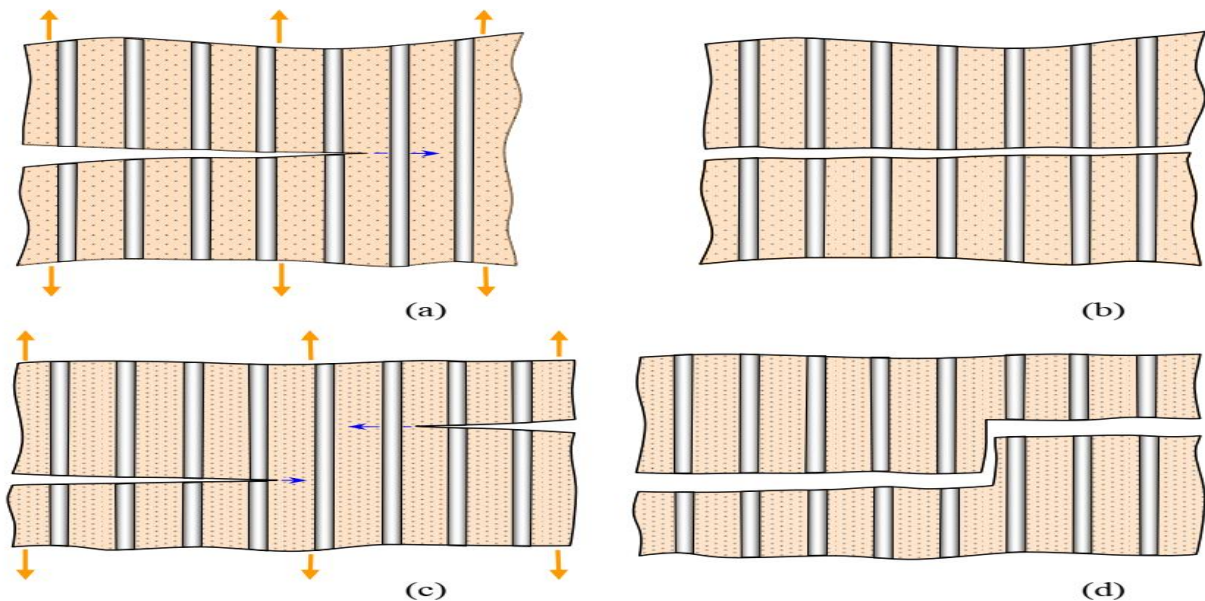


Figure II.8: Propagation de la rupture dans le cas d'une forte adhérence fibre matrice [9]

4. 3.2.Cas d'une interface très faible

La fissuration matricielle est déviée à l'interface, la décohésion fibre-matrice s'étend sur une très grande distance [9]

4.3.3. Cas d'une interface ayant des propriétés intermédiaires

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 des zones plus rigides. La rigidité du matériau diminue progressivement au cours de la sollicitation. Ce type de comportement permet au composite d'avoir une contrainte à la rupture plus élevée que dans les deux cas précédents. Ce dernier cas est bien entendu celui souhaité pour un composite optimal [6].

5. Le comportement d'un composite unidirectionnel

Dans un composite thermoplastique unidirectionnel sollicité parallèlement aux fibres, le comportement à rupture peut être imaginé comme étant constitué des séquences suivantes: [11]. Cas des fibres et matrice subissent la même déformation : Le composite possède donc un comportement linéaire élastique jusqu'à l'apparition d'une première fissure matricielle.

Cette fissure se propage et s'approche d'une fibre, ensuite on peut distinguer les cas suivants:

5.1 Cas d'une interface très forte

Si l'adhérence entre fibres et matrice est très forte, la fissure continue sa propagation comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle, mode I (mode d'ouverture). Cela entraîne aussi des concentrations de contraintes sur les fibres voisines et provoque la rupture catastrophique du composite. Le comportement du composite est celui d'un matériau fragile et les fibres n'exercent aucun effet de renforcement sauf éventuellement par leur énergie de rupture. Qui ne peut plus jouer son rôle de renfort. Ce type de matériau possède un comportement fragile, comme une céramique monolithique. Alors la déformation des deux constituants est élastique. Il n'y a aucun déplacement relatif entre fibre et matrice, le transfert de charge s'effectue par l'intermédiaire d'une forte contrainte de cisaillement dans la matrice, dont l'intensité décroît lorsqu'on s'éloigne radialement de la fibre (figure. II.9). [11]

5.2 Cas d'une interface très faible

Si l'interface est trop faible, la fissure matricielle est bien déviée à l'interface, mais la décohésion entre fibres et matrice s'étend sur une très grande distance sur laquelle la matrice n'intervient donc plus. Donc, la résistance du composite est très faible en mode II et III. [11]

5.3 Cas d'une interface relativement faible

Si l'adhérence entre fibres et matrice est relativement faible, la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire (mode II de la rupture) en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface. Le mode II, ou mode de glissement droit, est la situation recherchée dans la déviation de fissure, avec le mode III (glissement vis). En règle générale, la propagation de la fissure est en mode mixte combinant le mode I et les deux autres modes (II et III) (figure. II.9). [11]

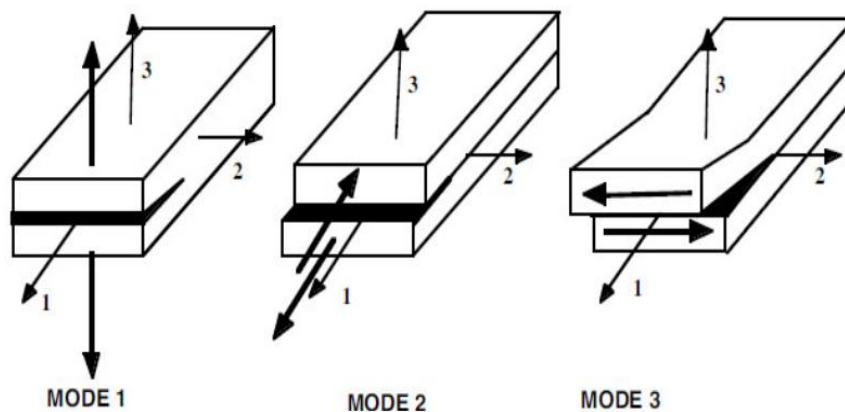


Figure .II.9 : Modes d'endommagement. [11]

6. Le composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction longitudinale, l'initiation de la rupture se produit généralement soit par rupture des fibres lorsque la déformation à la rupture des fibres est plus faible que celle de la matrice ($\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$), soit par rupture transverse de la matrice dans le cas contraire.[12] Dans le cas ($\epsilon_{fu} < \epsilon_{mu}$), les courbes contrainte-déformations sont représentés sur la figure II.10.

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

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

Où σ_{fu} la contrainte à la rupture des fibres et $(\sigma_m) \varepsilon_{fu}$ la contrainte dans la matrice pour une déformation égale à la déformation ε_{fu} à la rupture des fibres. La contrainte $(\sigma_m) \varepsilon_{fu}$ est inférieure à la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice, d'où:

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

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

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

Avec pour les fractions usuelles de fibres:

$$\sigma_{cu} = \sigma_{fu} v_f \quad (\text{II.4})$$

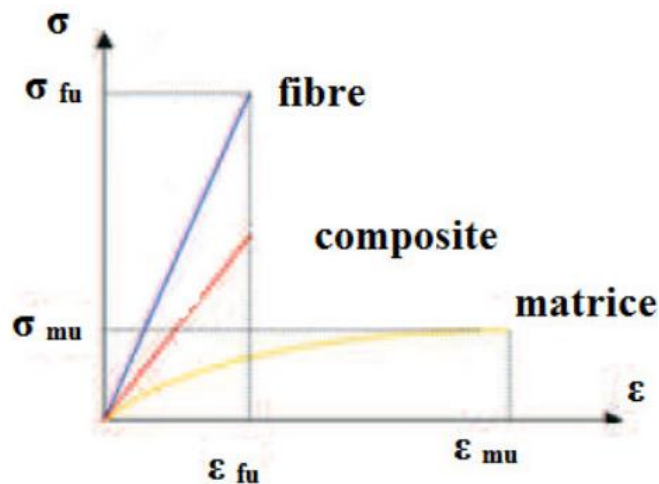


Figure II.10: courbe contrainte/déformation d'un composite soumis à une traction longitudinale ($\varepsilon_{fu} < \varepsilon_{mu}$) [10]

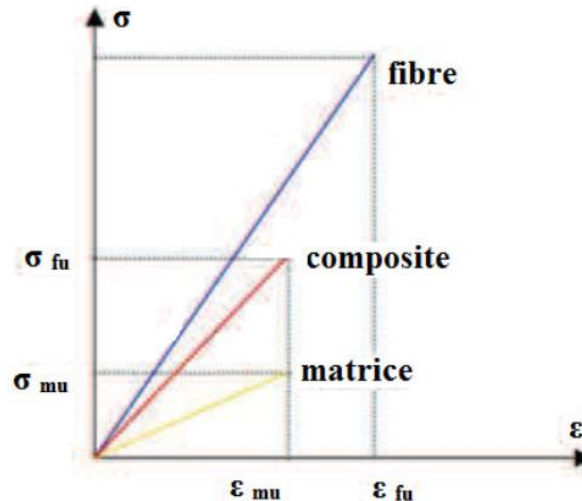


Figure II.11: courbe contrainte/déformation d'un composite soumis à une traction longitudinale ($\varepsilon_{fu} > \varepsilon_{mu}$) [10]

Dans le cas où la déformation à la rupture de la matrice est inférieure à celle des fibres figure II.11, la contrainte à la rupture est donnée par l'expression :

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

Où σ_f est la contrainte dans la fibre au moment de la rupture de la matrice. La valeur est alors bien inférieure à celle donnée par l'expression (II. 5). La matrice ne permet pas dans ce cas de bénéficier totalement du renfort des fibres.

7. Le composite unidirectionnel soumis à une traction transversale

Dans le cas d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transversale, la rupture se produit soit par rupture de la matrice, soit par décohésion de l'interface fibre matrice. La rupture de la matrice se produit lorsque la contrainte en traction σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture σ_{mu} de la matrice (figure II.12)

Ce processus intervient lorsque la contrainte à la rupture de la matrice est inférieure à la contrainte de décohésion σ_d en traction de l'interface fibre-matrice [12]. Dans le cas contraire ($\sigma_{mu} > \sigma_d$), la rupture du composite se produit par rupture de l'interface fibre- matrice.

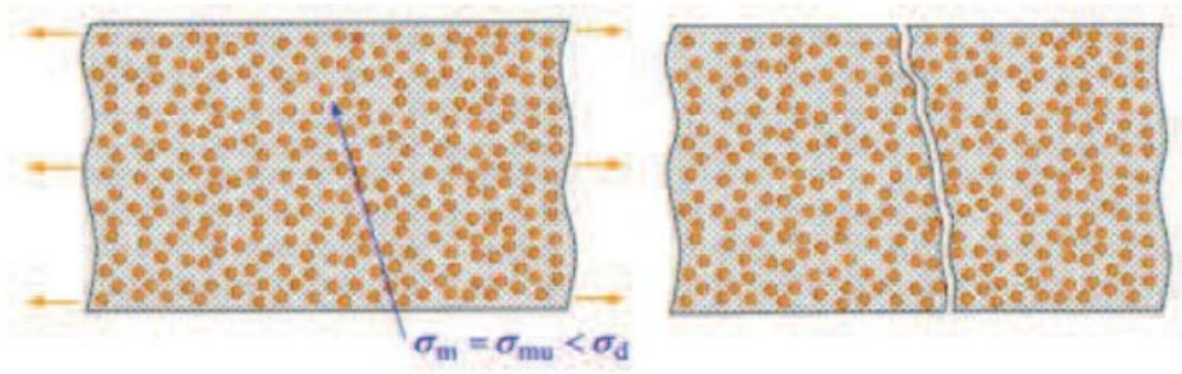


Figure II.12 : Rupture d'un composite unidirectionnel soumis à une traction transversale. [12]

8. Le modèle probabiliste de Weibull

La fibre est supposée constituée d'un assemblage de maillons ayant chacun leur résistance propre à la rupture. La fracture de la fibre intervient quand le maillon le plus faible se rompt. On divise la fibre en N segments dans lesquels la contrainte est supposée uniforme est égale à σ_i . La probabilité pour qu'un segment soit rompu à la contrainte σ_i est $F(\sigma_i)$. a $F(\sigma_i)$, on associe la fonction de densité de probabilité $f(\sigma)$ définie par : [13]

$$f(\sigma_i) = \int_0^{\sigma_i} f(\sigma) d\sigma \quad (\text{II.6})$$

Si σ_r est la résistance théorique à rupture du matériau:

$$f(\sigma_r) = \int_0^{\sigma_r} f(\sigma) d\sigma = 1 \quad (\text{II.7})$$

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

$$R = \prod_{i=1}^n (1 - f(\sigma_i)) \quad (\text{II.8})$$

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

$$R = 1 - f(\sigma) \quad (\text{II.9})$$

La probabilité pour que la fibre soit rompue est alors :

$$\text{Pr}(\sigma) = 1 - R = 1 - (1 - f(\sigma)) \quad (\text{II.10})$$

En utilisant l'approximation de poisson,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{x}{n}\right)^n = \exp(-x) \quad (\text{II.11})$$

on obtient:

$$(1 - f(\sigma_i))^n = \exp(-NF(\sigma)) \quad (\text{II.12})$$

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:

$$\Phi(\sigma) = \frac{(\sigma - \sigma_u)^m}{\sigma_0^m} \quad (\text{II.13})$$

$$\Phi(\sigma) = 0$$

$$\sigma < \sigma_u$$

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

σ_0 : facteur d'échelle.

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

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

Bleu : $m = 0.5$ Rouge : $m = 1$ Vert : $m = 1$

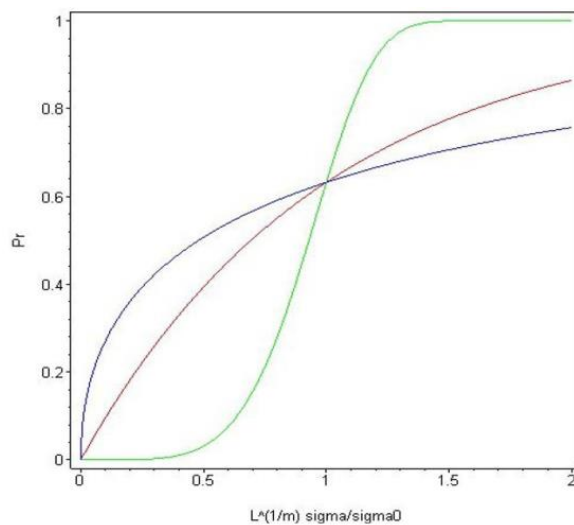


Figure II.13. Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull [13]

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

$$P_r(\sigma) = 1 - \exp\left[-L \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (\text{II.14})$$

La contrainte moyen de la rupture d'une population statistique de fibre peut s'écrire :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^1 \sigma dP_r \quad (\text{II.15})$$

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

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty (1 - P_r) d\sigma \quad (\text{II.16})$$

Soit à partir de l'équation (II.14) :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty \exp\left[-L \left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] d\sigma \quad (\text{II.17})$$

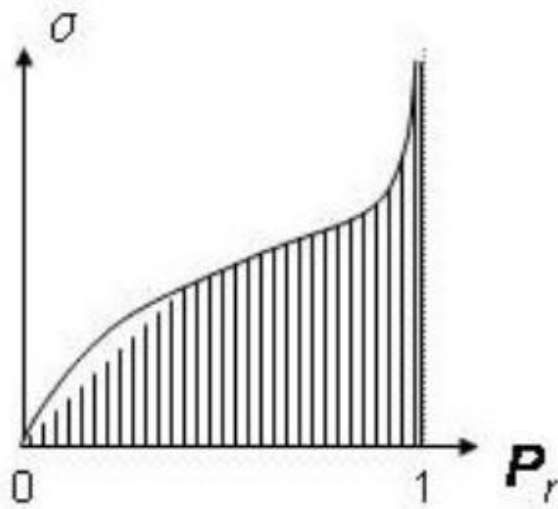


Figure II.14. Calcul de la contrainte moyenne de rupture[13]

On effectue les changements de variables suivants :

$$t = L \left(\frac{\sigma}{\sigma_m}\right)^m$$

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

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

L'équation (II.17) devient :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty e^{-t} t^{\frac{1-m}{m}} \frac{\sigma_0}{mL^{1/m}} dt \quad (II.18)$$

$$\text{Soit : } \bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_0}{mL^{\frac{1}{m}}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (II.19)$$

Où Γ est la fonction Gamma définie comme suit :

$$\Gamma = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \quad (II.20)$$

8.1. L'estimation de paramètres de Weibull

8.1.1. La méthode de régression linéaire

La méthode de régression linéaire est un cas particulier de la méthode des moindres carrés. L'expression de la loi de Weibull peut être "linéarisée" par :

$$y = \ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-P_{fi}}\right)\right) = m \ln \sigma_i - \ln \sigma_a \quad (II.21)$$

i = rang de l'élément dans l'échantillon (classé par ordre croissant de contrainte de rupture)

P_{fi} = probabilité de rupture de l'élément

σ_i = contrainte de rupture de l'élément de rang i

m_0, σ_0 = paramètres de Weibull

m, σ_0 peuvent alors être déterminés par la méthode des moindres carrés.

