

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. KECHNA Halima**

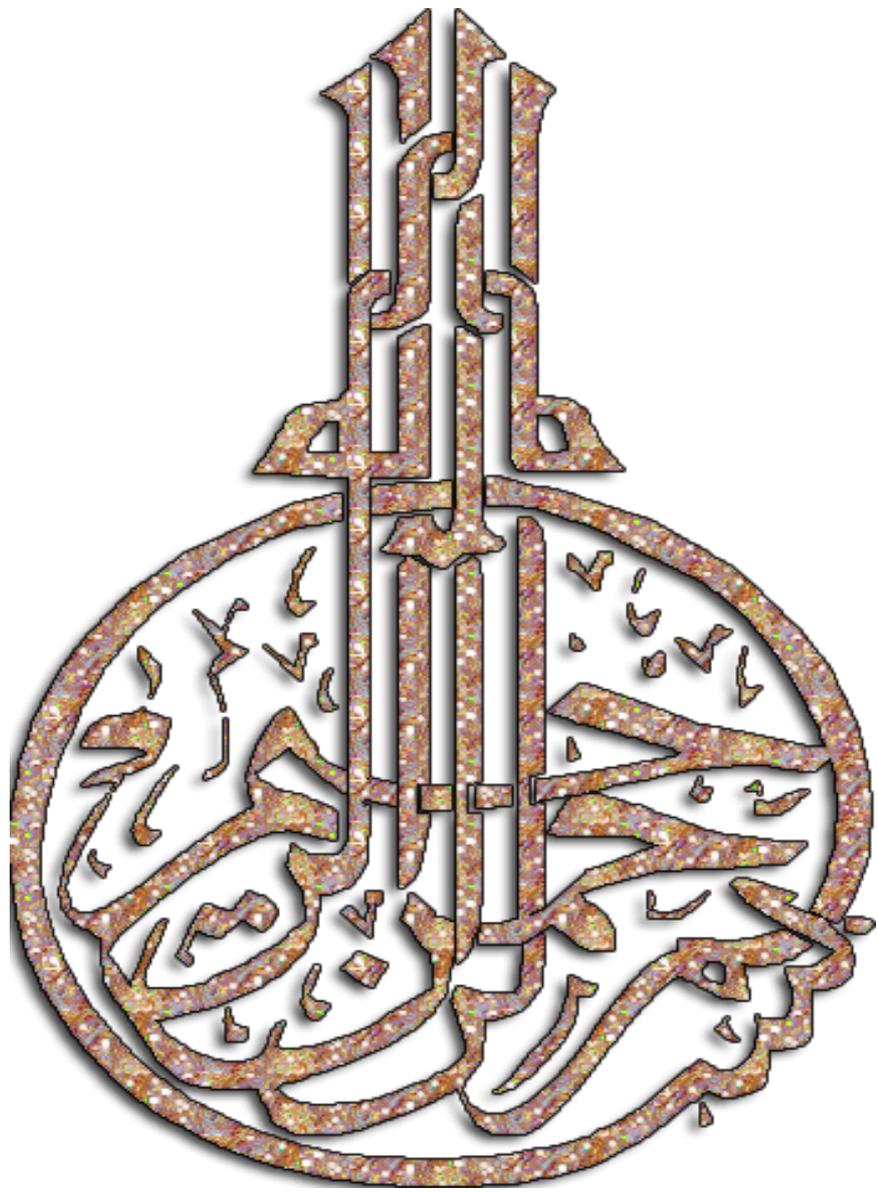
Sur le thème

**Simulation de l'effet d'humidité sur l'endommagement  
de l'interface d'un composite hybride.**

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.B El Bayadh)	Rapporteur
M. DOUMI	Bendouma	Maître de conférences A	(Université de Saïda)	Co-Encadreur
M. BOUDALI	Abdelkader	Maître de conférences A	(Université de Saïda)	Examineur
M. BOUTALEB	Miloud	Maître de conférences B	(Université de Saïda)	Examineur

**Année Universitaire 2016 – 2017**



# Remerciements

## Remerciements

*Nous tenons tout d'abord à remercier ALLAH le tout puissant et miséricordieux, qui nous a donné la force et patience d'accomplir ce modeste travail.*

*En second lieu, nous tenons à remercier notre encadreur :Monsieur MOKADDEM ALLEL ,pour sa disponibilité ,sa patience ,son précieux conseil et son aide qui ont contribué à orienter et à réaliser notre recherche et notre réflexion durant tout la période du travail.*

*Nous remercions de tout cœur les enseignants de département de physique.*

*Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et l'enrichir par leur propositions .*

*Nos remerciements s'étendent également à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études spécialement :Doumi Bendouma*

*En fin , nous adressons nos plus sincères remerciements à toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Dédicaces

## Dédicaces

*Je dédie le fruit de cet effort aux deux bougies qui ont veillé pour mon avenir :*

*A mon adorable maman « milouda » pour tous les efforts qu'elle a fournis pour devenir ce que j'en suis. Merci pour m'avoir donné cette force de réussir et de toujours aller au bout de ce qu'on entreprend.*

*A mon très chère père « Mohamed » qui m'a soutenu et a été toujours à mes cotés et m'a permis d'arriver où j'en suis aujourd'hui . C'est son soutien inébranlable qui me mène sur le chemin de la réussite.*

- *A mon très chères frère : Ben Ameer , Lakhdar , Ahmed , Laid , sliman*
- *A mes très chères sœurs « Fatna , Houria , Fatiha, Aicha , Meriem, Naima, Malika, Saadia.*
- *A tous les membres de ma famille , petits et grands*

- *A tous ceux qui me sont chers spécialement le petite : « Ibtissam Issra »*
- *A mes chères amis : Nadjet , Fatiha, Rafika, Dhiba.H , Amina.H, Soumia.H, Assma.G*

- *A toute la promotion du spectroscopie*  
*-2016-2017-*  
*\* HALIMA \**

# SOMMAIRE

Liste Des Figures

Liste Des Tableaux

Dédicace

Remerciement

Introduction générale.....	1
Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybrides.....	2
I.1.Introduction.....	2
I.2 .Matériaux hybrides.....	2
I.2 .1 Qu'est ce qu'un matériau hybride.....	2
I.2 .2 Caractérisation des matériaux hybrides .....	3
I.3. Définition d'un matériau composite .....	3
I.3.1 : Type de matériaux composites.....	4
I.3.1.1 Les composites à grande diffusion.....	5
I.3.1.2 Les composites à haute performances.....	5
I.3.2 Matrices.....	5
I.3.2.1 Résines thermodurcissables.....	6
I.3.2.2 Résines thermoplastiques.....	6
I.3.3. Additifs.....	7
I.3.4.Renforts.....	7
I.3.4.1.Fibres de verre.....	8
I.3.4.2. Fibres de carbone.....	8
I.3.4.3.Fibres aramides.....	8
I.3.4.4. Fibres céramique.....	9
I.3.4.5.Caractéristiques mécaniques des fibres.....	9
I.4.Composite hybride.....	9
I.5. Nature des fibres de carbone employées dans la fabrication des composites .....	11
I.6.Composites à base de fibres de carbone.....	12
I.6.1 Résines employées (matrices).....	12
I.6.2.Matrice Epoxydes.....	13
I.7. Présentation générale de fibre Sisal .....	13
I.7.1 Définition.....	13
I.7.2.Les fibres de sisal.....	14
I.7.3.Domaines d'utilisations.....	15
I.8.Conclusions .....	16
Chapitre II : Modélisation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice...	17
Partie I : Modélisation de l'endommagement.....	17
II.1 Introduction .....	17

II.1.1 : Endommagement des matériaux composites.....	17
II.1.2. L'interface fibre matrice.....	18
II.1.3 .Comportement de l'interface fibre-matrice dans les composites.....	18
II.1.4.Comportement d'un composite unidirectionnel.....	19
II.1.4.1.- Cas d'une interface très forte.....	19
II.1.4.2 - Cas d'une interface très faible.....	20
II.1.4.3 - Cas d'une interface relativement faible.....	20
II.1.5.Liaison interfaciales .....	21
II.1.6.Mécanismes de rupture de matrices céramiques renforcées par des fibres céramiques .....	21
II.1.6.1.Fissuration matricielle et décohésion fibre-matrice.....	21
II.1.6.2.Fragmentation des fibres.....	22
II.1.7.Module de Weibull .....	22
II.1.8. Module de Cox .....	24
II.1.8.1. Equilibre des forces de cisaillement.....	25
II.1.8.2. Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre... ..	27
Partie II : Les algorithmes génétiques et leurs applications.....	29
II.2. Introduction.....	29
II.2.1.Algorithme génétique.....	29
II 2.2. Les opérateurs des algorithmes génétiques.....	30
II 2.2.1 La sélection.....	30
II 2.2.2 Le croisement.....	31
II 2.2.3.La mutation.....	32
II 2.3.Fondements des algorithmes génétiques.....	33
<b>II 2.4.CONCLUSION.....</b>	<b>34</b>
Chapitre III : Résultats et Discussions.....	35
III .2. Développement.....	35
III. 2.1. Définitions.....	35
III. 2.2 Les mécanismes de diffus.....	36
III .3. Simulation numérique par un algorithme génétique.....	38
III 3.1. Développement.....	38
III .3.2. Organigramme.....	39
III .4. Résultats de simulation.....	39
III .4.1. Carbone /époxyde .....	40
III .4.2. Sisal-carbone /époxyde.....	40
III .5. Conclusion.....	42
Conclusion générale.....	43

## Liste Des Figure

<b>Figure I.1</b> : schéma général d'un matériau composite.....	4
<b>Figure I.2</b> : Composition générique d'un matériau composite.....	4
<b>Figure I.3</b> Types de Matrices.....	5
<b>Figure I.4</b> : Type de renforts.....	7
<b>Figure I.5.</b> les structures géométrique des renforts au sein de la matrice continue : (a) : fibres longues , (b) :fibres courtes ,(c) :particules.....	8
<b>Figure I.6</b> : Illustration de certaines formes commercialisées de fibres de carbone...	11
<b>Figure I.7</b> : fibres mécanique.....	14
<b>Figure I.8</b> :fibres de rubanées.....	15
<b>Figure I.9</b> :fibres de rubanées.....	15
<b>Figure I.10</b> : Utilisateurs de Fibre de sisal.....	16
<b>Figure II.1</b> : Modes d'endommagement.....	20
<b>Figure II.2</b> : Liaison interfaciale d'un Matériau composite.....	21
<b>Figure II.3</b> : Etude de la fissuration matricielle.....	22
<b>Figure II.4</b> : volume élémentaire représentatif.....	25
<b>Figure II.5</b> : volume élémentaire représentatif.....	26
<b>Figure II.6</b> : Équilibre élastique dans une portion de fibre.....	28
<b>Figure II.7</b> : modèle de Cox : profil des contraintes fibre/interface.....	30
<b>Figure II .8</b> : Croisement à un point.....	33
<b>Figure II .9</b> : Croisement à deux point .....	33
<b>Figure II .10</b> : Illustration du principe de la mutation.....	34
<b>Figure III.1</b> : Théorie des volumes libres.....	37
<b>Figure III.2</b> : Cinétique de diffusion de l'eau dans un matériau polymère.....	37

<b>Figure III.3</b> : L'organigramme de l'algorithme génétique.....	39
<b>Figure III.4</b> : L'influence de l'humidité sur l'endommagement de l'interface $\sigma$ (80N/m <sup>2</sup> ).....	40
<b>Figure III.5</b> : L'influence de l'humidité sur l'endommagement de l'interface $\sigma$ (100N/m <sup>2</sup> ).....	41
<b>Figure III.6</b> : L'influence de l'humidité sur l'endommagement de l'interface $\sigma$ (120N/m <sup>2</sup> ).....	41
<b>Figure III.7</b> : L'influence de l'humidité sur l'endommagement de l'interface $\sigma$ (80N/m <sup>2</sup> ).....	41
<b>Figure III.8</b> : L'influence de l'humidité sur l'endommagement de l'interface $\sigma$ (100N/m <sup>2</sup> ).....	42
<b>Figure III.9</b> : L'influence de l'humidité sur l'endommagement de l'interface $\sigma$ (120N/m <sup>2</sup> ).....	42

## Liste Des Tableaux

<b>Tableau I.1 :</b> Tableau résume les Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	6
<b>Tableau I.2 :</b> Tableau résume les Caractéristiques mécanique des résines thermoplastiques .....	6
<b>Tableau I.3 :</b> Tableau résume les Caractéristiques mécaniques des fibres.....	9
<b>Tableau I.4 :</b> Tableau des matériaux composites à base de composition.....	10
<b>Tableau I.5 :</b> Propriétés mécanique en traction des compositions sec et humide.....	11
<b>Tableau I.6 :</b> Les critères essentiels des matrices thermoplastiques et thermodurcissables.....	13

# **Introduction générale**

Les pièces et structures mécaniques, que nous utilisons et manipulons quotidiennement, sont toutes constituées d'une matière donnée, choisie pour sa bonne adaptation à la fonction de l'objet en question et au procédé utilisé pour lui conférer la forme souhaitée. La notion de matériau est donc rigoureusement indissociable composite de l'intérêt que peut présenter la substance en question pour la réalisation d'une pièce finie. Le matériau est alors un élément de base constituant la structure qui doit résister aux différentes sollicitations.

