

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE 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 : Spectroscopie moléculaire

Par

**Mlle. HASSANI Dhiba**

Sur le thème

**Etude de l'effet des nanoparticules sur  
l'endommagement de l'interface d'un Bio-nanocomposite.**

Soutenu le 01/06/2017 devant le jury composé de

M. ELKEURTI	Mohammed	Professeur	(Université de Saïda)	Président
M. MOKADDEM	Allel	Maître de conférences A	(Centre universitaire- N.BBayadh)	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. BOUTALEB	Miloud	Maître de conférences B	(Université de Saïda)	Examineur

**Année Universitaire 2016 - 2017**



## *Remerciement:*

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

*Nous remercions aussi notre encadreur : **Mr. Mokaddem Allel***

*Pour son aide et ses conseils.*

*Et a exprimé vivement notre sincère reconnaissance à*

*Aussi à tous ceux qui nous n'avons pas cités*

*Et qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

# Dédicaces

*Je dédie ce modeste travail à :*

*À celui qui m'a indiqué la bonne voie et qui a toujours été là pour moi, dans ma vie et mes études...*

***Mon père***

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

***Ma mère***

*Mon encadreur : Mr : Mokaddem Allel qui a su, par sa persévérance et son engagement guider mes pas tout au long de la réalisation de ce travail, seul le bon Dieu saura le récompenser. Je n'oublierai également jamais cette maîtresse de la maternelle qui a pu installer et graver dans ma petite tête d'écolière l'amour de savoir et de la connaissance.*

*Mes frères, mes sœurs et mes oncles, mes tantes et leurs enfants ainsi que mes amis sont vivement remerciés pour leur soutien et pour avoir supporté mes caprices.*

*Si j'ai l'aval de dédicace cette modeste contribution je la dédierai en premier lieu à l'Université de Saïda pour tout ce qu'elle a fait de moi et pour moi.*

*Je la dédie aussi à tous les membres de notre*

*Promotion pour l'amitié et la bonne*

## SOMMAIRE

Remerciement	
Dédicace	
Liste Des Figure	
Liste Des Tableaux	
Introduction générale.....	01
<b>Chapitre I:Etude bibliographique sur les matériaux Bio-nanocomposit</b>	
<b>I.1. Introduction :.....</b>	<b>02</b>
I.2.Définition d'un matériau composite :.....	02
I.3.Caractéristiques des matériaux composites :.....	03
<b>I.4. De composite à nanocomposite :.....</b>	<b>04</b>
I.4.1 Définition d'un nanocomposite :.....	04
I.4.2 Définition morphologique de nanocomposites :.....	04
I.4.3 Classification des nanocomposites :.....	05
<b>I. 3.1. Classification suivant la nature de la matrice :.....</b>	<b>06</b>
I. 3.1. a. Composites à matrice organique :.....	06
I. 3.1.b. Composites à matrice métallique :.....	06
I. 3.1. c. Composites à matrice céramique :.....	06
I.5 Les fibres de chanvre :.....	06
.I.6Propriétés des fibres de chanvre :.....	07
I.7. Définition d'un matériau Bio-composite :.....	08
I.8.Description de la classe de matériaux étudiés :.....	08

<b>I.9. Définition Des matrices :</b>	<b>09</b>
I.9.1 . Les thermoplastiques :	09
I.9.2 Les thermodurcissables :	10
I.10. La résine époxyde :	10
<b>I-11. Classification des Fibres Végétales :</b>	<b>12</b>
A. Les Fibres de Feuilles :	12
B. Les Fibres de Tiges :	12
C. Les Fibres de Bois :	12
D. Les Fibres de Surface :	13
<b>I.12. Conclusion :</b>	<b>13</b>

## **Chapitre II : Modélisation et Simulation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice**

<b>Partie : 01</b>	<b>14</b>
<b>Introduction :</b>	<b>14</b>
II. 1. Interface fibre/matrice :	14
Définitions :	14
II.2.Les mécanismes d'endommagement :	15
<b>II.3.Généralités sur l'endommagement des composites :</b>	<b>16</b>
- A l'échelle microscopique :	17
A l'échelle mésoscopique :	17
- A l'échelle macroscopique :	17
II.4. Comportement de l'interface fibre-matrice dans les composites. :	18

4.1. Généralité :	18
a- interphases :	19
b- interface :	19
II.4.2. Comportement d'un composite unidirectionnel :	20
II.4.2.1.- Cas d'une interface très forte (interface liée):	20
II.4.2.2.Cas d'une interface très faible (non liée) :	21
II.4.2.3.Cas d'une interface relativement fai :	21
II.5. Apport de la micromécanique :	21
II.6. Le comportement mécanique des composites :	22
II.7. Le modèle micromécanique de Cox :	23
II.7.1. Modèle de Cox : Transfert de charge élastique :	23
II.8.Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface :	24
II.9. Equilibre des forces de cisaillement :	24
II.10. Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre :	25
II.11 Statistique de Weibull :	28
Partie : 02.....	32
Introduction .....	32
II.2.A quoi sert l'algorithme génétique ?:	32
II.3.Principe :	32
II.4.Généralités sur les algorithmes génétiques :	34
II.5.Conception d'un algorithme génétique :	33

II.6.Fondements des algorithmes génétiques :.....	34
II.7. Comment fonctionne l'algorithme génétique :.....	3
II.8.Codage :.....	35
II.8.1. Codage binaire :.....	36
II.8..2 Codage réel :.....	36
II.8.3. Codage à l'aide de suite alphabétique :.....	36
II.8. 4 Codage sous forme d'arbre :.....	37
II.9.Conclusion :.....	37
<b>Chapitre III: Résultats et Discussion</b>	
<b>1.Introduction :.....</b>	<b>37</b>
2. Développement :.....	37
2.1 Renforcement :.....	37
2.2. Les modèles analytiques :.....	38
<b>3. Simulation numérique par un algorithme génétique :.....</b>	<b>39</b>
3.1. Développement :.....	39
3.2. Organigramme :.....	40
4. Résultats de simulation :.....	40
4.1. Carbone /époxyde :.....	40
4.2. Chanvre /graphite-époxyde :.....	41
<b>5.Conclusion :.....</b>	<b>42</b>
<b>Conclusion Générale :.....</b>	<b>44</b>

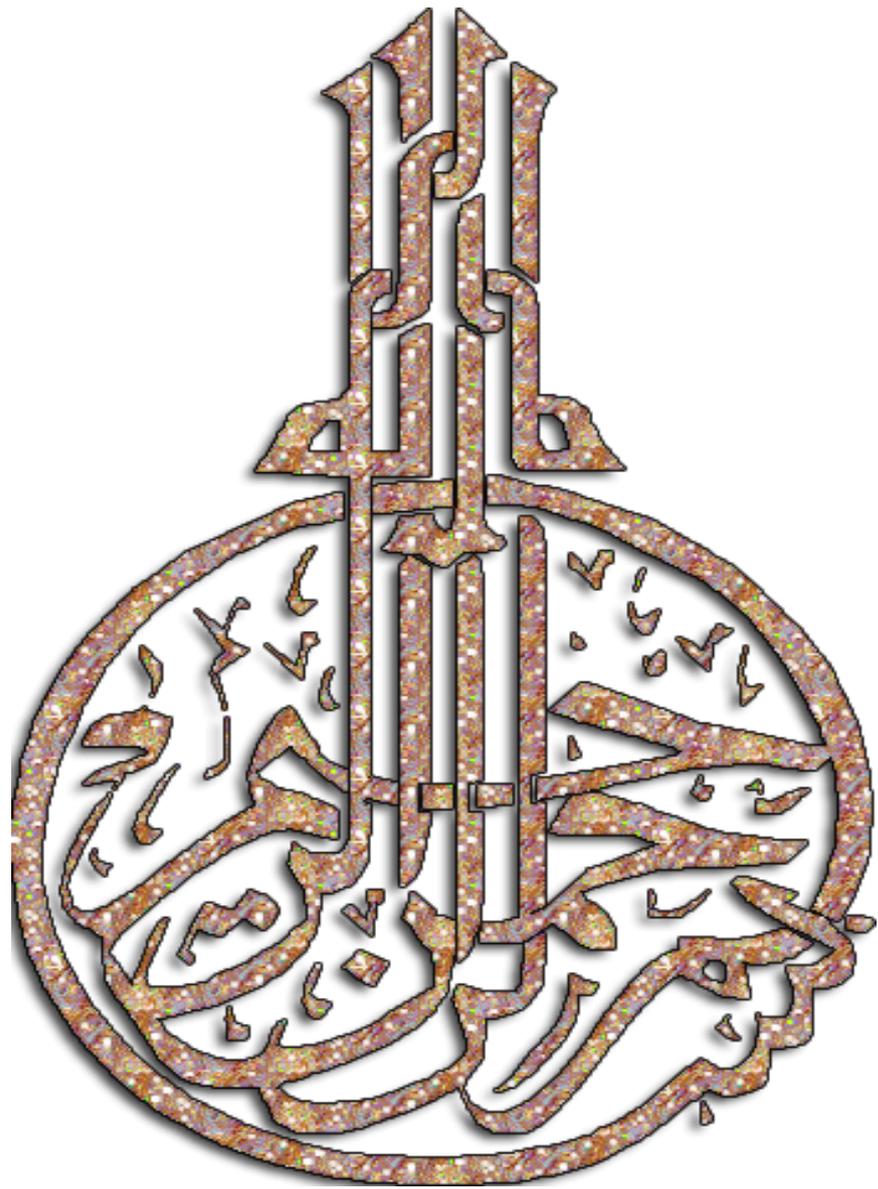
# Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Schéma illustratif d'un matériau composite.....	<b>03</b>
<b>Figure I.2</b> : Exemple d'un nanocomposite :.....	<b>04</b>
<b>Figure I.3</b> : Production mondiale de fibres végétales :.....	<b>07</b>
<b>Figure I.4</b> Différents types de nanocomposites :.....	<b>08</b>
<b>Figure I.5</b> Représentation schématique d'un polymère thermoplastique :.....	<b>09</b>
<b>Figure II.1</b> : Mécanismes d'endommagement observés dans un composite :.....	<b>15</b>
<b>Figure II.2.</b> Représentation schématique des différentes échelles d'analyse d'un matériau :..	<b>17</b>
<b>Figure II.3</b> Paramètres qui conditionnent les performances d'un composite :.....	<b>18</b>
<b>Figure II.4</b> : Concepts d'interphase et d'interface :.....	<b>19</b>
<b>Figure. II.5</b> Modes d'endommagements :.....	<b>20</b>
<b>Figure II.6</b> Volume élémentaire représentatif (VER). :.....	<b>21</b>
<b>Figure. II.7</b> : volume élémentaire représentatif :.....	<b>22</b>
<b>Figure II.8</b> équilibre de la matrice en cisaillement :.....	<b>23</b>
<b>Figure. II.9</b> : Équilibre élastique dans une portion de fibre :.....	<b>25</b>
<b>Figure II.10</b> modèle de Cox : profil des contraintes fibre/interface. :.....	<b>26</b>
<b>Figure II.11</b> : Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull:.....	<b>28</b>
<b>Figure II.12</b> : Calcul de la contrainte moyenne de rupture :.....	<b>29</b>
<b>Figure II. 13.</b> Schéma simplifié du principe de fonctionnement d'un algorithme génétique :..	<b>32</b>
<b>Figure. II.14.</b> Exemple d'un codage binaire d'un chromosome :.....	<b>35</b>
<b>Figure. II.15.</b> Exemple d'un codage réel d'un chromosome :.....	<b>35</b>
<b>Figure II.16.</b> Codage alphabétique d'un chromosome :.....	<b>36</b>
<b>Figure. II.17.</b> Exemple de codage sous forme d'arbre :.....	<b>36</b>
<b>Figure III. 1</b> : Influence de différentes techniques de traitement sur la valeur :.....	<b>37</b>
<b>Figure III. 2</b> : L'organigramme de l'algorithme génétique. :.....	<b>40</b>

<b>Figure III 3</b> : L'influence de la contrainte $\sigma$ (90N/m <sup>2</sup> ) sur l'endommagement de l'interface :.....	<b>41</b>
<b>Figure III. 4</b> : L'influence de la contrainte $\sigma$ (110N/m <sup>2</sup> ) sur l'endommagement del'interface :.....	<b>41</b>
<b>Figure III.5</b> : L'influence de la contrainte $\sigma$ (130N/m <sup>2</sup> ) sur l'endommagement de l'interface :.....	<b>41</b>
<b>Figure III.6</b> : L'influence de la contrainte $\sigma$ (90N/m <sup>2</sup> ) sur l'endommagement de l'interface :.....	<b>42</b>
<b>Figure III. 7</b> : L'influence de la contrainte $\sigma$ (110N/m <sup>2</sup> ) sur l'endommagement de l'interface :.....	<b>42</b>
<b>Figure III. 8</b> : L'influence de la contrainte $\sigma$ (130N/m <sup>2</sup> ) sur l'endommagement de l'interface :.....	<b>42</b>

## **Liste des Tableaux**

<b>Tableau I.1 :</b> Tableau comparatif entre la matrices TP et la matrices TD :.....	<b>11</b>
<b>Tableau I.2 :</b> les caractéristiques mécaniques des résines thermoplastiques et thermodurcissables :.....	<b>12</b>
<b>Tableau III. 1.</b> Propriétés mécaniques du renforcement.....	<b>37</b>



# **Introduction générale**

Les nanocomposites sont des matériaux constitués d'une matrice polymère dans laquelle sont dispersées des particules de taille nanométrique appelées charges. Ces charges, de nature et de forme variées (sphères, fibres, plaquettes...) de différentes compositions (noir de carbone, argile, métaux, graphite), vont jouer le rôle de renfort et vont permettre d'améliorer les propriétés mécaniques, thermiques, optiques et électriques de la matrice dans laquelle elles sont incorporées. [1] Ce qui en fait des matériaux intéressants dont quelques un sont déjà étudiés voire utilisés pour diverses mais vu la complexité des mécanismes d'endommagement d'origine mécanique et environnementaux (température, humidité, contraintes résiduelles de mise en œuvre,...) qui peuvent créer des dégradations irréversibles empêchant la satisfaction du cahier des charges en termes de performances. [1]

Il est donc primordial de maîtriser l'impact de l'environnement sur la tenue mécanique de matériau, afin de prévoir son endommagement. En particulier, le phénomène d'absorption d'humidité est un inconvénient majeur des matériaux composites à matrice polymériques puisqu'il conduit à l'endommagement et la mise hors service de ce type de matériau.[1]

Notre travail consiste à calculer par une simulation génétique, pour différentes valeurs de la contrainte de traction appliquée, l'endommagement de la liaison interfaciale entre la matrice époxyde renforcée par les nanoparticules de graphite et la fibre de chanvre. Les résultats de ce calcul sont comparés avec ceux obtenus dans certains matériaux composites dans le but d'aboutir à une conclusion quant à leur résistance mécanique.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres dont le premier chapitre présente des généralités sur les bio-nanocomposites, le deuxième chapitre se divise en deux parties; la première est consacré à la modélisation de l'endommagement de l'interface fibre – matrice et la deuxième partie est réservée à l'étude des algorithmes génétiques. Dans le dernier chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats obtenus par notre simulation génétique.

