

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

UNIVERSITE « Dr. TAHAR MOULAY » DE SAIDA
FACULTE DES SCIENCES



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : PHYSIQUE

Option : Physique des Matériaux

Par

Mlle. MOULAY Fatima Zohra

Sur le thème

**Etude par algorithme génétique de l'effet d'humidité sur l'endommagement
de l'interface d'un Bio-composite bois- polypropylène**

Soutenu le 10/05/2018 devant le jury composé de

M. ELKEURTI	Mohamed	Professeur	(Université de Saïda)	Président
M. MOKADDEM	Allel	Maître de conférences A	(Centre Universitaire Nour Bachir El Bayadh)	Rapporteur
M. DOUMI	Bendouma	Maître de conférences A	(Université de Saida)	Co-encadreur
M. BOUDALI	Abdelkader	Maître de conférences A	(Université de Saida)	Examineur
M. HACHEMAOUI	Malika	Maître de conférences B	(Université de Saida)	Examineur

Année Universitaire 2017-2018

Introduction générale

Les matériaux composites présentent aux industriels une alternative très intéressante en matière de compromis coût/résistance. Ce compromis est devenu actuellement incontournable et indispensable pour la recherche scientifique au profit du secteur industriel. (des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps).

Le développement des matériaux composites est conditionné par les exigences des utilisateurs dans les différents domaines industriels en respectant la réglementation en matière de recyclage et valorisation. Donc l'utilisation des constituants de base d'un matériau composites d'origine naturels devient un axe de recherche essentiel pour faire face aux besoins du marché qui est toujours en croissance.

Les composites renforcés par des fibres naturelles ont donc attiré une attention de plus en plus grande en raison de leur faible coût, leur densité peu élevée, leur biodégradabilité et leur disponibilité, leur facilité de mise en œuvre, leur haut module spécifique, et leur capacité à être recyclé, etc. Ces avantages présentent un intérêt général pour des applications dans divers domaines comme par exemple la vie quotidienne (meublier, plancher, pots...), l'industrie automobile..., qui exigent des matériaux légers à haute performance, des possibilités de recyclage, le minimum d'impact sur l'environnement, et une réduction du coût de la matière. [1]

Dans ce contexte, notre étude visant à étudier de nouveaux matériaux bio-composites à base des fibres naturelles pour mieux améliorer les propriétés mécaniques des matériaux composites (dit traditionnels) et d'avoir par la suite des matériaux biodégradables afin de protéger l'environnement.

Ce mémoire est divisé en trois chapitres, dans le premier, nous abordons des généralités sur les matériaux composites et les matériaux bio-composites. Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation de l'endommagement de l'interface et la présentation des algorithmes génétiques et leurs applications.

Dans la dernière partie, nous présentons nos résultats de simulation numérique avec une interprétation plus explicite.

Introduction générale

Références

[1] ViVi Do Thi. Matériaux composites à fibres naturelles / polymère biodégradables ou non. Alimentation et Nutrition. Université de Grenoble, 2011. P7

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

Chapitre I

I.1 Introduction

Un matériau composite est défini comme étant un assemblage d'au moins deux constituants non miscibles, mais ayant une forte capacité d'adaptation. Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites qui peuvent être classés suivant différents critères (La nature de la matrice et la nature du renfort), détaillée ci-après ou selon l'objectif recherché via leurs utilisations. Si l'optimisation des coûts est le principal objectif, on parlera de composites 'grande diffusion'. En revanche, pour une utilisation dans le but d'optimiser les performances mécaniques ou thermiques, liées à une réduction de poids, on parlera de composite 'hautes performances'. [1]

I.2 Définitions

Un matériau est "bio composite" quand sa matrice ou son renfort, ou bien les deux, sont issus de la biomasse végétale. Ou de bio polymères (PLA, PHAs,). Les bio composites fabriqués à partir de fibres issues des plantes (fibres naturelles) et de polymères bio sources (bio polymères, bioplastiques) sont souvent appelés "composites verts". [2]

I.3 Caractéristiques des bio-composites

Les bio-composites sont caractérisés par le fait que :

- La résine pétrochimique est remplacée par une résine végétale ou animale ;
- et/ou les renforts synthétiques (fibres de verre, fibres de carbone, ...) sont remplacés par des fibres naturelles (chanvre, lin, sisal, jute, etc.).

Ces marchés sont en forte croissance, principalement du fait de l'augmentation des prix du pétrole, des obligations de recyclage et de respect de l'environnement.

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

I.4 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est un matériau hétérogène formé d'au moins deux constituants non miscibles, disposés selon une organisation géométrique particulière. Quasiment tous les composites sont constitués :

- De renforts, prenant généralement la forme de fibres ou de particules, assurant l'essentiel des propriétés mécaniques du composite ;
- D'une matrice dans laquelle sont noyés les renforts, assurant la cohésion de l'ensemble et le transfert des efforts ainsi que l'essentiel des propriétés autres que mécaniques. [3]

Il existe de très nombreuses organisations géométriques possibles, aussi bien au niveau des constituants eux-mêmes (renforts sous forme de fibres longues, fibres courtes ou particules) que de la façon dont ils sont disposés (sous forme de fils qui sont ensuite tissés, de plis unidirectionnels qui sont empilés...). Selon l'organisation géométrique choisie, les propriétés du composite peuvent varier du tout au tout ; ces aspects sont évoqués dans la ressource « *Matériaux composites et structures composites* ». [3]

I.4.1 Constituants des matériaux composites

Les matériaux composites sont constitués principalement :

- D'une matrice à laquelle sont ajoutés, dans certains composites des charges,
- D'un renfort.
- D'une interface.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux Bio-composites

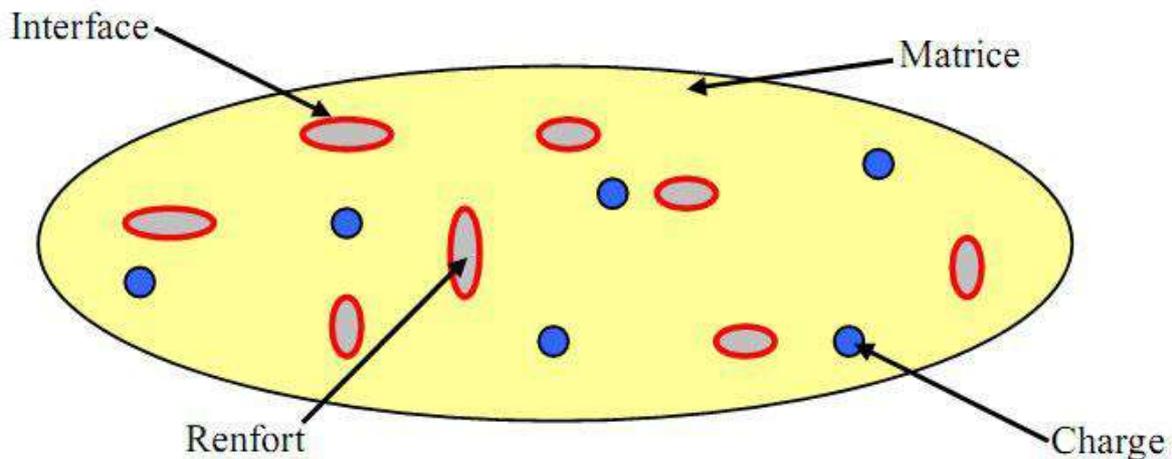


Figure.I.1 Matériaux composites. [4]

Il existe aujourd'hui un grand nombre de matériaux composites que l'on classe généralement en trois familles en fonction de la nature de la matrice [5]

- Les composites à matrices organiques (CMO) qui constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle.
- Les composites à matrices céramiques (CMC) réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire, ainsi que le freinage.
- Les composites à matrices métalliques (CMM) qui tentent de concilier les qualités des métaux avec la légèreté et les caractéristiques mécaniques des structures composites. [5]

I.4.2 Matrices

La matrice permet de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion). La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres[I-2]. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique. [6]

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrice :

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux Bio-composites

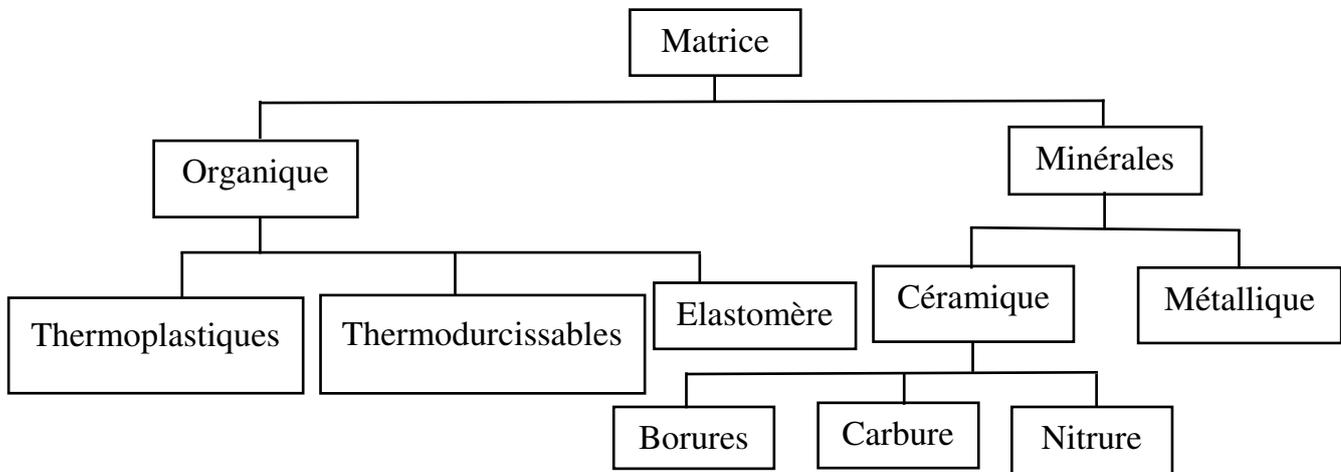


Figure.I.2 Différentes familles de matrices. [6]

Les résines les plus employées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

I.4.2.1 Les résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables, sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Elles subissent une transformation irréversible par apport de chaleur en passant à l'état solide après polymérisation. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Ces résines possèdent des propriétés mécaniques plus élevées que les résines thermoplastiques [7] elles sont les plus employées dans la mise en œuvre des matériaux composites. Les principales résines thermodurcissables sont : les résines polyesters, les résines de condensation et les résines époxydes.

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

I.4.2.2 Les résines thermoplastiques

Les thermoplastiques sont constitués de macromolécules linéaires qui peuvent devenir mobiles entre elles lorsqu'on élève la température. La mise en œuvre se fait avec un apport d'énergie par chauffage ou par frottement, la matrice passe d'un état solide à un état plastique ou fondu [8].

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

Matrice	Thermoplastique	Thermodurcissable
Etat de base	Solide prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière de base	Illimité	Réduit
Mouillabilité des renforts	Difficile	Aisée
Moulage	Chauffage + refroidissement	Chauffage continu
Cycle	Long	Court
Tenue au choc	Assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Meilleure
Chute et déchets	Recyclable	Perdus

Tableau.I.1 Caractéristiques des résines thermodurcissables et des résines thermoplastiques. [6]

I.4.2.3 Renfort

Le renfort a pour rôle de supporter l'essentiel de l'effort mécanique appliqué au matériau composite grâce à ses caractéristiques mécaniques élevées (modules et limite d'élasticité, résistance mécanique...) [9] et d'améliorer des propriétés physiques, tels que les comportements au feu, la tenue en température (conservation des

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux Bio-composites

caractéristiques mécaniques à haute température) ou les propriétés électriques. Outre les propriétés mécaniques élevées qu'ils procurent, les caractéristiques recherchées dans les renforts sont une masse volumique faible, une compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre. Les renforts peuvent provenir d'origines diverses (animale, végétale, synthétique, etc.).

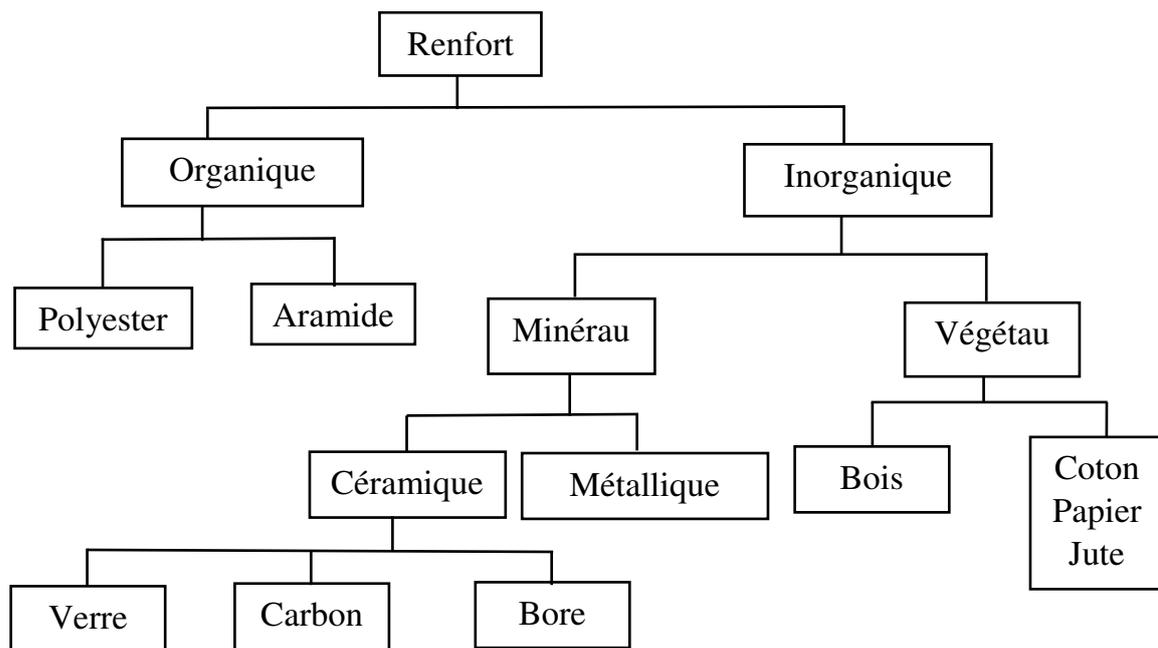


Figure.I.3 Principaux matériaux de renfort. [10]

Il existe plusieurs types de renforts fibreux :

a / Fibre de verre :

Les fibres de verre sont les renforts les plus utilisés lors de la conception de matériaux composites. Parmi les qualités de ces fibres figurent leur légèreté et leur résistance en traction mais aussi leur résistance à la corrosion, leur qualité d'isolant électrique et la liberté de mise en forme qu'elles permettent -autant au niveau du procédé que de la forme des pièces à créer [11].