Les matériaux composites, au sens le plus courant du terme, sont un ensemble de matériaux de synthèse conçus et mis en œuvre essentiellement pour des applications structurales, de façon à ce que la fonction mécanique est dominante. Ces matériaux trouvent de plus en plus d'application pour la réalisation des pièces structurales de dimensions diverses, dans de nombreux secteurs industriels tels que 'aéronautique, biomédical...etc. [1].

L'utilisation croissante des matériaux composites dans les différents domaines d'application exige au concepteur de veiller à présenter un matériau de grande dureté, léger et d'un prix concurrentiel. Ce compromis nécessite de trouver une meilleure fibre et une meilleure matrice pour fabriquer un composite qui répond à ces exigences.

Afin d'atteindre cet objectif, notre mémoire est composé de trois chapitres, d'une introduction, et d'une conclusion générale.

Le premier chapitre définit les matériaux composites et les matériaux hybrides, leurs propriétés mécaniques remarquables, et leurs différentes applications dans le domaine industriel. On a réservé le deuxième chapitre à la modélisation du phénomène d'endommagement des matériaux composites par les algorithmes génétiques. Dans le troisième chapitre on a présenté nos résultats de simulation analytiques et graphiques avec une interprétation plus explicite.

### **Références :**

[1] ACHOUR Toufik, « Etude des Techniques de Réparation des structures composites endommagées » ; Université des sciences des l'ingénieur Constantine Mémoire de Magister, 2010/2011 page :1-10

# **CHAPITRE I**

## **L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride**

# Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride

---

## I.1. Introduction :

Nous utilisons tous les jours des matériaux hybrides et à titre indicatif : les tableaux de bord de voitures qui sont composés de plastiques dans les quels sont incorporées des charges inorganiques, ici du noir de carbone, qui permet des les colorer mais également de les rendre plus résistants aux UV. L'engouement pour ces matériaux touche des domaines très variés allant de la construction (adjonction de charges pour le renforcement) au domaine du biomédical (vectorisation de médicaments) en passant par la cosmétique (la silice joue le rôle d'abrasif dans les dentifrices par exemple). Nous connaissons encore une large utilisation d'un autre type de matériaux dit composites. [1-2] L'intérêt de ces matériaux composites réside dans la combinaison des propriétés d'une part, par la matrice polymère (facilité de mise en œuvre) et d'autre part, par celles du matériau inorganique (dureté, couleur) Néanmoins, la simple incorporation de ces matériaux inorganique ne permet pas une bonne dispersion dans la matrice de polymère. Pour dépasser ces inconvénients des efforts constants sont menés depuis un peu plus de 10 ans pour lier de manière covalente des particules inorganiques et des chaînes de polymères. Cette association covalente permet une excellente synergie des propriétés de ces différents matériaux associant par exemple les propriétés optique, thermique et/ ou électriques des particules inorganiques et les propriétés physico-chimiques des matériaux polymères, tout en minimisant les problèmes de dispersion et de compatibilité.[1-2]

## I.2 .Matériaux hybrides :

### I.2 .1 Qu'est ce qu'un matériau hybride :

De nos jours, les polymères occupent une place très importante de notre quotidien avec le développement des matériaux polymères dans des domaines à fortes valeurs ajoutées comme l'optique, l'électronique ou les biomatériaux, les polymères généralement disponibles ne sont pas suffisants pour répondre aux exigences de ces secteurs. Il est alors nécessaire de développer de nouveaux matériaux présentant des propriétés exceptionnelles et avec une grande facilité de mise en œuvre (souvent apportée par la composante polymère). On peut citer par exemple l'utilisation de matériaux hybrides dans des domaines comme l'opto-électronique, les systèmes catalytiques, le domaine médical ou pharmaceutique.[1]

## I.2 .2 Caractérisation des matériaux hybrides :

La Caractérisation des matériaux hybrides est un point clé de la réussite de leur préparation. En effet, en plus de contrôler la croissance de la couronne de polymère à la surface des particules, il est essentiel de suivre l'évolution de la stabilité colloïdale, dans le cas de particules en suspension, de déterminer la nature de la liaison mise en jeu entre les chaînes et le support ainsi que la densité de greffage. Pour atteindre ces différentes informations, la littérature fait état d'un grand nombre de technique. Les plus utilisés étant les suivantes :[1,2]

- La microscopie électronique en transmission, ou TEM
- La microscopie à force atomique, ou AFM
- L'analyse thermogravimétrique, ou TGA
- Calorimétrie différentielle à balayage, ou DSC
- La spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier ou FTIR
- La spectrométrie de photons X, ou XPS
- La diffraction des rayons X, ou XRD
- La diffusion de la lumière, dynamique(DLS) et statique(SLS).

## I.3. Définition d'un matériau composite :

Un matériau composite résulte d'un assemblage intime d'au moins deux corps non miscibles à structure différente dont les qualités individuelles se combinent en donnant un matériau hétérogène dont les performances globales sont améliorées. [2]

L'intérêt d'un matériau composite est de combiner les avantages des constituants pour obtenir un matériau plus performant que les constituants pris isolément ; le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas.

Les composites « Fibres-Résine » sont les plus répandus. Ils sont constitués :

1- d'une ossature conçue en volume de filaments appelée renfort ; c'est cette armature qui assure la tenue mécanique. Dans le cas de la présente étude il s'agit des fibres de carbone.

2- d'une protection : la matrice, qui lie les fibres renforts et répartit les efforts. Elle assure la protection chimique et garantit la cohésion et l'orientation des fibres. Elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les composites à matrice organique (appelés également de grande diffusion), issus de matières plastiques thermodurcissables ou thermoplastiques forment l'essentiel des composites actuellement utilisés (99 %).

# Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride

3- de charges et additifs pouvant être inclus pour modifier les propriétés du matériau (valable uniquement pour certaines applications) ( Figure I.1).

Les matériaux ainsi obtenus sont hétérogènes et anisotropes.[2]

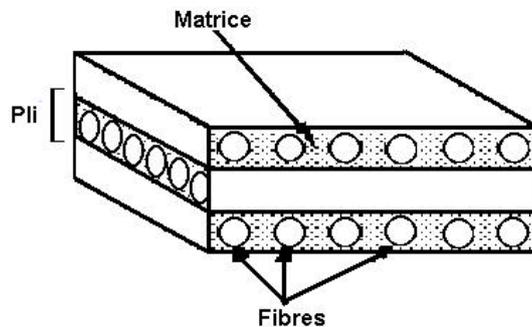


Figure I.1 schéma général d'un matériau composite

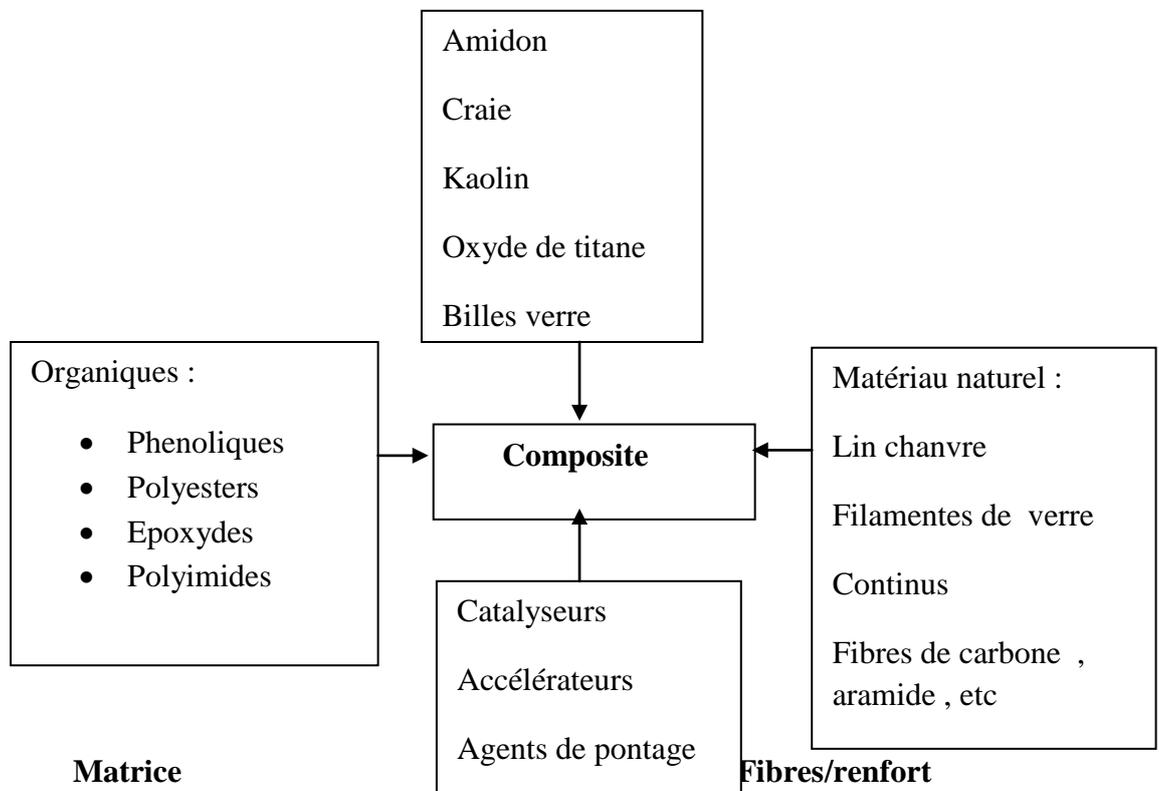


Figure I.2 Composition générique d'un matériau composite

## I.3.1 : Type de matériaux composites

Selon leur taux d'utilisation, les composites sont classés en deux grandes Classes : les composites à grande diffusion et les composites haute performances [3].

# Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride

## I.3.1.1 Les composites à grande diffusion

Ils occupent une portion de 95% des composites utilisés. Ce sont en général des Plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort est de 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes.

Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters avec des fibres de verre. Dans ce cas le renfort et la matrice sont à des coûts voisins [4].

## I.3.1.2 Les composites à haute performances

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique et sont d'un coût élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le coût. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celles des métaux, contrairement aux composites à grande diffusion. Des méthodes de calculs de structures et d'homogénéisations ont été développées pour les composites à haute performance [5]

## I.3.2 Matrices

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une résine polymère. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à matrice métallique, céramique ou carbone sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2200°C peuvent être atteintes. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée [6]

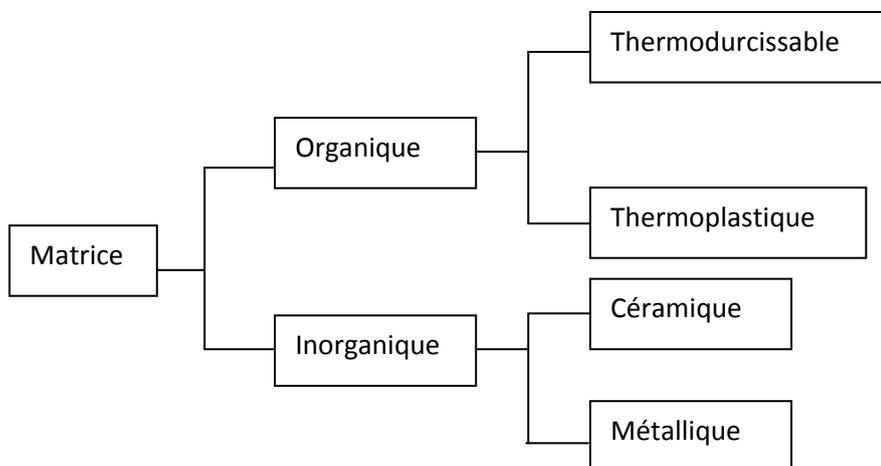


Figure.1.3 Types de Matrices

# Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride

## I.3.2.1 Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées. Ces résines ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. Elles sont en solution sous forme de polymère non réticulé en suspension dans des solvants. Les résines polyesters insaturées, les résines de condensation (phénoliques, amioplastes, furaniques) et les résines époxydes sont des résines thermodurcissables. Les exemples de résines thermodurcissables classiquement rencontrées sont 914, 5208, 70, LY556.

Les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible. Ces caractéristiques sont présentées dans le tableau I.1.