### **Référence**

[1] ALAMI Mohamed ; Prédiction de l'Endommagement l'InterfaceFibre Matrice d'un Nano-CompositeCarbone/Graphite Epoxy par Algorithme Génétique ; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf ; Diplôme de Doctorat en Sciences ;2015 /2016 Page1-3

# **CHAPITRE I**

**Etude bibliographique sur les  
matériaux Bio-nanocomposites**

## **I.1. Introduction :**

L'intérêt croissant de la recherche pour les nanocomposites rend ce domaine d'étude dynamique et en perpétuelle évolution. Cette branche très active de la recherche commence à déboucher sur de premières applications industrielles et commerciales, mais qui restent encore limitées à quelques types de matériaux. [1]

Par exemple, les nanocomposites à matrice polymère et à renforts d'argile font figures de leaders au niveau des premières applications :

Les argiles naturelles, faciles à extraire, sont des candidates idéales pour des nanorenforts. Mais surtout, les processus de mise en forme des polymères sont largement maîtrisés et peu coûteux. C'est ce qui explique le développement des nanocomposites à matrice organique par rapport à leurs "cousins" à matrice céramique et métallique. [1]

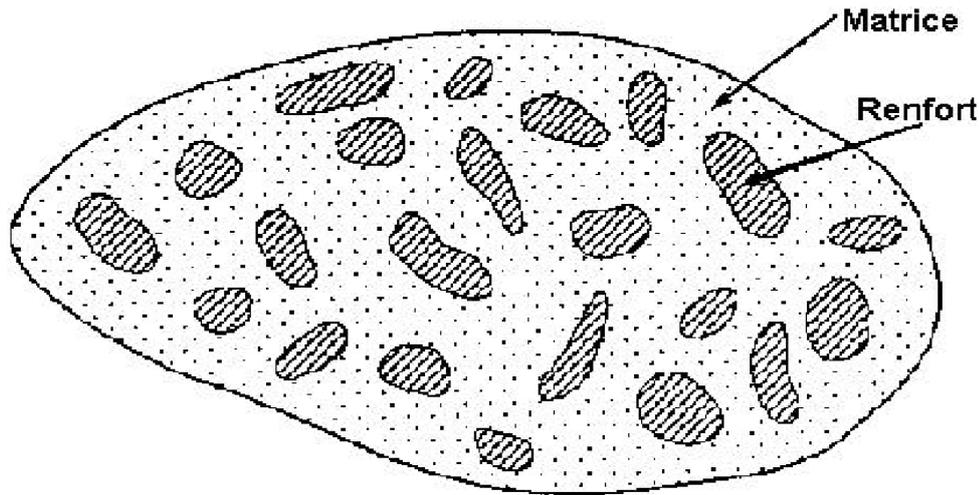
La transition vers la commercialisation s'amorce et a besoin de s'inspirer de modèles et de succès concrets. L'émergence des premières applications des nanocomposites pourrait ainsi tracer la voie pour d'autres domaines des nanosciences.

Dans ce rapport, j'ai d'abord donné une définition assez large de ce qu'est un nanocomposite, puis j'ai traité particulièrement les nanocomposites à matrice organique en m'arrêtant sur différents aspects aussi bien techniques qu'économiques. Enfin, je me suis aussi intéressé aux limites de ses derniers avant de conclure. [1]

## **I.2.Définition d'un matériau composite :**

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. [2]

La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice.



**Figure .I.1** :Schéma illustratif d'un matériau composite

### **I.3.Caractéristiques des matériaux composites :**

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

- des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort
- de leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont : [3]

- le gain de masse,
- la bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- l'absence de corrosion,
- l'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur,
- l'insensibilités à certains produits chimiques courants ( solvants, peinture, huiles, pétroles,... ),
- tenue aux impacts et aux chocs très moyenne,
- très forte anisotropie.

## I.4 De composite à nanocomposite :

### I.4.1 Définition d'un nanocomposite :

Un matériau composite est constitué de plusieurs composants élémentaires, dont l'association confère un ensemble de propriétés qu'aucun des composants, pris séparément, ne possède. Le but que l'on recherche le plus souvent en substituant un matériau composite à un matériau traditionnel, est pour une même rigidité de structure, un gain de masse appréciable. Un matériau composite est constitué de deux phases : [3]

- La matrice.
- Le renfort ou la charge.

Les nanocomposites constituent une classe de matériaux à part entière: bien qu'ils aient la même composition que les composites classiques, notamment concernant la nature de la matrice, leur différence réside dans la taille des composants (matrice ou renfort) et dans le fait que certaines propriétés spécifiques n'apparaissent qu'à l'échelle du nanomètre.

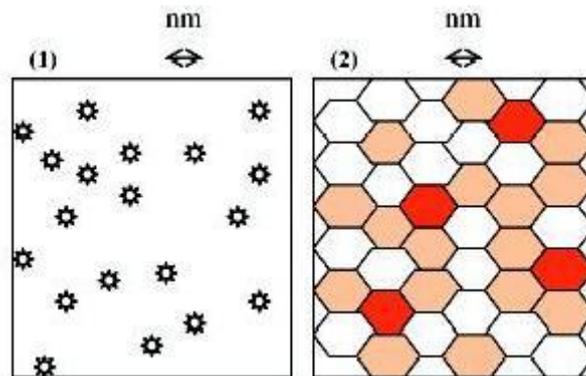


Figure I.2 : Exemple d'un nanocomposite

### I.4.2 Définition morphologique de nanocomposites :

C'est un composite dans lequel les renforts ont une dimension inférieure ou égale au nanomètre ; ou c'est matériaux résultant de mélanges multiphasiques, dont la répartition en tailles caractéristiques est voisine de la centaine de nanomètres, voire inférieure.[3]

Les composites avec des renforts micrométriques ont montré certaines de leurs limites. Leurs propriétés résultent de compromis : l'amélioration de la résistance, par exemple, se fait au détriment de la plasticité ou de la transparence optique. Les nanocomposites peuvent pallier à certaines de ces limites et présentent des avantages face aux composites classiques à renforts micrométriques : [3]

- Une amélioration significative des propriétés mécaniques notamment de la résistance sans compromettre la ductilité du matériau car la faible taille des particules ne crée pas de larges concentrations de contraintes.

- Une augmentation de la conductivité thermique et de diverses propriétés notamment optiques qui ne s'expliquent pas par les approches classiques des composants. Les nanoparticules, ayant des dimensions en deçà des longueurs d'onde de la lumière visible (380-780 nm), permettent au matériau de conserver ses propriétés optiques de départ ainsi qu'un bon état de surface. [4]

La diminution de la taille des renforts que l'on insère dans la matrice conduit à une très importante augmentation de la surface des interfaces dans le composite. Or, c'est précisément cette interface qui contrôle l'interaction entre la matrice et les renforts, expliquant une partie des propriétés singulières des nanocomposites. A noter que l'ajout de particules nanométriques améliore, de manière notable, certaines propriétés avec des fractions volumiques beaucoup plus faibles que pour les particules micrométriques.

On obtient ainsi à performances égales, un gain de poids important ainsi qu'une diminution des coûts puisque l'on utilise moins de matières premières (sans tenir compte du surcoût des nano-renforts), une meilleure résistance pour des dimensions structurales similaires et une augmentation des propriétés barrières pour une épaisseur donnée. [4]

On obtient ainsi à performances égales, un gain de poids important ainsi qu'une diminution des coûts puisque l'on utilise moins de matières premières (sans tenir compte du surcoût des nano-renforts), une meilleure résistance pour des dimensions structurales similaires et une augmentation des propriétés barrières pour une épaisseur donnée. [4]

### **I.4.3 Classification des composites**

On peut appliquer la classification classique des composites suivant la nature de la matrice, dans l'ordre croissant de la température d'utilisation. Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans un domaine de températures ne dépassant pas 200 à 300°C, alors que les autres types de composites sont utilisés au-delà : jusqu'à 600 degrés pour une matrice métallique et jusqu'à 1000 degrés pour une matrice céramique. [4]

### **a. Les composites à matrice organique :**

Aussi appelés composites à matrice polymère, ils sont sûrement les plus développés du fait de l'importance commerciale de ces derniers et de la maîtrise (coût et savoir-faire) de nombreux processus de fabrication. [4]

### **b. Les composites à matrice métallique :**

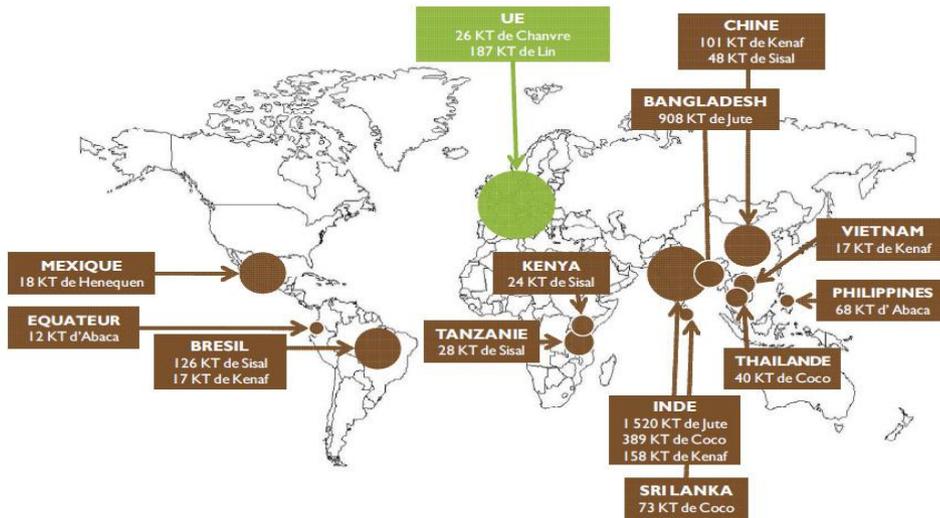
Dont certains procédés de fabrication s'inspirent de la métallurgie des poudres. Les particules de seconde phase peuvent être des oxydes, borures, carbures, nitrures. Les composites à matrice métallique encore appelés MMCs pour *metal-matrix composites* se sont développés grâce à la facilité et à la maîtrise des procédés de fabrication ainsi qu'à leur faible coût. [4]

### **c. Les composites à matrice céramique**

Ils sont utilisés pour des applications à plus haute température comme des oxydes, carbures ou nitrures. L'utilisation des céramiques est limitée notamment par leur ténacité à rupture, leur résistance à la fatigue et aux chocs thermiques. Pour résoudre ces problèmes, l'incorporation d'une seconde phase ductile dans la matrice céramique est une solution. [4]

## **I.5 Les fibres de chanvre :**

Le chanvre est une plante annuelle qui est cultivée partout dans le monde mais principalement dans l'union européenne (Figure I.). Elle regroupe quatre espèces, chacune adaptée à un climat différent. Selon les espèces la taille de la plante varie entre 1,5 et 4 mètres. Le chanvre est plus connu sous le nom de *Cannabis Sativa*. Les cultures légales de chanvre en Europe et plus spécifiquement en France, proviennent d'espèces génétiquement sélectionnées pour leur très faible taux en composés psychotropes (THC). On l'appelle alors le chanvre industriel.