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites



Figure.I.4 Fibre de verre.

b / Fibre de carbone :

Les fibres de carbone sont obtenues par décomposition thermique non oxydante d'un fil de matière organique appelé *précurseur*, qui généralement, est une fibre acrylique (polyacrylonitrile PAN). Selon les conditions de traitement et de température, on obtient des fibres à haute ténacité ou à haut module auxquelles on fait subir une oxydation superficielle afin d'améliorer la liaison carbone/résine. [12]

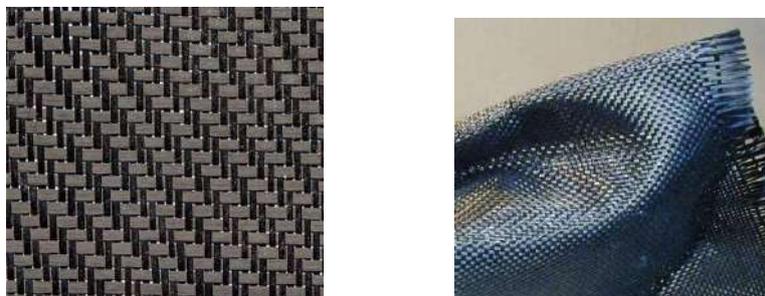


Figure.I.5 Fibres de carbone.

c / Fibres aramides :

Ces fibres appartiennent à la famille des fibres polyamides aromatiques. Les versions commerciales disponibles incluent le Kevlar (nom déposé) et le Nomex (nom déposé). Elles possèdent une résistance élevée et une rigidité considérablement supérieure à celle des fibres de verre. La tolérance aux dommages est très bonne également. Leurs

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

désavantages incluent une résistance en compression inférieure à celle des fibres de carbone et une adhésion relativement faible aux matrices [13].



Figure.I.6 Fibres d'aramide.

Leurs caractéristiques mécaniques se trouvent à un niveau intermédiaire entre les deux matériaux précédents, voir tableau.I.2.

Renforts	Diamètre du filament (μm)	Masse volumique (Kg.m^{-3})	Module d'élasticité longitudinal (MPa)	Module de cisaillement (MPa)	Coefficient	Contrainte de rupture (traction) MPa	Allongement a rupture %	Coefficient de dilatation thermique $^{\circ}\text{C}^{-1}$
	D	Mv	E	G	K	C_r	A	A
Verre E	16	2600	74 000	30 000	0.25	2 500	3.5	$0.5 \cdot 10^{-3}$
Verre R	10	2 500	86 000		0.2	3 200	4	$0.3 \cdot 10^{-3}$
Carbone HM	6.5	1 800	390 000	20 000	0.35	2 500	0.6	$0.08 \cdot 10^{-3}$
Carbone HR	7	1 750	230 000	50 000	0.3	3 2000	1.3	$0.02 \cdot 10^{-3}$

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

Kevlar49	12	1 450	130 000	12 000	0.4	2 900	2.3	$0.2 * 10^{-3}$
Bore	100	2 600	400 000			3 400	0.8	$0.4 * 10^{-3}$
Silicate d'alumine	10	2 600	200 000	-	-	3 000	1.5	-
Polyéthylène		960	100 000	-	-	3 000	-	-

Tableau.I.2 Caractéristiques mécaniques des fibres utilisées dans le renforcement.

[14,15]

I.4.2.4 Charges et additifs

Enfin, des charges et additifs sont ajoutés au composite afin de lui conférer de nouvelles propriétés et, ainsi, de lui permettre de remplir davantage de fonctions techniques. De manière générale, les charges et additifs jouent un rôle essentiel dans l'obtention des propriétés des polymères, qu'ils soient utilisés seuls ou comme matrices de composites ; il en existe de très nombreux types.

Les charges sont des particules solides que l'on disperse au sein de la matrice. Elles peuvent être minérales, organiques (végétales ou synthétiques) ou métalliques, et s'utilisent grosso modo de la même façon que dans les plastiques « traditionnels ». On peut par exemple rencontrer (figure.I.8) :

- Des microbilles de verre creuses, ajoutées en plus des renforts principaux, qui améliorent la tenue en compression tout en allégeant la matrice ;
- Du noir de carbone utilisé à la fois comme pigment noir, comme barrière anti-UV et comme antioxydant ;
- Des particules de silice pour rendre la matrice plus isolante (thermiquement, électriquement et acoustiquement), diminuer son retrait au moulage... ;

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

- Des poudres ou paillettes métalliques pour rendre la matrice conductrice de l'électricité et de la chaleur, pour améliorer son usinabilité, sa résistance aux chocs ou à l'abrasion... ;
- Des billes thermoplastiques ajoutées dans les matrices thermodurcissables, pour améliorer leur ductilité et donc leur résistance à la fissuration... ;



a)



b)



c)

Figure.I.7 Exemples de charges utilisées dans les CMO :
(a) microbilles de verre, (b) noir de carbone, (c) silice. [3]

Les additifs possibles sont encore plus nombreux. Une classe d'additifs que l'on rencontre systématiquement est celle des agents d'interface, que l'on dépose sur les fibres pour les faire adhérer à la matrice. On rencontre également :

- Des stabilisants, qui retardent les dégradations dues à l'oxygène, aux UV ou encore à l'ozone
- Des ignifugeants ou retardateurs de flamme (la plupart des polymères sont inflammables !)
- Des agents de démoulage
- Des colorants...

Il est ainsi possible de conférer de nombreuses fonctions techniques au composite, et d'adapter finement ses propriétés aux besoins du concepteur. [3]

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

I.5 Le polypropylène

I.5.1 Historique

Le polypropylène PP à structure cristalline régulière. Bouterfa emploie le terme « *isotactique* » pour décrire ce polymère. Les chaînes d'un polymère isotactique peuvent se rapprocher les unes des autres pour former un solide ordonné. Plus tard, il mettra au point des catalyseurs stéréospécifiques permettant l'obtention systématique de tels polymères.

Le polypropène atactique (aPP), matériau amorphe affichant une faible résistance mécanique, présente peu d'intérêt industriel.

Le polypropylène commercial le plus courant est l'iPP.

Le polypropène syndiotactique (sPP), industrialisé à partir de 1992, tend à se développer. Cette matière, différente de l'iPP, peut être obtenue en utilisant des systèmes à base de métallocènes. [16]

I.5.2 Définition

Le polypropylène (PP) de formule chimique $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-)_n$ est un polymère vinylique $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{R})-)_n$ ($\text{R}=\text{CH}_3$), polyvalent ayant des propriétés physico-chimiques et mécaniques intéressantes avec un prix relativement bas. La polymérisation Ziegler Natta ou la catalyse métallocène des monomères de propylène sont les méthodes d'obtention du PP. Il possède différents arrangements préférentiels en fonction de la position du groupe méthyle (CH_3). [17]

I.5.3 Propriétés

Le polypropylène est translucide à opaque, hydrophobe, dur, semi rigide et très résistant à l'abrasion

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux Bio-composites

Le polypropylène expansé, de sigle EPP en anglais, est une mousse blanche ressemblant au polystyrène expansé, mais avec une mémoire de forme lui permettant de se déformer sans casser et de conserver sa structure.

Le polypropylène de grade « injection » est très facilement recyclable ;

Le PP de grade « film » est au contraire beaucoup plus délicat à recycler, surtout s'il est imprimé ;

Le PP film imprimé est sûrement l'un des plastiques usuels les plus difficiles à recycler. [16]

I.5.4 Structures de polypropylènes

Les polypropylènes existent sous les trois formes suivantes qui dépendent de la disposition des groupes méthyle par rapport au plan contenant la chaîne carbonée principale [18] :

I.5.4.1 Polypropylène isotactique (iPP)

Les groupes méthyles sont répartis du même côté du plan; une macromolécule d'iPP est essentiellement constituée de diades méso. [18]

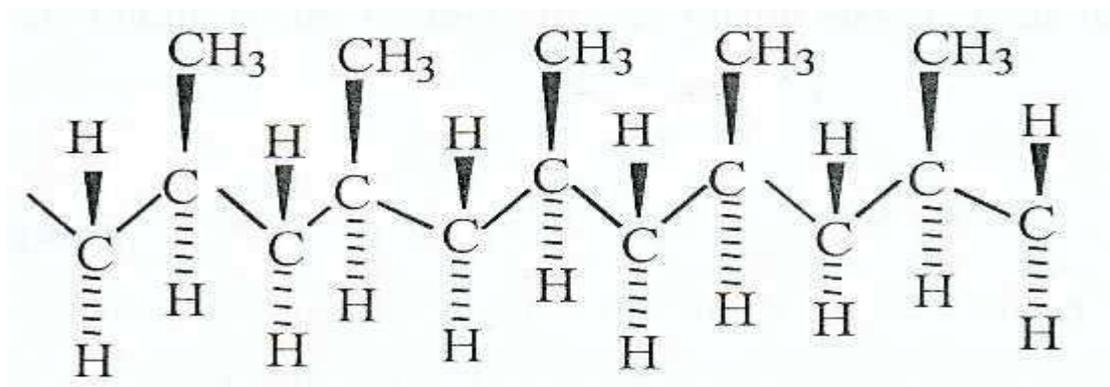


Figure.I.8 Schéma représentatif du polypropylène isotactique

I.5.4.2 Polypropylène syndiotactique (sPP)

Les groupes méthyle sont disposés alternativement de part et d'autre du plan; une macromolécule de sPP est essentiellement constitué de diades racemo .[18]

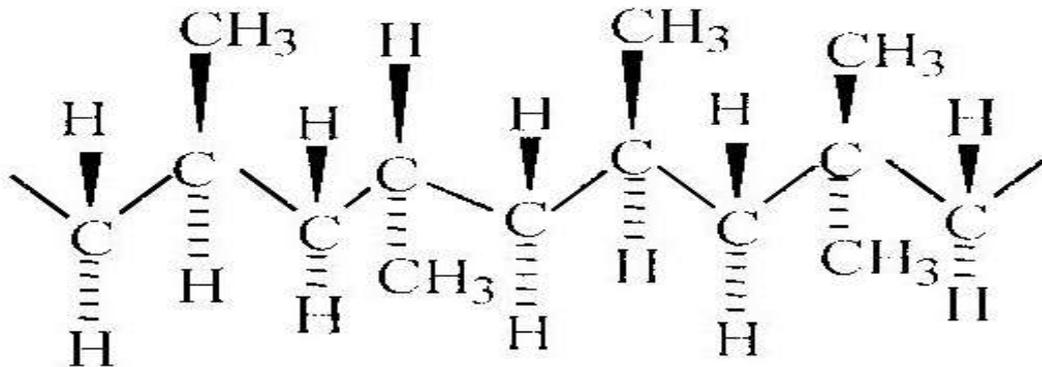


Figure.I.9 Schéma représentatif du polypropylène syndiotactique

I.5.4.3 Polypropylène atactique (aPP)

Dans ce cas, la répartition des groupes méthyles est aléatoire.[18]

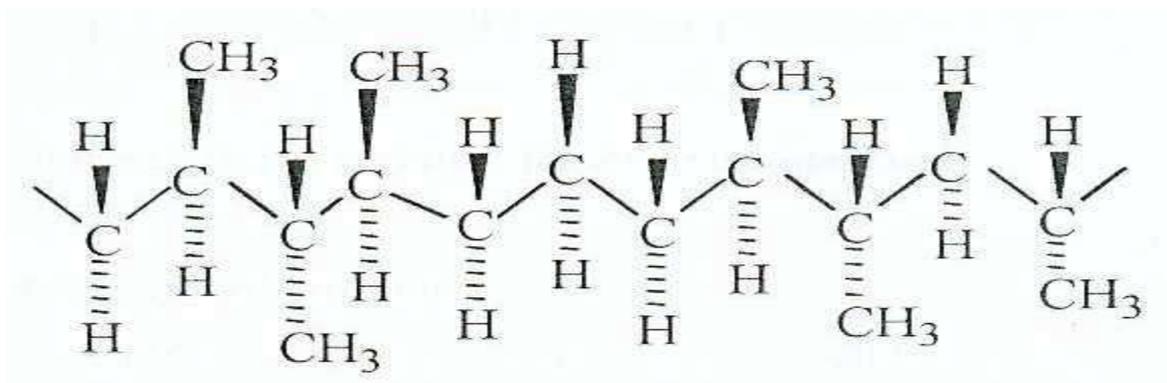


Figure.I.10 Schéma représentatif du polypropylène atactique.

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

I.6 Fibres naturelles

Les fibres naturelles sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. [19] Dans une proportion beaucoup plus faible elles contiennent aussi des extractibles, des protéines et certains composés inorganiques. [20] Il existe différentes classifications de ces fibres. Les fibres dures forment un groupe à part entière qui représente 90% de la production mondiale.

Ce sont ces fibres dures ou rigides qui sont utilisées lors de la fabrication des WPC.

La proportion d'holocellulose (cellulose, hémicelluloses) et de lignine varie beaucoup selon les fibres naturelles (jute, bois, sisal, kenaf, etc.). Chaque fibre se présente sous la forme d'un composite multicouches dans lequel la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant un élément structurant très rigide qu'est la cellulose. [21]

Les fibres naturelles peuvent être classées selon leur origine. Il est donc possible de distinguer trois grandes familles : [22]

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

- Les fibres végétales : elles se subdivisent elles-mêmes selon leur provenance. On peut donc citer les fibres libériennes qui sont extraites de tiges de plantes (chanvre, lin, ramie, jute), les fibres dures qui sont extraites de feuilles, de troncs ou d'écorces de fruits (sisal, chanvre de Manille, noix de coco), et les fibres qui proviennent des poils séminaux de graines (coton, kapok) ;
- Les fibres animales : elles peuvent émaner des poils (toison animale) ou encore des sécrétions (soie) ;
- Les fibres minérales.

La Figure.I.12 illustre la classification des fibres naturelles.