Résines	$T_f$ (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Renforte	$\sigma_t^R$ (Mpa)	$\sigma_c^R$ (Mpa)	E (Gpa)
Polyestres	60 à 100	1140	2 à 5	50 à 85	90 à 200	2.8 à 3.6
Phénoliques	120	1200	2.5	40	250	3 à 5
Eopxydes	290	1100 à 1500	2 à 5	60 à 80	250	3 à 5

**Tableau I.1** –Tableau résume les Caractéristiques des résines thermodurcissables

## I.3.2.2 Résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorure polyéthylènes, polypropylène, polystyrène, polycarbonate polyamide sont quelques exemples de ces résines thermoplastiques. Les résines thermoplastiques classiquement rencontrées sont PEEK, K3B.

De même que pour les résines thermodurcissables, les matériaux les plus performants ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible : ces dernières sont présentées dans le tableau I.2

Résines	$T_f$ (°C)	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_t^R$ (Mpa)	E (Gpa)
Polyamide	65 à 100	1140	60 à 85	1.2 à 2.5
Polypropylène	900	1200	20 à 35	1.1 à 1.4

**Tableau I.2** :Tableau résume les Caractéristiques mécanique des résines thermoplastiques

# Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride

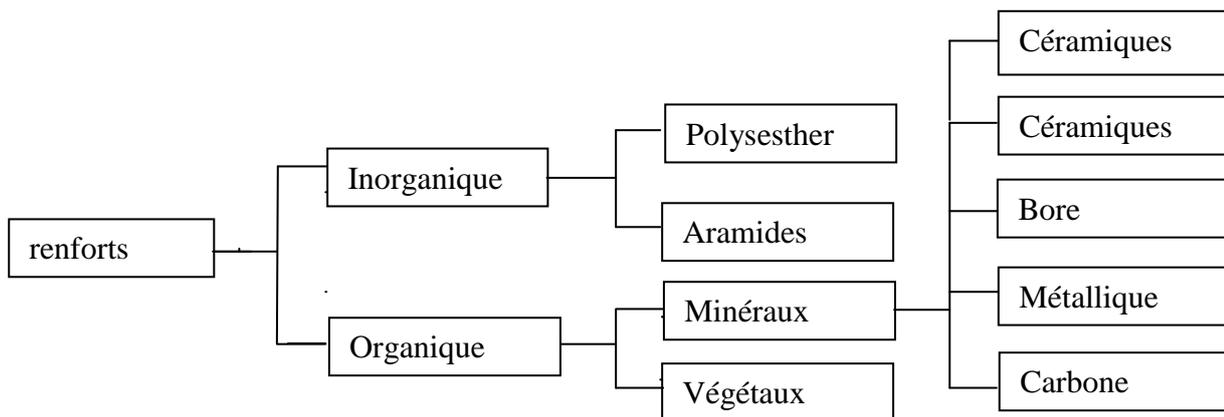
## I.3.3. Additifs

Des produits peuvent être incorporés à la résine pour renforcer les propriétés mécaniques (charges renforçantes ,ex: charges sphériques creuses 5 à 150 $\mu$ m). Des charges non renforçantes peuvent être également utilisées pour diminuer le coût des matrices en résine. Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites

## I.3.4. Renforts

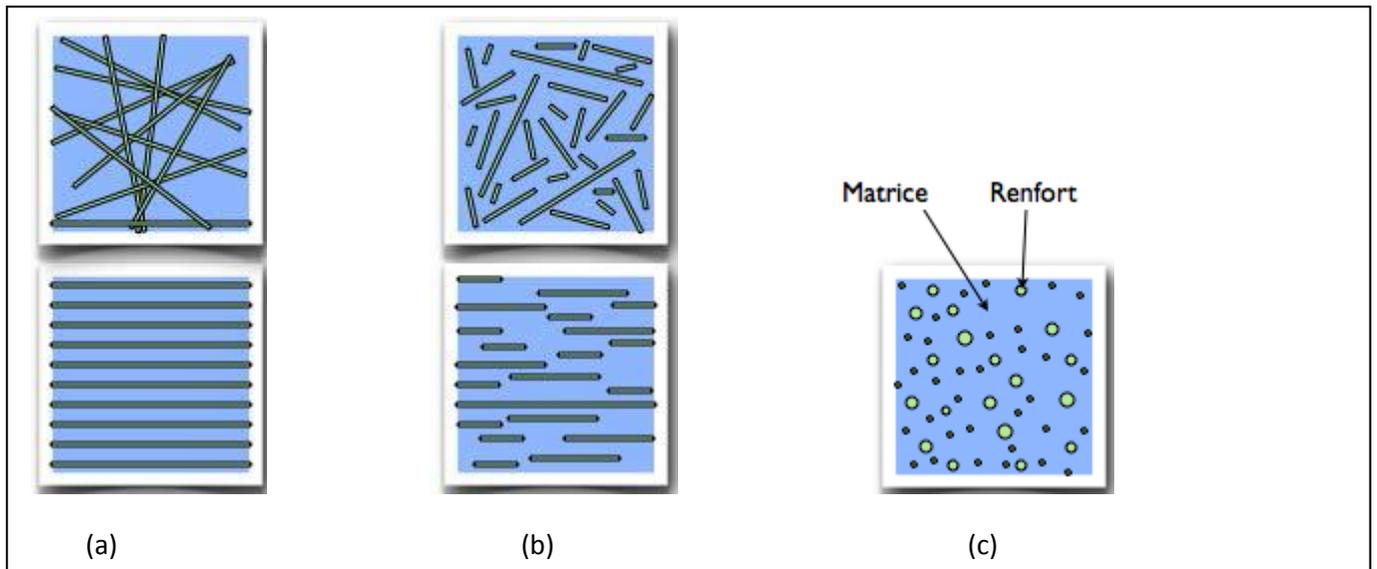
Les renforts assurent les propriétés mécaniques du matériau composite et un grand nombre de fibres sont disponibles sur le marché en fonction des coûts de revient recherchés pour la structure réalisée. Les renforts constitués de fibres se présentent sous les formes suivantes : linéique (fils, mèches), tissus surfaciques (tissus, mats), multidirectionnelle (tresse, tissus complexes, tissage tri directionnel ou plus).[7]

La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la **figure 1.3**



**Figure I.4:** Type de renforts

Fondamentalement, un composite est un matériau hétérogène qui cumule au moins deux constituants dans des phases différentes. On obtient alors un matériau qui respecte le principe suivant : « le tout est meilleur que ses parties » car les matériaux composites permettent d'atteindre des niveaux de performance supérieurs à ceux des constituants pris séparément.[8] La majorité des composites sont constitués de renforts, éléments discontinus dont des exemples d'organisations géométriques variables sont donnés dans la (Figure1.4) au sein d'une phase continue.



**Figure. I.5.** les structures géométrique des renforts au sein de la matrice continue :(a) :fibres longues , (b) :fibres courtes ,(c) :particules

### I.3.4.1.Fibres de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance–prix qui les placent de loin au premier rang des renforts utilisés actuellement dans la construction de structures composites.

### I.3.4.2. Fibres de carbone

Les fibres de carbone ont de très fortes propriétés mécaniques et sont élaborées à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Actuellement, les fibres *précurseurs* utilisées sont des *fibres acryliques* élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN). La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur.

Le principe d'élaboration est de faire subir aux fibres acryliques une décomposition thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou des huiles est également utilisé pour produire des fibres de carbone.

Quelques exemples de fibres de carbone classiquement rencontrées : T300, T800, MR40, TR50, IM6, IM7, GY, M55J.

### I.3.4.3.Fibres aramidés

Les fibres aramidés ont des propriétés mécaniques élevées en traction comme les carbonés mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des enzymages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de

# Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride

composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis).

Quelques exemples de fibres aramides : KEVLAR (Dupont de Nemours, USA), TWARON (Akzo, Allemagne-Hollande),

## I.3.4.4. Fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support.

Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques :

- fibres de Carbone de Silicium
- fibres de Bore
- fibres de Bore carbure de silicium

## I.3.4.5. Caractéristiques mécaniques des fibres

Il existe différents types de fibres. Elles peuvent être scindées en deux groupes, les fibres à haut module et les fibres à haute résistance. Les fibres à haut module ont une résistance faible et celles à forte résistance ont un module faible

Renfort	$\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	$\sigma_t^R$ (Mpa)	$\sigma_c^R$ (Mpa)	E(Gpa)
AS4	1800		3599	235
T300	1700	1.2	3654	231
IM7		088	1460	
IM8	1800		5171	310
Kevlar49	1440	2.5	3620	124
Verre E	2580	3.5	3450	69

**Tableau I.3** –Tableau résume les Caractéristiques mécaniques des fibres

# Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride

## I.4.Composite hybride

Panthpulakkal et Sain ont travaillé sur des matériaux hybrides de fibres de chanvre et de fibres de verre avec comme matrice le polypropylène . Ils ont aussi ajouté un copolymère de polypropylène et d'anhydride maléique pour étudier l'effet de la rétention d'eau sur les propriétés mécaniques. Les échantillons ont été trempés jusqu'à saturation des composites. Les Tableaux I.4 et I.5 montrent la nature hydrophile de la fibre de chanvre, car une plus grande quantité d'eau a été absorbée par les composites possédants des concentrations plus élevées en chanvre. De plus, les composites possédants davantage de fibres de verre ont gardé des propriétés mécaniques plus élevées après saturation d'eau. La fibre naturelle a tendance à absorber de l'eau, ce qui risque de faire gonfler la fibre et d'endommager la matrice l'entourant. [9-10]

Echantillon	Polypropylène (%massique)	Fibre de verre (% massique)	Fibre de chanvre (%massique)	Agent couplant (massique)
A	55	0	40	5
B	55	5	35	5
C	55	10	30	5
D	55	15	25	5

**Tableau.I.4** Tableau des matériaux composites à base de composition [10]

Echantillon	Résistance à la traction (MPa)			Module de traction (GPa)		
	Originale	Echantillon humide	Rétention (%)	Originale	Echantillon humide	Rétention (%)
Polypropylène						81
A	30,1±0,1	29,9 ±0,5	99	1,1±0,03	0,89±0,03	
B	52,5±0,6	34,0 ±0,6	65	3,77±0,05	1,64±0,04	44
	53,7 ±1,6	34,8 ±1,6	65	4,07±0,05	1,7±0,03	43

<b>C</b>	53,7 ± 1,6	34,9 ± 0,9	60	4,25 ±	2,04 ± 0,05	48
				0,04		
<b>D</b>	59,5 ± 0,9	35,5 ± 0,5	65	4,4 ± 0,01	2,32 ± 0,12	53

**Tableau I.5** Propriétés mécanique en traction des compositions sec et humide.[9-10]

### I.5. Nature des fibres de carbone employées dans la fabrication des composites :

Les fibres de carbone utilisées pour la fabrication des composites peuvent se présenter différemment selon la forme et la dimension du matériau souhaité. Comme l'illustre la(FigureI.6)

Les fibres de carbone peuvent ainsi être :

- utilisées directement à partir d'une bobine (pour un enroulement filamentaire par exemple) (1) ;
- tressées sous forme de nappes de tissu sec (2) : les fibres sont arrangées suivant des axes qui assurent au composite les propriétés requises. Il en résulte une architecture fibreuse (3), appelée aussi « préforme », correspondant à des nappes uni ou pluridirectionnelles et Selon plusieurs dimensions (2D, 3D, etc.) ;
- coupées ou broyées avant inclusion dans la matrice (4). [9-10]

Pour certaines applications, les nappes de tissus sont commercialisées déjà pré imprégnées par une résine



**Figure I.6** Illustration de certaines formes commercialisées de fibres de carbone[11]

## I.6 Composites à base de fibres de carbone

### I.6.1 Résines employées (matrices)

La matrice lie les fibres du renfort entre elles et assure la répartition de la contrainte. Les matériaux composites à matrice organique sont ceux les plus répandus actuellement, l'emploi de composites à matrice métallique ou céramique restant très limité. Les matrices organiques sont obtenues à partir de polymères thermoplastiques ou thermodurcissables (résines). La résine joue le rôle d'une matrice pour lier les fibres renforts, répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit.[10-11]

Les résines thermodurcissables (TD) associées à des fibres longues sont les plus employées. Actuellement, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe. Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices :

-La structure des TP se présente sous forme de chaînes linéaires, qu'il faut chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible.