L'expression de m est alors:

$$m = \frac{\sum_i y_i \ln \sigma_i - \frac{1}{N} (\sum_i y_i \sum_i \ln \sigma_i)}{\sum_i (\ln \sigma_i)^2 - \frac{1}{N} (\sum_i y_i \ln \sigma_i)^2} \quad (II.22)$$

8.1.2. La méthode des moments

Les deux premiers moments de la distribution de Weibull sont :

$$\text{La contrainte moyenne } \bar{\sigma} = \sigma_0 \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (II.23)$$

$$\text{La variance : } s^2 = \frac{\sum_i (\sigma_i - \bar{\sigma})^2}{n-1} = \sigma_0^2 \left\{ \Gamma\left(1 + \frac{2}{m}\right) - \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right)^2 \right\} \quad (\text{II.24})$$

En faisant l'hypothèse que la moyenne et la variance trouvée expérimentalement sont égales à celle de la distribution entière (pour un nombre infini d'éléments), l'expression de la moyenne et de la variance permet de déterminer m et σ_0 .

8.1.3. La méthode de la vraisemblance maximale

La méthode de la vraisemblance maximale donne des paramètres de Weibull permettant d'approcher au mieux les résultats expérimentaux. La probabilité que les résultats expérimentaux soient reproduits doit être maximisée. Cela revient à ce que tous les G , se produisent simultanément c'est à dire que le produit des probabilités de rupture doit être maximal.

On définit alors la fonction de vraisemblance L_v

$$l_v = f(\sigma_1)f(\sigma_2) \dots f(\sigma_N) = \prod_i f(\sigma_i) \quad \text{avec} \quad f(\sigma_1) = \frac{dP_f}{d\sigma} \quad \text{et} \quad P_f = \exp(-\alpha\sigma^m)$$

$$\text{On a encore : } \ln(L_v) = N\ln(m) + N\ln(\alpha) + (m-1) \sum_i \ln(\sigma_i) - \alpha \sum_i \sigma_i^m$$

Cette fonction doit être maximisée vis-à-vis des variables m et σ_i . Cela peut être écrit sous la forme du système suivant :

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \ln(L_v)}{\partial m} &= 0 \\ \frac{\partial \ln(L_v)}{\partial \alpha} &= 0 \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{cases} \frac{N}{m} + \sum_i \ln(\sigma_i) - \alpha \sum_i \sigma_i^m \ln(\sigma_i) = 0 \\ \frac{N}{\alpha} + \sum_i \sigma_i^m = 0 \end{cases}$$

Le module de Weibull peut être calculé en éliminant α entre les deux équations précédentes:

$$\frac{N}{m} + \sum_i \ln(\sigma_i) - N \frac{\sum_i \sigma_i^m \ln(\sigma_i)}{\sum_i \sigma_i^m} = 0 \quad (\text{II.25})$$

9 Le modèle de COX

9.1. 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 σ_1 . Seules les composantes axiales des contraintes

générées dans la fibre et la matrice sont considérées. Il s'agit donc d'une approche monodimensionnelle dans laquelle la contrainte axiale dans une section donnée de la fibre est supposée uniforme. La fibre et la matrice sont supposées parfaitement élastiques et la liaison fibre/matrice parfaite.

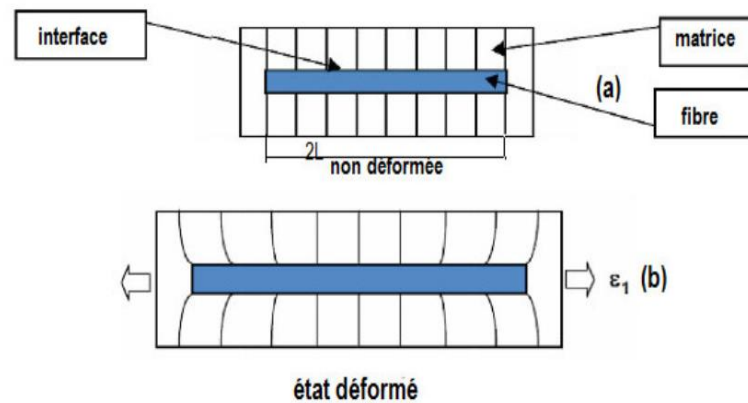


Figure II.15: volume élémentaire représentatif. Schéma simplifié du champ de contrainte autour de la fibre. (a) sans chargement; (b) chargé.

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

A) L'équilibre 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 ($r \propto a$) sont équilibrées par la force de cisaillement à l'interface ($r = a$) soit: $2\pi \cdot \tau \cdot dx = 2\pi \cdot a \cdot \tau_i \cdot dx$

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

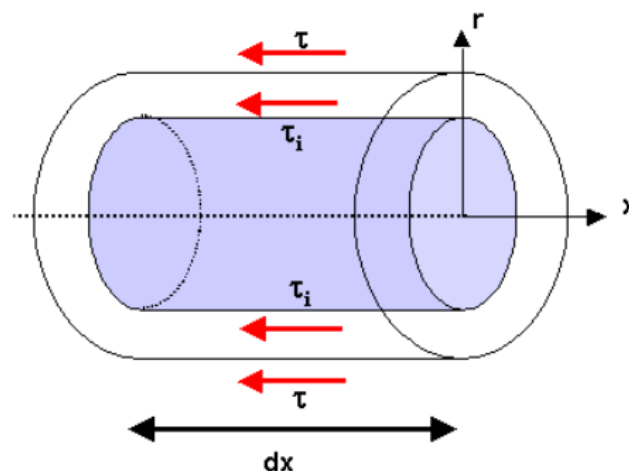


Figure II.16 : Equilibre élastique de la matrice en cisaillement.

Soit : $\tau = \frac{a\tau_i}{r}$

En faisant l'hypothèse d'un comportement élastique linéaire de la matrice en cisaillement ($\tau = G_m \gamma$), on peut écrire: $\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau}{G_m} = \frac{a\tau_i}{G_m r}$ (II.26)

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):

$$\int_a^R dw = \frac{\tau_i a}{G_m} \int_a^R \frac{dr}{r} \quad (II.27)$$

$$w_R - w_a = \frac{\tau_i a}{G_m} \ln(R/a) \quad (II.28)$$

Soit

$$\beta^2 = \frac{2G_m}{E_f \ln(R/a)} \quad (II.29)$$

B) L'équilibre 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: $\pi \cdot a^2 \cdot d\sigma_f = -2\pi a \tau_i \cdot dx$

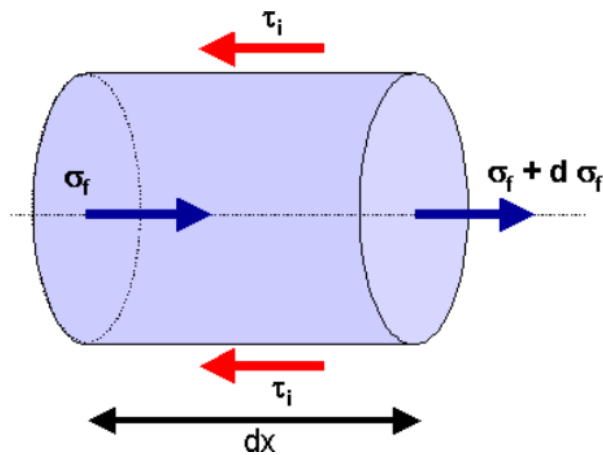


Figure II.17: Equilibre élastique d'une portion de fibre.

Ce qui permet d'écrire: $\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_i}{a}$ (II.30)

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = -\frac{2}{a} \frac{d\tau_i}{dx} \quad (\text{II.31})$$

$$\text{on obtient : } \frac{d\tau_i}{dx} = \frac{G_m}{a \ln(R/a)} \left(\frac{dwR}{dx} - \frac{dwa}{dx} \right) \quad (\text{II.32})$$

Pour $r = R$: on suppose que la déformation de la matrice est égale à la déformation appliquée

$$\frac{dwR}{dx} = \varepsilon_m = \varepsilon_1 \quad (\text{II.33})$$

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

$$\frac{dwa}{dx} = \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (\text{II.34})$$

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

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = \frac{\beta^2}{a^2} (\sigma_f - E_f \varepsilon_1) \quad (\text{II.35})$$

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

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

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \left\{ 1 - \frac{\cosh(\beta x/r)}{\cosh(\beta s)} \right\} \quad (\text{II.36})$$

B.2 Contrainte de cisaillement à l'interface

$$\tau_i = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_1 \sinh(\beta x/r) / \cosh(\beta s) \quad (\text{II.37})$$

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

$$\tau_i = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_1 \sinh(\beta x/r) / \cosh(\beta L/a) \quad (\text{II.38})$$

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

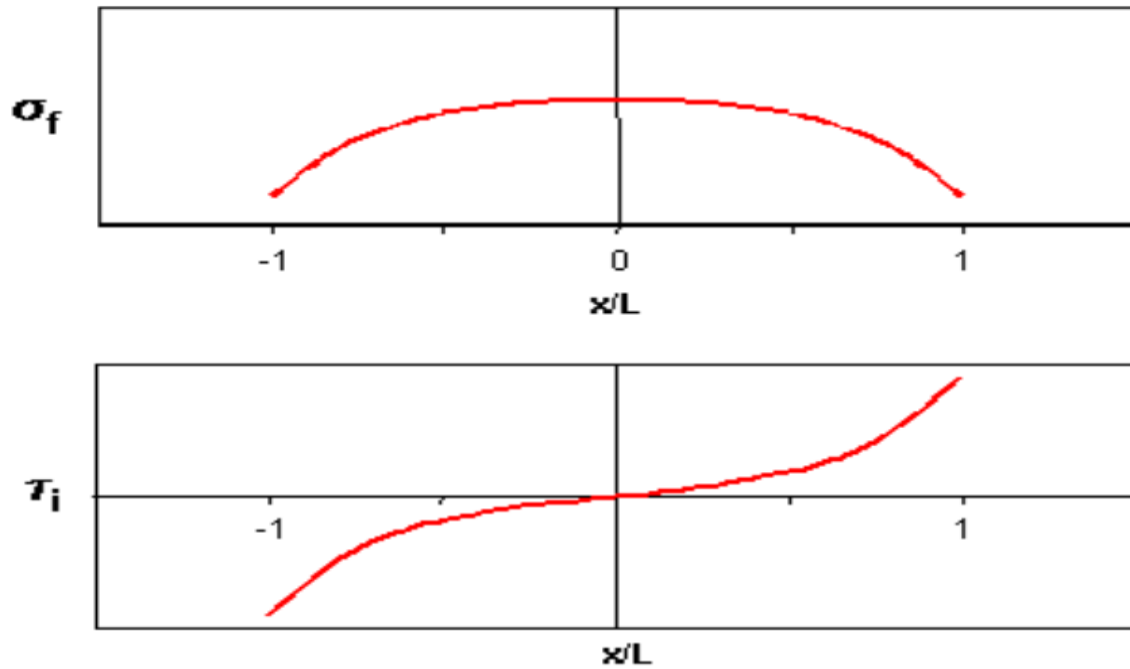


Figure II.18: Modèle de Cox - Profils de contrainte dans la fibre (σ_f) et à l'interface (τ_i).

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 intéressantes de voir l'influence du contrainte thermique sur les dégâts de l'interface proposés par Cox [14], ce qui donne la forme de la contrainte de cisaillement le long de la longueur fibre que la forme suivante: $\tau =$

$$\frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta_1 \operatorname{th}(\beta_1 l/2) \quad (\text{II.39})$$

Pour simplifier les calculs, nous prenons $\beta_1^2 = \frac{2G_m}{E_f r_f^2 \ln(\frac{R}{r_f})}$ (II.40)

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)

10. Le modèle de Fick (Modèles de diffusion d'eau) :

Le modèle de diffusion de Fick est le modèle le plus couramment utilisé pour prédire la diffusion d'eau au sein d'une matrice polymère. Pour un cas d'étude de diffusion à une dimension, avec un coefficient de diffusion D constant, la seconde loi de Fick est

écrite telle que [15] :

$$\frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2}$$

où la teneur en eau c est fonction de l'espace et du temps. Si l'échantillon étudié est une plaque fine d'épaisseur e , les conditions initiales et aux limites sont :

$$\begin{cases} c = c_0, 0 < x \leq e, t = 0 \\ c = c_L, x = \{0, e\}, t \geq 0 \end{cases}$$

avec c_0 la teneur en eau initiale et c_L la teneur en eau aux limites.