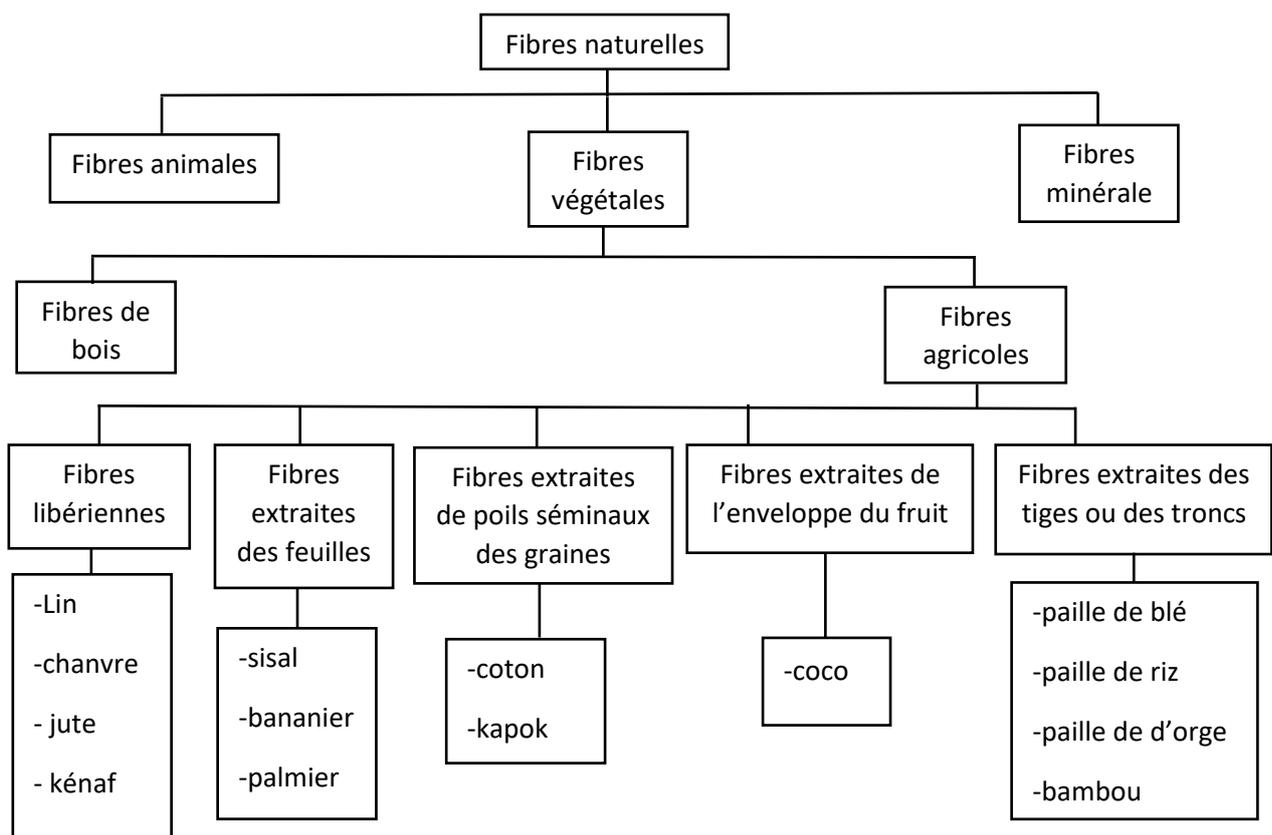


Figure.I.11 Classification des fibres naturelles et quelques exemples. [23]

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

Les fibres naturelles, surtout les fibres végétales, sont très utilisées car elles sont très disponibles. Leur utilisation valorise donc les ressources locales d'un pays donné, tout en respectant l'environnement.

Les performances varient d'une fibre à une autre et il convient donc de noter que chaque type de fibres, dans ce cas les fibres végétales ou cellulosiques, possède des caractéristiques très variables, dues au caractère naturel. [24]

Le Tableau.I.3 dresse une liste des différentes fibres et les propriétés associées à chacune d'elles.

Fibre	Longueur de la fibre technique (mm)	Diamètre(μm)	Facteur de forme L/D	Module de traction (GPa)	Déformation maximale (%)
Coton	25	12-25	2000	6,0-10,0	6,0-8,0
Lin	4,0-8,5	12-30	1500	50-70	1,3-3,3
Chanvre	5,0-40,0	16-50	550-960	30-60	1,7-2,7
Kénaf	2,5-4,5	14-33	-	60	1,7-2,1
Jute	2,5	5-25	110	20-55	1,5-2,0
Sisal	100-125	100-400	100	9-22	3,0-14,0
Banane	4,5-10	50-250	-	7-20	1,8-3,5
Abaca	60 et plus	50-280	-	-	2,1-2,4

Tableau.I.3 Quelques caractéristiques des fibres naturelles. [25,26]

Les fibres animales présentent elles aussi des propriétés intéressantes. En effet, les soies animales se caractérisent par un allongement à la rupture très important. Cette propriété explique le grand intérêt qui leur est porté, à savoir une absorption d'énergie

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

mécanique exceptionnelle, comparée à celle des fibres synthétiques et des fibres naturelles. [22]

Les fibres naturelles se composent principalement de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine. Elles contiennent aussi des quantités faibles en protéines, extractibles et quelques composés inorganiques. Il existe différentes classifications de ces fibres. Les fibres dures, tel que le bois, forment un groupe à part entière qui représente environ 90% de la production mondiale.

La proportion de cellulose, d'hémicelluloses et de lignine varie d'une espèce à une autre. À l'intérieur de chaque fibre, la lignine joue le rôle d'une matrice enrobant la cellulose, qui est une structure très rigide.

La cellulose possède une structure en majeure partie cristalline, contrairement aux autres composantes des fibres qui présentent une structure amorphe. La cellulose cristalline se caractérise ainsi par un module d'élasticité très élevé, soit environ 136 GPa à comparer au 75 GPa de la fibre de verre. Cette rigidité émane d'un agencement supramoléculaire hélicoïdal très ordonné de la structure cristalline. Lors d'une elongation des fibres, cette structure particulière engendre un couplage torsion/traction qui peut avoir des incidences sur l'interface, sur la déformation ou sur les mécanismes de rupture d'un composite. [28] La Figure.I.13 illustre la structure du bois.

Chapitre I : Etude bibliographique sur les matériaux Bio-composites

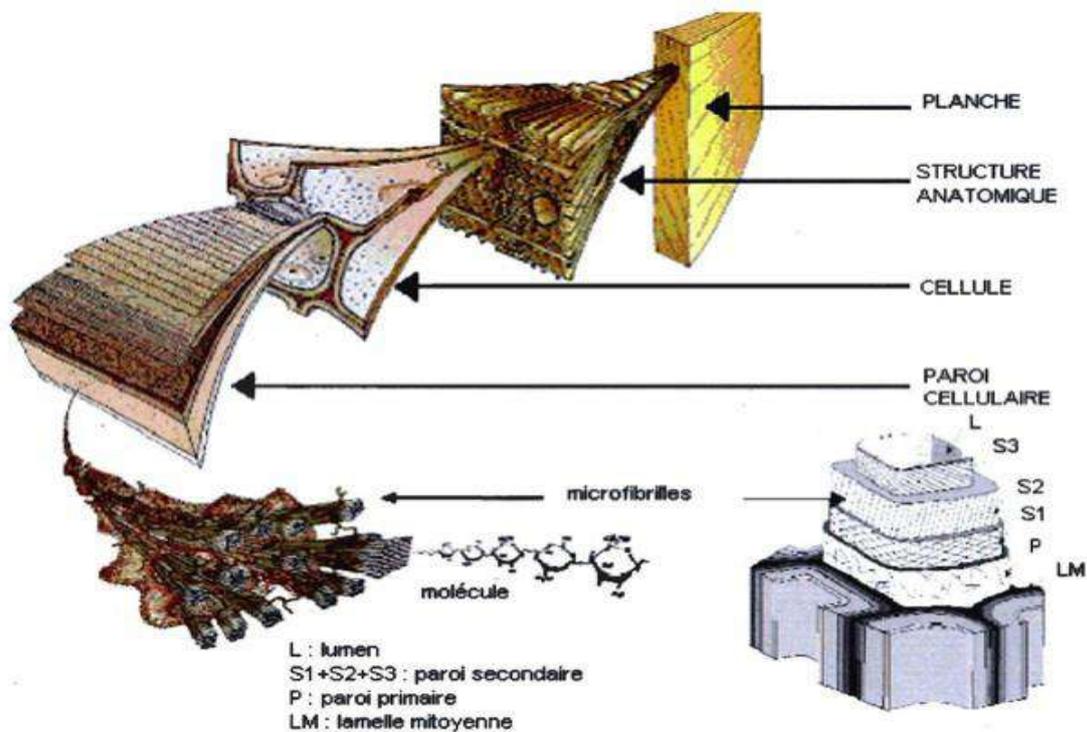


Figure.I.12 Structure du bois avec des observations multi-échelles. [27]

L'utilisation de bio composites, matériaux constitués de bio polymères (polymères biodégradables) et de bio fibres (fibres biodégradables), est très avantageuse pour la préservation de l'environnement, et ceci grâce à la possibilité de les incorporer dans un compost en fin de vie. [24]

I.7 Présentation générale de fibre bois

I.7.1 Définitions

Le bois est une matière première naturelle servant à de multiples usage dans la construction et la maison. Le bois est aussi utilisé pour fabriquer du papier, des pièces de charpente, des meubles ou des objets ou comme combustible. [28]

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

I.7.2 Propriétés du bois

I.7.2.1 Physiques

La structure du bois est influencée par l'eau qui imprègne plus ou moins le bois agissant sur sa consistance et son gonflement. [29]

Ceci est dû à la nature hydrophile de la matière qui le constitue essentiellement (cellulose). [29]

I.7.2.2 Chimique

Chimiquement, le bois se compose presque toujours de 50% de carbone, 42% d'oxygène, 6% d'hydrogène, 1% d'azote et 1% de matières minérales (qui se trouvent dans les cendres).

La matière principale constitutive du bois est la cellulose ($C_6H_{10}O_5$)_n, qui entre pour »50% dans la composition et 20 à 30 % de lignine. [29]

I.7.2.3 Mécaniques

Le bois matériau hétérogène et anisotrope, offre des résistances mécaniques différentes en fonction de la direction de l'effort par rapport à la section transversale, radiale ou tangentielle.

Elles varient avec l'espèce (texture, densité, humidité) ; dans une même espèce avec l'âge, les conditions d'exposition, de croissance et de voisinage et dans un même individu avec l'emplacement du prélèvement (cœur, aubier, etc.). [29]

I.7.3 Caractéristiques mécaniques de quelques essences

Ces valeurs moyennes (en MPa) sont obtenues par essais en laboratoire sur des échantillons de bois. Ces essais sont effectués dans le sens longitudinal du bois.[29]

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

Essence	Module D'élasticité	Compression	Traction	Flexion	Cisaillement
Épicéa	11000	43	90	66	6,7
Pins	12 000	47	104	87	10,0
Mélèze	13 800	55	107	99	9,0
Hêtre	16 000	62	135	105	10,0
Chêne	13000	54	90	91	11,0

I.8 Les Fibres de Bois

Les fibres de bois proviennent du broyage des arbres tels que les bambous ou les roseaux. Elles sont généralement courtes. Plusieurs chercheurs ont montré l'efficacité de ces fibres dans le renforcement des ciments. [30]

I.9 Les Fibres de carbone

Les fibres de carbone sont des filaments minces faites de carbone élémentaire avec les structures qui changent de ceux du carbone amorphe à ceux du graphite cristallin.

Ces fibres sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur, les propriétés chimiques et physiques des fibres de carbone finales dépendent fortement des qualités du précurseur. [31]

I.10 Matrice polypropylène

La matrice polypropylène a pour rôle d'assurer le transfert de charge entre les fibres, de protéger la fibre des chocs et des frottements et enfin d'assurer la forme de la structure. [32]

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

I.11 Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux bois, carbone et la Matrice polypropylène

	Les Propriétés Mécaniques et Physiques			
	Densité (g/m^3)	Module d'Young (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Fibres Bois[33]	0,3 – 1.1	8 – 15	80 – 200	-
Matrice polypropylène	0,92	1,6	310	71-75
Fibres carbone[33]	1,7-1,9	230	3500	1,5

Tableau.I.2 Les propriétés mécaniques et physiques des trois matériaux (fibres bois et carbone et la matrice polypropylène).

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

Références Bibliographiques

- [1] J.L. Billoët, « Introduction aux matériaux composites à hautes performances », Edition Broché, 1993.p4
- [2] Hippolyte DURAND et Yannis LABAT Élèves ingénieurs 2^e année Avril 2013.
- [3] Helene Horsin Malinaro, Cours des sciences et technique industrielles dossier matériaux composites, ENSParis,Saclay, 28 juin 2016.p1,4 ,5.
- [4] Centre d’animation régional en matériaux avancés, glossaire des matériaux Composite, 2004.
- [5] Frédéric Poulet, CI6 Technologie des systèmes, thème : les matériaux
- [6] Ericka Jao Jules,« Couplages entre propriétés thermiques, réactivité chimique et viscosité des matériaux composites therm durcissables en relation avec les conditions de leur élaboration fondée sur l’hystérésis diélectrique », Paris Tech, 2001. p15,16
- [7] Radouane Sellak, "Elaboration et caractérisation d'une résine therm durcissable conductrice", Thèse de Doctorat à l'école doctorale, Matériaux, le Mans, 2013.
- [8] PABIOT « Plastiques renforcés : Propriétés mécaniques, Calcul », Techniques de l'ingénieur, Paris, 1987, PP: A3245 (1-13).
- [9] GAY, D. Matériaux composites. Paris, Hermès, 1991.
- [10] HOUIDEG Abdellah, Transfert de charge et frottement Fibre/ Matrice d.unMatériau Composite (T300/914), Université des Sciences et de la Technologie d.Oran« Mohamed Boudiaf » Mémoire Magister2011 p22
- [11] G. Sims et W. Broughton, Glass Fiber Reinforced Plastics-Properties, Oxford: In Anthony Kellyand Carl Zweben,, 2000.
- [12] D. GAY. Matériaux composites. 5^{ème} édition révisée. Paris : Hermès-Science-Lavoisier, 2005, pagination multiple.
- [13] REINHART, T.J. & CLEMENTS, L.L. « Introduction to composites. » Dans :

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

Engineered materials handbook - Volume 1: Composites. Ohio, USA: ASM International, 1993, p. 27-34. ISBN 0871702797 (v.1).

[14] D.G.Hermes, « matériaux composites », 5eme édition, 2005.

[15] C.Bathias, « Matériaux composites », édition Dunod, année 2005.

[16] BOUTERFA Meriem « Etude de la determination du parametre D'interaction entre deux polymeres par voie mecanique "effet du compatibilisant sur ce parametre" », Memoire Magister, UNIVERSITE FERHAT ABBAS SETIF. 01 /12 / 2011.p22

[17] Sofien Bouzouita, « Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel », Autre. Ecole Centrale de Lyon; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 2011. Français.P27

[18] D. C. Miles et J. H. Briston, « Technologie des polymères », Traduit par P.T. MAC et D. V. Quang, Dunod, Paris, pp : 133-160,1968.p23 24

[19] Jodin P : Le Bois, Matériau d'Ingénierie. Association pour la recherche sur le bois en Lorraine, Nancy, France, (1994).