-La structure des TD a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se pontonne (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.[9-10]

Les matrices de type TD sont les plus utilisées dans la fabrication des matériaux composites à base de fibres de carbone, qui requièrent une bonne stabilité à la température, propriété que n'apportent pas les résines TP. Les résines TD possèdent de plus une grande souplesse de formation et d'adaptabilité à l'utilisation. Il en existe plusieurs types mais celui qui est majoritaire dans l'industrie des composites et spécialement dans celle des composites de carbone est la résine époxyde. Cette dernière est très employée pour la réalisation des composites GD (grande diffusion) et HP (hautes performances). Elle résulte généralement de la polycondensation de l'épichlorhydrine avec un polyalcool ou un phénol. Dans la majorité des cas il s'agit du bisphénol A. [9-10]

Le bisphénol F peut également être utilisé mais son emploi est minoritaire face au bisphénol A. Cette dernière se caractérise en effet par ses propriétés mécaniques, chimiques et thermiques qui lui permettent de supporter des contraintes importantes. De plus, elles sont difficilement inflammables mais elles brûlent assez facilement si la combustion est entretenue. Elles possèdent une bonne adhérence sur les fibres et les métaux et leur mise en œuvre ne nécessite aucun solvant.

# Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride

---

	<b>TP thermoplastiques</b>	<b>TD thermodurcissables</b>
Etat de base	Solide , prêt à l'emploi	Liquide visqueux à polymériser
Stockage matière de base	Illimité	Temps réduit
Mouillabilité des renforts	Difficile	Aissée
Moulage	Chauffage+refroidissement de fixation	Chauffage continu
Cycles	Court	Long avec la Polymérisation
Caractéristiques techniques		
Tenue au choc	Moyen	Limitée
Tenue thermique	Réduite	Meilleure
Chutes et déchets	Recyclables	Définitivement perdus
Condition de mise en œuvre	Bonne	Emanations toxiques possibles

**Tableau I.6 :** Les critères essentiels des matrices thermoplastiques et thermodurcissables

## **I.6.2.Matrice Epoxydes :**

Le terme époxyde désigne une grande variété de pré-polymères comportant un ou plusieurs motifs époxydiques qui, après polycondensation avec un durcisseur, conduisant à des produits thermodurcis dont les principales applications concernent le collage et les matériaux composites (matrice époxyde avec des renforts en fibres de carbone, dans le cas de cette étude).

Mis à part des applications très particulières, ces résines sont la plupart du temps employées avec un agent de réticulation appelé durcisseur.[12]. Un accélérateur est parfois adjoint au durcisseur pour faire démarrer la réaction

## **I.7. Présentation générale de fibre Sisal :**

### **I.7.1 Définition**

Le Sisal [12] est une plante vivace constituée par une rosette de grandes feuilles à section triangulaire allant jusqu'à 2 m de long .il s'agit d'une plante tropicale et chaque plante peut produire de 180à240 feuilles selon la situation géographique , l'altitude, la pluviométrie et la variété considérée. Le sisal peut être récolté deux ans après avoir été planté et sa vie productive peut atteindre 12 ans .principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique .La

## Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride

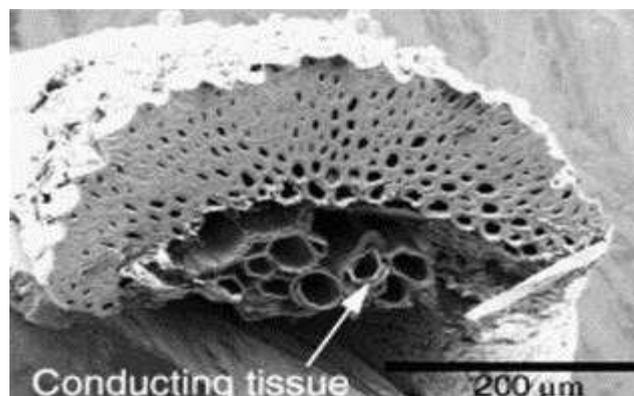
---

longueur moyenne de ces fibres est de 3mm de la famille des Agavaceae , est Le sisal provient d'une agave originaire du Mexique dont les feuilles possèdent de longues fibres très résistantes utilisée pour la fabrication de cordages, tissus grossiers, tapis, sacs, utilité dans le bâtiment (construction) ,en effet les fibres de cette plante sont utilisées comment stabilisateurs (par armature) dans le béton de terre ( terre crue) .et autres objets artisanaux ou à usage domestique ,destinés le plus souvent à l'exportation .Il s'agit d'une plante tropicale, principalement cultivé en Amérique du sud et en Afrique .Le sud Malgache est une zone de culture de cette plante. Les conditions climatiques font que ces fibres de sisal sont bien classées sur le marché international des fibres dures [12-13]

### I.7.2.Les fibres de sisal :

La fibre de sisal est dure, grossière, longue (1–1,5 m), très résistante et presque blanche, ivoire ou jaunâtre pâle. Les fibres sont résistantes à la traction. Et Les fibres de sisal contiennent de la cellulose (66-73%), l'hémicelluloses(12-13%), de la lignine (9.9%) et des pectines. Chaque feuille de sisal contient 2 types principaux de fibres :

1– “**les fibres mécaniques**” forment 75% des fibres de la feuille. Elles maintiennent la feuille rigide.[13]



**Figure I.7 :**fibres mécanique[13]

2– “les fibres rubanées”, composant 25% des fibres foliaires, servent à protéger les faisceaux vasculaires celles recouvrant le phloème sont grandes et en croissant et tendent à se fractionner longitudinalement pendant la transformation, alors que celles recouvrant le xylème sont fragiles, à parois minces et sont généralement perdues lors du décorticage [13]

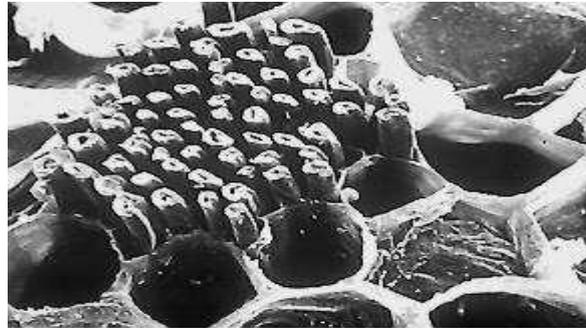


Figure I.8:fibres de rubanées[13]



Figure I.9:fibres de rubanées[13]

### I.7.3.Domains d'utilisations

**Usages traditionnels** – Ficelles, cordes et fils, qui peuvent être utilisés pour fabriquer des tapis, des nattes et divers produits artisanaux.

**Les fibres sont ensuite lavées et séchées avant d'être Utilisations utilisées pour des fabrications diverses. Pâtes et papiers à base de sisal**

– il peut être utilisé dans les filtres des cigarettes, des billets de banque, papier infalsifiable et les sachets de thé.

#### **Textiles**

– Le sisal sert souvent à fabriquer les chiffons de polissage car il est assez solide pour polir l'acier et suffisamment doux pour ne pas le rayer.

# Chapitre I : L'état de l'art sur les Matériaux Composites Hybride

---

## Bâtiment:

Le sisal, impropre à la fabrication de fabrication des vêtements et de tapisseries, se Tapissierie , se substitue à l'amiante et à la fibre de et à la fibre de verre dans un grand nombre de matériaux composite



**Figure I.10 :** Utilisateurs de fibre de sisal

## I.8.Conclusions :

Nous avons vu que de nombreux matériaux peuvent être utilisés pour la fabrication des matériaux composites. Ce sont des matériaux soit purement inorganiques, soit purement organiques. Ces deux familles de matériaux ont des propriétés et des contraintes de fabrication différentes, ce qui engendre des technologies et des performances spécifiques.

Une nouvelle approche de la fabrication de composants optiques intégrés consiste à essayer d'associer les avantages de ces deux types de familles par le choix des matériaux hybrides organiques-inorganiques [14].

### Références Bibliographiques

- [1] Jérôme Vinas, Matériaux Hybrides polymères-particules de silice : synthèse et caractérisation »le 29/02/2008, page :1-50.
- [2] Fabrication et usinage des matériaux composite à base de Fibre de Carbone Eléments pour l'évaluation des risques sanitaires des travailleurs en France. RAPPORT d'expertise collective.02/2010 page : 19-25.
- [3] JJ.Barrau, S Laroze, [www.Techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-fonction- et composants-mécaniques-Taïba/archives-1/structure-en-matériaux composites, -1990 –Technique-ingenieur.fr](http://www.Techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-fonction- et composants-mécaniques-Taïba/archives-1/structure-en-matériaux composites, -1990 –Technique-ingenieur.fr)
- [4] [www.Techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-fonction- et composants-mécaniques-Taïba/archives-1/structure-en-matériaux composites.](http://www.Techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-fonction- et composants-mécaniques-Taïba/archives-1/structure-en-matériaux composites.)
- [5] [www.Techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-fonction- et composants-mécaniques-Taïba/archives-1/structure-en-matériaux composites. partie2](http://www.Techniques-ingenieur.fr/base-documentaire/archives-th12/archives-fonction- et composants-mécaniques-Taïba/archives-1/structure-en-matériaux composites. partie2)
- [6] Laurent Gornet « Généralités sur les matériaux composites » Engineering school .2008 page :1-4.
- [7] Christian Hopmann, Walter Michaeli, Florian Puch, “Investigation of the processing, the mechanical properties, and the morphology of short glass fiber-reinforced polypropylene-layered silicate composites”, Volume 19, Issue 4, Pages 331–338, ISSN (Online) 2191-0359, ISSN (Print) 0792-1233,DOI: 10.1515/secm-2012-0035, September 2012
- [8] Erwan charbet, Matériaux composites à matrices vitrimère et polymère supramoléculaire, 31/07/2016, page :24-25.
- [9] Panthapulakkal, S., Sain, M. (2006). Injection-molded short hemp fiber/glass fiber-reinforced polypropylene hybrid composites - mechanical, water absorption and thermal properties, J. Appl. Polym. Sci., 103, 2432-2441.
- [10] Panthapulakkal, S., Sain, M. (2007). Studies on the water absorption properties of short hemp-glass fiber hybrid polypropylene composites, J. Comp. Mater., 41(15), 1871-1883.
- [11] <http://www.directindustry.fr/fabricant-industriel/fibre-carbone-77614.html>
- [12] Hachemane B, Mir A, B Bezzazi “Elaboration et caractérisation mécanique d'un matériau composite hybride”. Matériaux, Dijon-France, Novembre 13-17 (2006).
- [13] [www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/fr/](http://www.fao.org/economic/futurefibres/fibres/sisal/fr/)
- [14] J.Jabbour, S.calas, S.Gatti, R.K.Kribich ,G.pill, P.Etienne, Y.Moreau., Caractérisation Spectroscopiques d'un matériaux hybrides organique-inorganique synthétisé par procédé sol-gel pour la fabrication des circuits photoniques (matériaux 2006, Dijou, 13-17 novembre 2006, poster communication

# **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

#### II.1 Introduction :

L'objectif de ce travail est de développer un modèle analytique permettant d'évaluer l'endommagement de l'interface fibre-matrice d'un matériau composite [1] ; à partir des propriétés de la fibre, de la matrice et des caractéristiques de la liaison interfaciale. Le comportement des matériaux composites fibreux à matrice fragile dépend des propriétés de leurs constituants (fibre, matrice et interface) et du chargement mécanique appliqué. La rupture d'un matériau composite est le résultat de plusieurs micromécanismes d'endommagement (rupture des fibres ou de la matrice, interactions entre les fibres et les fronts de fissures, délaminage d'interface...) qui en règle générale, apparaissent simultanément. Parmi ces micromécanismes on distingue le décollement entre la fibre et la matrice et le frottement à l'interface. [1]

#### II.1.1 : Endommagement des matériaux composites :

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui conduit à l'apparition de défauts locaux. Contrairement aux matériaux métalliques, pour lesquels l'endommagement dépend du chargement impose, les composites présentent toujours les mêmes endommagements, du fait de l'hétérogénéité de leur structure, il n'existe pas de mécanisme unique mais plusieurs types de dégradations différentes par leur nature et leur mode de développement. Ces dégradations apparaissent à différentes échelles. Ainsi, on distingue [2] :

- A l'échelle microscopique apparaissent des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice (décohésion fibres/matrice) ou de porosité.
- A l'échelle mésoscopique, ou échelle du pli, on observe des fissures intra/laminaires transverses (perpendiculaires à la direction de sollicitation) ou longitudinales (dans la direction de l'application de l'effort) et des ruptures de fibres au stade ultime de la ruine du matériau.
- 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.