Une solution analytique à ce problème est donnée par Crank [15] pour une diffusion fickienne dans une plaque mince caractérisée par un coefficient de diffusion constant.

$$\frac{c(x,t)-c_0}{c_L-c_0} = 1 - \frac{4}{\pi} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{(-1)^n}{(2n+1)^2} \exp\left(-D \left(\frac{2n+1}{e}\right)^2 \pi^2 t\right) \cos\left(\frac{(2n+1)\pi x}{e}\right) \quad (\text{II.41})$$

Si la plaque ne contient initialement pas d'humidité $c_0 = 0$ et avec $c_L = C_S$, après intégration sur l'épaisseur, on obtient :

$$c(t) = \left(1 - \frac{8}{\pi^2} \sum_{n=0}^{\infty} \frac{1}{(2n+1)^2} \exp\left(D \left(\frac{2n+1}{e}\right)^2 \pi^2 t\right)\right) C_S$$

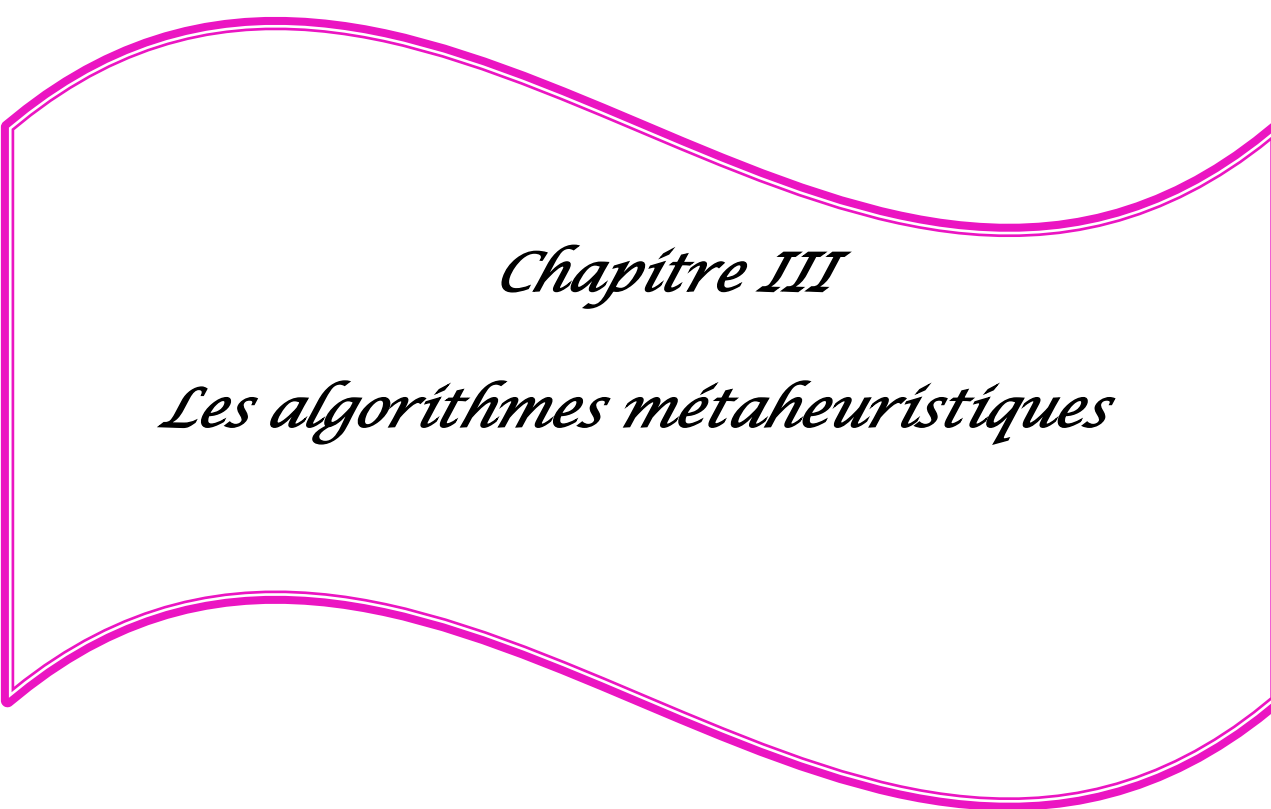
où $C(t)$ est la teneur en eau globale (%) à l'instant t et C_s la teneur en eau globale à saturation (%).

11. Conclusion

Afin de modéliser l'endommagement et la rupture des composites à fibres sous chargement mécanique, plusieurs approches sont utilisées. Parmi eux, l'analyse, des modèles basés sur le transfert de charge (modèle de Cox). L'un des défis de cette modélisation est la nécessité de prendre en compte l'endommagement d'interface et le comportement d'aspect statistique de la fibre et la matrice qui seront évalués dans notre travail sous l'influence de la contrainte thermique, en se basant sur la technique acoustique non linéaire. En absence des modèles analytiques, nous allons utiliser une approche basée sur des méthodes dites heuristiques pour modéliser l'effet de cette contrainte thermique sur l'endommagement de nos matériaux biocomposites hybrides.

Référence

- [1] J. Cinquin : Les composites en aérospatiale, Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites, 140 5645 (2002)
- [2] Berthelot J-M. : Composite Materials: Mechanical Engineering Series, 225 (1999)
- [3] Alain Thionnet, Christiane Martin, Sophie Barradas : Mécanique et comportements des milieux continus : tome 2 Applications et théorie des invariants. Ellipses, Institut de Mathématiques de Bourgogne, 294 (2003)
- [4] Zeddour Mohamed Brahim.Z : Optimisation par algorithme génétique de l'écart entre fibres d'un matériau composite pour l'estimation de l'endommagement d'interface, Mémoire de magister ,14 (2013)
- [5] M. DJELIL : Caractérisation mécanique et physicochimique de matériaux composites à matrice organique dans les prothèses, Mémoire de magister (2006)
- [6] Maurice Reyne : Technologie des composites, Edition hermes, Paris (1990)
- [7] Louis Berreur : Bertrand de Maillard, L'industrie française des matériaux composites, Etude stratégique réalisée par pour le compte de la DiGITIP / SIM. Rév. 2 du 13 mai 2002 Stanislas Nösperger 17 décembre 2001.
- [8] R. El Guerjouma, J.C. Baboux, D. Ducret, N. Godin, P. Guy, S. Huguet, Y. Jayet, T. Monnier : Non destructive evaluation of damage and failure of fiber reinforced polymer composites using ultrasonic waves and acoustic emission, Advanced engineering materials , 3, 601-608(2001).
- [9] Jean-Marie Berthelot :Mécanique des Matériaux et Structures Composites, Institut Supérieur des Matériaux Le Mans, France et Mécaniques Avancés,225. (2010)
- [10] Houideg Abdellah :Transfert de charge et frottement Fibre/ Matrice d'un Matériau Composite (T300/914),Thèse en vue d'obtention du diplôme de magistère (2012)
- [11] BERTHELOT, J. M : Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures, Paris, Masson, 615 (1992)
- [12] kaouche naima, :prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites, Thèse en vue d'obtention du diplôme de magistère,28 (2016)
- [13] W. Weibull :Théory of the strength of materials, Royal Swedish Academy of Eng. Sci.Proc., 151, 1-45 (1939)
- [14] H L Cox :L'élasticité et la résistance du papieretd'autres matières fibreuses, Brit. J. Appl. Phys, 12, 72-79 (1952).
- [15] C. A. Coulson, J. Crank : The mathematics of diffusion, The Mathematical Gazette, 42(340) 165 (1958)



Chapitre III

Les algorithmes métaheuristiques

1. Généralités sur les métaheuristiques

Les premières métaheuristiques datent des années 80, et bien que d'origines discrètes, on peut les adapter à des problèmes continus. Elles interviennent généralement quand les méthodes classiques ont échoué, et sont d'une efficacité relativement imprévisible. Le terme métaheuristique est utilisé car, par opposition aux heuristiques particulières pour un problème donné, les métaheuristiques peuvent être utilisées pour plusieurs types de problèmes, et l'heuristique n'est pas réellement explicite, mais déduite d'un algorithme donné. Les métaheuristiques ont également comme caractéristiques communes leur caractère plus ou moins stochastique, ainsi que leur inspiration par une analogie avec d'autres sciences (physique, biologie, etc.) [1].

Les métaheuristiques forment un ensemble de méthodes utilisées en recherche opérationnelle et en intelligence artificielle pour résoudre des problèmes d'optimisation réputés difficiles. Résoudre un problème d'optimisation combinatoire, c'est trouver l'optimum d'une fonction, parmi un nombre fini de choix, souvent très grand. Les applications concrètes sont nombreuses, que ce soit dans le domaine de la production industrielle, des transports ou de l'économie – partout où se fait sentir le besoin de minimiser des fonctions numériques, dans des systèmes où interviennent simultanément un grand nombre de paramètres [2].

1.1. Classification des Métaheuristiques

Une manière de classer les métaheuristiques est de distinguer celles qui travaillent avec une population de solutions de celles qui ne manipulent qu'une seule solution à la fois. Les méthodes qui tentent itérativement d'améliorer une solution sont appelées méthodes de recherche locale ou méthodes de trajectoire. La méthode Tabou, le Recuit Simulé et la Recherche à Voisinages Variables sont des exemples typiques de méthodes de trajectoire. Ces méthodes construisent une trajectoire dans l'espace des solutions en tentant de se diriger vers des solutions optimales. L'exemple le plus connu de méthode qui travaille avec une population de solutions est l'algorithme génétique. La figure suivante donnera un panorama des méthodes les plus utilisées [2].

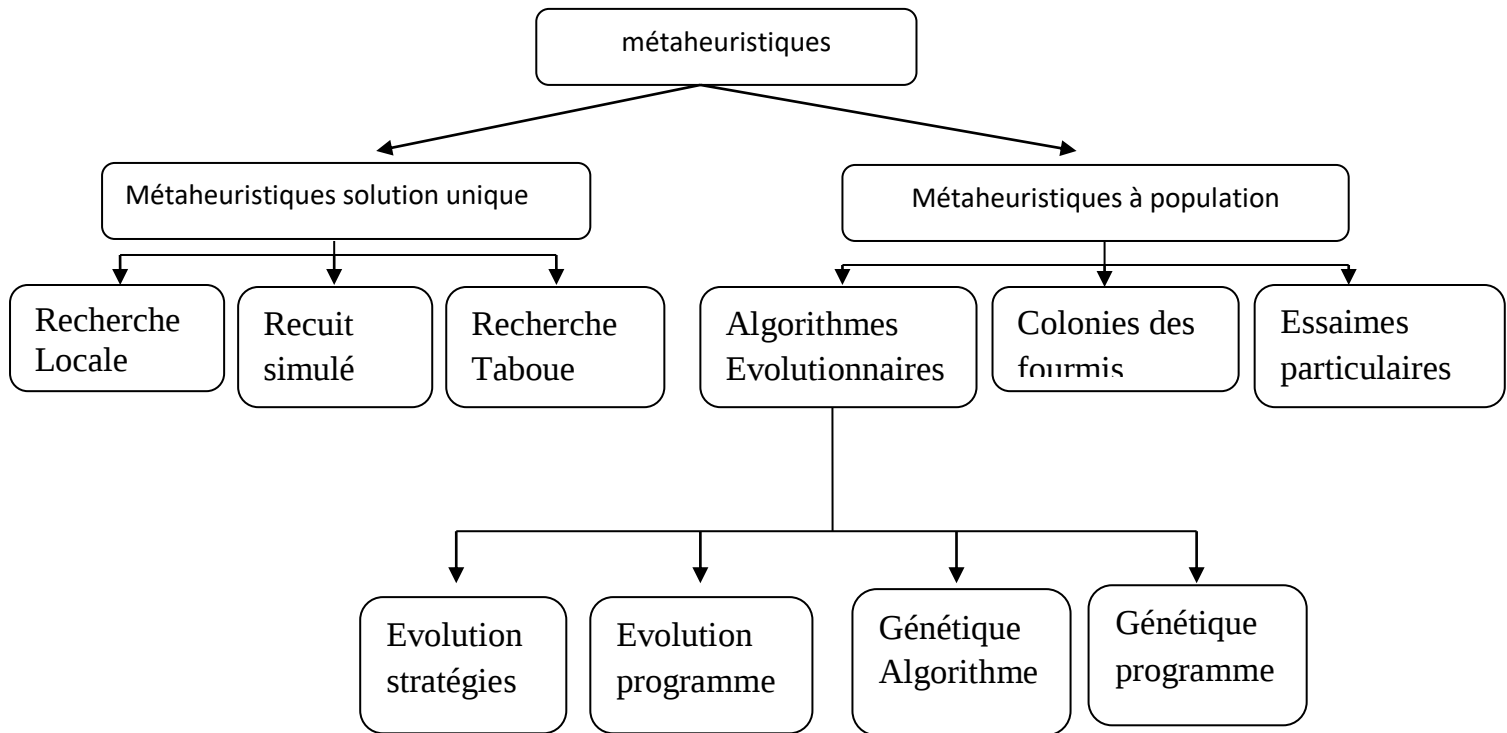


Figure III.1 : Classes des métaheuristiques [2].

1.2. Domaines d'utilisation des métaheuristiques

Les métaheuristiques sont utilisées pour résoudre les problèmes d'optimisation difficile qui sont des problèmes pour lesquelles aucune méthode exacte n'est capable de résoudre exactement en un temps raisonnable. Ces problèmes peuvent se découper en deux types de problèmes : les problèmes discrets et les problèmes continus.

- certains problèmes d'optimisation discrète, pour lesquels on ne connaît pas d'algorithme exact polynomial (c'est à dire dont le temps de calcul est proportionnel à Nn , où N désigne le nombre de paramètres inconnus du problème, et n est une constante entière). C'est le cas, en particulier, des problèmes dits "NP difficiles", pour lesquels on conjecture qu'il n'existe pas un constant n tel que le temps de résolution soit borné par un polynôme de degré n .
- certains problèmes d'optimisation à variables continues, pour lesquels on ne connaît pas d'algorithme permettant de repérer un optimum global (c'est-à-dire la meilleure solution possible) à coup sûr et en un nombre fini de calculs [3,4].

Des efforts ont été longtemps menés, séparément, pour résoudre ces deux types de problèmes.

Dans l'optimisation continue, il existe ainsi un arsenal important de méthodes classiques dites d'optimisation global, mais ces techniques sont souvent inefficaces si la fonction objectif ne possède pas une propriété structurelle particulière, tel que la convexité. Dans le domaine de l'optimisation discrète, un grand nombre d'heuristiques qui produisent une solution proche de l'optimum ont été développées mais la plupart d'entre elles ont été conçues spécifiquement pour un problème donné.

L'arrivée des métaheuristiques marque une réconciliation des deux domaines (celle-ci s'applique à toutes sortes de problèmes discrets et peuvent s'adapter aussi aux problèmes continus). En pratique, certains problèmes sont mixtes et présentent à la fois des variables discrètes et des variables continues. On peut donc souligner une autre richesse des métaheuristiques : elles se prêtent à toutes sortes d'extensions [5].

2. Les Algorithmes Monté-carlo

De manière générale, la simulation permet d'étudier et expérimenter un système donné dont on connaît les interactions complexes, de mesurer les effets de certains changements dans les interactions sur le comportement du système, d'expérimenter de nouvelles situations [6]. Lorsque dans la simulation intervient un élément aléatoire, on parle de simulation aléatoire. Les exemples d'application sont très variés, citons par exemple :

- la simulation de files d'attente, de réseaux.
- la simulation de portefeuilles d'actifs en finance.
- la comparaison d'estimateurs en statistique.
- la recherche d'état stationnaire en physique, en économie.

Nous remarquons de plus que si l'on cherche une représentation fidèle des phénomènes observés, on est rapidement confronté à des difficultés dues aux calculs non explicites. Les techniques de simulation vont nous permettre d'approcher numériquement ces calculs. Nous allons développer ici les méthodes de Monte-Carlo qui ont pour essence l'utilisation d'expériences répétées pour évaluer une quantité, résoudre un système déterministe. Ces méthodes peuvent servir pour :

- le calcul d'intégrale
- la résolution d'équations aux dérivées partielles
- la résolution de système linéaire
- la résolution de problèmes d'optimisation (algorithme du recuit simulé).

Considérons par exemple le problème de l'intégration numérique [6].

Il s'agit d'approcher :

$$I = \int_0^1 g(x)dx \quad (III.1)$$

Diverses méthodes classiques de type déterministe existent : rectangles ,trapèzes, Simpson et I est approximé par une somme de la forme :

$$\sum_{i=0}^n w_i g(x_i) \quad \text{avec} \quad \sum_{i=0}^n w_i = 1 \quad (x_i)_{0 \leq i \leq n}$$

bien choisis dans [0, 1].

La méthode de Monte-Carlo consiste à écrire cette intégrale sous la forme :

$$I = E[g(U)] \quad (III.2)$$

où U est une variable aléatoire suivant une loi uniforme sur [0, 1] et à utiliser la loi des grands nombres : si $(u_i)_{i \in \mathbb{N}}$ est une suite de variables aléatoires indépendantes et de loi uniforme sur [0, 1]. Alors :

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(u_i) \rightarrow E[g(U)] \quad (III.3)$$

En d'autres termes, si $u_1, u_2, u_3, \dots, u_n$ sont des nombres tirés au hasard dans [0, 1].