[20] Rowell R.M, Young R.A, Rowell J.K : Paper and composites from agro-based resources. Ed Rowell R.M, Lewis publishers, Boca Raton, USA, (1997).

[21] Franck Michaud, « Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique :Aptitude au postformage», UNIVERSITÉ BORDEAUX I Bordeaux, France Thèse,2003.

[22] C. Baley « Fibres naturelles de renfort pour matériaux composites », Technique de l'ingénieur, traité génie des procédés, Vol. AM5, 2004, pp. 130.

[23] J.E.G.Van Dam et H.L. Bos, «Consultation sur l'impact environnemental des fibres naturelles dans les applications industrielles», Congrès de Food and Agriculture Organization(FAO), Rome, 2004, 263p.

[24] Bourrai K. « Étude du comportement thermique d'un composite bois-polymère pour une application en rotomoulage » , Mémoire de magister, Université Laval, Québec, 128 p,2010.

Chapitre I : Etude bibliographie sur les matériaux Bio-composites

- [25] A. Mahfoudh , «Étude de la production et de la caractérisation de composites bois-plastiques», Mémoire de Maître ès sciences, Département de Génie Chimique, Université Laval, Québec, 2013, 101p.
- [26] S. Nekkaa,« Etude des propriétés d'un nouveau matériau composite à base de polypropylène renforcé par des fibres végétales locale le Genêt d'Espagne », Thèse de Doctorat d'Etat, Département de Génie des Procédés, Université Ferhat Abbas Sétif, Algérie 2007, 148 p.
- [27] Franck Michaud, 2003 Harrington J.J. Micro Fibril Angle in Wood. Ed. B.G Butterfield, IAWA/IUFRO, New Zealand,1998.
- [28] Le bois «Dictionnaire du bâtiment et du BTP », lexique et terminologie du bâtiment – Batiweb.
- [29] Ghomari fouad , science des matériaux de construction , université aboubekr belkaid faculte des sciences de l'ingénieurDépartement de genie civil ,<https://ft.univ-tlemcen.dz/pages/124/cours-en-ligne>,2004.
- [30] Latelli H«Etude du comportement mécanique du béton polymère renforcé par des fibres végétales et déchets minéraux»,Mémoire Master,01 Juin 2017.
- [31] Gornet L. Généralités sur les matériaux composites. cel-00470296, version 1 - 6 Apr 2010.
- [32] Bénédicte Bonnet, « Comportement au choc de matériaux composites pour applications automobiles », École Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
- [33] Florent Ilcyszyn Silva, N.D., Etat de la connaissance scientifique sur les fibres végétales. 2008.

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

Chapitre II

Partie I : Modélisation de l'endommagement

II.1 Introduction

Les matériaux composites sont conçus pour diverses applications thermo-structurales dans des domaines tels que l'aéronautique, les constructions civiles et l'industrie navale. Cette diversité d'applications industrielles est possible car ces matériaux peuvent supporter de manière satisfaisante tant les chargements mécaniques que d'autres types de sollicitations (abrasion, agents chimiques, hautes températures), issue des fonctionnalités spécifiques auxquelles sont destinées les structures impliquant ces matériaux, ou encore des environnements auxquels ces matériaux sont exposés. [1]

Lors d'une sollicitation quelconque sur un matériau composite, le développement de l'endommagement au sein du matériau commence assez tôt. Dans un composite les premiers dommages détectés commencent à se développer à l'échelle microscopique lorsque l'effort localisé atteint la limite de rupture d'un des constituants ou celle de l'interface qui les relie. Les microfissures qui se développent sont habituellement trop petites pour causer la rupture finale du composite. Ainsi, un nombre important de ces microfissures s'accumulent dans le composite avant la rupture finale. Les paramètres tels que la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur des plis et l'espacement entre fibres jouent un rôle très important dans la progression de l'endommagement. On peut constater aussi en conséquence que la nature de matrice et de la fibre jouent un rôle très essentiel dans le type et le mécanisme d'endommagement [2]. Certains composites sont fragiles mais montrent une très grande résistance dans des milieux agressifs (milieux corrosifs, températures élevées), inversement à d'autres qui sont ductiles mais moins résistants à la corrosion ou à l'augmentation de la température. [1]

Le procédé global de la rupture dans les composites est souvent considéré comme un processus d'accumulation de différents types d'endommagements.

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

II.1.1 Endommagement des matériaux composites

L'utilisation des matériaux composites et en les plaçant sous sollicitations mécaniques excessives passent quasiment par une étape d'endommagement plus ou moins longue avant leur rupture finale. C'est en fait, l'accumulation de micro-défauts qui se propagent au sein du composites donnent naissance à divers défauts plus importants qui entraînent la ruine de ces matériaux. Ce dernier est un phénomène très complexe ou plusieurs mécanismes d'endommagement différents apparaissent et interagissent. Chaque constituant (fibre/matrice) ou interface de matériau composite peut être affecté par ce phénomène qui prend naissance à l'échelle microscopique et conduit à des mécanismes macroscopique (tableau II.1). [3]

Les mécanismes d'endommagement des matériaux composites sont d'abord propres à leur nature d'architecture. Pour les matériaux composites stratifiés, ces mécanismes d'endommagement sont principalement les décollements fibre/matrice, les fissures transverses, le délaminage et enfin les ruptures de fibres. D'après, Mbacké M. A [4] l'endommagement d'un matériau est un processus irréversible de modification de la microstructure.

La référence [5] indique qu'il y a généralement plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée de plis unidirectionnels ou tissés, ayant des conséquences à différentes échelles (figure II.1).

Les plus significatifs sont les suivantes (tableau II.1):

- à l'échelle microscopique, apparaissent les ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice : c'est le phénomène de décohésion fibre/matrice ;
- à l'échelle mésoscopique, ou échelle du pli, apparaissent de nombreuses fissures

Inter laminaires parallèles aux fibres, mais également la rupture de fibres qui intervient généralement au stade ultime de la ruine du matériau ;

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

- À l'échelle macroscopique, nous observons le phénomène de décollement inter pli : c'est le délaminage qui apparaît généralement dans les zones de forts gradients de contraintes comme les bords de la structure.

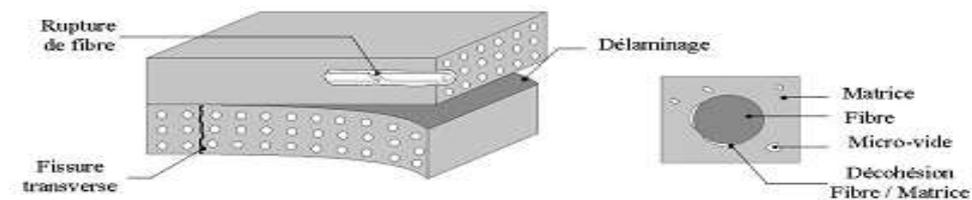


Figure.II.1 Les différents endommagements rencontrés dans les composites stratifiés.[5]

Ces mécanismes sont les retours de plusieurs raisons ou paramètres :

- L'arrangement géométrique (proportion, forme et orientation dans chaque pli, Séquence d'empilement),
- L'interaction entre les différentes phases (types d'interfaces notamment),
- Le processus de fabrication (porosité initiale, contraintes résiduelles),
- La nature et les propriétés des constituants (en particulier leur mode d'endommagement propre).

Fibre	Matrice	Interfaces	
		Inter-pli	Fibre-matrice
Rupture des fibres	Micro fissuration	Délaminage	Décohésion fibre-matrice
	Micro-vides		
	Macro fissuration		

Tableau.II.1 Types d'endommagement dans les composites stratifiés. [3]

II.1.3 L'interface fibre matrice

L'interface est une zone assez critique qui joue un rôle très important sur le comportement mécanique du composite. Elle assure la transmission des efforts entre la matrice et le renfort lors d'une sollicitation. La résistance au cisaillement de l'interface influence largement les propriétés finales du composite. En effet, un des modes d'endommagement dans les composites est la rupture à l'interface (figure Figure.II.2). La résistance de l'interface dépend non seulement des propriétés des composants mais aussi de sa formation. Pour ces raisons, l'étude de l'interface est indispensable. [6]

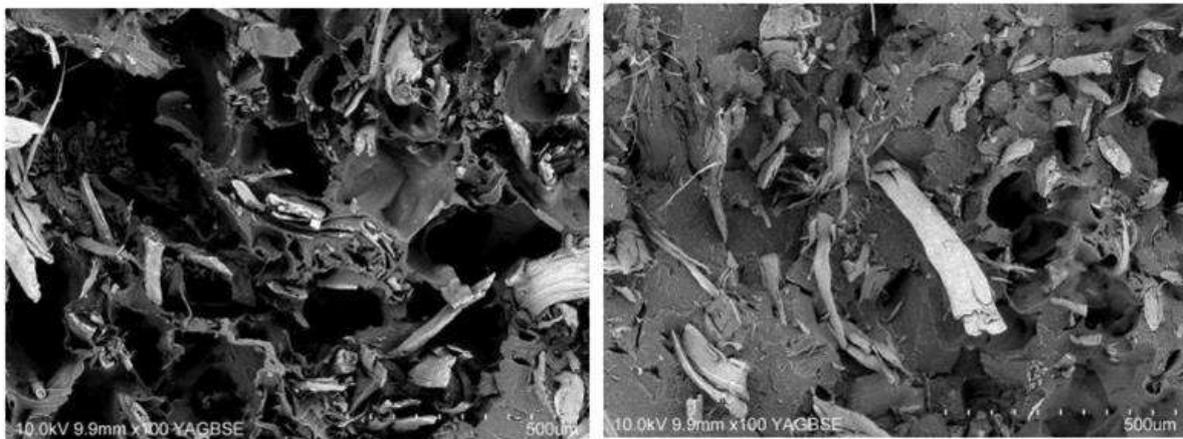


Figure.II.2 Facies de rupture des composites 20% fibres non traitées/polypropylène.[7]

Pourtant, les méthodes de caractérisation de l'interface présentent des limites, soit dans la méthodologie (préparation des éprouvettes), soit dans la procédure expérimentale.

D'autre part, les interactions moléculaires entre deux solides (la fibre et la matrice de polymère) au niveau de l'interface sont importantes à prendre en compte [8] lors d'une étude sur l'interface. Premièrement ce sont les forces de liaison de type dipolaire (Van de Waals). Ensuite, il y a les liaisons type accepteur-donneur d'électron (acide-base) de quelques nanomètres de portée. Ces liaisons sont difficiles à quantifier mais jouent un rôle fondamental dans l'adhésion fibre/matrice. Troisièmement, on considère des

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

liaisons chimiques (liaisons covalentes) de très courtes portées et très résistantes. Finalement, il y a les interactions structurales qui jouent un rôle un peu moins important dans l'adhésion.

En se basant sur les interactions fondamentales de l'interface, quelques théories sur l'adhésion ont été proposées. Ces théories permettent aussi d'expliquer les phénomènes qui se produisent à l'interface.

II.1.4 Comportement de l'interface fibre-matrice dans les composites

II.1.4.1 Généralité

Les caractéristiques de l'interface sont fonction de plusieurs paramètres : les propriétés physicochimiques des constituants (fibres et matrice), la microstructure de l'interface (interphase et rugosité), les contraintes thermiques résiduelles, la méthode d'élaboration du composite, etc. Il est donc évident que la qualité des liaisons interfaciales (faibles ou fortes) et la résistance au frottement sont des paramètres déterminant le comportement du composite. D'autres facteurs aussi importants que le choix des constituants sont liés directement à la performance du composite (FigII.3)

Le procédé de fabrication de ce composite et les propriétés de l'interface entre les fibres et la matrice. [9]

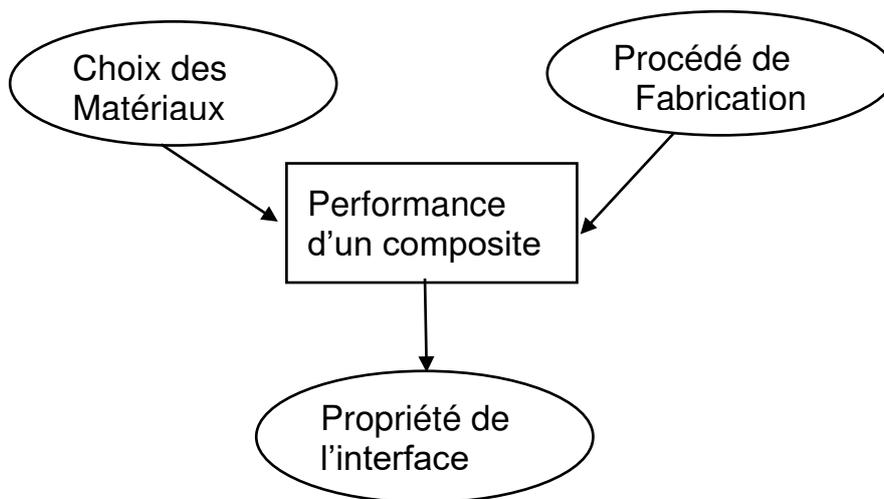


Figure.II.3 Paramètres qui conditionnent les performances d'un composite. [10]

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

En effet, il est reconnu que le comportement mécanique des composites à matrice céramique à renforts fibreux dépend fortement de la liaison fibre/matrice qui s'établit entre les constituants lors de l'élaboration du composite. [11]

Cette liaison est constituée d'une ou plusieurs interphases et interfaces.

Rappelons tout d'abord la distinction entre les termes interphase et interface :

a- Interphases

Est un milieu continu qui peut être une zone de réaction chimiquement formée par les constituants du composite lors de son élaboration, ou une fine couche introduite volontairement dans le but de protéger la fibre ou de contrôler la liaison interfaciale (Figure II.4, a).

b- interface

Est un terme utilisé dans le domaine des matériaux composites, pour décrire la surface ou la zone qui sépare la fibre et la matrice (discontinuité macroscopique) (Figure II.4, b).

C'est dans cette zone que s'effectue précisément le transfert de charge de la matrice vers le renfort (ou vice versa) et elle est également le siège de concentration de contraintes résiduelles lors de la préparation du composite.