**Figure I.3 :** Production mondiale de fibres végétales [5]

En France, la culture du chanvre a connu son apogée dans les années 1950. En 1960, la superficie des champs cultivés a diminué considérablement du fait de l'émergence des fibres synthétiques. Mais après 1970, le chanvre a retrouvé un regain d'intérêt grâce à l'ouverture de cette plante au marché papetier. Le chanvre est principalement cultivé en Champagne-Ardenne, soutenue par la Chanvrière de l'Aube qui est une coopérative d'agriculteurs. Le chanvre est semé fin mars ou début avril. La culture ne demande pas d'apport supplémentaire de pesticides. La plante a besoin d'être arrosée en juin pour la croissance de la tige et en août au moment de la floraison. Dans la région de la Champagne-Ardenne, les besoins en eau sont satisfaits par les précipitations annuelles. La récolte a lieu en septembre. Une première récolte à la moissonneuse batteuse permet de récupérer les graines, suivie d'une deuxième récolte à l'aide d'une faucheuse qui permet d'obtenir la paille qui elle-même fournira les fibres.

## I.6 Propriétés des fibres de chanvre :

Les caractéristiques des fibres de chanvre sont présentées dans le Tableau I-10. La longueur est de 8 à 14mm pour un diamètre d'environ 20 $\mu$ m. La teneur en cellulose est de 67% conférant une rigidité dépassant les 30GPa pour certaines variétés de chanvre. La résistance en traction est très variable montrant la forte dispersion des propriétés mécaniques des fibres de chanvre.

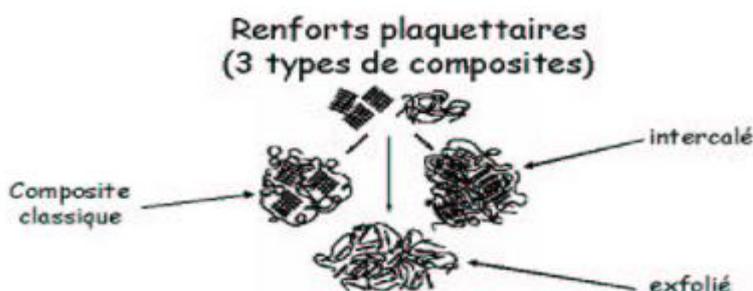
### I.7. Définition d'un matériau Bio-composite :

Les Bio-composites sont une classe de matériaux composites obtenus généralement par mélange de fibres naturelles, dérivant de plantes, et/ou de polymères biodégradables issus de ressources renouvelables.

### I.8. Description de la classe de matériaux étudiés:

Les matériaux étudiés sont des nanocomposites à matrice polypropylène et renforts plaquettaires (plaquettes d'argile). Ils ont été élaborés à l'Indian Institute of technology (IIT) de Delhi en Inde dans le cadre de la collaboration entre le LML et cet établissement. La matrice polymère de Polypropylène (PP) REPOL H020EG (Reliance est renforcée par des plaquettes d'argile de Montmorillonite (MMT) CRYSNANO 1010 (Southern Clay).

Les éprouvettes de nanocomposite ont été obtenues par moulage par injection. La taille des nanoplaquettes de MMT a été mesurée à l'aide d'un analyseur de taille de nanoparticule Brookhaven 90Plus à l'IIT. Les particules de formes ellipsoïdales ont un diamètre principal de 209nm, un diamètre médian de 189nm et une épaisseur de 50nm.



**Figure I.4** Différents types de nanocomposites.

La diffraction par rayons x a permis de mettre en évidence que les nanocomposites obtenus ont une structure dite partiellement intercalée/partiellement exfoliée. On notera qu'il est possible avec des plaquettes de taille nanoscopique d'obtenir trois types de matériaux différents (figure 4). Le premier type est celui du nanocomposite dont la microstructure est similaire à celle d'un composite classique. Dans ce cas, les renforts plaquettaires, qui sont initialement regroupés sous forme d'agrégats dont l'ordre de grandeur est supérieur au nanomètre, restent

Sous forme d'agrégats au sein de la matrice. Le deuxième type regroupe les nanocomposites à structure intercalée. Dans ce cas, les plaquettes restent sous forme d'agrégats entre lesquels s'intercalent des constituants de la matrice.

Le dernier cas concerne les nanocomposites à structure exfoliée. Dans ce cas, toutes les plaquettes des agrégats se sont séparées et dispersées au sein de la matrice. C'est ce dernier

type de nanocomposites qui Offre les meilleures propriétés mécaniques. On ne peut rigoureusement parler de nanocomposites que pour les Structures intercalée ou exfoliée, qui font intervenir l'échelle nanoscopique. La structure la plus courante est celle du nanocomposite à nanoplaquette partiellement intercalée /partiellement exfoliée [6].

### I.9. Définition des matrices :

La matrice est, avec les renforts, l'un des deux principaux constituants des matériaux composites. C'est le terme désignant la résine polymérisée dont le rôle est de maintenir les renforts en place et de leur assurer la cohésion et la protection. Elle permet également la transmission des efforts mécaniques vers les renforts.

La matrice est généralement homogène et isotrope ; on distingue les matrices céramiques, les matrices métalliques, les matrices minérales et les matrices organiques. [7]

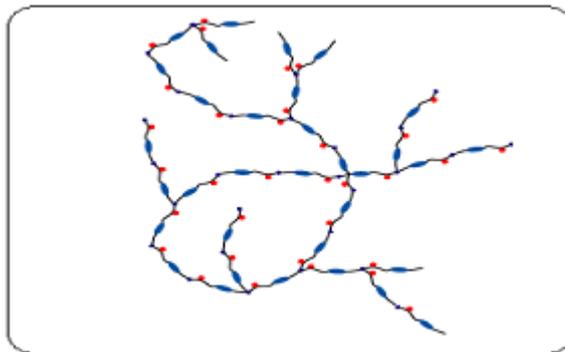
#### I.9.1 . Les thermoplastiques :

Un thermoplastique est un polymère linéaire ou ramifié pouvant être ramolli par chauffage et durci par refroidissement dans un intervalle de température spécifique. Ces polymères peuvent cristalliser thermoplastes amorphes ou thermoplastes semi-cristallins comme le polyéthylène (PE), le poly (chlorure de vinyle) (PVC) ou le polystyrène (PS) sont

9

mis en forme par diverses techniques comme l'injection, l'injection-soufflage, l'extrusion ou le roto moulage. (Voir Fig. I.5).

Dans la majorité des cas, le polymère ayant la forme désirée récupère son état partiellement cristallin ou amorphe après refroidissement. [7]



**Figure I.5** Représentation schématique d'un polymère thermoplastique.

### I.9.2 Les thermodurcissables :

Un thermodurcissable est un produit (poudre à mouler solide ou résine liquide) transformé irréversiblement par polymérisation en un réseau tridimensionnel infusible et insoluble que l'on qualifie de thermo durci. Il est souvent d'usage, dans l'industrie, d'employer abusivement le terme

thermodurcissable pour désigner à la fois le système réactif initial, soluble et fusible et le produit final et infusible. Le réactif initial peut être composé d'un monomère ou d'un mélange de monomères

(résines aminoplastes et phénoplastes, silicone,...) ou plus fréquemment d'un mélange de Polymère linéaire de faible masse molaire et de monomère (résine époxy, résines polyesters Insaturés,...) .

Dans tous les cas, la réticulation s'effectue sous l'action de la chaleur et / ou de catalyseurs. Ces polymères amorphes ont une température de transition vitreuse élevée (80 °C à + de 150 °C) mais, du fait de la réticulation, ne présentent pas d'état caoutchouteuse ni d'état liquide.

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

### I.9.3. La résine époxyde :

La plupart du temps, les époxydes sont employés avec un agent de réticulation appelé durcisseur pour former un réseau tridimensionnel stable et de ce fait infusible. Parfois, un accélérateur est utilisé pour faire démarrer la réaction et souvent on ajoute des adjuvants supplémentaires dont les plus importants sont les charges. Les résines époxyde sont des produits performants qui possèdent de nombreuses qualités (bonne tenue mécanique, bonne tenue aux agents chimiques, faible reprise d'humidité, excellente adhérence, faible retrait, bonne mouillabilité des renforts). Elles entrent dans un très grand nombre d'applications dont certaines sont d'un niveau de technologie élevé telles que : [8]

- l'industrie aéronautique et automobile (collages de structures et de panneaux)
- l'industrie électrique moyenne et haute tension
- l'électronique (enrobage de condensateurs, confection de circuits imprimés,...)
- le sport (ski, raquettes, arcs et flèches de compétition, cadres de vélos en carbone,...)

## Chapitre1 : Etude bibliographique sur les matériaux Bio-nanocomposites

➤ l'outillage (modèles à reproduire, maîtres modèles, ...)

Le tableau suivant présente une comparaison entre Les thermoplastiques et Les thermodurcissables

Matrices	Thermoplastiques.TP	Thermodurcissables.TD
Etat de base	solide prêt à l'emploi	liquide visqueux à polymériser
Stockage	Illimité	Réduit
Mouillabilité renforts	Difficile	Aisée
Moulage	chauffage+refroidissement	chauffage continu
Cycle	Court	Long
Tenue au choc	assez bonne	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Bonne
Chutes et déchets	Recyclables	perdus ou recyclés en charges
Condition de travail	Propreté	Emanation pour méthode humide

**Tableau.I.1.**Tableau comparatif entre la matrices TP et la matrices TD

Et Le Tableau suivant permet de résumer les caractéristiques mécaniques des résines thermoplastiques et thermodurcissables :

Il est à noter que dans les résines, des charges et des additifs y sont fréquemment incorporés. Leur rôle est d'améliorer les caractéristiques mécaniques et physiques, de diminuer les coûts et de faciliter leur mise en oeuvre ou en forme. Les taux de charges rencontrés dans les résines sont de quelques dizaines de % et les additifs de quelques pourcent. Comme exemple de charge utilisée, on peut citer les microbilles de verre creuses et le noir de carbone et comme additifs, les agents de démoulage et lubrifiants, les agents anti UV et anti-retrait, les colorants et pigments.

	$\rho(\text{kg/m}^3)$	$E(\text{GPa})$	
Polypropylène	900	1,1-1,4	20-35
Polyamides	1140	1,2-2,5	60-85
Résine Polyesters	1200	2 ,8-3,5	50-80
Résine Epoxyde	1100-1500	3-5	60-80
Résine de condensation	1200	3	40

**Tableau.I.2.** les caractéristiques mécaniques des résines thermoplastiques et thermodurcissables

### I-10. Classification des Fibres Végétales :

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance. A s'avoir : les fibres de feuille, de tiges, de bois e t de surface.

#### A. Les Fibres de Feuilles :

Ces fibres sont obtenues grâce au rejet des plantes monocotylédones. Les fibres sont fabriquées par chevauchement de paquet qui entoure le long des feuilles pour les renforcer ces fibres sont dures et rigides. Les types de fibres de feuilles les plus cultivées sont la fibre de sisal, de Henequen et d'abaca . [8] De ces fait, plusieurs chercheurs tel que : NILSSON , AYYAR et al ont montré l'efficacité du renforcement du ciment par les fibres de feuilles.

#### B. Les Fibres de Tiges :

Les fibres de tige sont obtenues dans les tiges des plantes dicotylédones. Elles ont pour rôle de donner une bonne rigidité aux tiges de plantes. Les fibres de tige sont commercialisées sous forme de paquet de cor et en toute longueur. Elles sont par la suite séparées individuellement par un processus de défilage. Les fibres, une fois séparées, sont utilisées dans la fabrication des cordes ou de textile ou bien dans le renforcement du ciment et béton. Les fibres de tige les plus utilisées sont les fibres de jute, de lin, de ramie de sunn, de kenaf, de urena et de chanvre.

NILSSON rapporte que les fibres de tige, les plus utilisées dans le renforcement du ciment, sont celles de sunn, de chanvre et de jute. [9]

**C. 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.[10]

### **D. Les Fibres de Surface :**

Les fibres de surface entourent en général la surface de la tige, de fruits ou de grains. Les fibres de surface des grains constituent le groupe le plus important dans cette famille de fibres. Nous citons entre autre le Cotton et la noix de coco (coco). Les fibres de coco ont donné de bons résultats pour la résistance à la flexion du ciment de fibre . [11]  
Il est à noter que, les fibres de palmier, qui entourent son tronc, appartiennent à cette famille de fibres.

### **I.11. Conclusion**

Les nanocomposites, à l'image des nanotechnologies plus généralement, suscitent de nombreux espoirs du fait de leur potentiel et d'un certain engouement médiatique. Quelques écueils peuvent ralentir le développement de ces derniers:

- Les espoirs déçus d'une technologie présentée comme trop prometteuse.
- L'éclatement d'une éventuelle bulle spéculative similaire à celle d'Internet qui a eu pour conséquence de tarir de nombreuses sources de financement.
- Les préoccupations environnementales liées à la taille des particules nanométriques qui pourraient se révéler dangereuses en pénétrant dans le corps humain (circulation sanguine, poumon) à l'image de l'amiante.