$1/n (g(u_1) + g(u_2) + \dots + g(u_n))$ est une approximation de $\int_0^1 g(x)dx$.

Prenons l'exemple plus général d'une intégrale du type:

$$I = \int_R g(x)f(x)dx \quad (III.4)$$

où $f(x) \geq 0$ et $\int_R f(x)dx = 1$.alors $I = E[g(X)]$ où X est une variable aléatoire de densité f par rapport à la mesure de Lebesgue sur $\mathbb{R}^d$. Toujours par la loi des grands nombres, si $(X_i)_{i \in \mathbb{N}}$ est une suite de variables indépendantes sur $\mathbb{R}^d$ de loi de densité f.

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i) \rightarrow E[g(X)] \quad (\text{III.5})$$

et donc si $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ est une réalisation de $(X_1, X_2, \dots, X_n)$, $1/n (g(x_1) + g(x_2) + \dots + g(x_n))$ sera une approximation de I .

Une question naturelle est la vitesse de convergence dans la méthode de Monte-Carlo.

D'après le Théorème central limite, si : $\sigma^2 \text{Var}[g(X_1)]$

$$\frac{\sqrt{n}}{\sigma} \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i) - E(g(X_1)) \right] \quad (\text{III.6})$$

converge en loi vers G , ou G est une variable aléatoire gaussienne centrée de variance

1. Par conséquent pour n suffisamment grand, l'écart $\epsilon_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i) - E(g(X_1))$ satisfait :

$$p \left(\frac{\sqrt{n} \epsilon_n}{\sigma} \leq 1.96 \right) \sim P(|G| \leq 1.96) = 0.95 \quad (\text{III.7})$$

et donc $|\epsilon_n|$ est avec une quasi-certitude de 95% inférieur à $\sigma \frac{1.96}{\sqrt{n}}$. Par suite un intervalle de confiance pour $E[g(X_1)]$ au niveau 0,95 est

$$\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i) - \sigma \frac{1.96}{\sqrt{n}}, \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i) + \sigma \frac{1.96}{\sqrt{n}} \right] \quad (\text{III.8})$$

En général σ ne sera pas calculable et on l'approximera par une méthode de Monte-Carlo puisque

$$\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i)^2 - \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i) \right)^2 \rightarrow \sigma^2 \quad (\text{III.9})$$

Ce calcul sera mené en même temps que celui de l'espérance [6]. La vitesse de convergence est donc de l'ordre de $\frac{1}{\sqrt{n}}$. Cette vitesse peut paraître faible en petite dimension, mais présente l'avantage :

- d'être insensible à la dimension,
- de ne pas dépendre de la régularité de la fonction g à intégrer, pourvu que $g(X_1)$ soit de carré intégrable.

On remarque cependant le rôle important joué par l'écart-type σ dans la qualité de l'approximation et on va chercher des méthodes pour réduire cet écart-type [6]

2.1. Simulation de lois uniformes

On admet que l'on dispose d'un générateur de nombres aléatoires qui est capable de simuler une suite de nombres au hasard compris entre 0 et 1. En d'autres termes cette suite représentera une réalisation d'une suite de variables aléatoires $U_1, U_2, \dots, U_n$ indépendantes et de loi uniforme sur $[0, 1]$. Le générateur qu'il soit congruentiel, à déplacement de registre ou mixte aura été testé par des méthodes statistiques. On renvoie aux transparents pour ce paragraphe [6]

2.2. Simulation de lois non uniformes

Méthode de la fonction de répartition : On suppose que X est une variable aléatoire réelle de fonction de répartition $F(t) = P(X \leq t)$, alors F est une fonction croissante continue à droite [6]

On définit la fonction pseudo-inverse de F sur $[0, 1]$ par :

$$F^{-1}(u) = \inf\{y \in \mathbb{R}, F(y) \geq u\}.$$

Cette fonction pseudo-inverse est bien sûr la fonction réciproque de F lorsque F est bijective. On a le lemme suivant :

Lemme 1 : Pour tout $u \in [0, 1]$ et $x \in \mathbb{R}$, $F^{-1}(u) \leq x \iff u \leq F(x)$

Démonstration :

L'implication $\Leftarrow$ est triviale. Pour le sens direct, on remarque que si $F^{-1}(u) \leq x$, alors par croissance de F pour tout $y > x$, on a $F(y) \geq u$. Comme F est continue à droite, on en déduit $F(x) \geq u$.

Proposition 1 : Si U suit une loi uniforme sur $[0, 1]$, la variable aléatoire $F^{-1}(U)$ suit une loi de fonction de répartition F .

Démonstration : D'après le lemme 1.2.1, on a pour tout $x \in \mathbb{R}$,

$$P[F^{-1}(U) \leq x] = P[U \leq F(x)] = F(x) \quad (\text{III.10})$$

Par conséquent si F est explicite, on calculera F^{-1} et pour générer un échantillon $X_1, X_2, \dots, X_n$ de variables aléatoires indépendantes et de même loi de fonction de répartition F , on générera un échantillon $U_1, U_2, \dots, U_n$ de variables de loi uniforme sur $[0, 1]$ et on posera $X_i = F^{-1}(U_i)$. [6]

2. 3.Variable aléatoire exponentielle

Si X suit une loi exponentielle de paramètre λ de densité $f(x) = \lambda \exp(-\lambda x)$ sur $\mathbb{R}^+$, sa fonction de répartition vaut pour $x \geq 0$:[6]

$F(x) = 1 - \exp(-\lambda x)$ et donc si $u \in [0, 1]$, $F^{-1}(u) = -\log(1 - u)/\lambda$.

Soit U une v.a. de loi uniforme sur $[0, 1]$. La variable X a donc même loi que $-\log(1 - U)/\lambda$ et aussi par symétrie que $-\log U/\lambda$.

Variable aléatoire prenant un nombre fini de valeurs :

Supposons que X soit une v.a. prenant un nombre fini de valeurs de loi :

$$P(X = x_i) = p_i \quad 0 \leq i \leq n.$$

$$\text{Alors } F^{-1}(u) = x_0 \mathbf{1}_{u \leq p_0} + \sum_{i=1}^n x_i \mathbf{1}_{p_0 + p_1 + \dots + p_{i-1} < u \leq p_0 + p_1 + \dots + p_i} \quad (\text{III.11})$$

Pour simuler X , on procédera de la manière suivante : on tire u au hasard dans $[0, 1]$ et on pose $X = x_k$ si, $p_0 + p_1 + \dots + p_{k-1} < u \leq p_0 + p_1 + \dots + p_k$.

Par exemple si X est une v.a. de Bernoulli prenant la valeur 1 avec la probabilité p et la valeur 0 sinon, on posera $X = 1$ si $u \leq p$ et $X = 0$ si $p < u \leq 1$. La méthode ci-dessus s'étend bien sûr aux lois discrètes [6]

2. 4.Lois particulières

2.4.1 Loi binomiale

$$B(N, p) : P(X = k) = C^k_n p^k (1 - p)^{N-k} \quad (\text{III.12})$$

La v.a. X peut s'écrire comme somme de N v.a. de Bernoulli indépendantes prenant la valeur 1 avec la probabilité p . [6] Une méthode possible consiste à tirer N nombres au hasard dans $[0, 1]$ et à poser $X = k$ si exactement k nombres sont tombés dans l'intervalle $[0, p]$.

2.4.2 Loi géométrique

$$P(X = k) = p(1 - p)^{k-1} \text{ pour } k \in \mathbb{N} \quad (\text{III.13})$$

On simule des nombres au hasard dans $[0, 1]$, et on pose $X = k$ si le k ème nombre tiré est le premier à tomber dans $[0, p]$.

2.4.3 Loi gaussienne

La fonction de répartition n'est pas explicite ; on peut utiliser des approximations de cette fonction, mais on risque d'accumuler les erreurs [6] Une méthode classique directe dite de Box-Muller repose sur la propriété suivante :

si θ suit une loi uniforme sur $[0, 2\pi]$, si R^2 suit une loi exponentielle de paramètre 1/2 avec θ et R^2 sont indépendantes, alors $X = R \cos \theta$ et $Y = R \sin \theta$ sont deux v.a. indépendantes de loi normale centrée de variance 1.

Par conséquent si U_1 et U_2 sont indépendantes et de loi uniforme sur $[0, 1]$, le couple $((-2 \log U_1)^{1/2} \cos(2\pi U_2), (-2 \log U_1)^{1/2} \sin(2\pi U_2))$ est formé de variables gaussiennes indépendantes centrées de variance 1.

La simulation de deux v.a. indépendantes de loi uniforme conduit à la simulation de deux v.a. gaussiennes standard indépendantes. Pour simuler un v.a. gaussienne de moyenne m et de variance σ^2 , il suffit de poser $X = m + \sigma G$, où G suit une loi normale centrée réduite.

2.4.4. Loi de Poisson de paramètre λ

$$P(X = n) = \frac{\exp(-\lambda) \lambda^n}{n!} \quad (\text{III.14})$$

Si $(T_i)_{i \geq 1}$ est une suite de variables exponentielles de paramètre λ , alors on peut montrer que la v.a. [6]

$$X = \sum_{n=1}^{\infty} n \mathbf{1}_{\{T_1 + T_2 + \dots + T_n \leq 1 < T_1 + T_2 + \dots + T_{n+1}\}} \quad (\text{III.15})$$

suit une loi de Poisson de paramètre λ . Sachant que T_i peut se mettre sous la forme

$-\log U_i / \lambda$ avec U_i de loi uniforme sur $[0; 1]$, on obtient :

$$X = \sum_{n=1}^{\infty} n \mathbf{1}_{\{U_1 + U_2 + \dots + U_n \leq \exp(-\lambda) < U_1 + U_2 + \dots + U_{n+1}\}} \quad (\text{III.16})$$

Pour simuler X , on simule une suite $(u_i)_{i \geq 1}$ de nombres au hasard dans $[0; 1]$, on cherche le premier instant k où $u_1 + u_2 + \dots + u_k > \exp(-\lambda)$ et on pose $X = k - 1$.

2.5. Lois vectorielles

Si les coordonnées sont des v.a. réelles indépendantes, on se ramène au cas unitaire en simulant successivement les coordonnées de manière indépendante.

Sinon on peut effectuer des conditionnements successifs : par exemple soit $(X; Y)$ un couple de v.a. de densité $f(x; y)$ par rapport à la mesure de Lebesgue sur $\mathbb{R}^2$; on peut écrire $f(x, y) = f(x)_x f(y|x)$ où f_x est la densité de X et où $f(.|x)$ est la densité conditionnelle de Y sachant $X = x$. Pour générer $(X; Y)$, on simule X selon la loi de

densité f_x ; si $X = x$, on simule Y selon la loi de densité $f(y=x)$ et indépendamment de X . Ce procédé peut être itéré pour générer des vecteurs d -dimensionnels.
 – La formule de changement de variables est aussi un outil utile pour effectuer des transformations [6]

2.6 Méthode de rejet

On veut simuler une v.a. de loi de densité f (par exemple par rapport à la mesure de Lebesgue sur $\mathbb{R}^d$), et on suppose qu'il existe une loi de densité g simulable facilement, telle que

$$\forall x \in \mathbb{R}^d; f(x) \leq kg(x)$$

où k est une constante réelle. On pose : $\alpha(x) = \frac{f(x)}{kg(x)}$

Proposition 1 : Générons un couple (X_1, U_1) de v.a. indépendantes telles que U_1 une loi de densité g et U_1 suive une loi uniforme sur $[0; 1]$. Si $U_1 \leq \alpha(X_1)$, posons $X = X_1$.

Sinon rejetons X_1 et recommençons en générant une suite $(X_n, U_n)_{n \geq 2}$ de v.a. indépendantes de même loi que $(X_1; U_1)$ jusqu'à l'instant p où $U_p \leq \alpha(X_p)$.

Posons alors $X = X_p$. La v.a. X ainsi simulée a pour densité f .

Remarque :

1-La probabilité d'acceptation à l'instant 1 de la v.a. X_1 vaut :

$$p_1 = p(U_1 \leq \alpha(x_1)) = \int p(u_1 \leq \alpha(x))p_{x_1}(dx) = \int \alpha(x)g(x)dx = \int \frac{1}{k}f(x)dx = \frac{1}{k}$$

(III.17) par indépendance de U_1 et X_1 .

Si on ne veut pas trop de rejets lors de la simulation de X , il faut que cette probabilité d'acceptation p_1 soit la plus grande possible et donc que k soit le plus petit possible.

Comme f et g sont des densités et que $f \leq kg$, le réel k est en fait nécessairement ≥ 1 .

Remarquons de plus que les rejets seront limités si $\frac{f(x)}{kg(x)}$ est proche de 1 et donc si la fonction g a une allure similaire à celle de f .

2-L'algorithme ci-dessus est encore valable si la v.a. X à simuler a une densité f par rapport à une mesure positive μ quelconque majorée par kg où g est la densité par rapport à μ d'une variable Y facile à simuler. Ceci se traduit par :

$$p(x \in A) = \int_A f(x)\mu(dx) \leq \int_A kg(x)\mu(dx) = kp(y \in A) \quad (\text{III.18})$$

Si la v.a. X a une loi portée par un ensemble discret E , on peut choisir pour μ la mesure de comptage sur E et la méthode de rejet est aussi valable pour des lois discrètes, $f(x)$ étant dans ce cas égal à $P(X = x)$.

Démonstration : Remarquons tout d'abord qu'au bout d'un nombre d'essais fini, la relation $Up \leq \alpha (Xp)$ sera vérifiée, en effet

$$p(\forall p \in N^*, X \neq Xp) = \lim_{N \rightarrow \infty} P(\cap_{p \leq N} Up \leq \alpha (Xp)) \quad (III.19)$$

Puis :

$$p(\forall p \in N^*, X \neq Xp) = \lim_{N \rightarrow \infty} P(U1 \leq \alpha (X_1))^N = \lim_{N \rightarrow \infty} (p_1)^N = \lim_{N \rightarrow \infty} \left(\frac{1}{k}\right)^N = 0 \quad (III.20)$$

puisque les v.a. (Xp, Up) sont indépendantes et de même loi. Par conséquent :[6]

$$P[X \in A] = \sum_{n \in N^*} P[X = X_n, X \in A] \quad (III.21)$$

$$= \sum_{n \in N^*} P[\cap_{p \leq n-1} Up \leq \alpha (Xp) U_n \leq \alpha (X_n) \cap X_n \in A] \quad (III.22)$$

$$= \sum_{n \in N^*} (1 - p_1)^{n-1} P[U_1 \leq \alpha (X_1) \cap X_1 \in A] \quad (III.23)$$

$$= P_1 P[U_1 \leq \alpha (X_1) \cap X_1 \in A] \quad (III.24)$$

$$= P[X_1 \in \frac{A}{\{U_1 \leq \alpha (X_1)\}}] \quad (III.25)$$

La loi de X est donc la loi de X_1 conditionnée par l'ensemble d'acceptation $\{U_1 \leq \alpha (X_1)\}$ Elle satisfait par indépendance de X_1 et U_1 :[6]

$$P[X \in A] = P_1 \int_A P(U_1 \leq \alpha (x)) P_{X_1}(dx) = \frac{1}{k} \int_A a(x) g(x) \mu(dx) = \int_A f(x) dx \quad (III.26)$$

3. Les Algorithmes génétiques

3.1. Définition des algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques, initiés dans les années 1970 par John Holland, sont des algorithmes d'optimisation s'appuyant sur des techniques dérivées de la génétique et des mécanismes d'évolution de la nature : croisement, mutation, sélection [7]. L'intérêt des algorithmes génétiques est de produire des solutions diversifiées notamment en utilisant des heuristiques telles les partages, en temps contrôlable. Afin de les appliquer à un problème particulier, il est nécessaire de définir convenablement la fonction d'évaluation et le codage d'une solution. Ces algorithmes nécessitent

également la définition d'opérateurs, aussi bien de mutation que de croisement, en adéquation avec le problème [8].