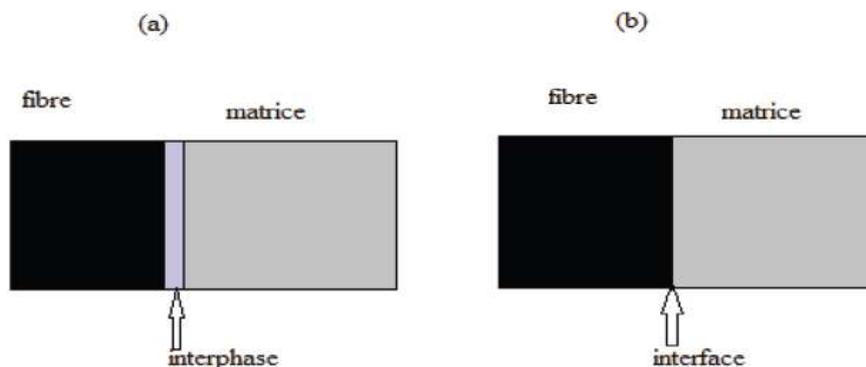


Figure.II.4 Concepts d'interphase et d'interface. [12]

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

Pour que le transfert de charge ait lieu, un certain contact ou adhérence à l'interface entre les constituants est nécessaire. Comme caractéristiques de cette adhérence (caractéristiques de l'interface), il y a : la contrainte de décohesion (\bar{C}_d), la contrainte frottement (\bar{C}_f), le coefficient de frottement (μ), la microstructure, l'énergie d'adhésion et d'autres grandeurs physico-chimiques. Suivant ces caractéristiques, le comportement du composite est déterminé. [12]

II.1.5 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 [13] :

- 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 :

a - 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.5). [14]

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

b - 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. Là également, la résistance du composite est très faible, mode II et III.

c- Cas d'une interface relativement faible :

Si l'adhérence entre fibres et matrice est relativement faible, la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire (mode II de la rupture) en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface. Le mode II, ou mode de glissement droit, est la situation recherchée dans la déviation de fissure, avec le mode III (glissement vis). En règle générale, la propagation de la fissure est en mode mixte combinant le mode I et les deux autres modes (II et III) voir figure. II.5

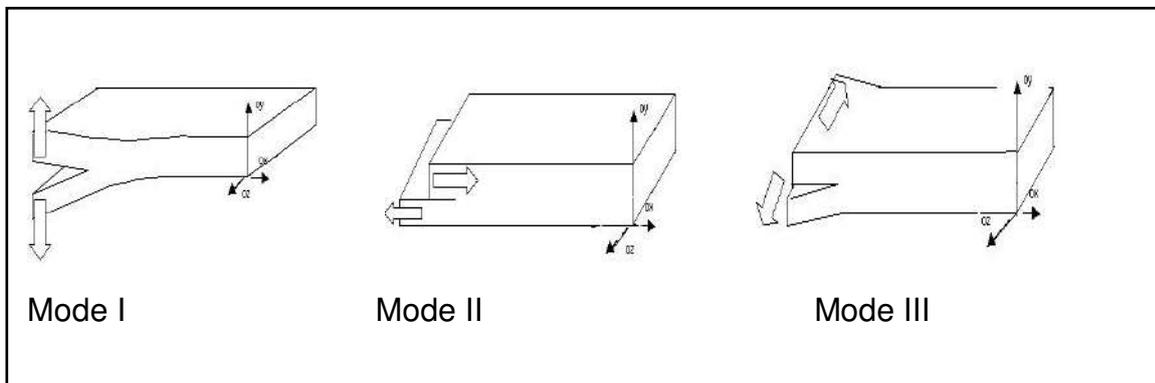


Figure. II.5 Modes d'endommagement. [14]

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

II.1.6 Mécanismes de rupture de matrices céramiques renforcées par des fibres céramiques

II.1.6.1 Fissuration matricielle

Les observations A et B donnent accès à des informations complémentaires sur la fissuration matricielle. En effet, la distribution des fissures peut être étudiée grâce à la radiographie de d'échantillon complet sous charge (obs. B). Si celle-ci donne accès à la position axiale (et à la largeur) des fissures, elle ne permet pas de caractériser leur morphologie et donc leur propagation. Au contraire, les images tomographiques (obs. A) contiennent un nombre de fissures limité mais permettent d'observer leur morphologie et leur propagation au sein du minicomposite. [15]

II.1.6.2 Décohésion fibre-matrice

Pour les résines plastiques présentant une importante déformation à rupture, l'interface fibres-matrice constitue le point plus faible à l'intérieur des plis. Ces ruptures d'adhérence, généralement induites par des contraintes de cisaillement locales, se propagent le long des fibres jusqu'à former des fissures transverses (traversant l'intégralité d'un pli, Fig. 1.6) dans le cas des stratifiés unidirectionnels ou longitudinales (Fig. 1.7) dans le plan des plis dans le cas de composites tissés. [16]

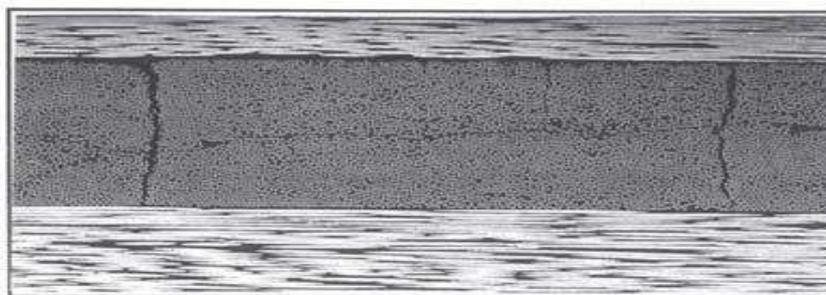


Figure.II.6 Fissuration transverse induite par décohésion fibres-matrice et délaminage en tête de fissure dans un stratifié en carbone-époxy. [16]

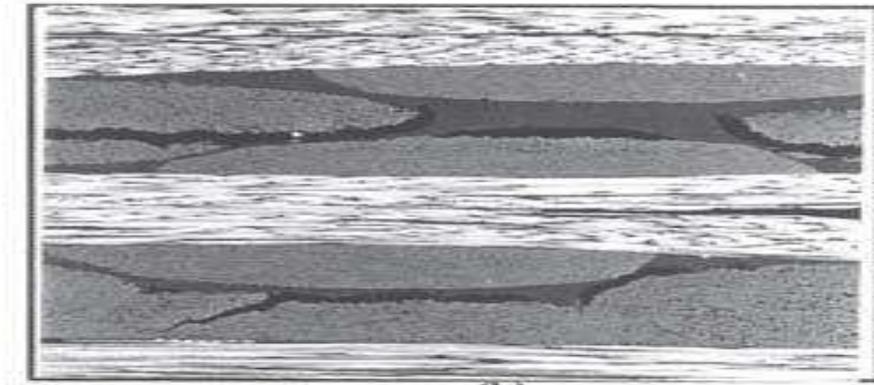


Figure.II.7 Fissurations longitudinales inter-torons induites par décohesion fibres matrice dans un stratifié en carbone-époxy. [16]

II.1.6.3 Rupture de la fibre

Dans certains cas, l'endommagement dans les composites est initié par une rupture de la fibre. Cela se produit en général lorsque l'orientation des fibres coïncide plus ou moins avec l'axe de sollicitation du matériau composite. La rupture aura lieu lorsque la contrainte de rupture de la fibre est atteinte. L'endommagement se produit et ne cesse de se progresser à mesure que la contrainte est appliquée ce qui provoque ainsi la rupture de la matrice et de la fibre jusqu'à la rupture totale du matériau.

II.1.7 La loi de Weibull

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

Sa fonction de fiabilité est :

$$R(t) = e^{-(t^\gamma/\eta)^\beta} \quad (\text{II.1})$$

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

Avec les paramètres de signification :

γ, β, η définissent la distribution de Weibull.

On utilise trois paramètres :

β : paramètre de forme ($\beta > 0$)

η : paramètre d'échelle ($\eta > 0$)

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

II.1.8 Statistique de Weibull

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

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

$$F(\sigma_i) = \int_0^{\sigma_i} f(\sigma) d\sigma \quad (II.2)$$

Si σ_r est la résistance théorique à rupture du matériau :

$$F(\sigma_r) = \int_0^{\sigma_r} f(\sigma) d\sigma = 1 \quad (II.3)$$

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

$$R = \prod_{i=1}^N (1 - F(\sigma_i)) \quad (II.4)$$

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

$$R = (1 - F(\sigma))^N \quad (II.5)$$

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

$$P_r(\sigma) = 1 - R = 1 - (1 - F(\sigma))^N \quad (II.6)$$

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

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

$$(1 - F(\sigma))^N = \exp(-NF(\sigma)) \quad (II.7)$$

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

$$\Phi(\sigma) = \frac{(\sigma - \sigma_u)^m}{\sigma_0} ; \sigma > \sigma_u \quad (II.8)$$

$$\Phi(\sigma) = 0 ; \sigma \leq \sigma_u \quad (II.9)$$

Avec

- σ_u : contrainte seuil en dessous de laquelle il n'y a pas de rupture possible.
- σ_0 : facteur d'échelle.
- m : paramètre rendant compte de la largeur de la distribution

II.1.9 Modèle de Cox

On considère le VER schématisé ci-dessous et constitué d'un fragment de fibre de rayon a enrobée dans un cylindre de matrice dont le rayon R est fixé par la fraction volumique de fibres vf, et les hypothèses faites sur l'arrangement des fibres. [18]

Ce V.E.R. est soumis à ses extrémités à une déformation en traction ϵl . 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 en outre supposée uniforme.[11] La fibre et la matrice sont supposées parfaitement élastiques et la liaison fibre/matrice parfaite

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

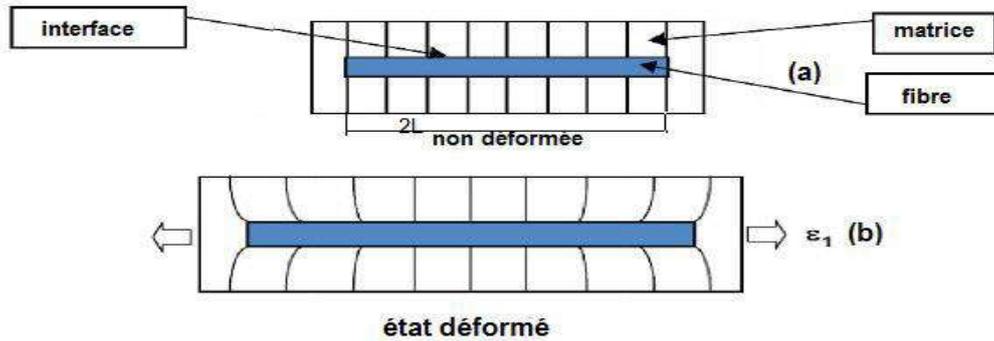


Figure.II.8 volume élémentaire représentatif. [18]

II.1.9.1 Equilibre des forces de cisaillement

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

$$2\pi r dx = 2\pi a \tau_i dx \quad (II.10)$$

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

$$\tau = \frac{a\tau_i}{r} \quad (II.11)$$

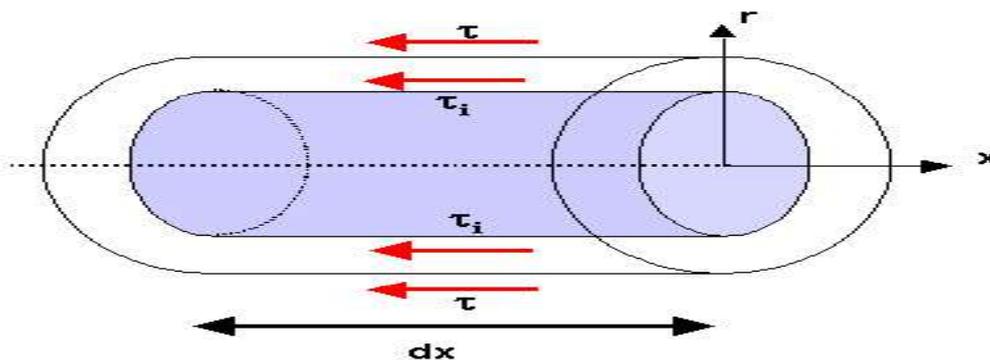


Figure. II.9 Equilibre élastique de la matrice en cisaillement

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

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

$$\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau}{G_m} = \frac{a\tau_i}{G_m r} \quad (II.12)$$

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):

$$\int_a^R dw = \frac{\tau_i a}{G_m} \int_a^R \frac{dr}{r} \quad (II.13)$$

Soit :

$$w_R - w_a = \frac{\tau_i a}{G_m} \ln\left(\frac{R}{a}\right) \quad (II.14)$$

$$\tau_i = \frac{G_m(w_R - w_a)}{a \ln(R/a)} \quad (II.15)$$

II.1.9.2 Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre

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

$$\pi a^2 d\sigma_f = -2\pi a \tau_i dx \quad (II.16)$$

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

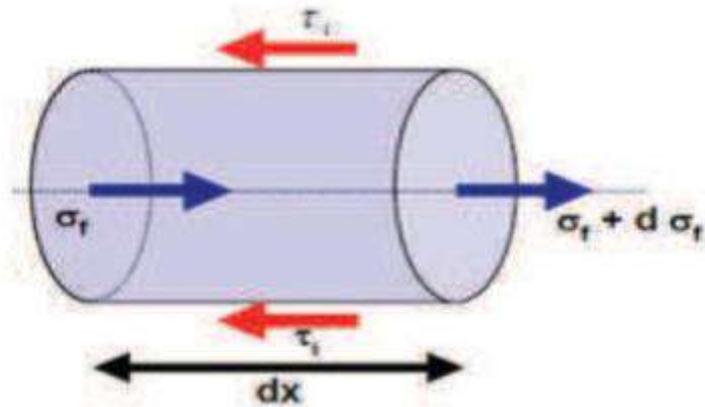


Figure. II. 10 Équilibre élastique dans une portion de fibre. [18]

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

Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{d\tau_i}{dx} = \frac{G_m}{a \ln(R/a)} \left(\frac{dw_r}{dx} - \frac{dw_a}{dx} \right) \quad (II.18)$$

D'après (20) on obtient :

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_i}{a} \quad (II.19)$$

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

$$\frac{dw_R}{dx} = \varepsilon_m = \varepsilon_l \quad (II.20)$$

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

$$\frac{dw_a}{dx} = \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (II.21)$$

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

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

$$\frac{d^2\sigma_f}{dx^2} = \frac{\beta^2}{a^2} (\sigma_f - E_f \varepsilon_l) \quad \text{avec} \quad \beta^2 = \frac{2G_m}{E_f \ln(R/a)} \quad (II.22)$$

En supposant la contrainte σ_f nulle aux extrémités de la fibre (en $x=-L$ et $x=L$), il est possible de résoudre (19). On obtient les solutions suivantes :