Actuellement, les nanocomposites se cantonnent à des marchés de niches où l'amélioration des propriétés justifie leur utilisation en dépit de leur surcoût. Les premières applications industrielles récentes sont des étapes nécessaires pour le développement et l'épanouissement d'une telle technologie qui a besoin d'un premier succès pour amorcer son passage du laboratoire à la commercialisation. [12]

## Chapitre1 : Etude bibliographique sur les matériaux Bio-nanocomposites

---

### Références

- [1] <http://www.aae.enscm.fr/anciens/94-mc/TPmacro.htm>
- [2] B. Agoudjil, L. Ibos, J. C. Majesté, Y. Candau, and Y. P. Mamunya, "Corrélation between transport properties of Ethylene Vinyl Acetate/glass, silver-coated glass spheres composites," *Composite: Part A*, vol. 39, pp. 342-351, 2008
- [3] <http://www.cea-technologies.com/article/article.php?article=300>
- [4] [http://www.france-science.org/publications/physique/PhysUSA\\_N11.pdf](http://www.france-science.org/publications/physique/PhysUSA_N11.pdf)
- [5] Meirhaeghe C., Evaluation de la disponibilité et de l'accessibilité de fibres végétales à usages matériaux en France, Etude de l'ADEME 2011
- [6] Bafna A., Beaucage G., Mirabella F., and Mehtab S. 3d hierarchical orientation in polymer-clay nanocomposite films. *Polymer*, 44, 1103–1115, 2003.
- [7] Renard J., "Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère", collection Lavoisier, Paris (2005).
- [8] P. BARDONNET, "Résines époxydes (EP)," *Techniques de l'Ingénieur*, vol. A3465.
- [9] KHENFER, M. M. Caractérisation structurale et rhéologique des ciments et des plâtres renforcés de fibres cellulosiques. Thèse de docteur, université de Bordeaux, Juin 1990.
- [10] SWAMY, R. H. S, AHUJA, B. M, KRISHAMOORTHY, S., Behavior of concrete reinforced with jute, coir, bamboo fibers. *The international journal of cement composite and light weight concrete*, volume 5, p 13, N°1, 1984.
- [11] COUTTS, R.S.P., ? Flax fibers as a reinforcement in cement mortar, *the international journal of cement composites and lightweight concrete*, vol.5, N°4, pp 257-262, 1983.
- [12] <http://www-ipst.u-strasbg.fr/nadia/courcomp/comp0.htm>

# **CHAPITRE II**

**Modélisation et  
Simulation de  
l'endommagement de  
l'interface fibre- matrice**

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

---

### Chapitre II :

#### Partie I : Modélisation de l'endommagement

##### Introduction :

Par mécanismes de rupture, il faut comprendre tout processus mécanique produisant au sein d'un matériau une " discontinuité" locale de matière appelée fissure. Il est usuel de parler d'initiation de la rupture, l'initiation de la rupture peut être considérée comme la création des microfissures à l'échelle microscopique (celle des constituants) à partir d'un défaut, on parlera de microfissuration. La propagation de la rupture est le résultat de la création de nouvelles surfaces de rupture à l'échelle macroscopique (plusieurs fois celle des constituants), à partir des microfissures existantes. On parlera également de macro- fissuration. Dans le cas des matériaux composites, l'initiation de la rupture se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique [1]

##### II. 1. Interface fibre/matrice :

Il est naturel de penser que les performances des matériaux composites sont fonction des propriétés des constituants de base rentrant dans leur composition. Cependant, ceux-ci n'existeraient pas si les fibres et la matrice ne pouvaient s'associer. L'interface est le siège de cette association et constitue une véritable région stratégique capable d'assurer notamment le transfert des charges de la matrice aux renforts. Les caractéristiques de l'interface dépendent quant à elles de la qualité de la liaison fibre/matrice ce qui fait appel à la notion d'adhésion.

Par définition, l'adhésion est le phénomène qui crée l'adhérence. L'adhérence est l'état d'une chose qui colle, qui tient à une autre. Pratiquement, l'adhésion peut s'expliquer par la physico-chimie tandis que l'adhérence se mesure par des tests [2]. La difficulté réside souvent à trouver des corrélations entre adhésion et adhérence. Dans la suite de ce paragraphe, les principaux facteurs de l'adhésion sont présentés ainsi que des tests permettant de mesurer les propriétés d'adhérence entre fibre et matrice

##### II.2.Les mécanismes d'endommagement

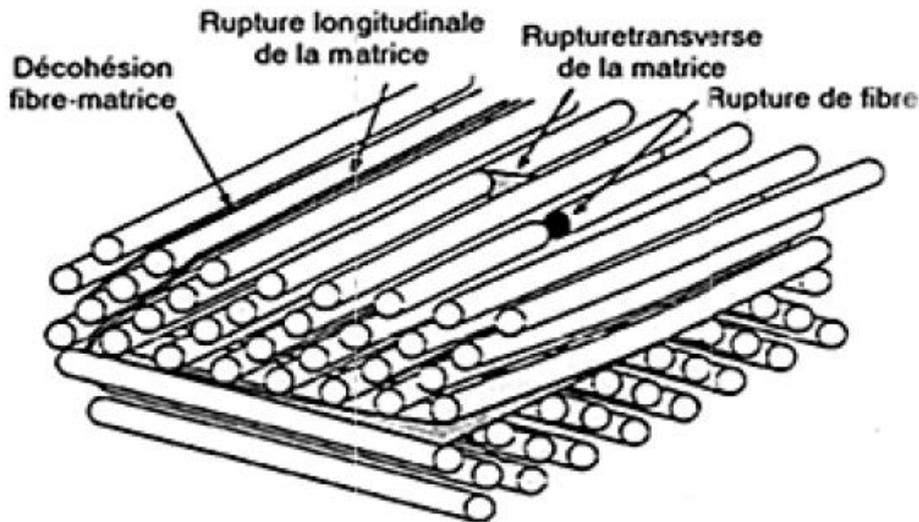
Le procédé global de la rupture dans les composites est souvent considéré comme un processus d'accumulation de différents types d'endommagements. Les mécanismes d'endommagement potentiels d'un matériau hétérogène, notamment les composites à base polymère soumis à une sollicitation mécanique, peuvent se regrouper en trois principaux modes différents selon le site où ils opèrent (**Figure II.1**) :

- Fissuration matricielle ;
- Rupture de l'interface fibre /matrice et déchaussement de fibre,

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

Délaminage (décohésion étendue intra plis);

- Rupture des fibres;
- Délaminage inter plis



**Figure II.1:** Mécanismes d'endommagement observés dans un composite [3]

### II.3.Généralités sur l'endommagement des composites :

La ruine (ou rupture) macroscopique d'un matériau ou d'une structure composite n'est pas initiée par un unique mécanisme d'endommagement comme nous pouvons le rencontrer dans les matériaux composites. En effet, la rupture d'un composite est le résultat d'une somme de dégradations observées à différentes échelles du composite. Ces endommagements ne sont pas présents uniformément dans la structure. Ils dépendent du type de sollicitation, mais aussi de l'orientation et de la proportion des renforts. Sandhu [4] s'est d'ailleurs intéressé à la détermination de la part de chacune des sollicitations uniaxiales élémentaires (longitudinale, transversale, cisaillement) dans l'endommagement d'un stratifié. Ainsi, les différents mécanismes d'endommagement (Figure II.2) susceptibles d'être rencontrés dans les matériaux ou structures composites sont :

#### - A l'échelle microscopique :

Apparaissent des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice (décohésion fibres/matrice) ou de porosité, c'est le cas étudié dans ce travail.

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

---

### - A l'échelle mésoscopique :

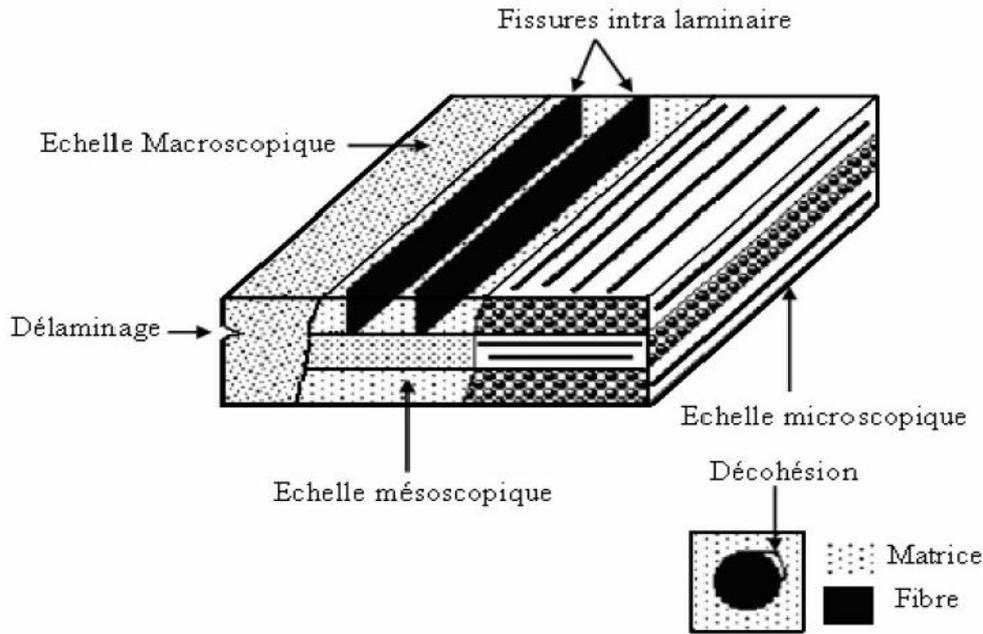
L'échelle du pli, on observe des fissures intra/laminaires transverses (perpendiculaires a la direction de sollicitation) ou longitudinales (dans la direction de l'application de l'effort) et des ruptures de fibres au stade ultime de la ruine du matériau,

### - A l'échelle macroscopique :

On observe le phénomène de délaminage qui correspond à une séparation locale entre deux couches liée à une concentration importante des contraintes en cisaillement s'amorçant généralement aux bords libres de la structure. La rupture des fibres, induite essentiellement par une traction axiale, intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint la contrainte de rupture de la fibre. Ces ruptures de fibres entraînent des concentrations de contraintes de cisaillement à l'interface fibre-matrice.

Elles favorisent la multiplication des ruptures des fibres voisines intactes, combinant l'aspect statistique de la rupture de la fibre et les capacités de report de charge dans la matrice. Sous chargement constant, l'augmentation de charge n'étant plus le facteur d'activation de l'accumulation de ruptures de fibres, il faut envisager les propriétés viscoélastiques de la matrice pour justifier de sa poursuite. La ruine du matériau est le résultat de la combinaison potentielle de l'ensemble des mécanismes élémentaires du pli unidirectionnel (décohésion fibre/matrice, fissures intra laminaires, ruptures de fibres) et a l'interface entre les plis (délaminage). Ces mécanismes peuvent être initiés par la présence de fissures intra laminaires présentes dans les plis. Ces fissures peuvent être générées par des concentrations de contraintes, des discontinuités des champs de contraintes entre les plis ou peuvent être présentes initialement dans le matériau (défauts apparus lors de la fabrication ou liés a des effets de bords). Leur propagation et coalescence est induite par différentes sollicitations, de diverses origines (mécanique, thermique, thermomécanique, hydrique...).

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



**Figure II.2.** Représentation schématique des différentes échelles d'analyse d'un matériau composite à matrice polymère et fibres longues. [5]

### II.4. Comportement de l'interface fibre-matrice dans les composites :

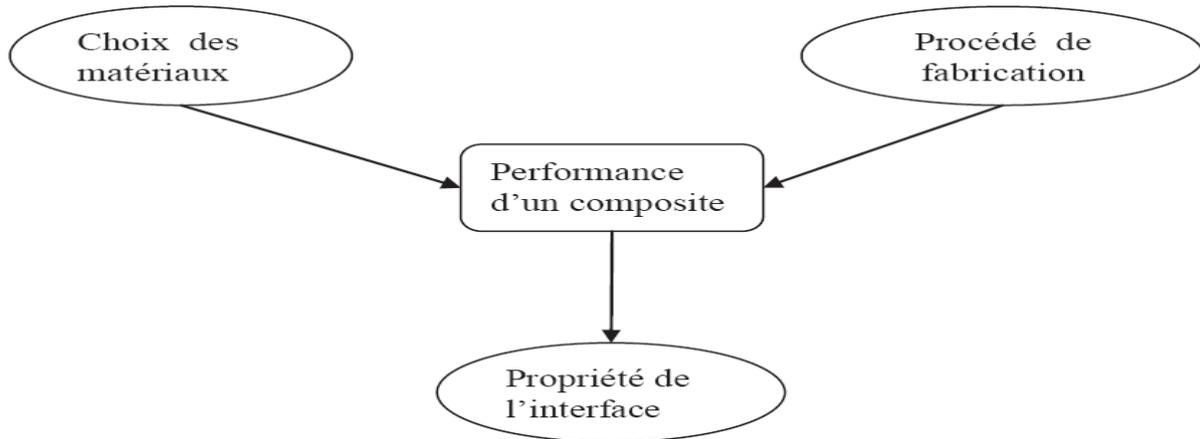
#### II.4.1. Généralité :

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 (Figure II.2)

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

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

---



**Figure. II.3** Paramètres qui conditionnent les performances d'un composite.

En effet, il est reconnu que le comportement mécanique des matériaux composites dépend fortement de la liaison fibre/matrice qui s'établit entre les constituants lors de l'élaboration du composite. Cette liaison est constituée d'une ou plusieurs interphases et interfaces. [06] Rappelons tout d'abord la distinction entre les termes interphase et interface :

**a- interphases :** Est une zone concentrique à la fibre, d'épaisseur fine (en général quelque 10 ou 100 nm) et de nature chimique définie (formée par un ou plusieurs constituants élémentaires du composite lors de son élaboration). Elle peut être également une fine couche introduite volontairement dans le but de protéger la fibre ou de contrôler la liaison interfaciale, ou bien encore de contribuer à améliorer la compatibilité chimique fibre/matrice (Figure II.4, a). [6]