3.2. La mise en œuvre d'un algorithme génétique

La mise en œuvre d'un algorithme génétique est réalisée suivant les étapes suivantes :

1. Création d'une population initiale.
2. Evaluation des individus de la population.
3. Sélection des meilleurs individus.
4. Reproduction (Croisement et mutation).
5. Formation d'une nouvelle génération.

La figure suivante montre l'organigramme de fonctionnement d'un algorithme génétique [9]

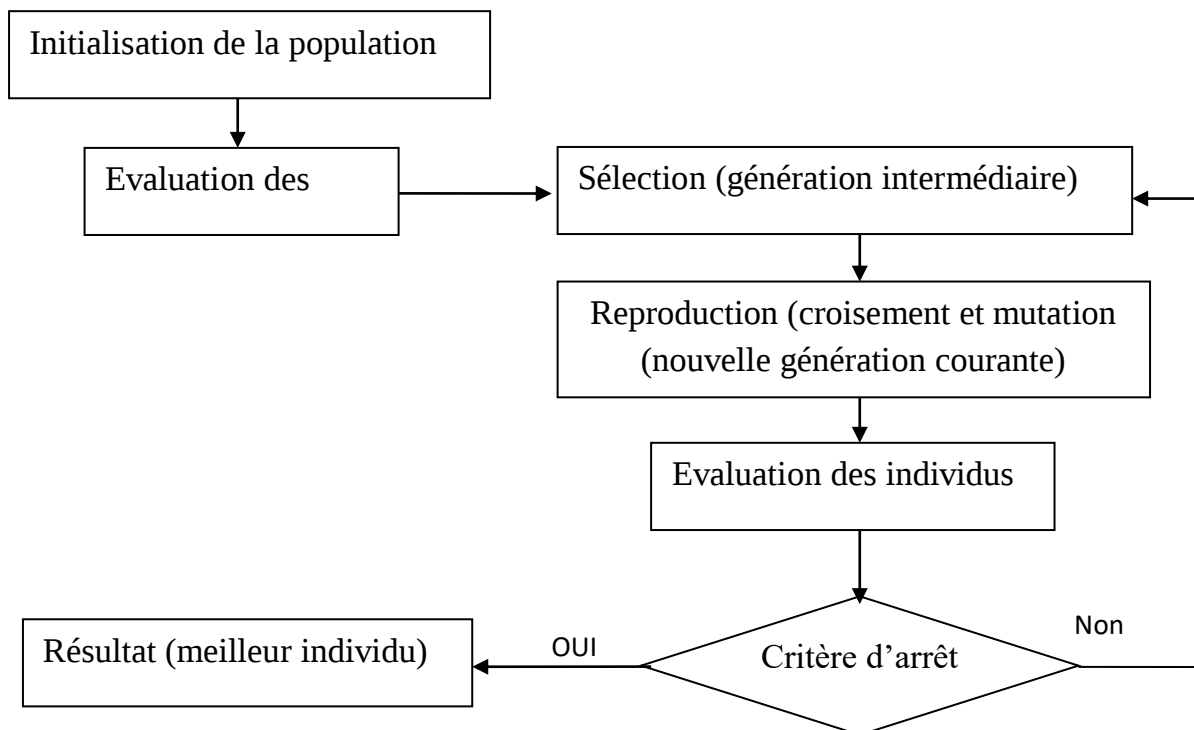


Figure III.2. Organigramme de l'algorithme génétique [9]

3.3. Principe d'Algorithme Génétique

3.3.1 Codage des Variables

Le codage est une modélisation d'une solution d'un problème donné sous forme d'une séquence de caractères appelée chromosome où chaque caractère, dit aussi gène, représente une variable ou une partie du problème. La tâche principale consiste à choisir le contenu des gènes qui facilite la description du problème et respecte ses

contraintes. Il utilise principalement trois types de codage : le codage binaire, le codage réel, le codage de Gray. [8]

3.3.1.1 Codage binaire

C'est le plus utilisé. Chaque gène dispose du même alphabet binaire $\{0, 1\}$ Un gène est alors représenté par un entier long (32 bits), les chromosomes qui sont des suites de gènes sont représentés par des tableaux de gènes et les individus de notre espace de recherche sont représentés par des tableaux de chromosomes. [7]

3.3.1.2 Codage Réel

La représentation des solutions dans le cadre des AG n'est pas nécessairement réduite à un alphabet de faible cardinalité (0,1), il existe toute une école pour laquelle la représentation la plus efficace est celle qui s'appuie sur des nombres réels. Cette représentation est à la base de l'approche évolutionnaire « Evolution stratégie ». Ce type de codage présente certains avantages par rapport au codage binaire :

- Le codage réel est robuste pour les problèmes considérés comme difficile pour le codage binaire.
- Ce codage nécessite une adaptation des opérateurs de croisement et mutation.[2]

3.3.1.3. le codage de Gray

Dans le cas d'un codage binaire on utilise souvent la "distance de Hamming" comme mesure de la dissimilarité entre deux éléments de population, cette mesure compte les différences de bits de même rang de ces deux séquences. C'est là que le codage binaire commence à montrer ses limites. En effet, deux éléments voisins en terme de distance de Hamming ne codent pas nécessairement deux éléments proches dans l'espace de recherche. Cet inconvénient peut être évité en utilisant un "codage de Gray" : le codage de Gray est un codage qui a comme propriété qu'on entre un élément n et un élément $n + 1$, donc voisin dans l'espace de recherche, un seul bit diffère [7]

3.3.2. La Sélection

Une opération de sélection est nécessaire pour pouvoir choisir les chromosomes qui garantiront une amélioration de la qualité des solutions. La sélection est un processus qui consiste à choisir parmi tous les individus de la population ceux qui vont participer à la construction d'une nouvelle génération où ce choix est basé essentiellement sur les valeurs d'adaptation de chaque individu. Un membre ayant une grande valeur de la fonction objectif aura plus de chance d'être sélectionné pour participer à la reproduction de la prochaine génération [10]. Plusieurs stratégies sont possibles pour effectuer une telle sélection parmi lesquelles nous abordons :

La sélection par classement : elle consiste à ranger les individus de la population dans un ordre croissant (ou décroissant selon l'objectif) et à retenir un nombre fixé de génotypes. Ainsi, seuls les individus les plus forts sont conservés. L'inconvénient majeur de cette méthode est la convergence prématurée de l'algorithme génétique.

La sélection par tournoi : le tournoi le plus simple consiste à choisir aléatoirement un nombre k d'individus dans la population et à sélectionner celui qui a la meilleure performance. Les individus qui participent à un tournoi sont remis ou sont retirés de la population, selon le choix de l'utilisateur. Avec le tournoi binaire, sur deux individus en compétition, le meilleur gagne avec une probabilité $p \in [0, 5; 1]$ [9]

3.3.3. Le Croisement

L'opérateur de croisement est un opérateur génétique qui permet à deux chromosomes parents de donner deux chromosomes enfants. Cet opérateur se produit selon une probabilité P_c fixée par l'utilisateur selon le problème à optimiser. A travers cette reproduction les chromosomes enfants héritent parties de patrimoine génétique de leurs parents.

L'opérateur de croisement permet de créer de nouvelles séquences de gènes pour les chromosomes enfants à partir d'une base de configuration des séquences héritées des chromosomes parents.

Il existe plusieurs opérateurs de croisement qui dépendent essentiellement du type du codage et de la nature du problème à traiter. Pour le codage binaire, nous distinguons plusieurs opérateurs de croisement tels que le croisement à un point, le croisement multipoints [10].

A. Le croisement en un point :

Pour chaque couple, on choisit au hasard un point de croisement. Le croisement s'effectue directement au niveau binaire, et non au niveau des gènes. Un croisement peut être coupé au milieu d'un gène [10]

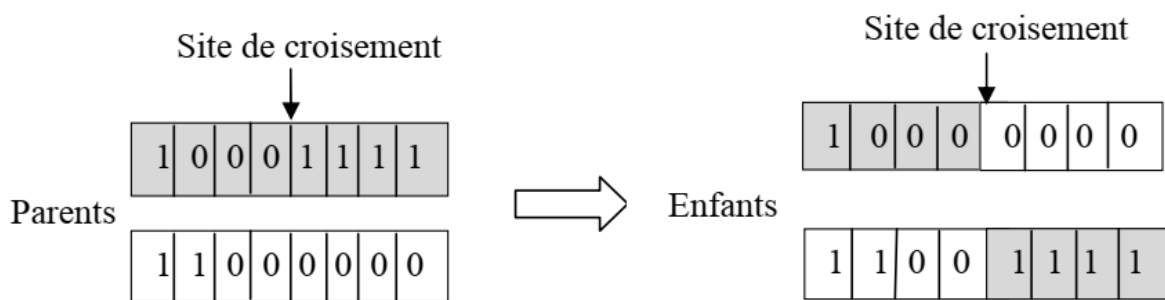


Figure III.3. Représentation schématique du croisement en un point.

B. Le croisement en deux points :

On choisit au hasard deux points de croisements successifs. Cet opérateur est généralement considéré comme plus efficace que le précédent [10].

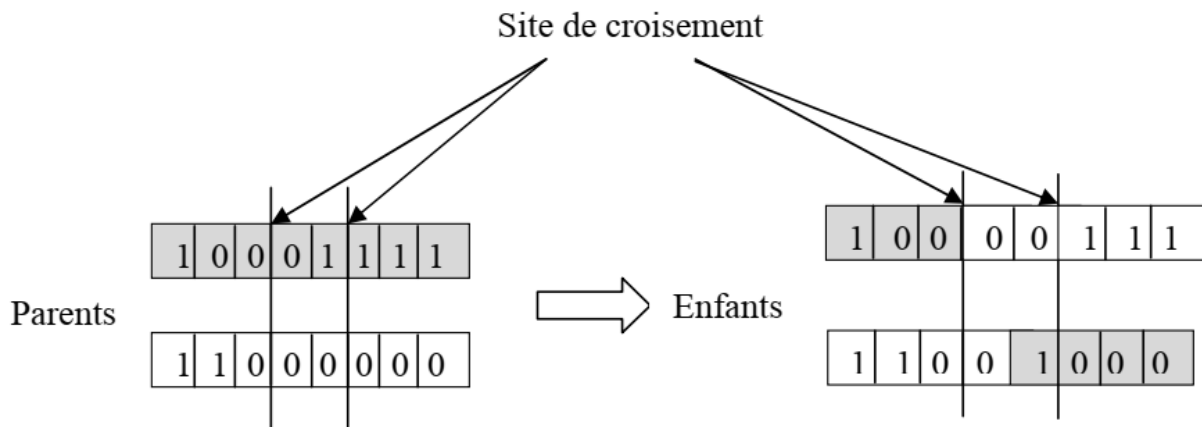


Figure III.4. Représentation schématique du croisement en deux points.

C. Le croisement uniforme :

Il opère à l'aide d'un masque qui représente les tirages aléatoires, pour décider de la transmission de la valeur de l'allèle à l'un ou l'autre des descendants. Si, à la même position que l'allèle, la valeur du masque est égale à 1, l'allèle du parent 1 passe à celui de l'enfant 1 et l'allèle du parent 2 passe à l'enfant 2. Sinon, c'est l'inverse qui se produit [10]

Parent1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	0
Parent2	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1
Masque	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0
Enfant1	1	1	1	0	1	1	0	0	1	1
Enfant2	1	0	0	1	0	0	1	1	0	0

Tableau III.1. Exemple de croisement uniforme.

3.3.4. La mutation

La mutation est un changement aléatoire selon une certaine règle probabiliste qui doit faire sur les génotypes, avec une faible probabilité P_m (fixée par l'utilisateur) de la valeur d'un ou plusieurs allèles d'un chromosome. En général, la mutation ne permet pas l'obtention de meilleures solutions, mais elle permet de garder une diversité dans l'évolution des individus et d'éviter les optimums locaux, et se protège contre une perte irrécouvrable dans les caractéristiques des individus. La mutation classique consiste à transformer dans un chromosome binaire un 1 en un 0 ou le contraire.

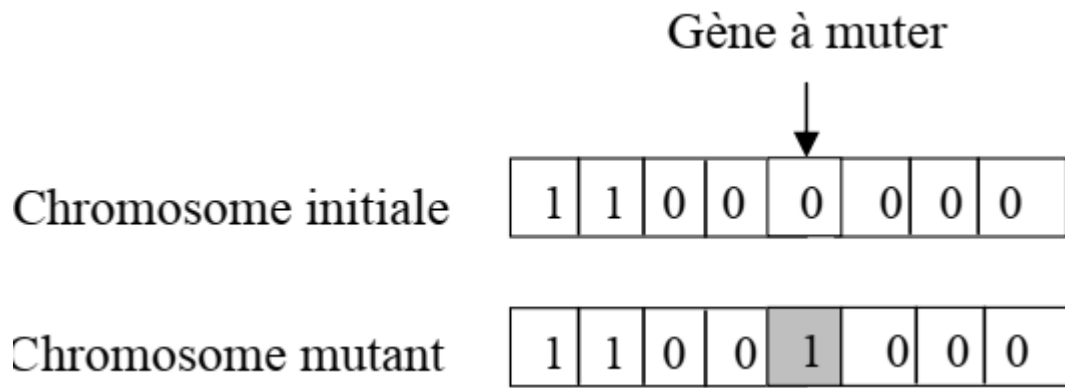


Figure III.5. Représentation schématique de la mutation.

Cependant, il existe plusieurs opérateurs de mutation :

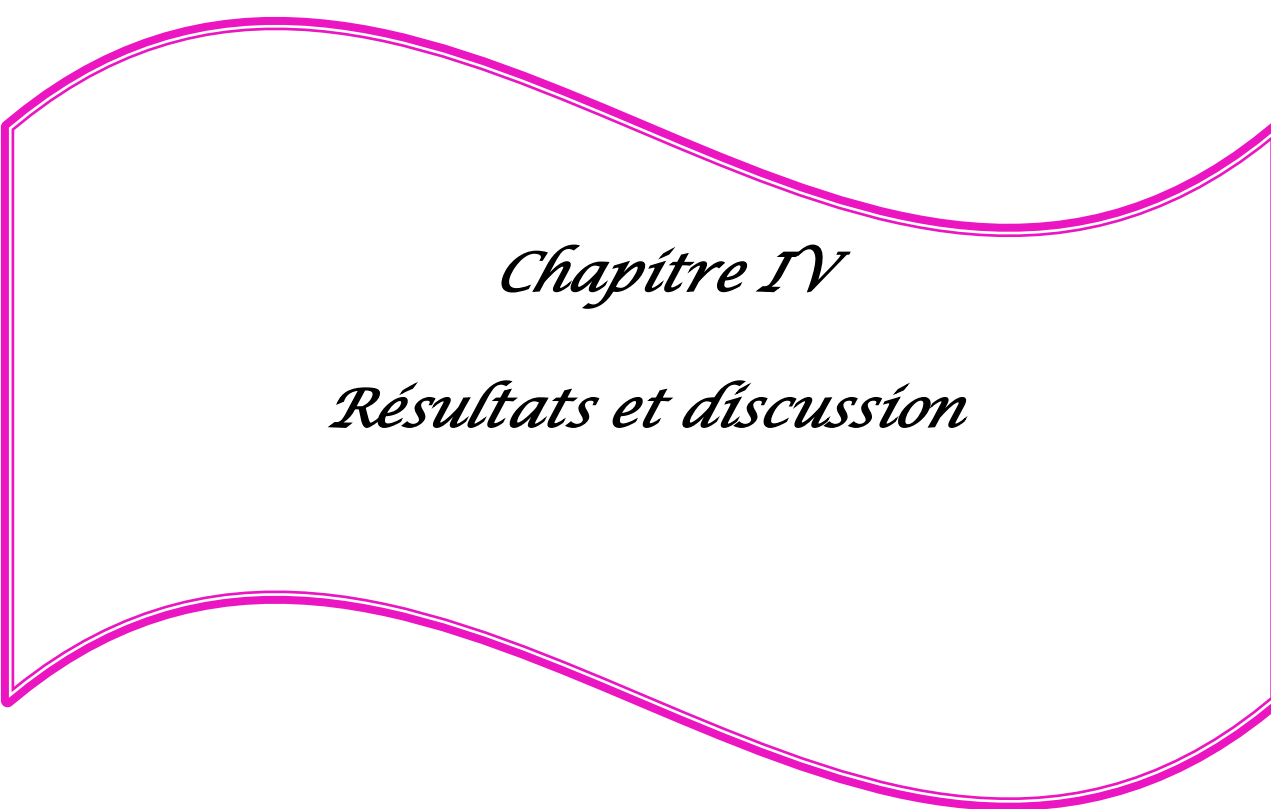
Transposition de deux allèles consécutifs: Cette mutation consiste à choisir deux allèles consécutifs au hasard et d'échanger leurs valeurs respectives.