- Contrainte axiale dans la fibre :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_l \left\{ 1 - \frac{\cosh(\beta x/a)}{\cosh(\beta s)} \right\} \quad (II.23)$$

- Contrainte de cisaillement à l'interface :

$$\tau_i = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_l \sinh(\beta x/a) / \cosh(\beta s) \quad (II.24)$$

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

$$\tau_i = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_l \sinh(\beta x/a) / \cosh(\beta L/a) \quad (II.25)$$

Les profils de contrainte d'un V.E. R correspondant aux équations II.22 et II.24 sont représentés ci-dessous Figure. II.11 :

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

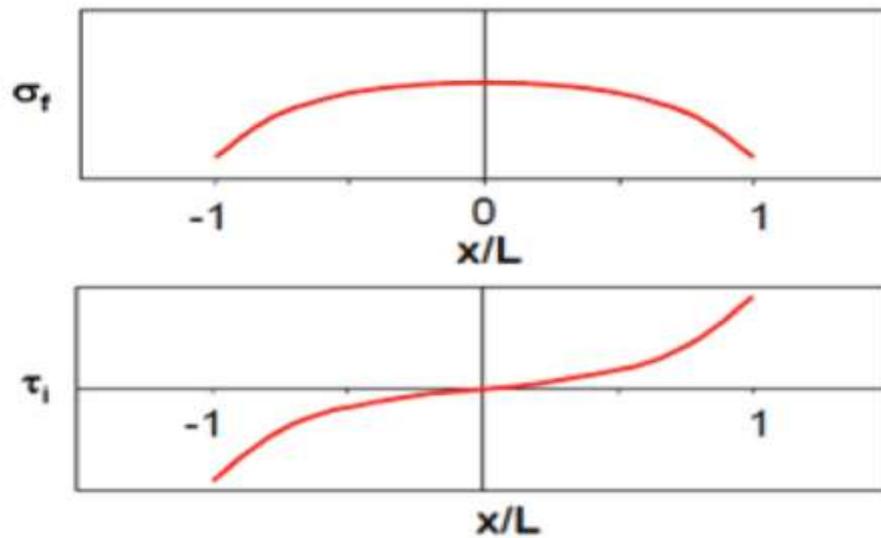


Figure. II.11 Modèle de Cox : profil des contraintes fibre/interface. [18]

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. [18]

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.

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

Partie II : Les algorithmes génétiques et leurs applications

II.2.1 Introduction

Les organismes que nous connaissons aujourd'hui sont rendus utiles pour la résolution des problèmes d'optimisation dans des divers domaines de la science et en particulier dans celui de l'ingénierie grâce à l'orientation de la recherche vers des techniques d'optimisation basés sur les analogies avec des processus naturels, biologiques ou humain. Parmi ces techniques, on trouve les algorithmes génétiques (AG) qui sont des procédures stochastiques (pseudo aléatoires) inspirées des lois de l'évolution des espèces et de la génétique naturelle. [19]

Les Algorithmes Génétiques sont des méthodes d'exploration de l'ensemble des solutions d'un problème utilisant les mêmes mécanismes que ceux intervenant dans la sélection naturelle. Ils sont utilisés principalement dans les domaines de l'optimisation et de l'apprentissage. Le parallélisme implicite et l'exploration globale de l'espace des solutions sont les deux principaux avantages des algorithmes génétiques [20].

II.2.2 Définition

Un algorithme génétique recherche le ou les extrêmes d'une fonction définie sur un espace de données. Pour l'utiliser, on doit disposer des cinq éléments suivants :

- 1) Un principe de codage de l'élément de population. Cette étape associe à chacun des points de l'espace d'état une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. [21]
- 2) Un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population d'individus non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut rendre plus ou moins rapide la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien du problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche.
- 3) Une fonction d'évaluation de l'individu à optimiser.

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

4) Des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace d'état.

5) Des paramètres de dimensionnement : Taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités d'application des opérateurs de croisement et de mutation. [21]

II.2.3 Les opérateurs des algorithmes génétiques

Les opérateurs jouent un rôle prépondérant dans la possible réussite d'un AG. Nous en dénombrons trois principaux : l'opérateur de sélection, de croisement et de mutation. Si le principe de chacun de ces opérateurs est facilement compréhensible, il est toutefois difficile d'expliquer l'importance isolée de chacun de ces opérateurs dans la réussite de l'AG. Cela tient pour partie au fait que chacun de ces opérateurs agit selon divers critères qui lui sont propres (valeur sélective des individus, probabilité d'activation de l'opérateur, etc.). [22]

II.2.3.1 La sélection

Pour déterminer quels individus sont plus enclins à obtenir les meilleurs résultats, une sélection est opérée.

Ce processus est analogue à un processus de sélection naturelle, les individus les plus adaptés gagnent la compétition de la reproduction tandis que les moins adaptés meurent avant la reproduction, ce qui améliore globalement l'adaptation. [23]

Étant donné que la sélection est le résultat d'une intervention humaine ou, du moins, l'application d'un critère défini par l'homme, les algorithmes génétiques devraient donc plutôt être rapprochés de la sélection artificielle telle que la pratiquent les agriculteurs que de la sélection naturelle, qui œuvre « en aveugle ». [23]

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

II.2.3.2 Le croisement

La naissance d'un nouvel individu, nécessite la prise aléatoire d'une partie des gènes de chacun des deux parents. Ce phénomène, issu de la nature est appelé croisement (cross over). Il s'agit d'un processus essentiel pour explorer l'espace des solutions possibles. Une fois la sélection terminée, les individus sont aléatoirement répartis en couples. Les chromosomes parents sont alors copiés et recombinaison afin de produire chacun deux descendants ayant des caractéristiques issues des deux parents. Dans le but de garder quelques individus parents dans la prochaine population, on associe à l'algorithme génétique une probabilité de croisement, qui permet de décider si les parents seront croisés entre eux ou s'ils seront tout simplement recopiés dans la population suivante. [24]

Il existe plusieurs types de croisement parmi lesquels on trouve : le croisement en 1 point, le croisement en deux points et le croisement en N points, ces types sont résumés dans la figure suivante :

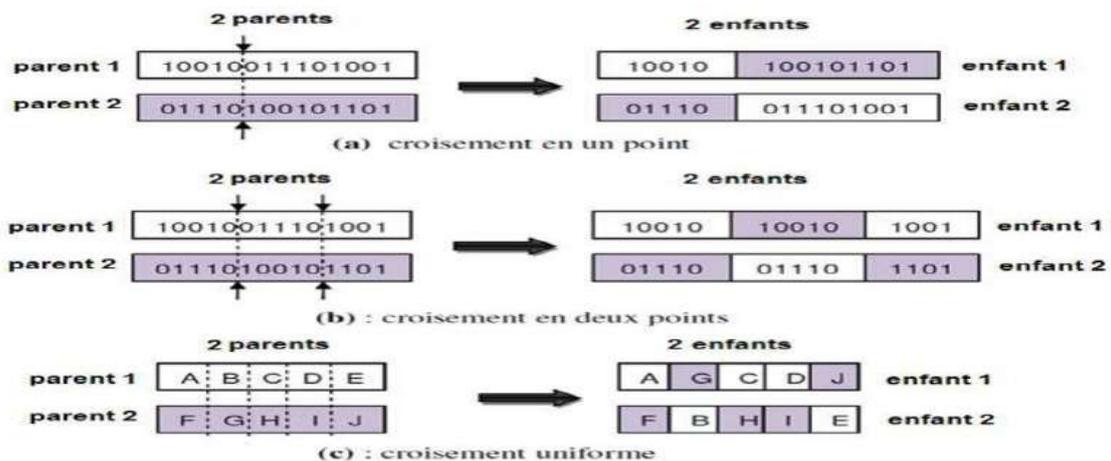


Figure.II.12 Exemple d'opération de croisement. [24]

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

II.2.3.3 La mutation

Teur de mutation Cet opérateur consiste à changer la valeur d'un gène avec une probabilité p_m très faible. Cette probabilité peut être prise $p_m = 1/L$, où L est la longueur de la chaîne de bits codant notre chromosome. L'opérateur de mutation modifie donc de manière complètement aléatoire les caractéristiques d'une solution, ce qui permet d'introduire et de maintenir la diversité au sein de notre population de solutions. [25]

Cet opérateur joue le rôle d'un "élément perturbateur". Il introduit du "bruit" au sein de la population. [26]

Le croisement n'est effectué que lorsqu'une probabilité aléatoire P est inférieure à P_m . Dans le cas contraire, le fils de la génération suivante sera lui-même le parent de la génération actuelle.

L'opération de mutation peut être appliquée sur un seul bit de l'individu, sur plusieurs points distincts ou sur tous les bits de l'individu (ce dernier cas est quasiment impossible surtout lorsque la longueur de l'individu est grande, si ça se produit ça veut dire que la probabilité attribuée à chaque bit est inférieure à P_m qui est lui-même de valeur faible). Cela dépend de la façon dont l'opération est programmée. [25]

Cet opérateur dispose de 4 grands avantages :

- Il garantit la diversité de la population, ce qui est primordial pour les Algorithmes Génétiques.
- Il permet d'éviter un phénomène connu sous le nom de « dérive génétique ». On parle de dérive génétique quand certains gènes favorisés par le hasard se répandent au détriment des autres et sont ainsi présents au même endroit sur tous les chromosomes. Le fait que l'opérateur de mutation puisse entraîner de manière aléatoire des changements au niveau de n'importe quel bit permet d'éviter l'installation de ce phénomène défavorable. [25]

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

- Il permet de limiter les risques d'une convergence prématurée causée par exemple par une méthode de sélection élitiste imposant à la population une pression sélective trop forte. En effet, dans le cas d'une convergence prématurée, on se retrouve avec une population dont tous les individus sont identiques, mais ne sont que des optima locaux. Tous les individus étant identiques, le croisement ne changera rien à la situation. En effet, l'échange d'informations par croisement entre des individus strictement identiques est bien sûr totalement sans conséquences ; on aura beau choisir la méthode de croisement qu'on veut, on se retrouvera toujours à échanger des portions de chromosomes identiques et la population n'évoluera pas, l'évolution se retrouvant bloquée on n'attendra jamais l'optimum global.
- La mutation permet d'atteindre la propriété d'ergodicité. Cette dernière est une propriété garantissant que chaque point de l'espace de recherche puisse être atteint. En effet, une mutation pouvant intervenir de manière aléatoire au niveau de n'importe quel locus, on a la certitude mathématique que n'importe quelle permutation de notre chaîne de bits peut apparaître au sein de la population [26]. La figure II.11 explique l'opération de mutation

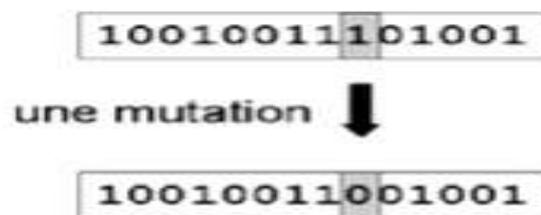


Figure.II.13 Exemple d'une mutation

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

II.2.4 Fondements des algorithmes génétiques

Les AGs sont fondés sur :

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

Les AGs se caractérisent selon quatre axes qui sont :

- Ils utilisent un codage des paramètres, et non les paramètres eux-mêmes.
- Ils travaillent sur une population de points, au lieu d'un point unique.
- Ils n'utilisent que les valeurs de la fonction étudiée ; pas sa dérivée ou une connaissance auxiliaire. [27]
- Ils utilisent des règles de transition probabilistes et non déterministes.

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

L'évolution des AGs se fait par deux mécanismes : la sélection naturelle et la reproduction ; la sélection naturelle fait que seuls les individus les mieux adaptés survivent et se reproduisent ; quant à la reproduction sexuée, elle assure un brassage de l'ensemble des solutions. Ce phénomène (sélection/reproduction) réitéré plusieurs fois sur une population produit après plusieurs générations des individus très bien adaptés au milieu dans lequel ils vivent. [27]

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

Références Bibliographique

- [1] T. Achour, «Etude des techniques de réparation des structures composites endommagées »Mémoire, 2011.
- [2] Y. Ledru,« Etude de la porosité dans les matériaux composites stratifiés aéronautiques », 14 décembre 2009.
- [3] F. Rekbi,« Contribution à l'analyse de l'endommagement des matériaux composites », Thèse,07 décembre, 2016.
- [4] M.A. Mbacké, « Caractérisation et modélisation du comportement mécanique des Composites tressés 3d: application à la conception de réservoirs gnv » ,Thèse de Doctorat, l'école des mines de paris france, 2013.
- [5]Y.D. Kergomard, « Etude expérimentale et numérique de la fissuration intralaminare etDe l'initiation du délaminage de bord libre dans les structures stratifiées pseudo-tissées », Thèse de doctorat, école des mines de paris france, 2007.
- [6] Duy Cuong Nguyenf , « Caractérisation de l'interface fibre/matrice. Application aux composites polypropylène/chanvre », Thèse,le 11 mai 2016.
- [7] M. Ragoubi, «Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/Matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne », Thèse de doctorat,Université henri poincaré nancy 1, 2010.
- [8] M. Nardin, «Interface fibre-matrice dans les matériaux composites », revue des compositesEt des matériaux avancés, vol. 16/1, pp. 49–62, 2006.
- [9] Ibrahim Mohamed Haisam ,« Elaboration de matériaux composites modèles Unifilamentaires a fibres longues sic et matrice Silice sol-gel et caractérisation micromécanique de L'interface », Thèses , 1997.
- [10] Kerans. R. J , hav .R.S, pagano. N. J,parthasarathy .T.A,« Therole of the fiber-matrix interface in ceramic composites », Am. Ceram. Soc. Bull, vol. 68,n° 2, p. 429-42,1989.