**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.15, b). [6]

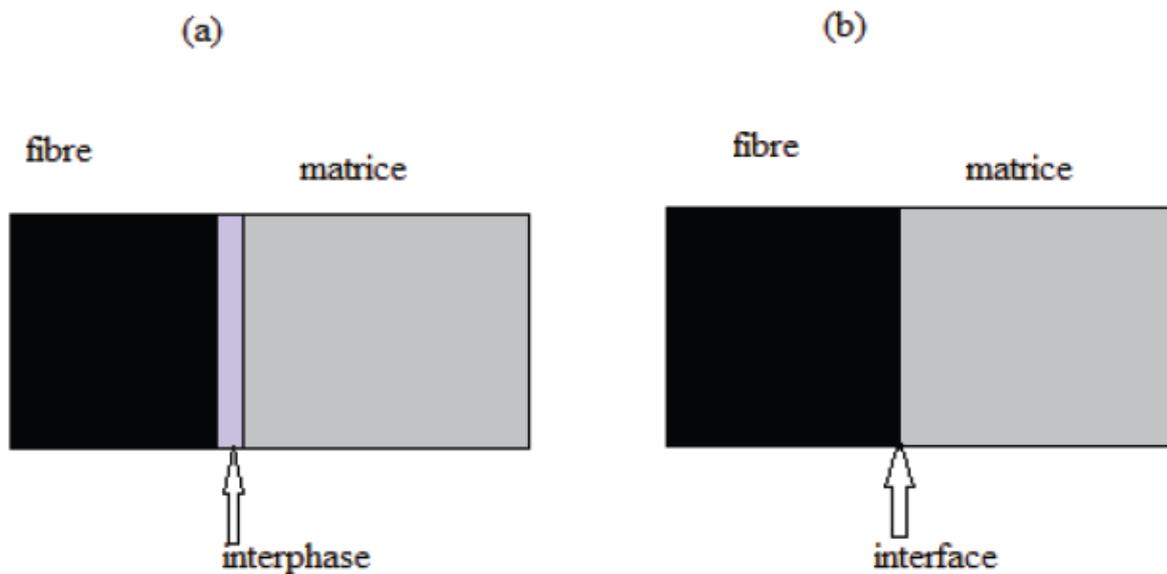


Figure II.4: Concepts d'interphase et d'interface [6]

### II.4.2. Comportement d'un composite unidirectionnel :

Dans un composite céramique unidirectionnelle sollicitée parallèlement aux fibres, le comportement à rupture peut être imaginé comme étant constitué des séquences suivantes :

- Cas des fibres et matrice subissent la même déformation :

Le composite possède donc un comportement linéaire élastique jusqu'à l'apparition d'une première fissure matricielle. Cette fissure se propage et s'approche d'une fibre, ensuite on peut distinguer les cas suivants: [7]

#### II.4.2.1.Cas d'une interface très forte (interface liée):

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. [7]

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

### II.4.2.2.Cas d'une interface très faible (non liée):

Si l'interface est trop faible, la fissure matricielle est bien déviée à l'interface, mais la décohésion entre fibres et matrice s'étend sur une très grande distance sur laquelle la matrice n'intervient donc plus. Là également, la résistance du composite est très faible, mode II et III. [8]

### II.4.2.3.Cas d'une interface relativement faible:

Si l'adhérence entre fibres et matrice est relativement faible, la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire (mode II de la rupture) en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface. Le mode II, ou mode de glissement droit, est la situation recherchée dans la déviation de fissure, avec le mode III (glissement vis). En règle générale, la propagation de la fissure est en mode mixte combinant le mode I et les deux autres modes (II et III) voir fig. II.5. [9]

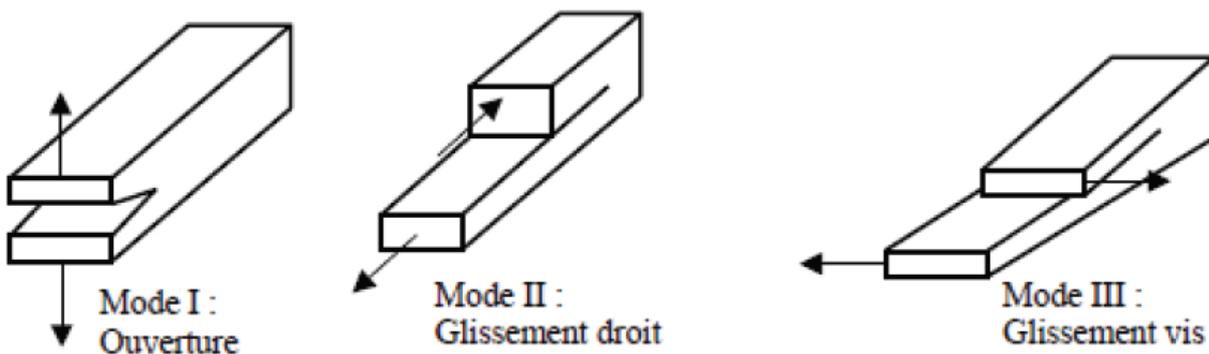


Figure. II.5 Modes d'endommagements.

### II.5. Apport de la micromécanique :

L'interface ayant un développement spatial réduit, son comportement est difficile à caractériser sur le composite globale puisque la réponse est diluée (masquée par celle des constituants principaux). Des expériences plus simples à analyser puisqu'elles se réalisent à l'échelle même de la fibre. On considèrera ici la fibre ou la particule entourée de la matrice, d'abord isolée, puis dans l'environnement naturel constitué par les autres fibres ou particules. [10]

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

### II.6. Le comportement mécanique des composites :

En fonction de l'arrangement géométrique de ses constituants, le matériau composite va présenter un comportement plus ou moins anisotrope. De plus, l'orientation et la proportion des renforts empêchera ou non le caractère élasto-viscoplastique de la matrice de se développer ainsi que l'apparition de divers endommagement.

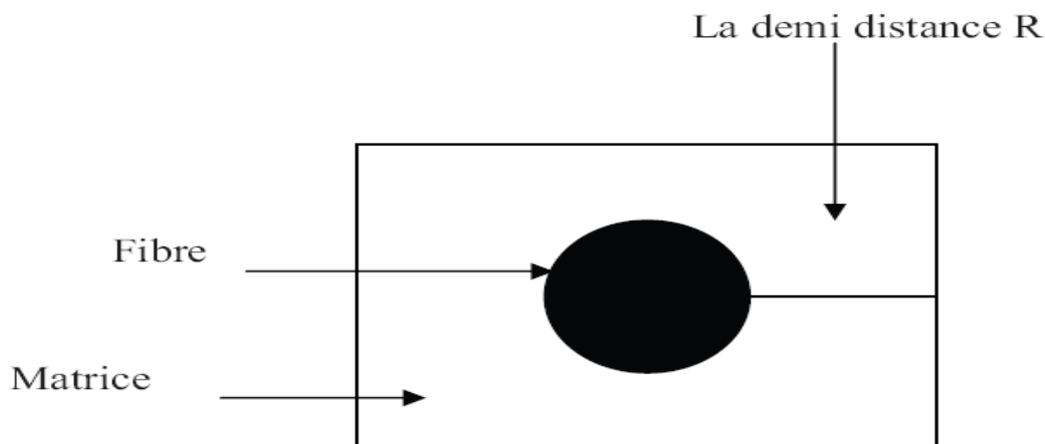
Au préalable de généralités, précisons les différences échelles nécessaires à l'étude des composites.

On en définit trois échelles :

1. L'échelle microscopique qui voit les hétérogénéités les plus présentes dans le matériau et au niveau des composants (fibre, matrice et interface)
2. L'échelle macroscopique qui voit la structure comme étant homogène : au niveau stratifié
3. L'échelle mésoscopique, intermédiaire entre les deux échelles précédentes, qui ne voit pas les hétérogénéités les plus fines et considère le plus d'une stratification comme une entité homogène

Micro  $\ll$  méso  $\ll$  macro

Enfin pour étudier le comportement d'un matériau, il est nécessaire de définir son volume élémentaire représentatif (V.E.R) (voir Figure II .6). Par volume élémentaire représentatif, il faut entendre un volume dont les dimensions sont suffisamment importantes par rapport à celle des hétérogénéités de manière à ce qu'il soit statistiquement représentatif de la matière à l'échelle de travail. (6)



**Figure II.6** Volume élémentaire représentatif (VER). [6]

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

### II.7. Le modèle micromécanique de Cox :

Un composite ne peut remplir pleinement sa fonction mécanique que si les charges appliquées au matériau peuvent être transmises de la matrice à la fibre. Ce transfert de charge est bien entendu largement conditionné par la réponse mécanique de la zone de contact entre la fibre et la matrice, autrement dit de l'interface ou de l'interphase.

Il est possible de décrire les processus de transfert de charge par des modèle micromécaniques simplifiés considérant, par exemple, une V.E.R. constitué d'une fibre noyée dans un cylindre de matrice sur lequel est appliquée une contrainte de traction. L'écriture des équations d'équilibre élastique permet théoriquement de déterminer le profil de la contrainte de traction dans la fibre et celui du cisaillement à l'interface. A partir de ces données, il est possible d'évaluer la courbe contrainte-déformation du composite.

En fonction du comportement supposé de l'interface, différentes réponses peuvent être simulées, deux modèles pionniers dans ce domaine, ceux de Cox (1952) et de Kelly-Tyson (1964). Dans le modèle de Cox, la liaison entre fibre et matrice est supposée parfaite et le comportement mécanique de ces constituants élastique. [10]

#### II.7.1. Modèle de Cox : Transfert de charge élastique.

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

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

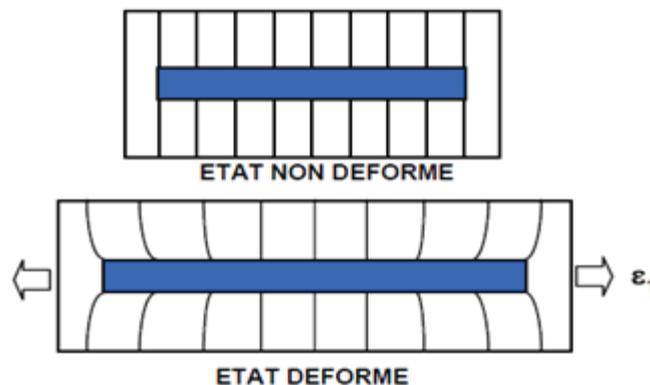


Figure. II.7: volume élémentaire représentatif [10]

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

### II.8. Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface :

#### II.8.1. 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:

$$2\pi r dx = 2\pi a \tau_i dx \quad (II.1)$$

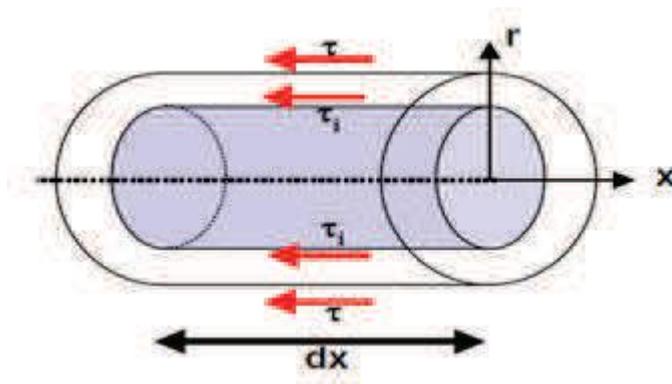


Figure II.8 équilibre de la matrice en cisaillement [10]

Où  $\tau$  et  $\tau_i$  sont respectivement la contrainte de cisaillement dans la matrice et la contrainte de cisaillement à l'interface. Soit :

$$\tau = \frac{a\tau_i}{r} \quad (II.2)$$

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

$$\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau}{G_m} = \frac{a\tau_i}{G_m r} \quad (II.3)$$

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  $r = R$  ( $w_R$ ):

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

---

$$\int_a^R dw = \frac{\tau_i a}{G_m} \int_a^R \frac{dr}{r} \quad (II.4)$$

Soit :

$$W_R - W_a = \frac{\tau_i a}{G_m} \ln(R/a) \quad (II.5)$$

$$\tau_i = \frac{G_m (w_R - w_a)}{a \ln(R/a)} \quad (II.6)$$

### II.8.6.2. 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:

$$\pi a^2 d\sigma_f = -2\pi a \tau_i dx \quad (II.7)$$

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = -\frac{2}{a} \frac{d\tau_i}{dx} \quad (II.8)$$

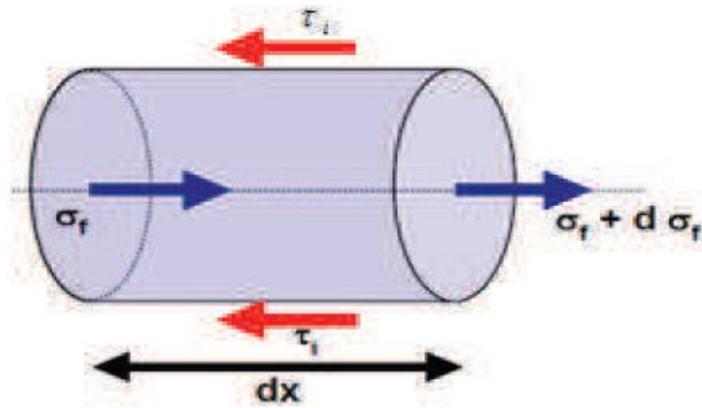
Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{d\tau_i}{dx} = \frac{G_m}{a \ln(R/a)} \left( \frac{dW_r}{dx} - \frac{dW_a}{dx} \right) \quad (II.9)$$