Transposition de deux allèles quelconques : Cette mutation consiste à choisir deux allèles au hasard et d'échanger leurs valeurs respectives

Inversion d'allèles : Cette mutation consiste à choisir deux allèles au hasard et d'inverser l'ordre des allèles contenus dans la zone sélectionnée. [10]

Références

- [1] Mehdi Souier : Métaheuristiques pour la manipulation de routages alternatifs en temps réel dans un Job Shop, Mémoire de magister, 27 (2012)
- [2] Lemouari Ali : Introduction Aux Métaheuristiques , Support de cours. Introduction Aux Métaheuristiques, Université de Jijel ,2-33(2014).
- [3] Dréo. J, Pétrowski. A, Siarry. P, Taillard. E : Métaheuristiques pour l'optimisation difficile, Eyrolles, (2003).
- [4] Maurice Cler, Patrick Siarry :Une nouvelle métaheuristique pour l'optimisation difficile : la méthode des essais particuliers, France Télécom R&D, Université Paris 12, 3(7),1 (2004)
- [5] Horst. R, Pardalos. P :Handbook of Global Optimisation, Kluwer Academic Publishers,77(3),196 (1995)
- [6] Laure Elie, Bernard Lapeyre : Introduction aux Méthodes de Monte-Carlo ,5-11 (2001)
- [7] Souquet Amédée, Radet Francois-Gérard : Algorithmes Genetiques, (2004)
- [8] Laetitia Jourdan :Métaheuristiques pour l'extraction de connaissances: Application à la génomique, Université des Sciences et Technologie de Lille - Lille I, français,22(2003).
- [9] Mohamed Assaad Hamida, Introduction aux algorithmes génétiques sur <https://studylibfr.com/doc/4580736/iv.1.-concepts-et-principe-des-algorithmes-g%C3%A9n%C3%A9tiques---e>
- [10] Les Algorithmes Génétiques Multiobjectif sur <http://thesis.univ-biskra.dz/2124/5/chapitre03.pdf>



Chapitre IV

Résultats et discussion

1. Introduction

Dans ce travail, nous allons étudier l'effet de la contrainte thermique sur la résistance de trois types de matériaux biocomposites et biocomposite hybride (Lin/polyéthylène, chanvre /Polyéthylène et Lin-chanvre/Polyéthylène). La fonction objective de notre modélisation génétique est basée sur le modèle de Cox [1], les valeurs de l'endommagement de l'interface entre la matrice et les deux fibres ont été déterminées par le formalisme de Weibull [2] et les différentes valeurs de la contrainte thermique ont été calculées par l'équation de Lebrun [3]. Pour valider nos calculs théoriques, nous avons utilisé le paramètre non linéaire β dans la loi de Hooke de la technique acoustique non linéaire pour tracer les courbes de l'endommagement sous les contraintes mécaniques et thermiques [4-6].

2. Présentation des matériaux étudiés

2.1 Les renforts

2.1.1 La fibre de Lin

Les fibres végétales comme le lin sont donc des remplaçants de choix de la fibre de verre, non seulement en raison de leur faible coût énergétique de production, mais aussi pour leur capacité d'allègement qui constitue un critère essentiel pour diverses applications [7].

Le nom scientifique de l'espèce cultivée est LINUM USITATISSIUM et correspond aux deux

applications pour lesquelles le lin est cultivé : lin graine et lin fibre. Le lin fibre a un

rendement en fibres plus important et les fibres sont de très haute qualité par rapport aux fibres disponibles avec le lin graine. Cette plante est cultivée depuis plus de 7000 ans et c'est la fibre libérienne la plus importante pour le textile en termes de volume. Le lin est une plante herbacée annuelle dont le cycle végétatif dure environ 3 mois. La tige mesure en moyenne 1m de hauteur à maturité pour un diamètre compris entre 1 et 3 mm Le. En général le lin est cultivé en zone tempérée.

L'ouest de l'Europe est une des zones les plus importantes du monde en termes de volume et la France en est un producteur majeur.

La production du lin demande peu d'intrants chimiques. On peut espérer une densité de 200 à

400 plants par m² [8-9].

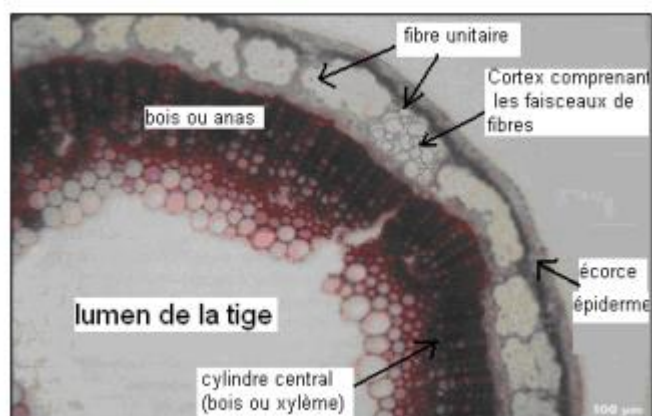


Figure IV.1. Vue en coupe d'une tige de lin (coloration des lignines en rouge) [9-11]

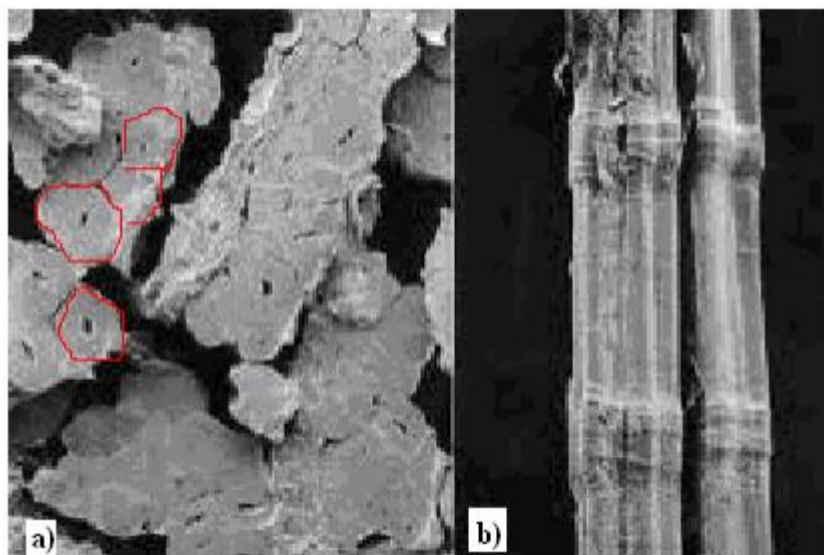


Figure IV.2. Vue en coupe et longitudinale de fibres de lin [9-11]

2.1.2 La fibre de chanvre

Le chanvre est une plante annuelle et monopodiale, c'est-à-dire que sa croissance est principalement gouvernée par son méristème apical caulinaire ce qui permet la croissance de la tige en hauteur. Les tiges de chanvre peuvent atteindre 2 à 4 m de haut avec un diamètre moyen de 1 à 3 cm [12-13]. Les parties jeunes de la tige (proche de l'apex) montrent une surface cannelée alors que la base de la tige est lisse. La tige est constituée d'entre-nœuds de longueur variable, résultant d'une croissance différentielle (car toutes les parties d'une tige ne s'allongent pas de la même façon) [12-13].

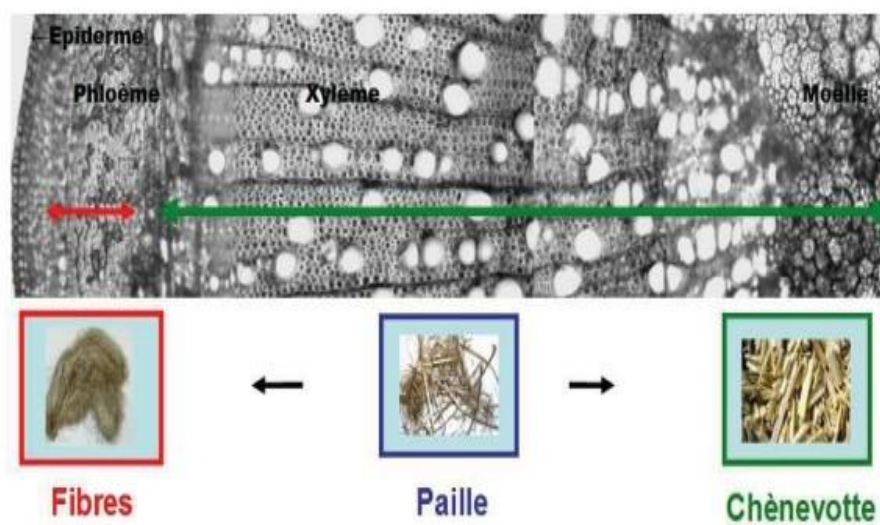


Figure IV.3. Coupe transversale d'une moitié de tige de chanvre [12-13].

Dans le tableau IV.1, nous avons présenté les propriétés physiques des deux fibres [14-15].

Fibres	Contrainte à la rupture (MPa)	Module d'Young (GPa)	Déformation (%)	Densité (g/cm ³)
Lin	500-900	50-70	1.5-4.0	1.45
Chanvre	350-800	30-60	1.6-4.0	1.48

Tableau IV.1 : les propriétés physiques des deux fibres Lin et Chanvre.

2.2 La matrice Polyéthylène (PE)

Polyéthylène est un nom générique utilisé afin de décrire les polyoléfinés issues de la polymérisation de l'éthylène. Ce sont probablement les polymères les plus couramment utilisés, en effet ils sont employés pour la fabrication des sacs plastiques, des bouteilles d'emballage et de certains jouets. Il en existe de nombreux types mais ceux-ci sont généralement classés dans deux grandes familles qui se définissent en fonction de leur masse volumique : [16]

- polyéthylènes basse densité ou PE-BD : $0,92 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,94 \text{ g/cm}^3$.
- polyéthylènes haute densité ou PE-HD : $0,95 \text{ g/cm}^3 < \rho < 0,97 \text{ g/cm}^3$.

Le polyéthylène est un matériau thermoplastique obtenu par polymérisation de l'éthylène (C_2H_4) menant à des macromolécules composées par la répétition du motif $-(\text{CH}_2)$ [16]

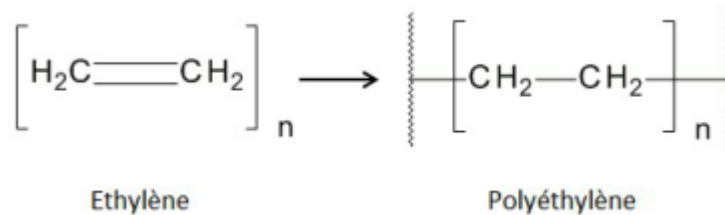


Figure IV.4. Représentation de la polymérisation du polyéthylène [16]

Nous présentons dans le tableau IV.2, les différentes propriétés physiques de la PE [16-17]

Polyéthylène	Moyenne densité	Basse densité	Haute densité
Module de flexion (MPa)	600-900	300-600	900-1300
Résistance traction (MPa)	15-23	7-15	23-30
Allongement rupture (%)	500-1000	500-1000	500-1000
Température de transition vitreuse	-110	-110	-110
Coefficient de	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$

dilatation			
Poids volumique (Kg/m ³)	930-945	915-925	946-960

Tableau IV.2. Les propriétés physiques de la PE [16-17]

3. Modélisation et simulation numérique

3.1 La contrainte thermique

La contrainte thermique est le résultat de la dilatation différentielle des fibres et de la matrice lors du refroidissement après préparation du composite à haute température. Il est donné par les équations suivantes de [3].

$$\sigma_f^T = E_f \frac{a}{1+a} (M_2 - M_0) \quad (1)$$

avec:

$$M_0(T) = \int_{T_0}^{T_e} (\alpha_m - \alpha_f) dT$$

$$M_2(T) = \int_{T_e}^T (\alpha_m - \alpha_f) dT$$

T_0 température ambiante, T_e la température de développement, T la température de test et enfin α_f et α_m les coefficients de dilatation de la fibre et de la matrice.

3.2 Technique acoustique non linéaire

Le comportement acoustique non linéaire classique des matériaux est couramment décrit par l'ajout d'un terme non linéaire β dans la loi de Hooke, qui se lit comme suit:[4-6,18]

$$\sigma = E\varepsilon(1 + \beta\varepsilon) \quad (2)$$

Dans notre algorithme génétique, nous avons déterminé les différentes valeurs du paramètre non linéaire β pour les trois matériaux biocomposites et biocomposite hybride à l'aide de la formule 1 et des valeurs des contraintes de traction (155N / m², 175N / m² et 195N / m²) et des modules de Young pour les fibres et la matrice indiqués

dans les tableaux IV.1 et IV.2.

3.3 Formalisme de Weibull

Lorsque la contrainte est uniforme, l'endommagement de la matrice, est donné par la formule (1) de Weibull [2] :

$$D_m = 1 - \exp \left\{ - \frac{V_{eff}}{V_0} \left[\frac{\sigma_f}{\sigma_0} \right]^m \right\} \quad (3)$$

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. 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.

$$D_f = 1 - \exp \left\{ - A_f * L_{equi} * \left[\frac{\sigma_{\max}^f}{\sigma_{0f}} \right]^{m_f} \right\} \quad (4)$$

Avec :

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

3.4 Modèle de cisaillement de l'interface de Cox

Pour l'interface leur endommagement se basant sur le modèle de Cox [1] qu'est défini par la relation suivante :

$$\tau = \frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta \tanh(\beta \frac{l}{2}) \quad (5)$$

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

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;

4. Modélisation génétique.

Notre étude consiste à modéliser l'effet de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface fibre-matrice de matériaux biocomposites (Lin/polyéthylène, chanvre /Polyéthylène) et matériau biocomposite hybride (Lin-chanvre/Polyéthylène). Notre algorithme génétique est basé sur l'utilisation des valeurs de chacune des propriétés mécaniques pour calculer à chaque fois le niveau de l'endommagement de l'interface en utilisant les équations de Weibull 3 et 4. L'endommagement à l'interface est déterminé par l'intersection des deux ; des deux fibres chanvre et Lin avec la matrice Polyéthylène. L'évaluation de chaque génération est réalisée par une fonction objective basée sur le modèle Cox (équation 5), qui comprend toutes les variables définies au début de l'algorithme (propriétés mécaniques

de chaque composante du composite, module de Young, ...). Enfin, nous déterminons l'endommagement à la longueur de fibre de l'interface pour les trois matériaux étudiés sous l'effet des contraintes mécaniques et thermiques (la contrainte thermique est calculée par l'équation 1). Les calculs numériques sont effectués à l'aide du logiciel Matlab R2012a. L'organigramme de notre programme est présenté sur la figure IV.5)

Organigramme.