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

- [11] Kerans. R. J , hav .R.S, pagano. N. J,parthasarathy .T.A,« Therole of the fiber-matrix interface in ceramic composites », Am. Ceram. Soc. Bull, vol. 68,n° 2, p. 429-442,1989.
- [12] Ahlstrom .C, « Interface fibre de verre/matrice polyepoxy. Introduction d'une Interphase à propriétés contrôlées »,Thèse de doctorat de l'insa de lyon, p 296,1991.
- [13] Kaouche . N , « Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en materiaux composites »,Mémoire, 27/11/2016.
- [14] Berthelot.J,« Matériaux composites comportement mécanique et analyse desstructures », Paris, Masson, 615 p , 1992.
- [15] Coradi .A , « Approche multi échelle en vue du composite numérique »,Thèse de doctorat, Universite de Bordeaux ,2014.
- [16] E. Aussedat ,Yahia , « Comportement et endommagements du composite tissé carbone/ PMR15 soumis à des chargements mécaniques et thermiques»»,Thèse de doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 1997.
- [17] Weibull. W, «A statistical distribution function of wide applicability », Journal of Applied Mechanics (1951) 18, 293-296.
- [18] Cox h.l, «The elasticity and strength of paper and other fibrous materials », british journal of applied physics, 3, n°1 (1952) 72-79.
- [19] D. Mokeddem ,«contrôle flou des processus biotechnologiques à base d'algorithmes génétiques »,Thèse ,11 juillet 2010.
- [20] Avila.S. L , « Optimisation multiobjectif et analyse de sensibilité appliquées à la conception de dispositifs », Thèse doctorat ecole centrale de lyon, 2006.
- [21] S.Tadjedit , « Optimisation par un algorithme génétique de l'endommagement de l'interface fibre/ matrice d'un nano composite graphite – époxy »,Mémoire, 01/07/2014.
- [22] Alemdar. N, özyildirim . S , « a genetic game of trade, growth and externalities » , journal of economic dynamics and control 22(6), 811–8327 , septembre 2001.
- [23] Michalewicz. Z« Genetic algorithms + data structures = evolution programs », Springer-verlag, 1992.

Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice

[24] Allen.F, karjalainen .R , «using genetic algorithms to find technical trading rules », journal of financial economics 51(2), 245–271 (1999).

[25] Bendekkiche.Nidal, Eddine Kemari.Youcef ,« contribution à l'optimisation des systèmes de mise à la terre par algorithme génétique & essaim particulaire », juin 2013.

[26] Souquet .A, Radet .f-g, « Algorithmes génétiques », te de fin d'année, université de nice sophia antipolis,france, juin 2004.

[27] Abdulghafour.M, Fellah .A, « A hybrid approach of genetic algorithms and fuzzy logic applied to feature extraction from multisensory images », international Conference on systems, man, and cybernetics, vol. 1, p 199-204,1997.

Chapitre 3

III.1. Introduction.

L'utilisation des matériaux composites dans un milieu humide va produire, selon le milieu, des endommagements au niveau microscopique qui sont l'origine à l'apparition des ruptures au niveau macroscopique. Dans ce contexte, nous allons étudier l'effet d'humidité sur l'endommagement de l'interface fibre matrice d'un biocomposite Bois-polypropylène, en utilisant des modèles probabilistes et d'une modélisation génétique, et ceci en absence des modèles analytiques qui décrivent l'endommagement de l'interface sous une contrainte de cisaillement.

III.2. La cinétique de diffusion de l'eau dans un matériau polymère

Les molécules d'eau migrent par capillarité le long des espaces libres du matériau. Ces cavités sont présentes dans le composite soit entre les macromolécules entremêlées du polymère soit dans les zones interfaciales charge/résine [1-3]. Lors du moulage de nos échantillons, la résine enrobe totalement la silice de part sa faible viscosité. Cependant, la réticulation et la différence de coefficient de dilatation des deux composants peuvent entraîner du retrait et créer ainsi des décollements entre la charge et la résine. La diffusion de l'eau dépend de la quantité de cavités ainsi que de leur taille. Au cours de la diffusion, les molécules d'eau se déplacent d'un site à l'autre avec une énergie d'activation. L'eau est alors considérée comme de l'eau liquide ou eau libre (Figure 1). [1-3].

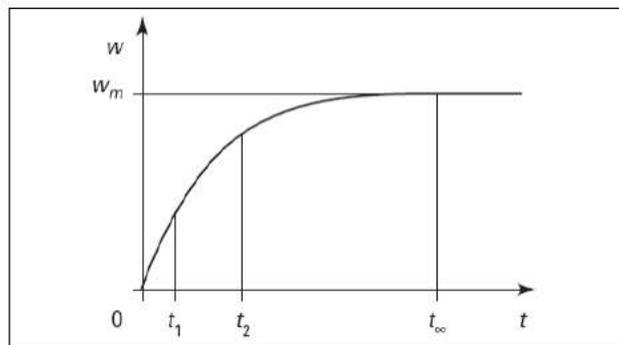


Figure.III.1 Cinétique de diffusion de l'eau dans un matériau polymère [1-3]

Chapitre III : Résultats et discussions

Pour simplifier les analyses de diffusion, les hypothèses suivantes ont été établies :

- Le coefficient de diffusion D est indépendant de la concentration en eau C
- Le profil de diffusion est considéré plan et selon la direction x. [2,3]

L'équation suivante est alors déterminée :

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (1)$$

III.3. Modélisation et simulation numérique

III.3.1. Les modèles probabilistes

Lorsque la contrainte est uniforme, l'endommagement de la matrice, est donné par la formule (1) de Weibull [4] :

$$D_m = 1 - \exp \left\{ -V_m \left[\frac{\sigma + \sigma_m^T}{\sigma_{0m}} \right]^{m_m} \right\} \quad (2)$$

Avec :

- (σ) : la contrainte appliquée ;
- (σ_m^T) : la contrainte thermique ;
- (V_m) : la fraction volumique de la matrice ;
- $(m_m \text{ et } \sigma_{0m})$: les paramètres de Weibull ;

Après la création d'une fissure, un fragment de longueur L va donner naissance à deux fragments de taille $L_1 = L \cdot X$ et $L_2 = L \cdot (1-X)$ (X étant un nombre aléatoire compris entre 0 et 1). Au niveau de chaque fissure atteignant une fibre, une décohésion fibre-matrice de longueur 2l va se produire avec une diminution de création d'une nouvelle fissure puisque la matrice est en partie déchargée. A chaque incrément de contrainte, la rupture est calculée. Tous les blocs dont la rupture atteint 0.5 donnent lieu à de nouvelles fissures. [4]

Une fibre rompue est déchargée sur toute sa longueur [4]. 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.

Chapitre III : Résultats et discussions

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

Avec :

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

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

Pour l'interface leur endommagement se basant sur le modèle de Cox [5] qu'est défini par la relation suivante :

$$\tau = \frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta \tanh(\beta l/2) \quad (4) \quad \beta^2 = \frac{2G_m}{E_f r_f^2 \ln(\frac{R}{r_f})}$$

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;

III.3.3. Simulation numérique par un algorithme génétique.

III.3.3.1. Développement.

L'objectif de cette étude est de montrer l'effet des taux d'humidité (25%, 45% et 65%) sur la résistance de l'interface fibre-matrice des matériaux bio-composite Bois-polypropylène et Carbone-polypropylène. Notre simulation génétique consiste à utiliser les valeurs de chacune des propriétés mécaniques pour calculer à chaque fois le niveau de l'endommagement de l'interface en utilisant les équations (1,2 et 3) et l'équation de Cox (4). L'endommagement à l'interface est déterminé par l'intersection des deux

Chapitre III : Résultats et discussions

endommagements de la fibre et de la matrice qui sont déterminés par l'équation 2 et 3 de Weibull. L'évaluation de chaque génération est réalisée par une fonction objective basée sur le modèle Cox, 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 deux matériaux utilisés (carbone/polypropylène et Bois-polypropylène). Les calculs numériques sont effectués à l'aide du logiciel Matlab R2012a.

III.3.3.2. Organigramme

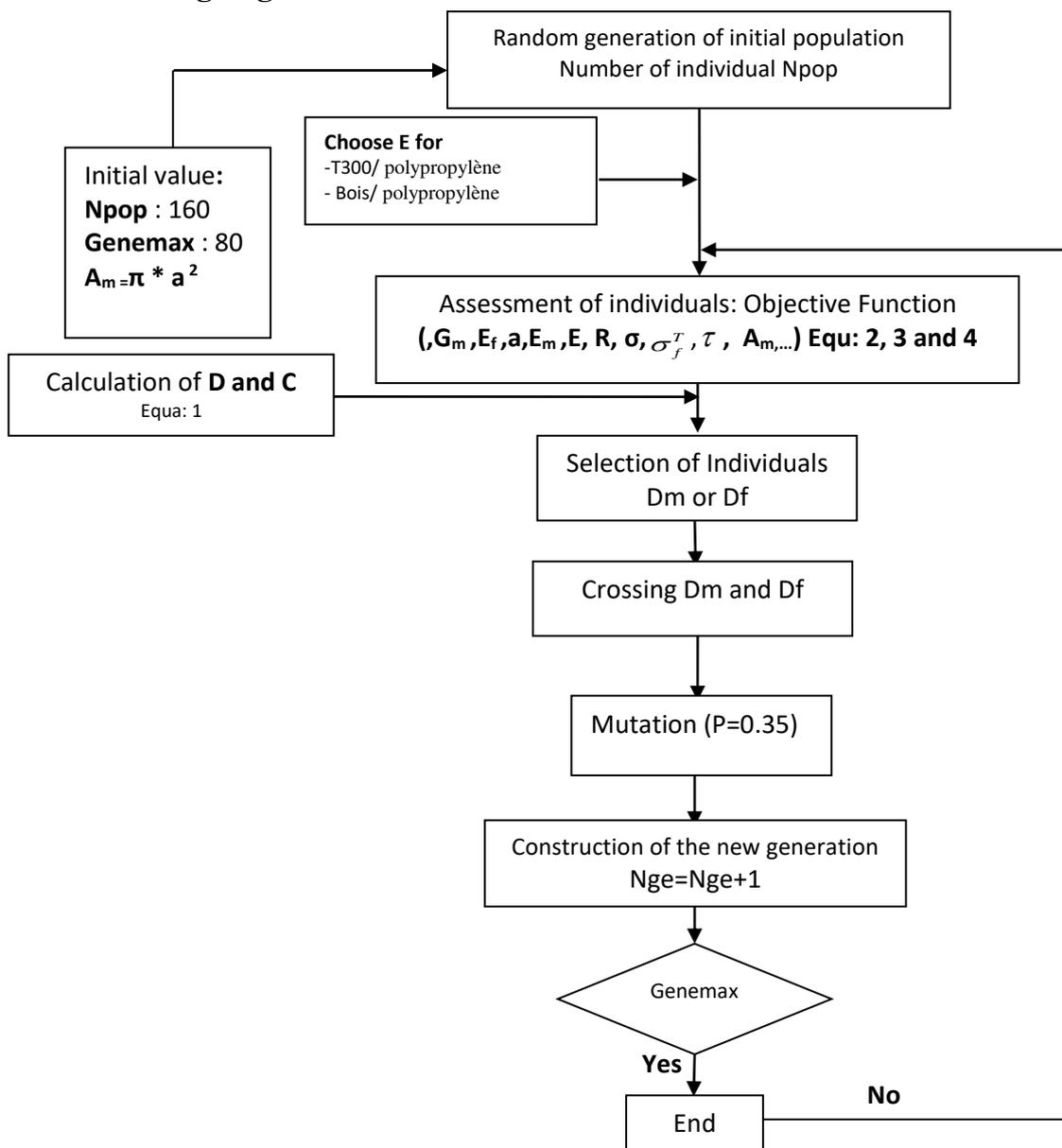


Figure.III.2 L'organigramme de l'algorithme génétique

Chapitre III : Résultats et discussions

III.4. Résultats de simulation

Nos calculs ont été réalisés sur deux types de matériaux biocomposites Carbone/polypropylène et Bois/polypropylène. Nous avons examiné par une modélisation génétique la résistance de notre matériau pour des trois pourcentages d'humidité 25%, 45% et 65% sous une contrainte de cisaillement de 110 N/m², ce qui nous a permis de calculer l'endommagement de l'interface fibre matrice. Les figures 3, 4, 5 et 6, 7, 8 montrent le niveau de l'endommagement à l'interface de Carbone/polypropylène et Bois/polypropylène.

III.4.1. Carbone/ polypropylène

Les figures 3, 4 et 5 montrent que l'endommagement "D" de l'interface commence au niveau de 0.28 pour un taux d'humidité de 25% puis augmente jusqu'à une valeur maximale de 0.55, pour un taux d'humidité de 65%, on remarque la présence d'une symétrie de l'endommagement à l'interface, dense aux extrémités et faible au milieu. On peut dire que la contrainte de cisaillement entraîne une forte dégradation de l'interface aux extrémités par rapport au milieu.

III.4.2. Bois/ polypropylène

Les figures 6, 7 et 8 montrent que l'endommagement "D" de l'interface commence au niveau de 0.12 pour un taux d'humidité de 25% puis augmente jusqu'à une valeur maximale de 0.29, pour un taux d'humidité de 65%, on remarque la présence d'une symétrie de l'endommagement à l'interface, dense aux extrémités et faible au milieu. On peut dire que la contrainte de cisaillement entraîne une forte dégradation de l'interface aux extrémités par rapport au milieu, et que les valeurs d'endommagement obtenues sont très faibles en comparant avec le Carbone/ polypropylène.