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

---

### II.1.2. L'interface fibre matrice :

Comme cela a été évoqué précédemment, les composites fibres de carbone/matrice présentent une interface plus forte que leurs homologues renforcés fibres de verre [3]. Ce renfort de l'interface est notamment lié à un phénomène physique appelé transcristallisation. À la différence des composites à matrice thermosable, pour lesquels l'adhésion fibre/matrice est assurée à l'aide d'interactions chimiques, pour les composites à matrice thermoplastique, l'interface fibre/matrice met en jeu des interactions complexes, qui entraînent des changements microstructuraux. Parmi ces interactions, apparaît un phénomène de nucléation hétérogène à la surface des fibres de carbone suivi d'une croissance monodimensionnelle de cristaux perpendiculairement à cette surface. Pour observer ce phénomène, le substrat ne doit pas présenter une structure chimique ou cristallographique proche de celle de la résine. C'est précisément le cas des fibres de carbone, qui sont constituées de feuillets plans de graphite orientés. La présence de défauts, ainsi que des pré-traitements peuvent favoriser ce phénomène. La matrice doit être préférentiellement de faible poids moléculaire, car les chaînes moléculaires, lorsqu'elles sont trop longues, s'orientent difficilement et ont par conséquent des difficultés à cristalliser. Cette cristallisation renforce l'interface en favorisant le transfert de charge entre la matrice et les fibres. [3]

### II.1.3 .Comportement de l'interface fibre-matrice dans les composites :

Par définition, l'interface est la zone de jonction de deux matériaux en contact, dans notre cas de (CFRP) l'interface est fibre/matrice [1]. Cette interface était considérée comme une surface sans épaisseur, notamment tant que l'on s'est limité à étudier l'aspect macroscopique des composites. Des études à une échelle microscopique ont mis en évidence que la transition entre la fibre et la matrice n'est pas brutale, mais qu'il existe plutôt une interaction entre les deux constituants. Par voie de conséquence on a pu introduire la notion d'interphase pour désigner la zone interfaciale de structure et de composition différentes de la fibre et de la matrice. [2-3]

La qualité de l'interface, (c'est-à-dire sa cohésion, sa durabilité...) est étroitement liée à celle du mouillage (des fibres par la matrice), à l'établissement d'interactions mécaniques et physico-chimiques, et au processus de solidification de la matrice parallèlement à la formation des liaisons interfaciales. Selon le type de matrice considéré, différents processus sont à considérer :

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

---

Pour les matrices thermodurcissables, la zone interfaciale peut présenter des propriétés différentes de celles de la matrice en masse : la fibre peut modifier le réseau polymérique en cours de réticulation en développant des liaisons propres (en gênant simplement l'arrangement des chaînes macromoléculaires ou encore en changeant la répartition des différentes phases de la matrice pour des matrices chargées).

Pour les matrices thermoplastiques, une transcrystallinité, de structure très différente de celle de la matrice, peut apparaître et conduire à la formation d'une interphase de propriétés très différentes.[1]

### **.1.4.Comportement d'un composite unidirectionnel :**

Dans un matériau composite céramique unidirectionnelle sollicité 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 [1]. Cette fissure se propage et s'approche d'une fibre, ensuite on peut distinguer les cas suivants:

#### **II.1.4.1. Cas d'une interface très forte:**

Si l'adhérence entre fibres et matrice est très forte, la fissure continue sa propagation comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle, mode I (mode d'ouverture). Cela entraîne aussi des concentrations de contraintes sur les fibres voisines et provoque la rupture catastrophique du composite. Le comportement du composite est celui d'un matériau fragile et les fibres n'exercent aucun effet de renforcement sauf éventuellement par leur énergie de rupture. Qui ne peut plus jouer son rôle de renfort. Ce type de matériau possède un comportement fragile, comme une céramique monolithique. Alors la déformation des deux constituants est élastique. Il n'y a aucun déplacement relatif entre fibre et matrice, le transfert de charge s'effectue par l'intermédiaire d'une forte contrainte de cisaillement dans la matrice, dont l'intensité décroît lorsqu'on s'éloigne radialement de la fibre. (figure II.1)

#### **II.1.4.2 - Cas d'une interface très faible:**

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

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

### II.1.4.3 - 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.1

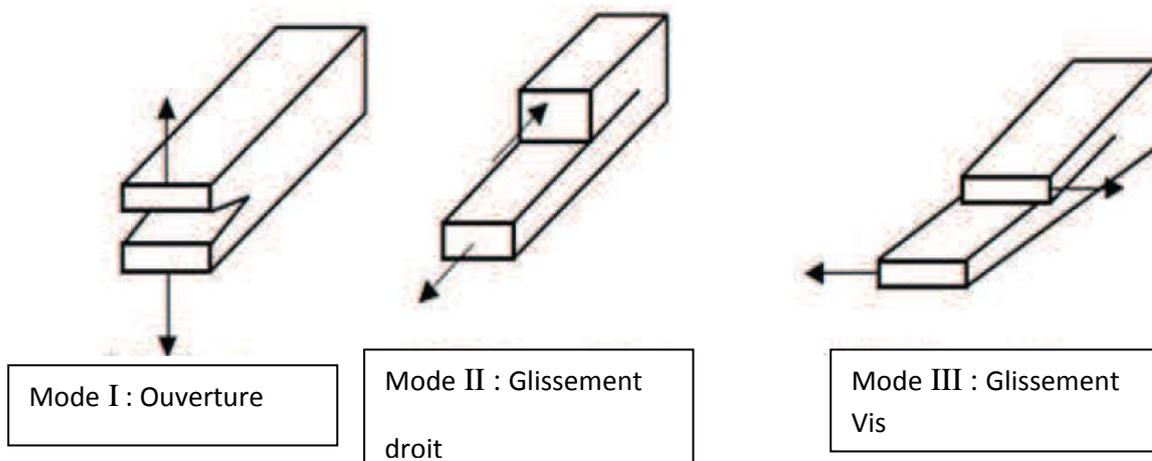
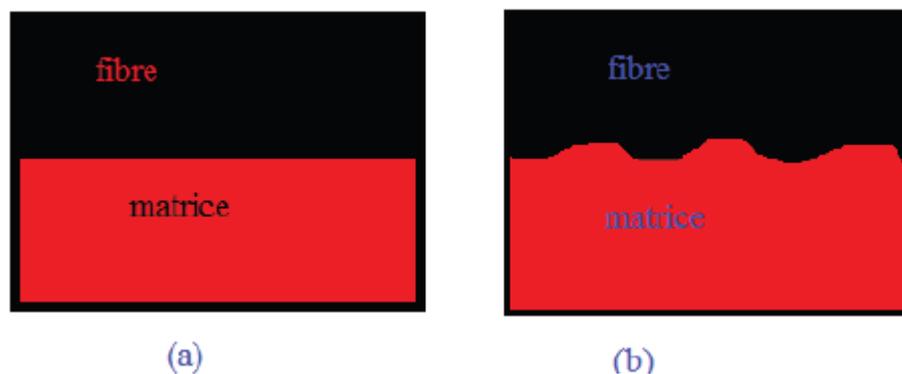


Figure II.1: Modes d'endommagement

### II.1.5.Liaison interfaciales :

Dans un matériau composite, fibre et matrice sont liées, et on distingue deux origines de liaisons dans les composites à matrice céramiques [1]:

- liaisons d'origine mécanique.
- liaisons d'origines chimiques



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

**Figure II.2** : Liaison interfaciale d'un Matériau composite

Interface lisse (a) et interface réelle ou rugueuse (b), présente un aspect d'une interface lisse et d'une interface réelle qui contient des rugosités (b).

A part l'établissement de contraintes thermiques résiduelles, les températures d'élaboration élevées conduisent à des phénomènes tels que :

- la pénétration de la matrice dans les creux de la surface rugueuse de la fibre par écoulement visqueux ou par diffusion conduisant à la formation de liaisons mécaniques.
- la diffusion des éléments constituant la fibre et la matrice conduisant à la formation de liaisons chimiques fortes, de types ioniques ou covalentes.

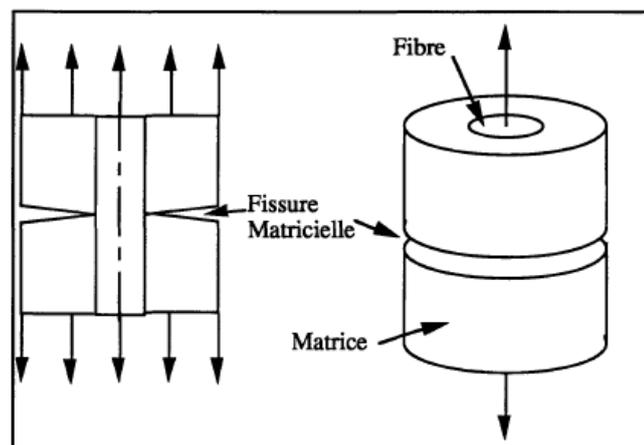
### II.1.6.Mécanismes de rupture de matrices céramiques renforcées par des fibres céramiques :

#### II.1.6.1.Fissuration matricielle et décohésion fibre-matrice :

La fissuration transverse de la matrice n'est possible que si les fissures dans la matrice laissent intactes les fibres qu'elles contournent. Cette fissuration transverse est importante car elle conduit à une augmentation de la ductilité observée dans ce type de matériaux soit  $G_{IC}/G_{FC}$

le rapport des taux de restitution Critiques dans l'interface et dans la fibre ou rapport de résilience interface-fibre [4]. En négligeant les contraintes d'origine thermique, une condition nécessaire de fissuration matricielle multiple est  $G_{IC}/G_{FC} \leq 1/4$

Ce résultat peut être obtenu en étudiant le problème donné en Figure II.3, et en utilisant les fonctions poids au voisinage de la pointe de fissure macroscopique. Ce résultat peut être généralisé en tenant compte des contraintes résiduelles.



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

---

Figure II.3 : Etude de la fissuration matricielle.

### II.1.6.2.Fragmentation des fibres

La fragmentation des fibres peut être décomposée en deux mécanismes. Le premier mécanisme est caractérisé par une fragmentation multiple de la fissuration matricielle. Dans ce cas, dans une éprouvette sollicitée en traction, La fragmentation est distribuée de manière statistiquement uniforme. Ce premier mécanisme correspond à un amorçage sur des défauts initiaux dans la fibre. Il s'accompagne d'un deuxième mécanisme qui correspond à un phénomène dit "de tirage" (ou arrachement, pull-out) au voisinage de la zone rompue, caractérisé par une longueur de tirage (L.T.) [4,5]

### II.1.7.Module de Weibull :

Les céramiques ont la particularité d'avoir une distribution entaille de défaut assez large(pores ;microfissures ;grain) ceci a pour conséquence une distribution des résistances a la rupture également dispersée. Le module de Weibull est une donnée statistique représentatif de la distribution des défauts et donc de l'homogénéité du matériau si le module de Weibull [6] est faible la répartition des défauts est très hétérogène, et on observera donc une grande dispersion des contraintes a rupture dans un volume V de matière inversement orsque le module de Weibull est élevée, la répartition des défautest relativement homogène et on observera donc une faible dispersion des contraintes a rupture dans le meme volume.

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  $\sigma_i$  .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

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

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

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

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

---

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

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

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

$$R = (1 - F(\sigma))^N \quad (\text{II.4})$$

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

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

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

$$(1 - F(\sigma))^N = \exp(-NF(\sigma)) \quad (\text{II.6})$$

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 :

$$\Phi(\sigma) = \frac{(\sigma - \sigma_u)^m}{\sigma_0} ; \sigma > \sigma_u \quad (\text{II.7})$$

$$\Phi(\sigma) = 0 ; \sigma \leq \sigma_u \quad (\text{II.8})$$

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

### II.1.8. Module de Cox :

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

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

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

La fibre et la matrice sont supposées parfaitement élastiques et la liaison fibre/matrice parfaite. [6]

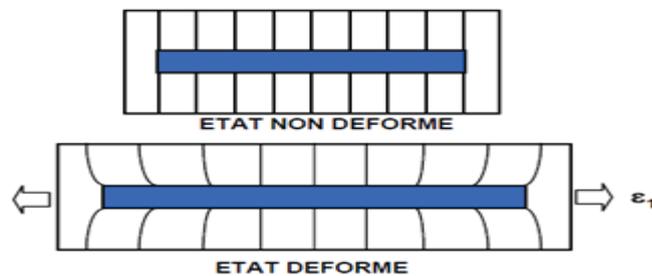


Figure II.4: volume élémentaire représentatif

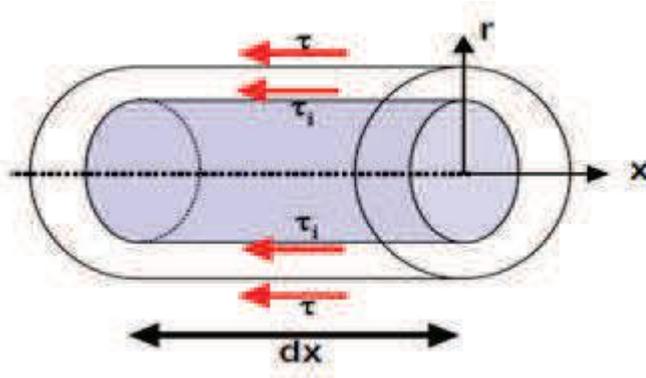
### II.1.8.1. Equilibre des forces de cisaillement.