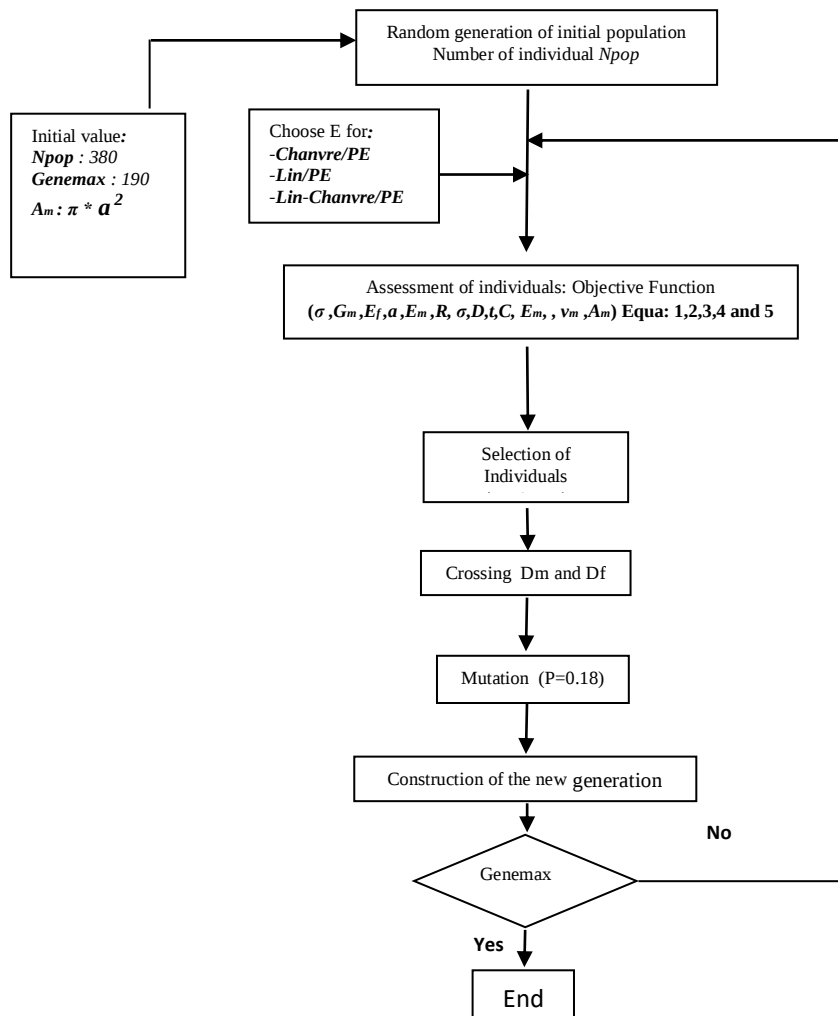


Figure IV.5 : L'organigramme de l'algorithme génétique.

5. Résultats et discussion

Nos calculs ont été réalisés sur deux matériaux biocomposites (Lin/polyéthylène et chanvre /Polyéthylène) et un biocomposite hybride (Lin-chanvre/Polyéthylène). Nous avons examiné la résistance de nos matériaux étudiés sous l'influence de différentes contraintes mécaniques ($\sigma=155 \text{ N/m}^2$), ($\sigma=175 \text{ N/m}^2$), ($\sigma=195 \text{ N/m}^2$), ce qui nous a permis de calculer l'endommagement de l'interface fibre matrice de nos biocomposites en fonction de la variation de la contrainte thermique. Dans notre algorithme génétique, nous avons déterminé les différentes valeurs du paramètre non linéaire β pour les trois matériaux biocomposites et biocomposite hybride à l'aide de la formule 1 et des valeurs des contraintes de traction et des modules de Young pour les fibres et la matrice indiqués dans les tableaux IV.1 et IV.2.

Les figures IV.6, IV.7, IV.8 et IV.9, IV.10, IV.11 et IV.12, IV.13, IV.14 montrent le niveau de l'endommagement à l'interface des Chanvre/PE, Lin/PE et Lin-Chanvre/PE, respectivement.

5.1. Chanvre /PE

Les figures IV.6, IV.7 et IV.8 montrent que l'endommagement "D" de l'interface du biocomposite Chanvre/PE commence au niveau de 0.38 ($\sigma=155 \text{ N/m}^2$ et $\sigma_f^T=0$), puis augmente jusqu'à une valeur maximal de 0.48 quand ($\sigma=195 \text{ N/m}^2$ et $\sigma_f^T=0$). Lorsque on applique la contrainte thermique, on observe que l'endommagement augmente, on remarque une sévère dégradation des matériaux et l'endommagement atteint une valeur minimale de 0.52 et une valeur maximale de 0.63 pour $35 < \sigma_f^T < 70$. On peut dire que l'augmentation de niveau de l'endommagement signifié la concentration des contraintes mécaniques et thermiques qui montrent une forte dégradation de l'interface.

5.2. Lin/PE

Les figures IV.9, IV.10 et IV.11 montrent que l'endommagement "D" de l'interface concernant le matériau Lin/PE commence au niveau de 0.28 ($\sigma=155 \text{ N/m}^2$ et $\sigma_f^T=0$),

puis augmente jusqu'à une valeur maximale de 0.36 quand ($\sigma=195 \text{ N/m}^2$ et $\sigma_f^T=0$). Lorsque on applique la contrainte thermique, on observe que l'endommagement augmente, on remarque une sévère dégradation de l'interface du biocomposite et l'endommagement atteint une valeur minimale de 0.41 et une valeur maximale de 0.49 pour $35 < \sigma_f^T < 70$. On peut dire que l'augmentation de niveau de l'endommagement signifié la concentration des contraintes mécaniques et thermiques qui montrent une dégradation de l'interface moins sévère par rapport au matériau biocomposite Chanvre/PE.

Nous précisons que les résultats obtenus par la simulation génétique sont en bon accord avec les résultats obtenus par la technique acoustique non linéaire mentionnés par la courbe verte dans toutes les figures.

5.3 Lin-Chanvre/PE

Les figures IV.12, IV.13 et IV.14 montrent que l'endommagement "D" de l'interface concernant le biocomposite hybride Lin-Chanvre/PE commence au niveau de 0.14 ($\sigma=155 \text{ N/m}^2$ et $\sigma_f^T=0$), puis augmente jusqu'à une valeur maximale de 0.22 quand ($\sigma=195 \text{ N/m}^2$ et $\sigma_f^T=0$). Lorsque on applique la contrainte thermique, on observe que l'endommagement augmente, on remarque une sévère dégradation de l'interface du biocomposite et l'endommagement atteint une valeur minimale de 0.25 et une valeur maximale de 0.32 pour $35 < \sigma_f^T < 70$. On peut dire que cette augmentation de l'endommagement signifiée la concentration des contraintes mécaniques et thermiques qui montrent une dégradation de l'interface moins sévère par rapport aux deux autres matériaux biocomposites.

Chanvre/ Polyéthylène

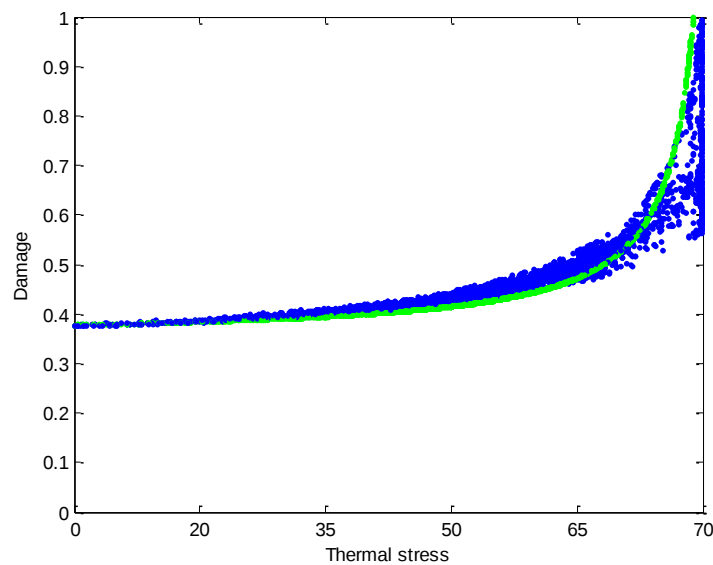


Figure IV.6 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 155 \text{ N/m}^2$)

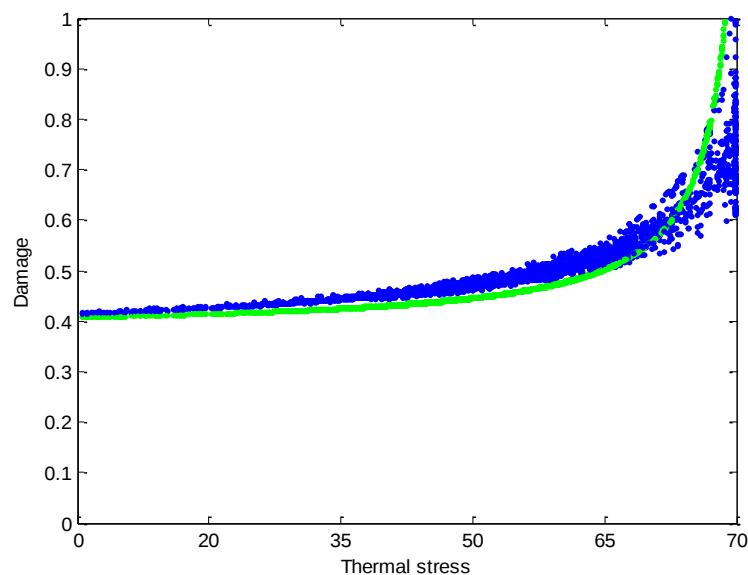


Figure IV.7 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 175 \text{ N/m}^2$)

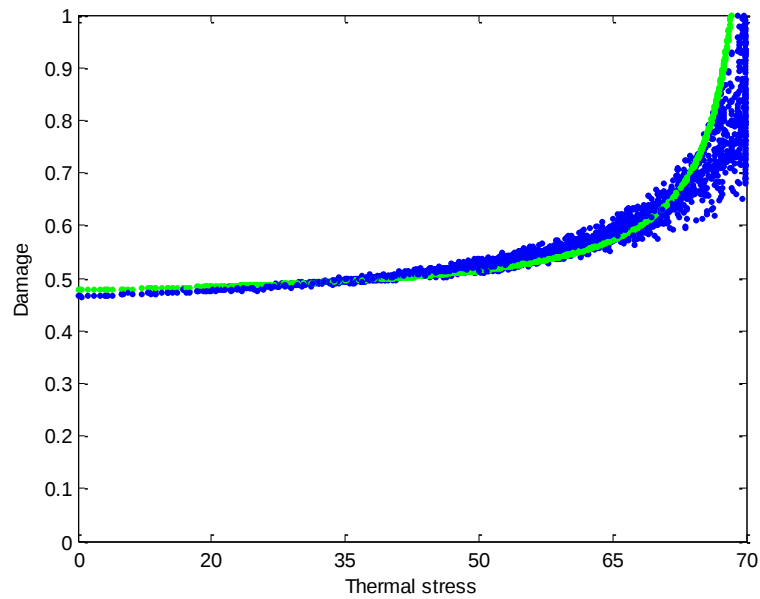


Figure IV.8 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma=195\text{N/m}^2$)

Lin / Polyéthylène

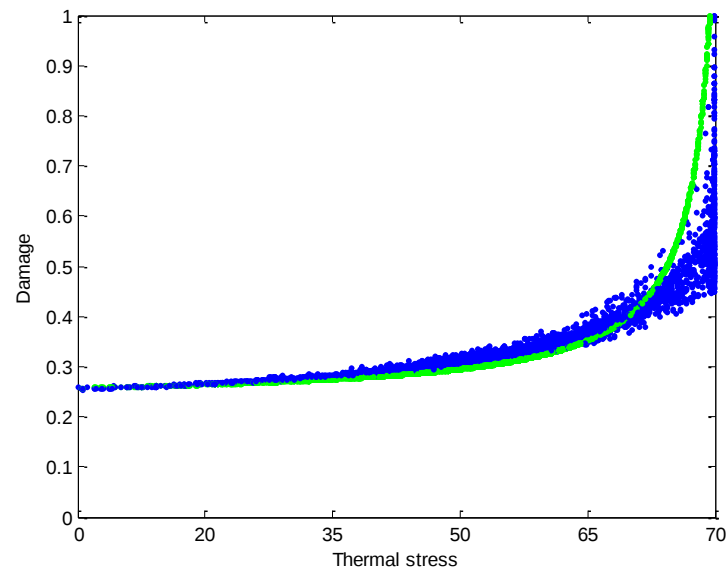


Figure IV.9 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma=155\text{N/m}^2$)

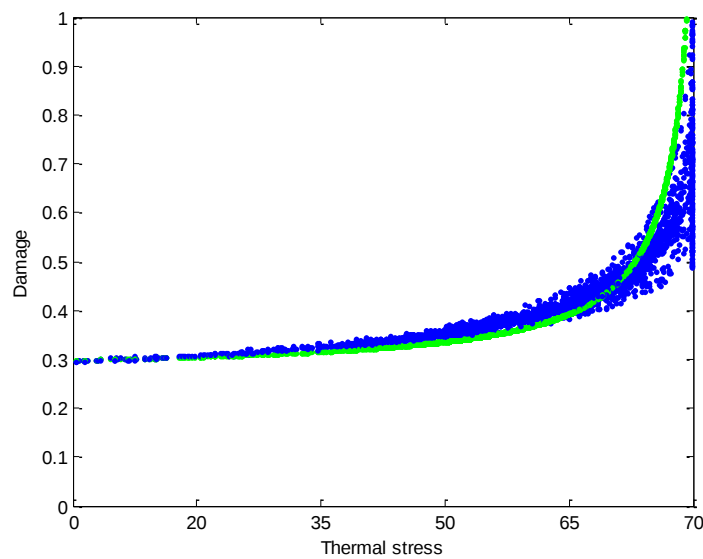


Figure IV.10 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 175 \text{ N/m}^2$)

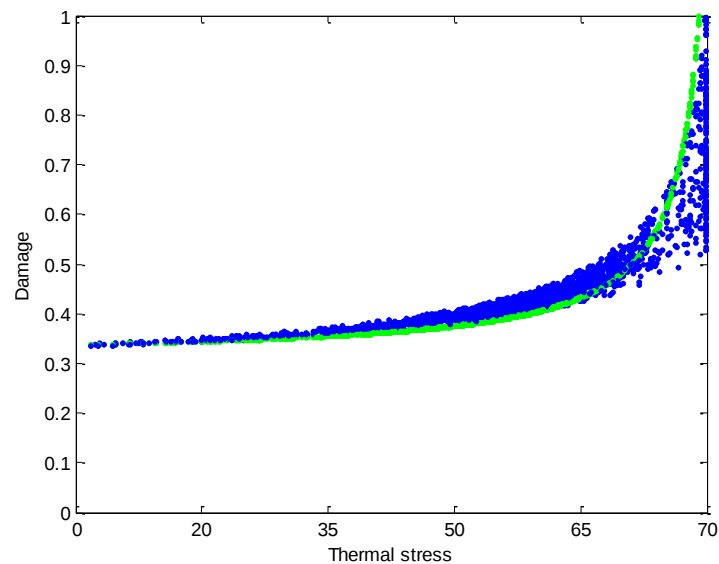


Figure IV.11 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 195 \text{ N/m}^2$)