D'après (5) on obtient :

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_i}{a} \quad (II.10)$$

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



**Figure. II.9** : Équilibre élastique dans une portion de fibre.[10]

Pour  $r = R$ , on suppose que la déformation de la matrice soit égale à la déformation Appliquée  $\varepsilon_1$  :

$$\frac{dw_R}{dx} = \varepsilon_m = \varepsilon_1 \quad (\text{II.11})$$

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

$$\frac{dw_a}{dx} = \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (\text{II.12})$$

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

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = \frac{\beta^2}{a^2} (\sigma_f - E_f \varepsilon_1) \quad \text{Avec} \quad \beta^2 = \frac{2G_m}{E_f \ln(R/a)} \quad (\text{II.13})$$

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

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

✓ *Contrainte axiale dans la fibre :*

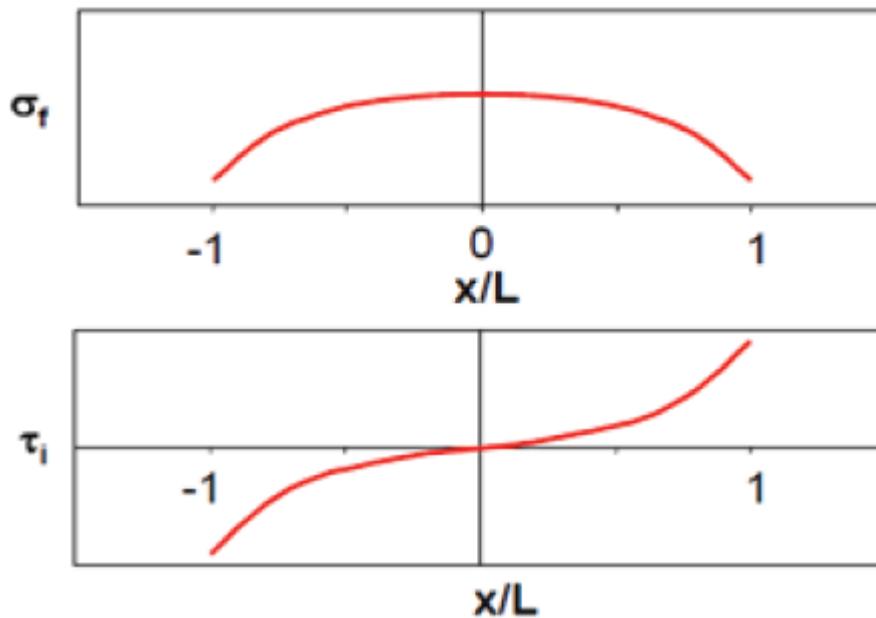
$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \{1 - \cosh(\beta x/a) : \cos(\beta s)\} \quad (II.14)$$

✓ *Contrainte de cisaillement à l'interface :*

$$\tau_i = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_1 \sinh(\beta x/a) : \cos(\beta s) \quad (II.15)$$

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

Les profils de contrainte d'un V.E.R correspondant aux équations II.13 et II.15 sont représentés ci-dessous Figure II.10 :



**Figure.II.10** modèle de Cox : profil des contraintes fibre/interface. [10]

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. [10]

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

### II.9 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 la maillon le plus faible se rompt. On divise la fibre en N segments dans lesquels la contrainte est supposée uniforme est égale à  $\sigma_i$ . La probabilité pour qu'un segment soit rompu à la contrainte  $\sigma_i$  est  $F(\sigma_i)$ . A  $F(\sigma_i)$ , on associe la fonction de densité de probabilité  $f(\sigma)$  définie par :

$$F(\sigma_i) = \int_0^{\sigma_i} f(\sigma) d\sigma \quad (II.16)$$

i  $\sigma_r$  est la résistance théorique à rupture du matériau :

$$F(\sigma_r) = \int_0^{\sigma_r} f(\sigma) d\sigma = 1 \quad (II.17)$$

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

$$R = \prod_{i=1}^N (1 - F(\sigma_i)) \quad (II.18)$$

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

$$R = (1 - F(\sigma))^N \quad (II.19)$$

La probabilité pour que la fibre soit rompue à la contrainte  $\sigma$  est alors :

$$P_r(\sigma) = 1 - R = 1 - (1 - F(\sigma))^N \quad (II.20)$$

)

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

$$(1 - F(\sigma))^N = \exp(-NF(\sigma)) \quad (II.21)$$

Le 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  $\Phi$  reste à déterminer. Weibull a proposé pour cette fonction la forme empirique suivante :

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

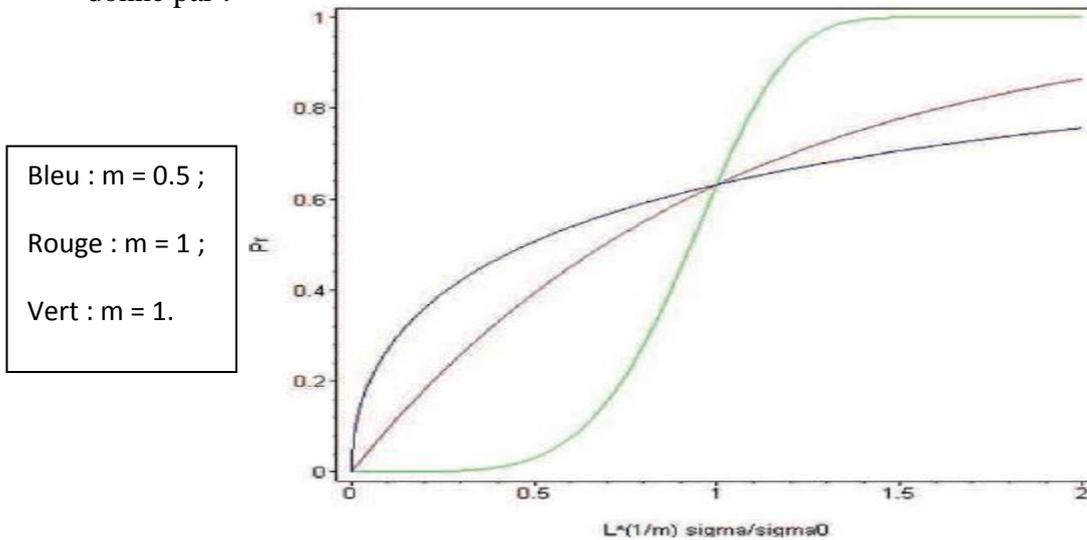
$$\Phi(\sigma) = \frac{(\sigma - \sigma_u)^m}{\sigma_0^m}; \sigma > \sigma_u \quad (II.22)$$

$$\Phi(\sigma) = 0; \sigma \leq \sigma_u \quad (II.23)$$

Avec

- $\sigma_u$  : contrainte seuil en dessous de laquelle il n'y a pas de rupture possible.
- $\sigma_0$  : facteur d'échelle.
- $m$  : paramètre rendant compte de la largeur de la distribution.

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



**Figure II.11:** Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull. [11]

$$P_r(\sigma) = 1 - \exp\left[-L\left(\frac{\sigma}{\sigma_0}\right)^m\right] \quad (II.24)$$

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

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^1 \sigma dP_r \quad (II.25)$$

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

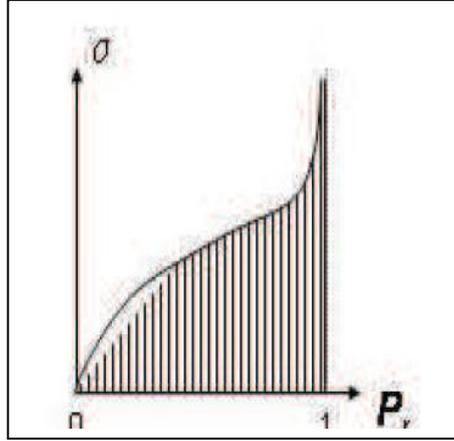
$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty (1 - P_r) d\sigma \quad (II.26)$$

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

---

Soit à partir de l'équation :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^{\infty} \exp \left[ -L \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] d\sigma \quad (II.27)$$



**Figure II.12** : Calcul de la contrainte moyenne de rupture

On effectue les changements de variables suivants :

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

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

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

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\frac{1-m}{m}} \frac{\sigma_0}{mL^{1/m}} dt$$

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

---

Soit :

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_o}{L^{1/m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \quad (\text{II.28})$$

Où  $\Gamma$  est la fonction Gamma définie comme suit :

$$\Gamma = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (\text{II.29})$$

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

---

### Partie II : Les Algorithmes génétiques

#### II.1 Introduction :

Les algorithmes génétiques (AGs) sont des algorithmes d'optimisation stochastique fondés sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Ils ont été initialement développés par John Holland [12], Goldberg [13]. Leurs champs d'application sont très vastes. Outre l'optimisation de structures, ils sont utilisés pour l'optimisation des fonctions [14], ou en programmation génétique et en théorie du contrôle optimum. Les raisons de ce grand nombre d'applications sont l'efficacité de ces algorithmes. Les AGs s'inspirent des mécanismes de l'évolution biologique pour les transposer à la recherche de solutions adaptées au problème qu'on cherche à résoudre. L'évolution biologique procède en sélectionnant des génotypes intègres aux chromosomes, sur la base de l'adaptation relative à leur environnement des phénotypes qu'ils génèrent. La qualité de cette adaptation est alors mesurée par la performance (fitness) relative de chaque génotype.

#### II.2.A quoi sert l'algorithme génétique ?

L'algorithme génétique résout des problèmes n'ayant pas de méthode de résolution décrite précisément ou dont la solution exacte, si elle est connue, est trop compliquée pour être calculée en un temps raisonnable. Ceci dit, face à un problème pour lequel il existe pour ainsi dire une infinité de solutions, plutôt que d'essayer naïvement toutes les solutions une à une pour trouver la meilleure, on va explorer l'espace des solutions en se laissant guider par les principes des algorithmes génétiques. [15]

#### II.3.Principe :

Rappelons tout d'abord brièvement les différentes étapes de l'évolution génétique d'une population. Considérons un ensemble d'individus, la population donc. Initialement, ces individus présentent certaines caractéristiques, les gènes. L'ensemble des gènes d'un individu est appelé le génotype. La première étape est la sélection : seuls les individus les mieux adaptés à leur environnement peuvent se reproduire, et donc transmettre une partie de leurs "meilleurs" gènes à la génération suivante.

Lorsque deux individus se reproduisent, leurs gènes sont croisés dans les cellules de l'enfant, c'est-à-dire que certaines allèles de l'individu A se combinent avec d'autres allèles de l'individu B pour former de nouveaux gènes. On appelle ce phénomène un brassage génétique. Il existe deux

types de brassages : les brassages inter chromosomiques et les brassages intra chromosomiques. Ces deux notions sont développées en annexe.

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

A ce premier facteur de diversité s'ajoute la possibilité d'une mutation de certains gènes. Généralement, la probabilité d'une mutation est très faible, mais ce phénomène doit être pris en compte pour obtenir un algorithme complet. L'enfant issu des individus A et B a donc un génotype différent de celui de ses parents. Suite à cette reproduction, on obtient une nouvelle génération d'individus, qui devient la nouvelle population initiale. Les trois étapes de sélection, croisement et mutation sont à nouveau opérées pour obtenir une nouvelle génération, et l'on réitère le processus un grand nombre de fois, puisque la sélection naturelle se fait sur un temps long. C'est ce principe-même, résumé dans la figure (13) qui est retranscrit dans les algorithmes génétiques, avec de légères variations liées notamment aux contraintes informatiques. En effet, la taille de la population ne peut être ni croissante pour des raisons de coût en temps, ni décroissante, car à mesure que le nombre d'individus diminue, des solutions potentiellement optimales peuvent disparaître. [16]

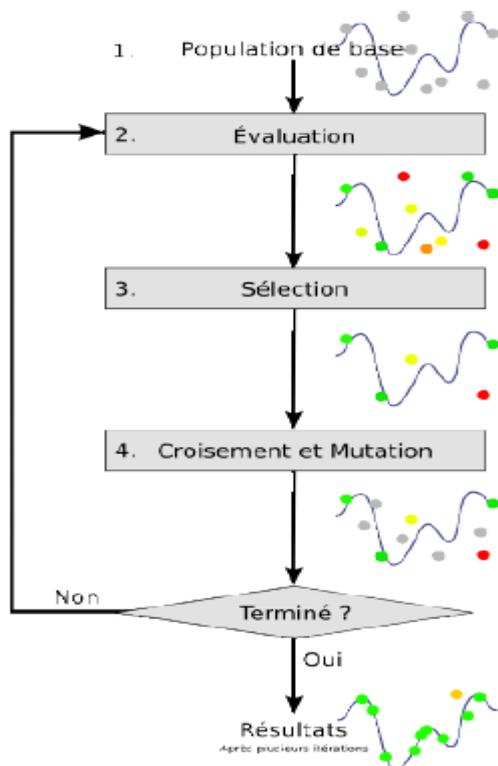


Figure II. 13. Schéma simplifié du principe de fonctionnement d'un algorithme génétique

## **Chapitre II : Modélisation et Simulation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice**

---

### **II.4.Généralités sur les algorithmes génétiques :**

Les algorithmes génétiques sont des techniques de recherche basées sur la théorie de l'évolution naturelle des espèces énoncée par Darwin. Ils se sont avérés très efficaces dans la résolution des problèmes complexes dans des différentes disciplines [17].