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:

$$2\pi r dx = 2\pi a \tau_i dx \quad (\text{II.9})$$

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

---



**Figure II.5:** volume élémentaire représentatif

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

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

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

$$\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau}{G_m} = \frac{a\tau_i}{G_m r} \quad (\text{II.11})$$

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

$$\int_a^R dw = \frac{\tau_i a}{G_m} \int_a^R \frac{dr}{r} \quad (\text{II.12})$$

Soit :

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

---

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

$$\tau_i = \frac{G_m (W_R - W_a)}{a \ln(R/a)} \quad (II.14)$$

### II.1.8.2. 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:

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

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

Ce qui permet d'écrire :

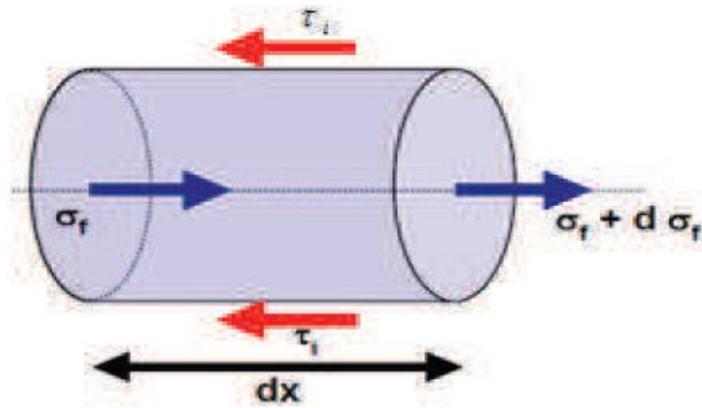
$$\frac{d\tau_i}{dx} = \frac{G_m}{a \ln(R/a)} \left( \frac{dW_r}{dx} - \frac{dW_a}{dx} \right) \quad (II.16)$$

D'après (5) on obtient :

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

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

---



**Figure II.6:** Équilibre élastique dans une portion de fibre.

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

$$\frac{dw_R}{dx} = \varepsilon_m = \varepsilon_1 \quad (\text{II.18})$$

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

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

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

$$\frac{d^2\sigma_f}{dx^2} = \frac{\beta^2}{a^2} (\sigma_f - E_f \varepsilon_1) \quad \text{avec} \quad \beta^2 = \frac{2G_m}{E_f \ln\left(\frac{R}{a}\right)} \quad (\text{II.20})$$

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 :*

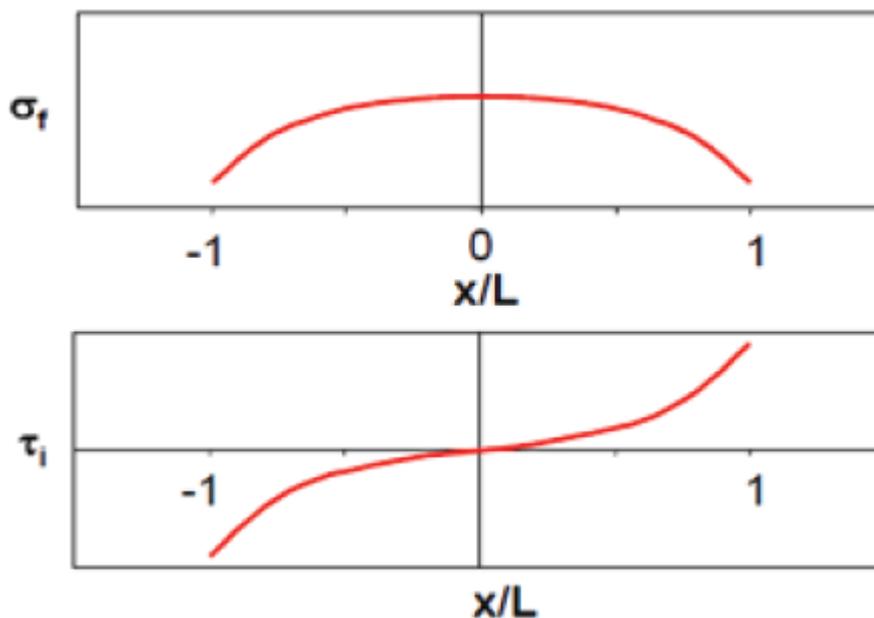
$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \{1 - \cosh(\beta x/a) : \cos(\beta s)\} \quad (II.21)$$

✓ *Contrainte de cisaillement à l'interface :*

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

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

Les profils de contrainte d'un V.E.R correspondant aux équations (5) et (2.1) sont représentés ci-dessous **Figure.II.7**



**Figure II.7 :** modèle de Cox : profil des contraintes fibre/interface.

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

---

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.

### **Partie II : Les algorithmes génétiques et leurs applications**

#### **II.2. Introduction**

La résolution d'un problème d'optimisation consiste à explorer un espace de recherche afin de maximiser (ou minimiser) une fonction donnée. Les complexités (en taille ou en structure) relatives de l'espace de recherche et de la fonction à maximiser conduisent à utiliser des méthodes de résolutions radicalement différentes. En première approximation, on peut dire qu'une méthode déterministe est adaptée à un espace de recherche petit et complexe et qu'un espace de recherche grand nécessite plutôt une méthode de recherche stochastique (recuit simulé, algorithme génétique,...).

Dans la plupart des cas, un problème d'optimisation se divise naturellement en deux phases : recherche des solutions admissibles puis recherche de la solution à coût optimal parmi ces dernières. Suivant la méthode employée, ce découpage est plus ou moins apparent dans la résolution.

L'usage d'un algorithme génétique [7,8] est adapté à une exploration rapide et globale d'un espace de recherche de taille importante et est capable de fournir plusieurs solutions. Dans le cas où l'ensemble des solutions admissibles est complexe (i.e. il est difficile d'isoler une solution admissible), l'admissibilité peut être rendue intrinsèque à la représentation choisie ou intégrée à la génération des chromosomes (mutation, croisement) ou à la fonction à optimiser (on attribue une mauvaise adaptation à une solution non admissible).[7-9]

L'utilisation d'une technique de satisfaction de contraintes (CSP) est adaptée aux problèmes très contraints où une exploration exhaustive de l'espace de recherche est envisageable. La méthode fournit naturellement des solutions admissibles. En ajoutant une contrainte (dynamique) portant sur le coût d'une solution, la résolution peut produire une solution optimale . Cette méthode garantit l'optimalité de la solution.[10]

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

---

### II.2.1 Algorithme génétique

Les algorithmes génétiques sont des méthodes d'optimisation destinées à des problèmes complexes.

Ils peuvent jouer un rôle intéressant dans le cadre de la protéomique [8-10]. Cette discipline est assez récente, elle étudie le patrimoine en protéines des individus. Elle produit des données de grande dimension.[10]

Le fonctionnement des algorithmes génétiques et certains résultats théoriques. La partie suivante détaille la mise au point d'un tel algorithme pour la sélection de biomarqueurs en spectrométrie de masse et l'alignement de gels d'électrophorèse 2D. Cette partie met en évidence la difficulté de construction du critère à optimiser. La dernière partie aborde des résultats théoriques. La convergence des algorithmes génétiques avec élitisme est démontrée dans le cas non homogène et de mutations dirigées. Nous avons en suite construit un critère de convergence alliant fondements théoriques et applicabilité, basé sur les occurrences de la solution localement optimale. Enfin, l'efficacité de l'introduction d'événements catastrophiques dans la résolution pratique de certains problèmes de convergence est montrée.[10]

### II 2.2. Les opérateurs des algorithmes génétiques :

La reproduction est le processus qui permet de construire une population  $k + 1$  à partir d'une population  $k$ . Ce processus est constitué par l'utilisation de l'opération de sélection, de l'opération de croisement ou/et de l'opération de mutation. [7-11]

#### II 2.2.1 La sélection

L'opération de sélection permet de déterminer quels individus sont plus enclins à obtenir les meilleurs résultats [12-14]. On trouve deux types de sélection:

1. La sélection pour la reproduction: On l'appelle tout simplement l'opération de sélection, et elle permet de choisir les individus qui participent à une reproduction (croisement ou mutation). Cette opération choisit, généralement, les individus les plus forts (meilleurs scores d'adaptation) pour produire les enfants les plus performants.
2. La sélection pour le remplacement: On l'appelle tout simplement l'opération de remplacement, et elle choisit les individus les plus faibles pour être remplacés par les nouveaux.

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

On trouve plusieurs techniques de sélection:

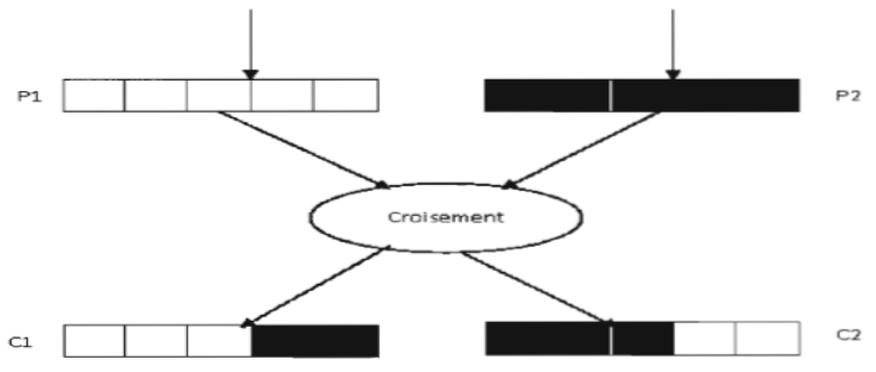
- Sélection **par rang** : Choisir toujours les individus possédant les meilleurs scores.
- Sélection **par tournoi**: Utiliser la probabilité de sélection proportionnelle à l'adaptation sur des paires d'individus, puis choisir parmi ces paires celui qui a le meilleur score d'adaptation.
- Sélection **uniforme**: Choisir aléatoirement sans faire intervenir la valeur d'adaptation

### II 2.2.2 Le croisement

L'opération de croisement (*crossover*) est une opération de reproduction qui permet l'échange d'information entre les chromosomes (individus). Il utilise deux parents pour former un ou deux enfants. Les deux parents sont choisis par l'opération de sélection. Le croisement permet l'innovation (les enfants sont différents de leurs parents) et repose sur l'idée que deux parents performants produiront des enfants plus performants.

Dans le cas d'une représentation binaire, le croisement de deux chromosomes peut se faire en un seul point de coupure (**Figure II .8**) ou en deux points de coupure (**Figure II .9**).

Le taux de croisement détermine la proportion des individus qui sont croisés parmi ceux qui remplaceront l'ancienne génération