Lin-Chanvre / Polyéthylène

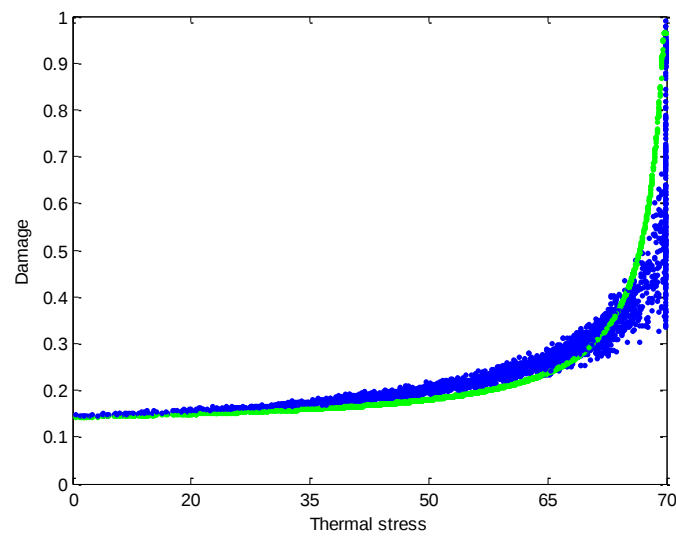


Figure IV.12 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 155 \text{ N/m}^2$)

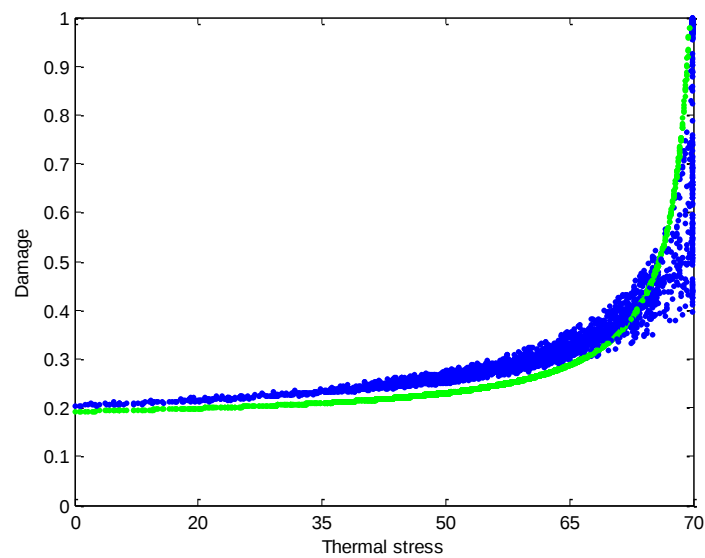


Figure IV.13 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 175 \text{ N/m}^2$)

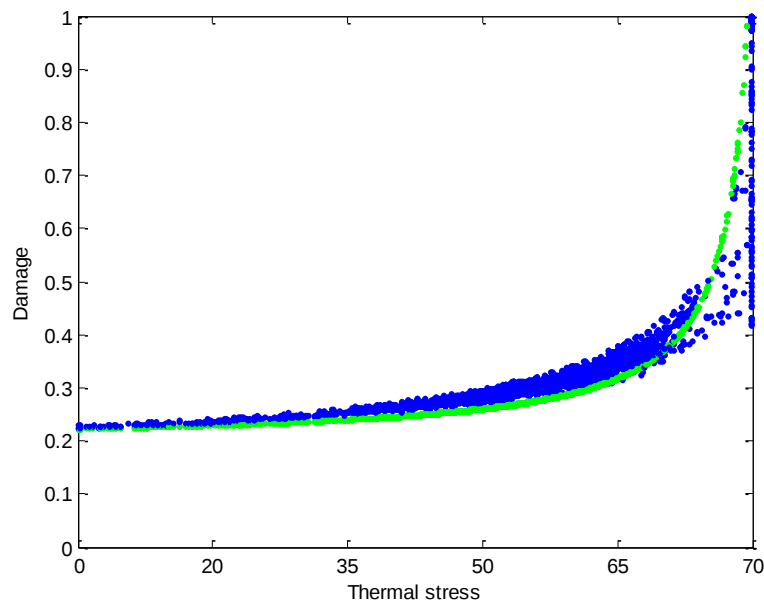


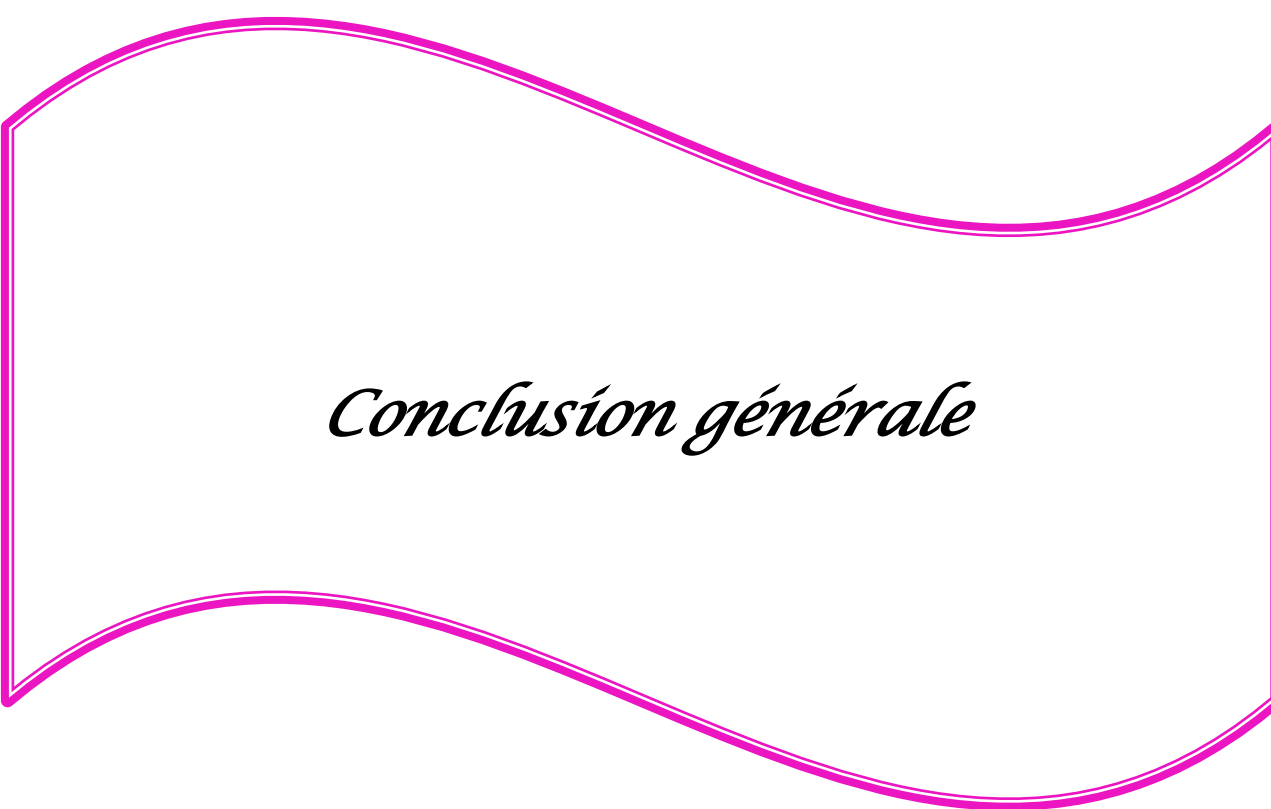
Figure IV.14 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface (pour $\sigma = 195 \text{ N/m}^2$)

5. Conclusion

Notre simulation génétique montre que la contrainte thermique appliquée sur les trois matériaux étudiés a engendré une dégradation importante de l'interface pour les deux biocomposites Chanvre/PE et Lin/PE, et une faible abaissement pour le biocomposite hybride Lin-Chanvre/PE, et montrent, aussi, une bonne concordance entre la simulation numérique et le comportement réel des trois matériaux. La simulation numérique fait ressortir que le biocomposite hybride Lin-Chanvre/PE a une résistance supérieure aux contraintes mécaniques et thermiques comparant aux deux autres matériaux biocomposites Chanvre/PE et Lin/PE. Les résultats obtenus dans notre étude coïncident parfaitement avec les résultats trouvés par Clément GOURIER [7] et Raphaël KUENY [9] qui ont montré que les fibres de Lin et de chanvre (fibres d'écorce / libériennes [15]) sont des bons renforts de la matrice Polyéthylène. Les résultats trouvés ont montré que notre matériau biocomposite hybride Lin-Chanvre/PE est résistant, notamment, une partie de ce matériau est d'origine végétale qui nous donne plus d'avantage environnementale. A noter que les résultats obtenus par la simulation génétique sont en bon accord avec les résultats obtenus par la technique acoustique non linéaire mentionnés par la courbe verte dans toutes les figures.

Références

- [1] Cox H.L. British journal of applied physics. 12 72–79 (1952).
- [2] W. Weibull. Royal Swedish Academy of Eng. Sci. Proc. 151, 1-45 (1939).
- [3] Lebrun, G. A. Comportement thermomécanique et durée de vie de composites à matrice céramique : théorie et expérience, Thèse de Doctorat n° 1606, Université de Bordeaux. (1996).
- [4] Moussatov, A., Castagnède, B., Gusev, V. Phys. Lett. A., 283 21 (2001).
- [5] El Guerjouma, R., Faiz, A., Godin, N., Bentahar, M., Baboux, J. C. (2002). Matériaux et Techniques, 48, 2002.
- [6] Johnson P.A, McCall K.R. Geophysical Research Letters. 21, 165.00557897> (1994)
- [7] 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.
- [8] Flénet F, Références pour de nouveaux itinéraires techniques en lin graine, Alternattech, 69 (2004)
- [9] Raphaël KUENY. Biocomposites : composites de hautes technologies en renfort de fibres naturelles et matrice de résines naturelles. Thèse de doctorat, Université de Lorraine Ecole Doctorale Sciences et Ingénierie des Ressources Procédés Produits et Environnement Département de Formation Doctorale Sciences du Bois. 14/11/2013.
- [10] Tahir et al. Review of bast fiber retting ; BioResources 6(4), 5260-5281 p 5273 (2011)
- [11] Karine C., J.P Jernot Jean-Paul, M.Gomina, C.Baley, L. Bizet, J Bréard , Morphologie and mechanical behavior of a natural composite: The flax fiber, 16TH International Conference on Composite Materials, (2007).
- [12] Bouloc, P. (Collectif). Le Chanvre Industriel : Production et Utilisations. Editions France Agricole. ISBN 2-8557-130-8 (2006)
- [13] Abot A. Caractérisation des fibres longues de chanvre (Cannabis sativa) en vue de leurs utilisations dans des matériaux composites. Thèse de l'Université de Poitiers. 19/11/2010.
- [14] Maya Jacob John, Rajesh D. Anandjiwala, Recent Developments in Chemical Modification and Characterization of Natural Fiber-Reinforced Composites; Polymer composites, 187-207 (2008)
- [15] Vi Vi Do Thi. Matériaux composites à fibre naturelle s /polymère biodégradables ou non Alimentation et Nutrition. Université de Grenoble, Français. NNT : 2011GRENA012 (2011)
- [16] Ludovic Douminge. Etude du comportement du polyéthylène haute densité sous irradiation ultraviolette ou sollicitation mécanique par spectroscopie de fluorescence .Autre .Université de la Rochelle, 2010. Français. NNT : 2010LAROS295.
- [17] Colom X, F. Carrasco, P. Pagès, J. Canavate. Composites Science and Technology 63, 161-169 (2003)
- [18] Ostrovsky L. A., Johnson P. A. Rivista del Nuovo Cimento, vol.24, pp.1-46 (2001)



Conclusion générale

Les différentes recherches que nous avons consulté ont montré que les fibres naturelles en particulier les fibres végétales, lorsqu'elles sont utilisées comme renforts dans les matériaux composites ou biocomposites, améliorent les propriétés physiques et mécaniques de ses matériaux. L'objectif de cette étude est de voir l'effet de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface du matériau biocomposite hybride Lin-chanvre/Polyéthylène, et pour atteindre cet objectif, nous avons étudié deux autres matériaux biocomposites séparément Lin/Polyéthylène et Chanvre/polyéthylène par le même modèle génétique pour avoir un référentiel théorique de comparaison. Les résultats montrent que le niveau de l'endommagement est lié à la concentration des contraintes mécaniques et thermiques appliquées sur les trois matériaux, et montrent, aussi, une bonne concordance entre la simulation numérique et le comportement réel des trois matériaux. La simulation numérique fait ressortir que le biocomposite hybride Lin-Chanvre/PE a une résistance supérieure aux contraintes mécaniques et thermiques comparant aux deux autres matériaux biocomposites Chanvre/PE et Lin/PE.

Les résultats obtenus dans notre étude coïncident parfaitement avec les résultats trouvés par Clément GOURIER et Raphaël KUENY qui ont montré que les fibres de Lin et de chanvre (fibres d'écorce / libériennes) sont des bons renforts pour les matériaux biocomposites. Les résultats trouvés ont montré aussi que notre matériau biocomposite hybride Lin-Chanvre/PE est résistant, notamment, une partie de ce matériau est d'origine végétale qui nous donne plus d'avantage environnementale. A préciser que les résultats obtenus par la simulation génétique sont en bon accord avec les résultats obtenus par la technique acoustique non linéaire mentionnés par la courbe verte dans toutes les figures.

En perspective, Il serait intéressant de voir, par la suite, l'effet d'humidité sur l'endommagement de l'interface fibre matrice d'un biocomposite hybride.

Effet de la contrainte thermique sur l'endommagement transversal d'un matériau hybride Lin-Chanvre/Polyéthylène

Résumé

Pour répondre aux défis et objectifs de développement durable dans le domaine des matériaux; la substitution des constituants de base d'un matériau composite par des renforts naturels joue un rôle très important dans la protection de l'environnement et présente une alternative importante à condition que les nouveaux matériaux disposeront des propriétés meilleures par rapport aux matériaux dits traditionnels. Dans ce contexte, nous avons étudié, en utilisant une modélisation génétique basée sur des modèles probabilistes, l'endommagement transversal d'un matériau biocomposite hybrides Lin-Chanvre/PE. Les résultats obtenus sont en bon accord avec les résultats trouvés par Clément GOURIER et Raphaël KUENY qui ont montré que les fibres de Lin et de chanvre (fibres d'écorce/ libériennes) sont des bons renforts de la matrice Polyéthylène. Les résultats trouvés ont montré aussi que notre matériau biocomposite hybride Lin-Chanvre/PE est résistant, notamment, une partie de ce matériau est d'origine végétale et qui nous donne plus d'avantage environnementale.

Mots clés : Lin-Chanvre/Polyéthylène, endommagement, interface, contrainte thermique

Effect of thermal stress on transversal damage of a hybrid material Flax-Hemp / Polyethylene

Abstract

To meet the challenges and objectives of sustainable development in the field of materials; the substitution of the basic constituents of a composite material by natural reinforcements has a very important role in the protection of the environment and presents an important alternative provided that the new materials will have better properties compared to so-called traditional materials. In this context, we have investigated, using genetic modeling based on probabilistic models, the transversal damage of a bio-composite hybrid Flax-Hemp/PE material. The results obtained are in good agreement with the results found by Clément GOURIER and Raphaël KUENY who have shown that flax and hemp fibers (bark/Liberian fibers) are good reinforcements of the Polyethylene matrix. The results found also showed that our hybrid biocomposite material Flax-Hemp/PE is resistant, in particular, a part of this material is of plant origin and gives us more environmental benefit.

Keywords : Flax-Hemp/Polyethylene, Damage, interface, thermal stress.