Ces algorithmes manipulent un ensemble de points dans l'espace de recherche, appelés population d'individus. Chaque individu ou chromosome représente une solution possible du problème donnée. Il est constitué d'éléments, appelés gènes, dont les valeurs sont appelées allèles. Les algorithmes génétiques font évoluer cette population d'individus par générations successives, en utilisant des opérateurs inspirés de la théorie de l'évolution qui sont la sélection, le croisement et la mutation. Le déroulement des algorithmes génétiques standards, peut être résumé comme suit :

- Génération de la population initiale,
- Sélection,
- Reproduction (croisement et mutation),
- Remplacement par la nouvelle population,

### **II.5.Conception d'un algorithme génétique :**

La simplicité de mise en œuvre et l'efficacité constituent deux des caractéristiques les plus attrayantes de l'approche proposée par les AGs. La mise en œuvre d'un algorithme génétique sollicite la disponibilité [18], [19] : d'une représentation génétique du problème, c'est-à-dire un codage approprié des solutions sous la forme de chromosomes. Cette étape associe à chacun des points de l'espace de recherche une structure de données. Elle se place généralement après une phase de modélisation mathématique du problème traité. La qualité du codage des données conditionne le succès des algorithmes génétiques ; d'un mécanisme de génération de la population initiale. Ce mécanisme doit être capable de produire une population non homogène qui servira de base pour les générations futures. Le choix de la population initiale est important car il peut prendre plus ou moins rapidement la convergence vers l'optimum global. Dans le cas où l'on ne connaît rien sur le problème à résoudre, il est essentiel que la population initiale soit répartie sur tout le domaine de recherche ;

d'une fonction d'évaluation pour mesurer la force de chaque chromosome ; d'un mode de sélection des chromosomes à reproduire ; des opérateurs permettant de diversifier la population au cours des générations et d'explorer l'espace de recherche. L'opérateur de croisement recompose les gènes d'individus existant dans la population, l'opérateur de mutation a pour but de garantir l'exploration de l'espace de recherche ; des valeurs pour les

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

---

paramètres qu'utilise l'algorithme : taille de la population, nombre total de générations ou critère d'arrêt, probabilités de croisement et de mutation.

### II.6. 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.
- 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.

### II.7. Comment fonctionne l'algorithme génétique ?

Un algorithme génétique fonctionne typiquement à travers un cycle simple de quatre étapes [20]:

1. création d'une population de chromosomes ;
2. évaluation de chaque chromosome ;
3. sélection des meilleurs chromosomes ;
4. manipulation génétique, pour créer une nouvelle population de chromosomes.

### II.8. Codage :

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

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

gènes qui facilite la description du problème et respecte ses contraintes [21]. La littérature définit deux types de codage : binaire et réel.

### II.8.1. Codage binaire :

Le codage classique utilise l'alphabet binaire : 0,1. Dans ce cas le chromosome représente simplement une suite de 0 et de 1. Le codage binaire est également indépendant des opérateurs génétiques (croisement et mutation) du moment où ces derniers ne nécessitent aucune spécification. En effet, toute manipulation d'un chromosome donne naissance à un nouveau chromosome valide. Dans la pratique, le codage binaire peut présenter des difficultés. En effet, il est parfois très difficile ou très lourd de coder des solutions de cette manière. En outre, dans certains cas la taille mémoire requise peut devenir prohibitive [21].

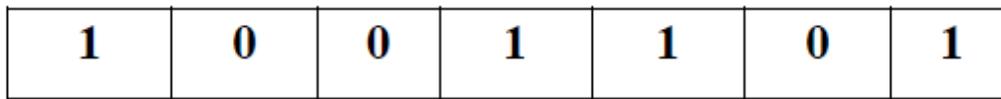


Figure. II.14. Exemple d'un codage binaire d'un chromosome.

### II.8.2 Codage réel :

Pour certains problèmes d'optimisation, il est plus pratique d'utiliser un codage réel des chromosomes. Un gène est ainsi représenté par un nombre réel au lieu d'avoir à coder les réels en binaire puis de les décoder pour les transformer en solutions effectives. Le codage réel permet d'augmenter l'efficacité de l'algorithme génétique et d'éviter des opérations de décodage supplémentaires. En effet, un chromosome codé en réels est plus court que celui codé en binaire. [21].



Figure. II.15. Exemple d'un codage réel d'un chromosome

### II.8.3. Codage à l'aide de suite alphabétique

Une troisième approche est de représenter des individus dans un AG comme une suite de caractères, où chaque caractère représente encore un aspect spécifique de la solution. Ce type de codage est utilisé dans de nombreux cas pour pousser des algorithmes génétiques comme en bioinformatique [21].

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

A	-	G	T	C
---	---	---	---	---

Figure II.16. Codage alphabétique d'un chromosome

### II.8.4 Codage sous forme d'arbre :

Ce codage utilise une structure arborescente. Un arbre est une structure de données munie d'une racine dans laquelle peuvent être issus un ou plusieurs enfants. Parmi les avantages de ce type de codage, son utilisation dans le cas de problèmes où les solutions n'ont pas une taille finie [21].

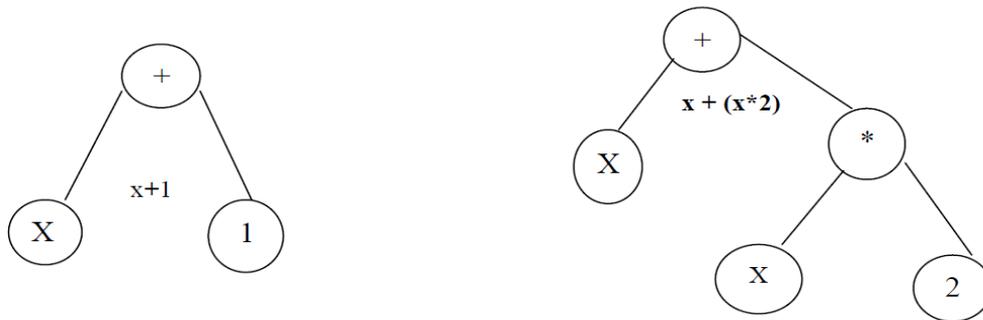


Figure. II.17. Exemple de codage sous forme d'arbre

### II.9. Conclusions

Nous l'avons vu, un algorithme génétique peut-être un algorithme très efficace pour déterminer un panel de solutions potentiellement optimales, qui peuvent par la suite être affinées par d'autres méthodes d'optimisation. L'avantage, et l'inconvénient, de ce type d'algorithmes, est qu'il cherche une solution "à l'aveugle", au contraire de méthodes comme le gradient conjugué. Ceci peut faire perdre beaucoup de temps, mais également révéler des alternatives intéressantes et inattendues. Toutefois, il est possible de combiner plusieurs algorithmes afin de donner une direction privilégiée à cette méthode de sélection. Les algorithmes génétiques sont donc une méthode d'optimisation intéressante et tendent à montrer ce que C. Darwin avait compris il y a 150 ans.

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

---

### Références

- [1] HOUIDEG Abdellah, Transfert de charge et frottement Fibre-Matrice d'un Matériau Composite (T300/914)., Mémoire de Magister Université des Sciences et de la Technologie d.Oran, « Mohamed Boudiaf » .; 2011/2012.
- [2] E. Darque-Ceretti, \_Adhésion - Adhérence, Cycle de cours de l'ENSMP, Cemef, 2001
- [03] J. M. BERTHELOT, Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures. 1992, Paris, Masson, p.615,
- [04] SANDHU R.S., Non linear of unidirectionel angle-ply laminates», Journal Aircraft, 1975, Vol.13, pp 104-111
- [05] B. Bonnet. Comportement au choc de matériaux composites pour applications automobiles ». Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
- [06] AHLSTROM C, Interface fibre de verre/matrice poly époxyde. Introduction d'une interphase à propriétés contrôlées, Thèse de doctorat, 1991, 296p.
- [07] BERTHELOT, J. M., Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures». Paris, Masson, 1992, 615 p.
- [08] [11] BERTHELOT, J. M. « Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures. Paris, Masson, 1992, 615 p.
- [09] B.KACIMI., Comportement aux chocs des composites a renfort verre et matrice organique. Mémoire de magister, UMMTO,2009/2010.
- [10]HLCox, «L'élasticité et la résistance du papieretd'autres matières fibreuses», Brit. J. Appl. Phys., 12, 72-79(1952).
- [11] W. Weibull “ Theory of the strength of materials”, Royal Swedish Academy of Eng. Sci. Proc., (1939) 151, 1-45.
- [12] Holland JH, "Adaptation in natural and artificial systems", University of Michigan Press, USA, 1975.
- [13] Goldberg D, "Genetic algorithm in search, optimization and machine learning", Addison Wesley, USA, 1989.
- [14] Jong KD, "Adaptive system design : A genetic approach", Journal in Electrical and Electronics Engineering Transactions on Systems Man and Cybernetics, Vol 10, N°3, pp 556–574, 1980.

## **Chapitre II : Modélisation et Simulation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice**

---

- [15] Youssef Harrat. "Contribution à l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance : Application au cas d'un job Shop". Thèse de Doctorat, L'U.F.R des Sciences et Techniques, Université de Franche-comté, 2003.
- [16] Nadia Selmani., Algorithmes génétiques, Rapport de projet. page 5.
- [17] Pei-Chann Chang, Shih-Shin Chen, Chin-Yuan Fan, Mining gene structures to inject artificial chromosomes for genetic algorithm in single machine scheduling problems. Applied Soft Computing 8, 767–777, 2008
- [18] Les algorithmes génétiques application à la segmentation des images. Ecole Nationale Polytechnique, Laboratoire Signal & Communications.
- [19] David E.Goldberg. Algorithmes génétiques Exploitation, optimisation et apprentissage automatique". Addison-Wesley, France, SA, 1994.
- [20] Youssef Harrat. Contribution à l'ordonnancement conjoint de la production et de la maintenance : Application au cas d'un job Shop. Thèse de Doctorat, L'U.F.R des Sciences et Techniques, Université de Franche-comité, 2003.
- [21] Layeb A, Introduction aux metaheuristiques", Formations Academiques, 2009. Site: [lmdacad.org/download/courses/m2/chapitre5\\_layeb\\_ROA.pdf](http://lmdacad.org/download/courses/m2/chapitre5_layeb_ROA.pdf).

# **CHAPITRE III**

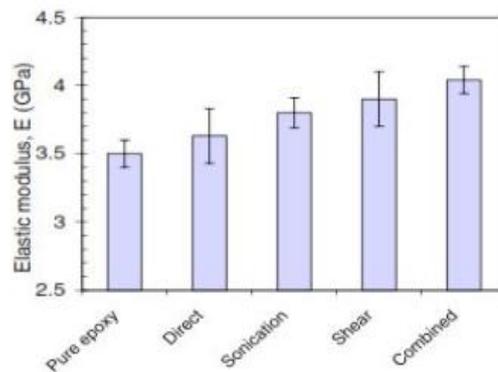
**Résultats et**

**Discussions**

**1. Introduction :**

L'objectif de ce travail est de montrer l'effet des nanoparticules de graphite sur l'endommagement de l'interface fibre - matrice d'un matériau Bio-nano-composite qui constitue de la fibre naturelle Chanvre et de la matrice graphite-époxyde par un algorithme génétique. Ce matériau partage une intéressante alternative pour l'environnement et l'industrie dont les bonnes propriétés mécaniques ont été les résultats expérimentale de l'étude qui ont été menée par Yasmine et al. [1].

Il existe plusieurs méthodes et brevets qui ont été consacrés à la préparation et à la production de nanocomposites à base de résine époxy et de nanoparticules de graphite [1-4]. Dans cette étude, nous avons utilisé les résultats expérimentaux sur les nanocomposites époxy graphite trouvés par Yasmine et al. [1] pour valider notre approche génétique (voir la figure 1).



**Figure 1 :** Influence de différentes techniques de traitement sur la valeur ee module élastique d'un nanocomposite graphite-époxye .

**2. Développement :**

**2.1 Renforcement :**

Le tableau ci-dessous présente les propriétés mécaniques du renforcement (fibre Chanvre).

**Tableau 1.** Propriétés mécaniques du renforcement.

Fibre	Densité(g/m <sup>3</sup> )	Contrainte de rupture en traction GPa	Module de rupture en traction Gpa	Diamètre de la fibre élémentaire (µm)	Allongement à la rupture (%)
Chanvre	1.3	0.7	60	20	3

## 2.2. Les modèles analytiques

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

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

Avec :

- $(\sigma)$  : la contrainte appliquée ;
- $(\sigma_m^T)$  : la contrainte thermique ;
- $(V_m)$  : le 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  $L_1 = L * X$  et  $L_2 = L * (1 - X)$  (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. [7]

Une fibre rompue est déchargée sur toute sa longueur [5]. C'est-à-dire qu'elle ne peut se rompre qu'une fois. La rupture obéit à une loi similaire à celle décrite pour la matrice.