**Figure II .8.** Croisement à un point

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

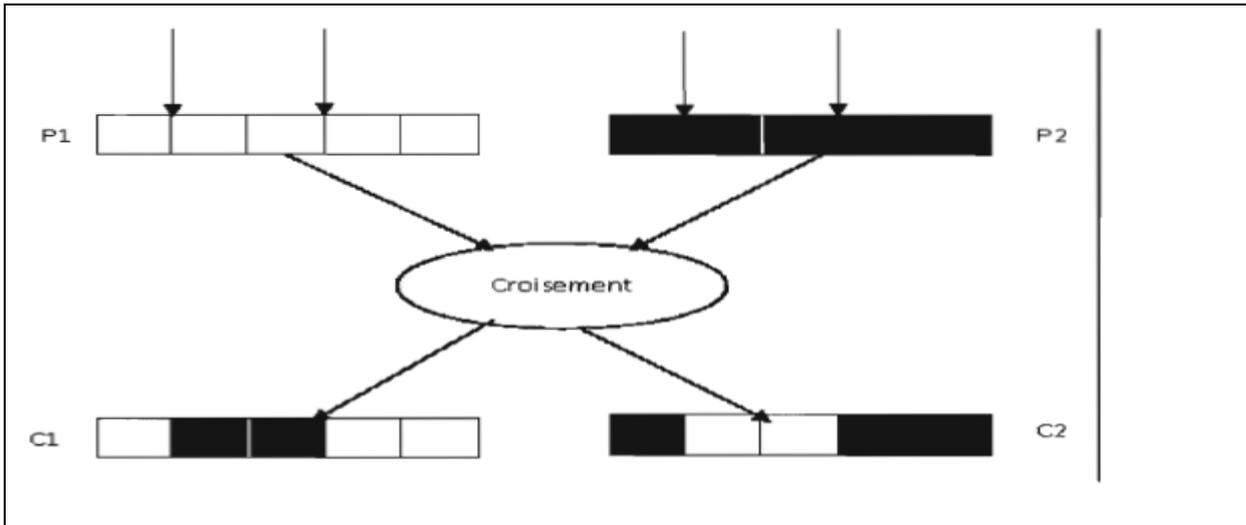


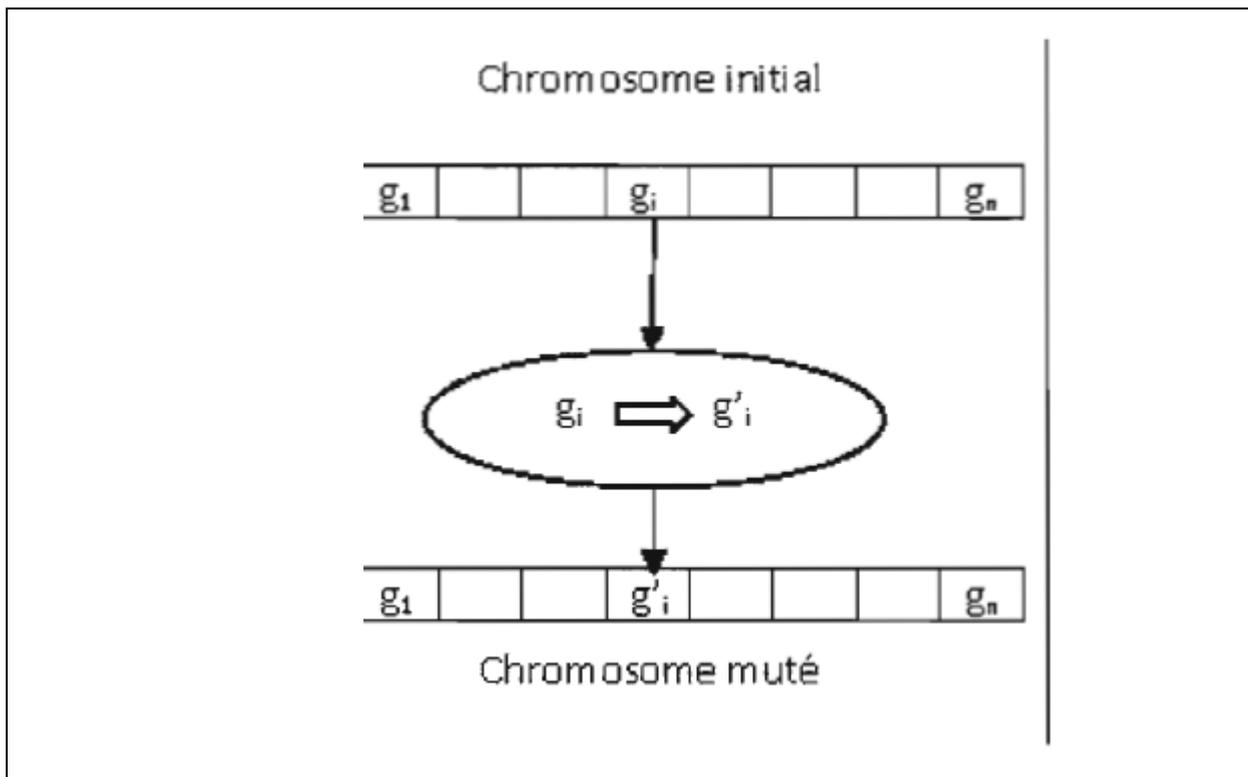
Figure .II .9Croisement à deux point

### II 2.2.3.La mutation

Le rôle de cet opérateur est de modifier aléatoirement, avec une certaine probabilité, la valeur d'un composant de l'individu (14). La (figure II .10) présente un exemple de mutation de chromosome tel que le gène  $g_i$  est retiré aléatoirement et est remplacé par la gène  $g$ ;

La mutation est un phénomène rare mais permet d'explorer de nouvelles zones dans l'espace de recherche et aide l'algorithme génétique à possiblement aller vers une solution optimale globale, sans resté pris dans une solution optimale locale

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



**Figure II .10.** Illustration du principe de la mutation

### II 2.3.Fondements des algorithmes génétiques [10-14]

Les algorithmes génétiques( 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.[11-13]

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 ;

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

---

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 2.4.Conclusion :**

L'objectif principal de cet chapitre, un algorithme d'optimisation basé sur les principes des algorithmes génétiques a été présenté afin de nous permettre de spécifier les types de variables qu'on va utiliser, le nombre de notre population initiale, l'ensemble des opérations de base : sélection, reproduction, croisement et mutation, dans notre modélisation ainsi que l'aspect évolutionnaire qu'on va utiliser pour une optimisation qui est le cas de la plupart des travaux portés sur les matériaux composites

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

---

### Références Bibliographique

- [1] HOUIDEG Abdellah, « Transfert de charge et frottement fibre /matrice d'un Matériau composite (T300/914) ;université de science et de la technologie d'Oran Mémoire de Magister, 2011/2012 page :1-93.
- [2] Cédric Thomas., Étude des mécanismes d'endommagement des composites fibre de carbone / matrice polyamide: Application \_a la réalisation de réservoirs de stockage de gaz sous haute pression de type IV ; Matériaux Ecole de paris 2011page : 67-70.
- [3] Jihed JELLID., Suivi Cycle de VIE d'un Composite CFRP Hybride par mesure de Résistance Electrique, L'école Centrale de Lyon ; spécialité :Matériaux Polymère et composite, 17/07/2009, page :16-19.
- [4] La rupture des matériaux à comportement Fragile, Compte rendu du16/12/1992 de l'université pierre et Marie Curie- Paris, avenue du président Milson, page :132-136.
- [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] Walker, M., and Smith, R. (2003). "A technique for the multi-objectif optimization of laminated composite structures using genetic algorithms and finite element analysis." Composite Structures, 62, 123-8.
- [8] Todoroki, A., and Haftka, R. (1998). "Stacking sequence optimization by a genetic algorithm with a new recessive gene like repair strategy." Composite Part B, 29B,277-85.
- [9] Todoroki, A., and Ishikawa, T. (1995). "Design with genetic algorithm using response surface approximation." Composite Structures, 30, 147-57.
- [10] G. Soremekun, Z. Gurdal, R.T. Haftka et L.T. Watson. « Composite laminate design optimisation by genetic algorithm with generalized elitist selection ». Computers and Structures, 79 :131-143, 2001.
- [11] Le Riche, R., and Haftka, R. (1995). "Improved genetic algorithm for minimum thickness composite laminate design." Composite Engineering 5(2), 143-61.
- [12] Park, J., Hwang, J., Lee, C., and Hwang, W. (2001). "Stacking sequence design of composite laminates for maximum strength using genetic algorithms." Composite Structures, 52, 217-31.
- [13] Z. Michalewicz. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. Springer-Verlag, 1992.
- [14] L. Davis. Handbook of genetic algorithms. Van Nostrand Reinhold, 1991.

# **CHAPITRE III**

**Résultats et**

**Discussions**

## Chapitre III

## Résultats et Discussions

## III .1. Introduction.

L'objectif de ce travail est de prédire par un algorithme génétique l'effet de l'humidité sur l'endommagement de l'interface entre deux fibres et la matrice d'un matériau composite hybride qui constitue de fibres de sisal, carbone et de la matrice époxyde. Notre modélisation sera basée sur le modèle analytique de Cox, modèle probabiliste de Weibull et les modèles décrivant le phénomène de diffusion de l'eau dans un polymère. La contrainte appliquée sur le volume élémentaire représentatif est une contrainte de traction uni-axiale.

## III .2. Développement.

## III .2.1. Définitions.

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

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

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 ;

Une fibre rompue est déchargée sur toute sa longueur [1]. 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.

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

Avec :

- $(\sigma_{\max}^f)$  : la contrainte maximale appliquée
- $(l_{\text{equi}})$  : 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 [2] qu'est défini par la relation suivante :

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

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

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;

### III .2.2 Les mécanismes de diffusion

La résine époxyde absorbe l'eau de l'atmosphère par sa couche superficielle jusqu'à atteindre l'équilibre avec l'environnement. Cette étape est atteinte rapidement et est permise par la diffusion de l'eau dans le matériau. Deux approches [3 ,4] permettent de décrire ce phénomène:

8 La théorie des volumes libres : La diffusion des molécules pénétrantes est déterminée par le nombre et la taille des trous du réseau polymère d'une part et par les forces d'attraction entre les molécules pénétrantes et le polymère d'autre part [5]. La présence de trous est déterminée par la structure du matériau et par sa morphologie (densité de éticulation, rigidité des chaînes moléculaires...). 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. 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 (Figure 1). L'eau est alors considérée comme de l'eau liquide ou eau libre [6,7].

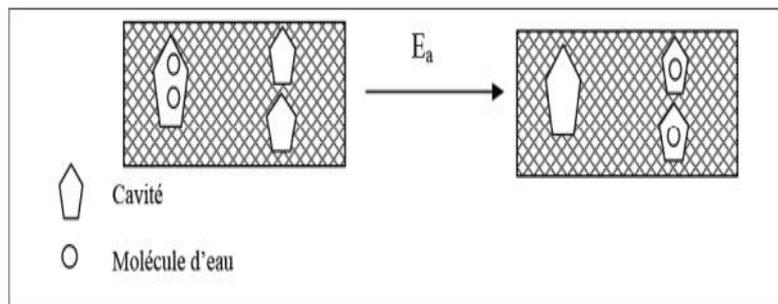


Figure III.1 : Théorie des volumes libres [7]

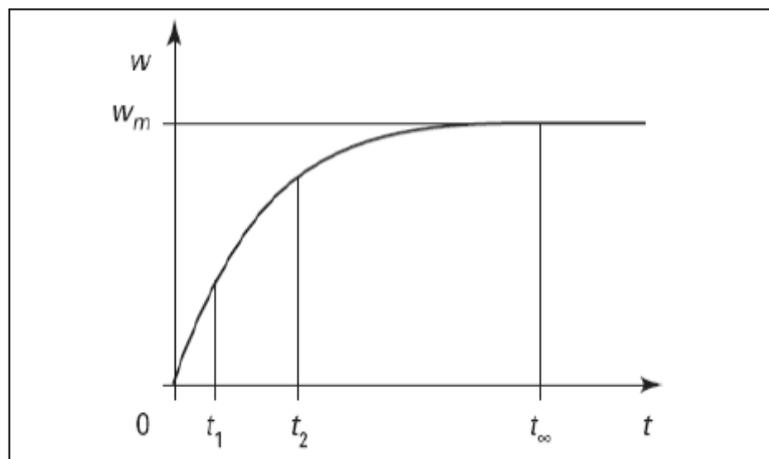


Figure.III.2 : Cinétique de diffusion de l'eau dans un matériau polymère [8]

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  $x$ .

L'équation suivante est alors déterminée :  $\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2}$   
(III.4)

### **III .3. Simulation numérique par un algorithme génétique.**

#### **III .3.1. Développement.**

Notre travail consiste à modéliser la diffusion par le taux d'humidité et voir son effet sur l'endommagement de l'interface fibre-matrice du composite hybride Sisal-Carbone/époxyde et le matériau composite Carbone/époxyde, par un algorithme génétique en utilisant un modèle analytique basé sur l'approche probabiliste de Weibull et l'équation de diffusion dans un polymère. Le principe de cet algorithme repose sur l'utilisation d'opérateurs génétiques (sélection, croisement, mutation) pour prévoir une population de cent (100) d'individus générés de manière aléatoire avec une production maximum de 50 en tant que critère d'arrêt. Les gènes du chromosome représentent les variables suivantes définies par le modèle analytique de cisaillement de l'interface de Cox : la contrainte mécanique qui est comprise entre 0 et 120 N, module de Young de la fibre, module de cisaillement des deux matrices, rayon de la fibre, la distance entre fibre,.... L'endommagement de l'interface est produit par le croisement des deux endommagements des deux constituants; la fibre et de la matrice, en utilisant une probabilité de mutation entre 60% et 80%. Les individus trouvés sont classés et positionnés pour obtenir le meilleur d'entre eux, ces individus sont insérés dans la première rangée, en construisant une nouvelle génération, le processus est répété jusqu'à convergence. Les calculs numériques sont effectués à l'aide du logiciel Matlab R2010a.

III .3.2. Organigramme.