Chapitre III : Résultats et discussions

Carbone/ polypropylène

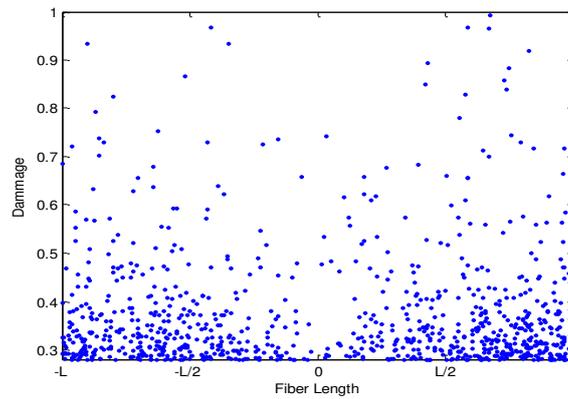


Figure.III.3 L'influence d'humidité (25%) sur l'endommagement de l'interface

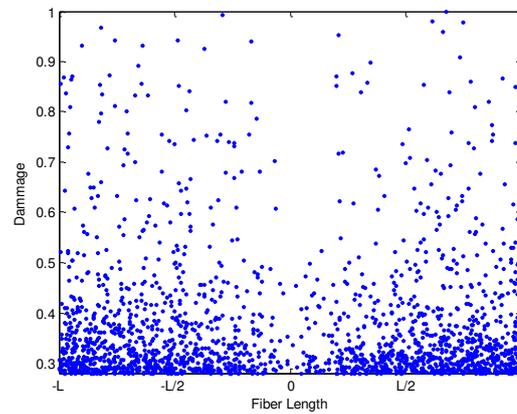


Figure.III.4 L'influence d'humidité (45%) sur l'endommagement de l'interface

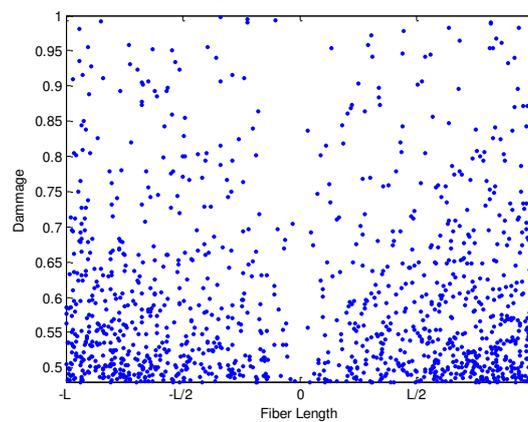


Figure.III.5 L'influence d'humidité (65%) sur l'endommagement de l'interface

Chapitre III : Résultats et discussions

Bois/ polypropylène

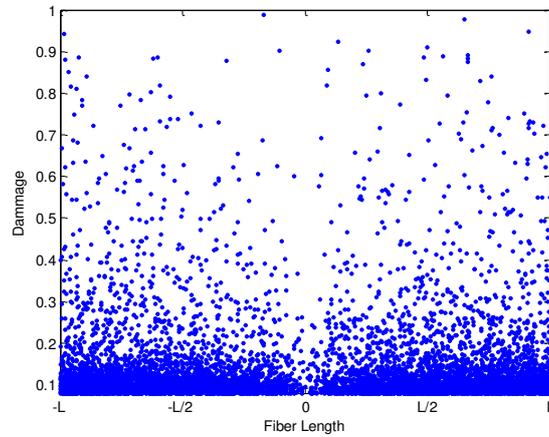


Figure.III. 6 L'influence d'humidité (25%) sur l'endommagement de l'interface

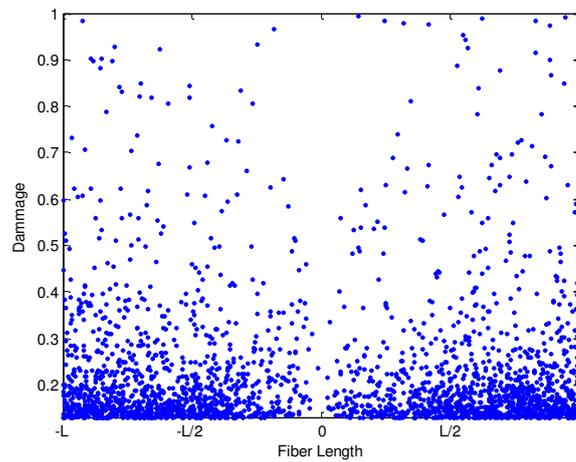


Figure.III.7 L'influence d'humidité (45%) sur l'endommagement de l'interface

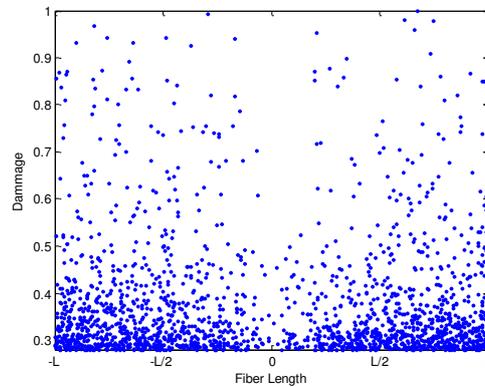


Figure.III.8 L'influence d'humidité (65%) sur l'endommagement de l'interface

Chapitre III : Résultats et discussions

III.5. Conclusion

Les résultats trouvés par un calcul génétique montrent que le niveau de l'endommagement est lié à la résistance de matériaux à l'environnement humide pour les deux biocomposites étudiés Carbone/ polypropylène et Bois/ polypropylène et montrent, aussi, une bonne concordance entre la simulation numérique et le comportement réel des deux matériaux. La simulation numérique fait ressortir que Bois/ polypropylène a une résistance à l'humidité supérieure à celle de Carbone/ polypropylène. Les résultats obtenus dans notre étude coïncident exactement avec les résultats expérimentaux d'Antoine et al. [6] qui ont montré que les fibres naturelles sont des bons renforts pour un matériau composite et ils présentent une grande résistance à l'environnement humide et en plus se sont biodégradables.

Chapitre III : Résultats et discussions

Références

- [1] P. BONNIAU et A.R. BUNSELL, A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites J.Comp.mater, vol.15, 1981, p.2728293
- [2] T. PHAM HONG, Caractérisation et modélisation du comportement diélectrique d'un matériau composite soumis à un vieillissement hydrothermique Thèse de doctorat, Université Joseph Fourier – Grenoble, 2005
- [3] H.L.TEMIMI, A. MOKADDEM, N.BELKAID, A. BOUTAOUS and R.BOUAMRANE. Study of the effect of water intake by the matrix on the optimization of the fiber matrix interface damage for a composite material by genetic algorithms ». Strength of materials, Vol. 45, No.6, 2013, pp : 739-747,
- [4] Weibull.W. Theory of the strength of materials”, Royal Swedish Academy of Eng. Sci. Proc., , (1939) 151, 1-45.
- [5] Cox H.L. “The elasticity and strength of paper and other fibrous materials”. British journal of applied physics, 12, 72–79, 1952.
- [6] Antoine, L, D., Davies, P., Baley,C.C.: Study of interfacial bonding of Flax fibre/Poly-L-lactide, JNC 16, Toulouse, France, AMAC, p10, 2009

Conclusion générale

Conclusion générale

En conclusion générale, nous rappelons que les matériaux étudiés sont Bois/ polypropylène et Carbone/ polypropylène, le calcul a été basé sur un algorithme génétique, les résultats montrent que le niveau de l'endommagement est lié à la concentration des contraintes, pour les deux matériaux étudiés et au milieu où se sont exposés ses matériaux.

La simulation numérique montre, aussi, une bonne concordance avec le comportement réel des matériaux étudiés.

Les résultats de simulation génétique font ressortir que Bois/ polypropylène est plus résistant dans le milieu humide comparant avec le Carbone/ polypropylène. L'étude expérimentale et théorique sur les matériaux bio-composites ont montré que ces matériaux disposent une résistance exceptionnelle aux contraintes mécaniques et thermiques même dans le milieu humide.

Les résultats obtenus dans notre étude sont en bon accord avec les données expérimentales d'Antoine et al. Qui ont montré que les fibres naturelles sont des bons renforts pour les matériaux composites et ils présentent une grande résistance à l'environnement humide et en plus se sont biodégradables.

Liste Des Figure

Figure.I.1 Matériaux composites.....	05
Figure.I.2 Différentes familles de matrices.....	06
Figure.I.4 Fibre de verre.....	08
Figure.I.5 Fibres de carbone.....	09
Figure.I.6 Fibres d'aramide.....	10
Figure.I.7 Exemples de charges utilisées dans les CMO : (a) microbilles de verre, (b) noir de carbone, (c) silice.....	12
Figure.I.8 Schéma représentatif du polypropylène isotactique.....	14
Figure.I.9 Schéma représentatif du polypropylène syndiotactique.....	15
Figure.I.10 Schéma représentatif du polypropylène atactique.....	15
Figure.I.11 Classification des fibres naturelles et quelques exemples.....	17
Figure.I.12 Structure du bois avec des observations multi-échelles.....	20
Figure.II.1 Les différents endommagements rencontrés dans les composites stratifiés.....	29
Figure.II.2 Facies de rupture des composites 20% fibres non traitées/polypropylène.....	30
Figure.II.3 Paramètres qui conditionnent les performances d'un composite.....	31
Figure.II.4 Concepts d'interphase et d'interface.....	32
Figure. II.5 Modes d'endommagement.....	34
Figure.II.6 Fissuration transverse induite par décohésion fibres-matrice et délaminage en tête de fissure dans un stratifié en carbone-époxy.....	35
Figure.II.7 Fissurations longitudinales inter-torons induites par décohésion fibres matrice dans un stratifié en carbone-époxy.....	36

Figure.II.8 volume élémentaire représentatif.....	39
Figure. II.9 Equilibre élastique de la matrice en cisaillement.....	39
Figure. II. 10 Équilibre élastique dans une portion de fibre.....	41
Figure. II.11 Modèle de Cox : profil des contraintes fibre/interface.....	43
Figure.II.12 Exemple d'opération de croisement.....	46
Figure.II.13 Exemple d'une mutation.....	48
Figure.III.1 Cinétique de diffusion de l'eau dans un matériau polymère.....	53
Figure.III.2 L'organigramme de l'algorithme génétique.....	56
Figure.III.3 L'influence d'humidité (25%) sur l'endommagement de l'interface.....	58
Figure.III.4 L'influence d'humidité (45%) sur l'endommagement de l'interface.....	58
Figure.III.5 L'influence d'humidité (65%) sur l'endommagement de l'interface.....	58
Figure.III.6 L'influence d'humidité (25%) sur l'endommagement de l'interface.....	59
Figure.III.7 : L'influence d'humidité (45%) sur l'endommagement de l'interface.....	59
Figure.III.8 : L'influence d'humidité (65%) sur l'endommagement de l'interface.....	59

Liste Des Tableaux

Tableau.I.1 Caractéristiques des résines thermodurcissables et des Résines thermoplastiques.....	06
Tableau.I.2 Caractéristiques mécaniques des fibres utilisées dans le renforcement.....	11
Tableau.I.3 Quelques caractéristiques des fibres naturelles.....	18
Tableau.I.4 Les propriétés mécaniques et physiques des trois matériaux (fibres bois et carbone et la matrice polypropylène).....	23
Tableau.II.1 Types d'endommagement dans les composites stratifiés.....	29

Résumé

Face à une pression réglementaire au niveau mondial de plus en plus forte pour des objectifs environnementaux, l'utilisation des matériaux Bio-composites dans l'industrie automobiles deviennent une nécessité absolue. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet d'humidité sur l'endommagement de l'interface d'un bio-composite bois- polypropylène. Notre modélisation génétique a été basée sur des modèles probabilistes pour localiser et calculer le niveau d'endommagement de l'interface en fonction des taux d'humidité. Les résultats de notre simulation génétique font ressortir que le Bois/ polypropylène est résistant dans le milieu humide comparant avec le carbone/ polypropylène. Les résultats que nous avons obtenus sont en bon accord avec les données expérimentales d'Antoine et al. qui ont montré que les fibres naturelles sont des bons renforts pour un matériau composite et ils présentent une grande résistance à l'environnement humide et en plus se sont biodégradable.

Abstract

Faced with increasing global regulatory pressure for environmental objectives, the use of Bio-composites materials in the automotive industry is becoming an absolute necessity. The objective of this work is to study the effect of humidity on the interface damage of a wood-polypropylene bio-composite. Our genetic modeling was based on probabilistic models to locate and calculate the level of damage to the interface as a function of moisture levels. The results of our genetic simulation show that Wood / Polypropylene is resistant in the humid environment compared to carbon / polypropylene. The results we obtained are in good agreement with the experimental data of Antoine et al. which have shown that natural fibers are good reinforcements for a composite material and they have a high resistance to the moist environment and in addition are biodegradable.

Table de matières

Introduction générale.....	01
Références.....	02
Chapitre I	
(Etude bibliographique sur les matériaux Bio-composites)	
I.1 Introduction.....	03
I.2.1. Définitions.....	03
I.3 Caractéristiques des bio-composites.....	04
I.4 Définition d'un matériau composite.....	05
I.4 Les Matériau hybrides.....	06
I.4.1 <i>Constituants des matériaux composites</i>	06
I.4.2 Matrices	06
I.4.2.2 Les résines thermoplastiques	
I.4.2.3 Renfort	
I.4.2.1 Les résines thermodurcissables	07
I.4.2.2 Les résines thermoplastiques.....	09
I.4.2.3 Renfort.....	12
I.7.1 Fibre de verre.....	13
I.7.2 Fibre de carbone.....	14
I.7.3 Fibre d'aramide.....	14

I.8 Les charges.....	16
I.9 Fibres naturelles.....	16
I.9.1 Définition.....	16
I.9.2 Les caractéristiques des fibres naturelles.....	17
I.9.3 Définition de la fibre végétale.....	18
I.9.3.1 La fibre de chanvre.....	18
I.9.3.2 La fibre de sisal.....	19
I.9.4 l'amidon.....	20
I.9.5 Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux chanvre, sisal et la matrice amidon.....	21
I.10 Conclusion.....	21
Références.....	22

Chapitre II

(Modélisation et Simulation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice)

Partie I : Modélisation de l'endommagement

II.1.1 Introduction.....	25
II.1.2 Généralités sur l'endommagement des composites.....	25
- A l'échelle microscopique.....	25
- A l'échelle mésoscopique.....	25
- A l'échelle macroscopique.....	26
II.1.3 L'interface fibre/matrice.....	26
II.1.4 Comportement d'un composite unidirectionnel	27

A- Cas d'une interface très forte.....	27
B- Cas d'une interface très faible.....	28
C- Cas d'une interface relativement faible.....	28
II.1.5 Mécanismes de rupture.....	28
II.1.6 Statistique de Weibull.....	29
II.1.7 Le modèle de Cox	32
II.1.7.1 Le modèle micromécanique de Cox	32
II.1.7.2 Modèle de Cox : Transfert de charge élastique.....	32
II.1.8 Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface.....	33
II.1.8.1 Equilibre des forces de cisaillement.....	33
II.1.8.2 Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre.....	34
Partie II : Les Algorithmes génétiques	
II.2.1 Introduction.....	38
II.2.2 Les algorithmes génétiques.....	38
II 2.3 Les opérateurs des algorithmes génétiques	39
II 2.3.1 La Sélection.....	39
II 2.3.1 Reproduction (croisement).....	39
II 2.3.1 Mutation.....	40
II 2.4 Le codage	40
II 2.4.1 Codage binaire.....	40
II 2.4.2 Codage réel.....	41
II 2.4.3 Codage à l'aide de suite alphabétique.....	41
II.2.4.4 Codage sous forme d'arbre.....	41
II.2.5 Fondements des algorithmes génétiques.....	42
II.2.6 Conclusion.....	43
Références.....	44

Chapitre III

(Résultats et Discussions)

III.1. Introduction.....	47
2. La cinétique de diffusion de l'eau dans un matériau polymère	
III.3. Modélisation et simulation numérique.....	47
III.3.1. Les modèles probabilistes.....	47
III.3.2 Les modèles cisaillement de l'interface de Cox.....	49
III.3.3. Simulation numérique par un algorithme génétique.....	49
III.3.3.1. Développement.....	49
III. 3.3.2. Organigramme.....	51
III.4. Résultats de simulation.	51
III.4.1. Résultats de simulation.	51
4.2. Bois/ polypropylène	
III.5. Conclusion.....	55
Références.....	56
Conclusion générale.....	58