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

Avec :

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

Pour l'interface leur endommagement se basant sur le modèle de Cox [6] qu'est défini par la relation suivante :

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

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

Avec :

$(G_m)$  : module de cisaillement de la matrice ;

- $(E_f)$  : module de Young de la fibre ;
- $(\varepsilon)$  : la déformation ;
- $(a)$  : rayon de la fibre ;
- $(R)$  : la demi distance ;
- $(\tau)$  : la contrainte de cisaillement de l'interface;

### 3. Simulation numérique par un algorithme génétique :

#### 3.1. Développement :

L'objectif de cette étude est de montrer l'effet des nanoparticules sur la résistance de l'interface fibre-matrice des matériaux bio-nanocomposite constitué de la fibre chanvre et de la matrice graphite-époxyde. Notre simulation génétique consiste à utiliser les valeurs de chacune des propriétés mécaniques pour calculer chaque fois le niveau de l'endommagement de l'interface en utilisant les équations de Weibull (1,2) et l'équation de Cox (3). L'endommagement à l'interface est déterminé par l'intersection du deux ; de la fibre chanvre et de la matrice graphite-époxyde. 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/époxyde et chanvre/graphite-époxyde). Les calculs numériques sont effectués à l'aide du logiciel Matlab R2010a.

3.2. Organigramme.

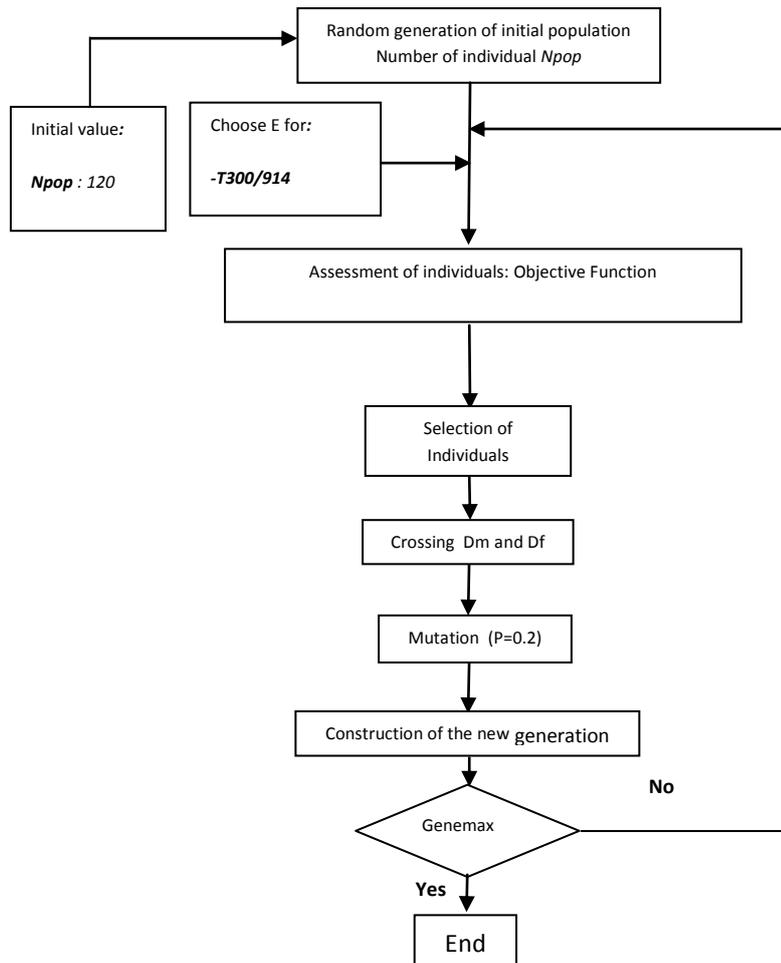


Figure III.2 : L’organigramme de l’algorithme génétique. [7]

4. Résultats de simulation :

Pour affirmer notre approche, un calcul a été réalisé sur deux types de matériaux composites chanvre /graphite-époxyde et carbone/époxyde. D’après les résultats de simulation par un Algorithme génétique. Nous avons examiné la résistance de notre matériau par l’application de différentes contraintes ( $\sigma$  (90 N/m<sup>2</sup>),  $\sigma$  (110 N/m<sup>2</sup>),  $\sigma$  (130 N/m<sup>2</sup>)), ce qui nous permis de calculer l’endommagement de l’interface fibre matrice de composite. Les figures III.3, III.4, III.5 et III.6, III.7, III.8 montrent le niveau de l’endommagement à l’interface de l’Chanvre /graphite-époxyde et carbone /époxyde.

#### 4.1. Carbone /époxyde :

Les figures III.3, III.4 et III.5 montrent que l'endommagement "D" de l'interface commence au niveau de  $0.26 \sigma$  ( $90 \text{ N/m}^2$ ), puis augmente jusqu'à une valeur maximal de  $0.48$  de  $\sigma$  ( $130 \text{ N/m}^2$ ), on remarque la présence d'une symétrie de l'endommagement à l'interface, dense au milieu et faible aux extrémités. On peut dire que l'augmentation de niveau de l'endommagement signifié la concentration des contraintes qui donne une forte dégradation de l'interface dans le milieu par rapport aux extrémités.

#### 4.2. Chanvre /graphite-époxyde :

Les figures 6, 7 et 8 montrent que l'endommagement "D" de l'interface commence au niveau de  $0.2$  de  $\sigma$  ( $90 \text{ N/m}^2$ ), puis augmente jusqu'à une valeur maximal de  $0.36$  de  $\sigma$  ( $130 \text{ N/m}^2$ ), on trouve la présence d'une symétrie de l'endommagement à l'interface, qui dense au milieu et faible aux extrémités. On peut aussi dire que l'augmentation de niveau de l'endommagement signifié la concentration des contraintes qui donne une forte dégradation de l'interface dans le milieu par rapport aux extrémités, des valeurs inférieures à celles trouvées pour carbone /époxyde.

#### Carbone /époxyde :

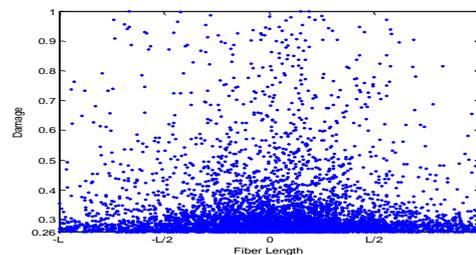


Figure III.3 : L'influence de la contrainte  $\sigma$  ( $90 \text{ N/m}^2$ ) sur l'endommagement de l'interface

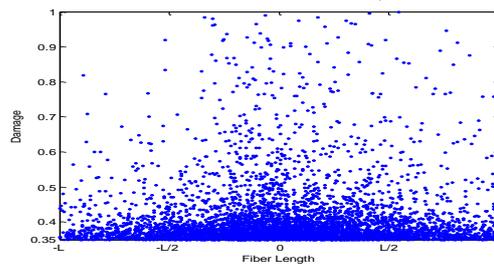


Figure III.4 : L'influence de la contrainte  $\sigma$  ( $110 \text{ N/m}^2$ ) sur l'endommagement de l'interface

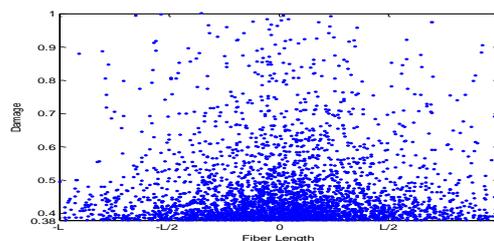


Figure III.5 : L'influence de la contrainte  $\sigma$  ( $130 \text{ N/m}^2$ ) sur l'endommagement de l'interface

Chanvre /graphite-époxyde

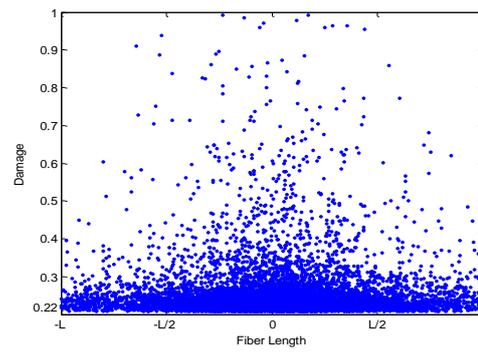


Figure III.6: L'influence de la contrainte  $\sigma$  ( $90\text{N/m}^2$ ) sur l'endommagement de l'interface

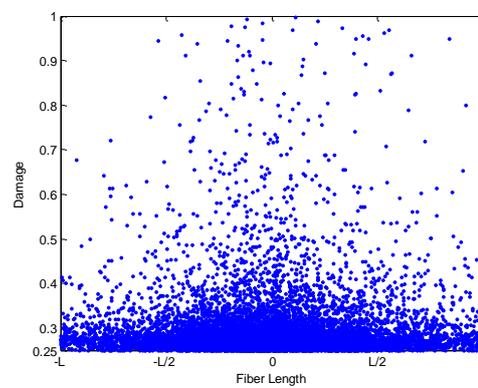


Figure III.7: L'influence de la contrainte  $\sigma$  ( $110\text{N/m}^2$ ) sur l'endommagement de l'interface

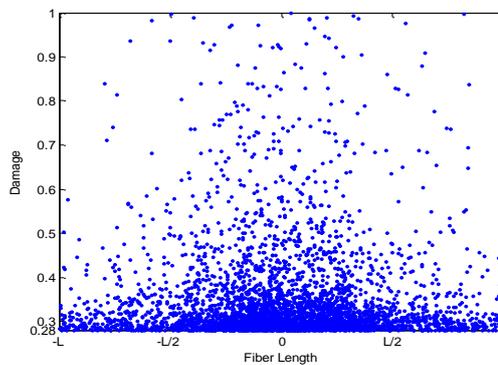


Figure III. 8: L'influence de la contrainte  $\sigma$  ( $130\text{N/m}^2$ ) sur l'endommagement de l'interface

**5. Conclusion :**

Les résultats trouvés par un calcul génétique montrent que le niveau de l'endommagement est lié à la résistance de matériau pour les deux composites qui ont été étudiés chanvre /graphite-époxyde et carbone /époxyde, et montrent, aussi, une bonne concordance entre la simulation numérique et le comportement réel des deux matériaux. La simulation numérique fait ressortir que l'Chanvre /graphite-époxyde est une résistance supérieure à celle de carbone /époxyde.

Les résultats obtenus dans notre étude coïncident exactement avec les résultats expérimentaux Yasmine et al. [1] qui a montré que les nanoparticules de graphite sont des bons renforts de la matrice époxyde et cette matrice présente des meilleures propriétés mécaniques. les résultats trouvés ont montré que notre matériau est résistant, notamment, une partie de ce matériau est d'origine naturelle qui nous donne plus d'avantage environnementale.

**Références**

- [1] Yassmine, R., Teng, Y.T. Nanocomposite, Electrode containing the Nanocomposite, and method of making the Nanocomposite. WO2015108486 (2015).
- [2] Wu, Z., Sun, T. Epoxy resin nanocomposite and preparation method thereof. CN104194277 (2014).
- [3] Buketov, A.V., Sapronov, O.O., Yarema, I.T. Method for curing Epoxy Nanocomposite with Enhanced mechanical-andphysical properties. UA89897 (2014).
- [4] Atar, N., Grossman, E., Guzman, I., Sfez, B. Thermal interface Nanocomposite. WO2014204828 (2014).
- [5] W. Weibull “ Theory of the strength of materials”, Royal Swedish Academy of Eng. Sci. Proc., , (1939) 151, 1-45.
- [6] Cox H.L. “The elasticity and strength of paper and other fibrous materials”. British journal of applied physics, 12, 72–79, 1952.
- [7] Mokaddem A, Alami M, Doumi B and Boutaous A, Prediction by a genetic algorithm of the fiber matrix interface damage for composite material. Part1: study of shear damage to two composites T300/914 and Peek/APC2. Strength Mate 2014; 46(4): 543-7.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

En conclusion générale, nous rappelons que les matériaux étudiés sont Chanvre /graphite-époxyde et carbone /époxyde, 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. La simulation numérique montre, aussi, une concordance avec le comportement réel des matériaux étudiés. Les résultats de simulation numérique font ressortir que Bio-nanocomposite Chanvre /graphite-époxyde est plus résistant que le matériau composite carbone/époxyde. Ce qui signifie que les nanoparticules de graphite modifient les propriétés mécaniques de la matrice époxyde et la transforment à une matrice plus résistante aux contraintes mécaniques appliquées.

Nous avons trouvé que les résultats de notre étude coïncident avec leurs résultats trouvés par Yasmine et al. et que ce Bio-nanocomposite est résistant à l'aide du renforcement de la matrice.

Finalement, nous pouvons donc dire que notre modèle est bien fonctionné par rapport au phénomène de l'endommagement d'un bio-nanocomposite en fonction de renforcement de la matrice par les nanoparticules de graphite.

Il serait intéressant de voir, par la suite, l'effet des contraintes thermiques sur l'endommagement de l'interface fibre matrice d'un bio-nanocomposite.

## Résumé

L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de renforcement de la matrice par des nanoparticules sur l'endommagement de l'interface fibre-matrice d'un bio-nanocomposite. Notre modélisation génétique sera basée sur les modèles probabilistes pour localiser et calculer le niveau d'endommagement de l'interface en fonction des taux de renforcement.

### التلخيص:

وكان الهدف من هذا العمل لدراسة تأثير مصفوفة يعزز من الجسيمات النانوية على الأضرار التي لحقت الألياف مصفوفة واجهة بمركب متناهي في الصغر الحيوي. وسوف يستند لدينا نماذج الجيني على النماذج الاحتمالية لتحديد وحساب مستوى الأضرار التي لحقت معدلات بناء واجهة القائمة.