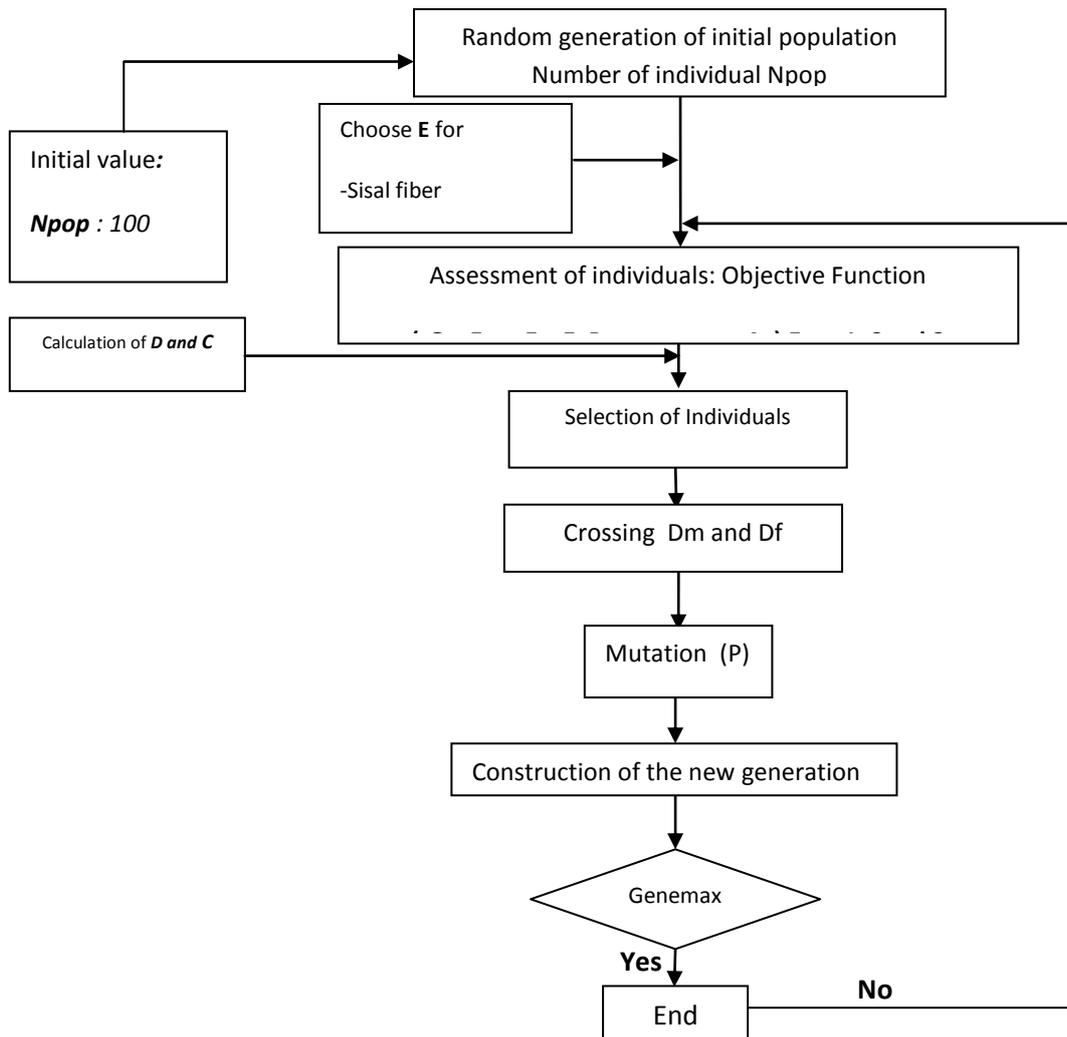


Figure.III.3 L’organigramme de l’algorithme génétique. [9,10]

III. 4. Résultats de simulation.

Pour affirmer notre approche, un calcul a été réalisé sur deux types de matériaux composites carbone /époxyde et Sisal-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 ( $\sigma (80 )$ ,  $\sigma (100 )$ ,  $\sigma (120 \text{ N/m}^2)$ ), ce qui nous permis de calculer l’endommagement de l’interface fibre matrice de composite en fonction du taux d’humidité. Les figures III.4, III.5, III.6 et III.7, III.8, III.9 montrent le niveau de l’endommagement à l’interface pour les deux matériaux en fonction du taux d’humidité.

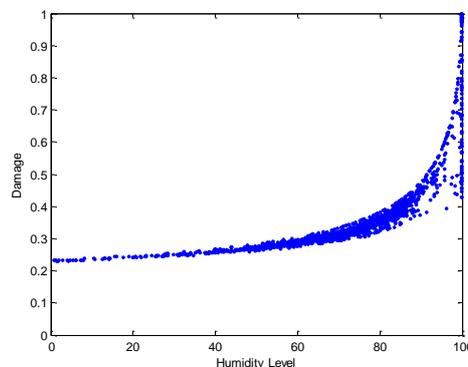
**III .4.1. Carbone /époxyde**

Les figures III.4, III.5 et III.6 montrent que l’endommagement "D" de l’interface commence au niveau de 0.23 de  $\sigma$  (80 N/m<sup>2</sup>), puis augmente jusqu’à une valeur maximal de 0 .41 de  $\sigma$  (120N/m<sup>2</sup>), et lorsque le taux d’humidité augmente, l’endommagement augmente et atteint son maximum après 60% du taux d’humidité. 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 humide.

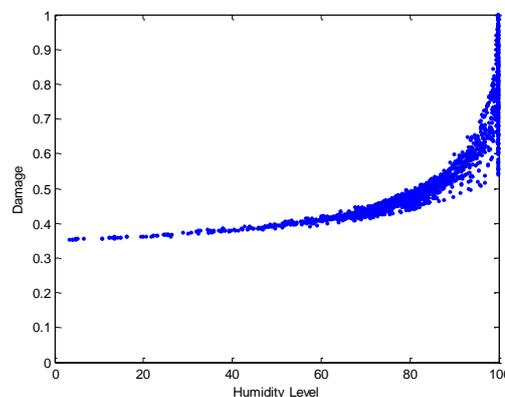
**III.4.2. Sisal-carbone /époxyde**

Les figures III.7, III.8 et III.9 montrent que l’endommagement "D" de l’interface commence au niveau de 0.15 de  $\sigma$  (80 N/m<sup>2</sup>), puis augmente jusqu’à une valeur maximal de 0 .19 de  $\sigma$  (120N/m<sup>2</sup>), et lorsque le taux d’humidité augmente, l’endommagement augmente et atteint son maximum après 60% du taux d’humidité. 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 humide.

**Carbone /époxyde**



**Figure.III.4 :** L’influence de l’humidité sur l’endommagement de l’interface  $\sigma$  (80N/m<sup>2</sup>)



**Figure.III.5 :** L’influence de l’humidité sur l’endommagement de l’interface  $\sigma$  (100N/m<sup>2</sup>)

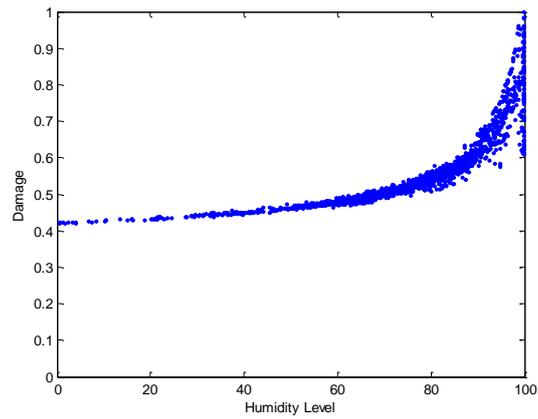


Figure.III.6 : L'influence de l'humidité sur l'endommagement de l'interface  $\sigma$  (120N/m<sup>2</sup>)

Sisal-carbone /époxyde

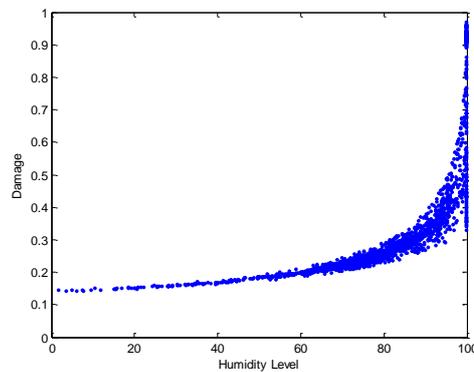


Figure.III.7: L'influence de l'humidité sur l'endommagement de l'interface  $\sigma$  (80N/m<sup>2</sup>)

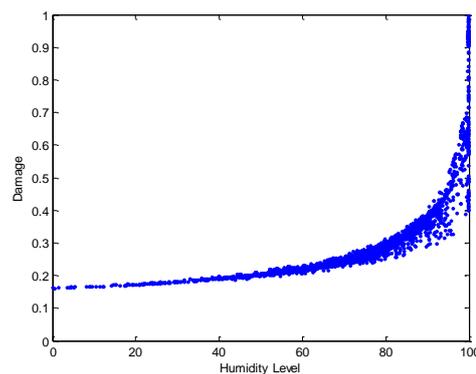
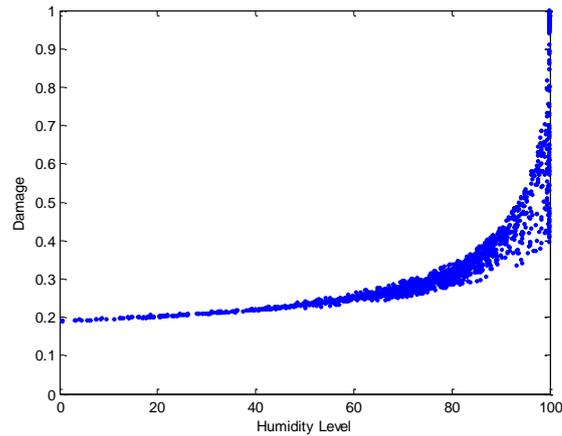


Figure.III.8: L'influence de l'humidité sur l'endommagement de l'interface  $\sigma$  (100N/m<sup>2</sup>)



**Figure.III.9:** L'influence de l'humidité sur l'endommagement de l'interface  $\sigma$  (120N/m<sup>2</sup>)

### III.5. Conclusion

Les résultats trouvés après calcul génétique montrent que le niveau de l'endommagement est lié à la résistance de matériau pour les deux composites qui ont été étudiés carbone /époxyde et Sisal-carbone/époxyde et au milieu où se sont exposés, et montrent, aussi, une bonne concordance entre la simulation numérique et le comportement réel des deux matériaux. La simulation numérique fait ressortir que la matériau Sisal-carbone/époxyde est résistant dans le milieu humide en comparant avec le composite carbone/époxyde. Les résultats obtenus dans notre étude montrent que les matériaux composites hybrides ont une résistance aux contraintes appliqués et à l'humidité comparant avec les matériaux dit traditionnels et les matériaux composites ordinaires.

## Références Bibliographique

- [1] W. Weibull “ Theory of the strength of materials”, Royal Swedish Academy of Eng. Sci. Proc., (1939) 151, 1-45.
- [2] Cox H.L. “The elasticity and strength of paper and other fibrous materials”. British journal of applied physics, 12, 72–79, 1952.
- [3] P. BONNIAU et A.R. BUNSELL, A comparative study of water absorption theories applied to glass epoxy composites J.Comp.mater, vol.15, p.2728293, 1981
- [4] 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
- [5] P. NOGUEIRA, C. RAMIREZ, A. TORRES, M.J. ABAD, J. CANO, J. LOPEZ, I. LOPEZBUENO et L. BARRAL,Influence of the curing cycle selection on the thermal degradation of an epoxy-diamide system J.Polym.Sci, vol.80, p.71880, 2001
- [6] Y. DIAMANT, G. MAROM et L.J. BROUTMAN , The effect of network structure on moisture absorption of epoxy resins J.Polym.Sci, vol.26, p.301583025, 1981
- [7] M.J. ADAMSON, Thermal expansion and swelling of cured epoxy resin used in graphite/epoxy composite material J. Mater. Sci., vol.15, p.173681745, 1980
- [8] A. APICELLA, L. EGIZIANO, L. NICOLAIS et V. TUCCI, Environmental degradation of electrical and thermal properties of organic insulating materials J. Mater. Sci., vol.23, p.7298735, 1988
- [9] 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.
- [10] Mokaddem A, Alami M, Boutaous A. Stability condition for the evaluation of damage in three-point bending of a laminated composite. Steel Compos Struct 2013; 15(2): 203-20.

# **Conclusion générale**

### Conclusion générale

En conclusion générale, nous rappelons que les matériaux étudiés sont carbone /époxyde et Sisal-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 et au milieu où se sont exposés ses matériaux. La simulation numérique montre, aussi, une concordance avec le comportement réel des matériaux étudiés. Les résultats de simulation numérique font ressortir que sisal-carbone /époxyde est résistant dans le milieu humide comparant avec carbone /époxyde.

L'étude expérimentale et théorique sur les matériaux hybrides et les bio-composites ont montré que ces matériaux disposent une résistance exceptionnelle aux contraintes mécaniques et thermiques même dans le milieu humide. Nous avons trouvé que les résultats de notre étude coïncident avec cette conclusion, et on a trouvé que ce matériau composite hybride est plus résistant que le composite carbone/époxyde.

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

Il serait intéressante de voir, par la suite, l'effet de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface fibre matrice d'un composite hybride.

### **Résumé :**

Les matériaux composites absorbent une quantité significative **d'humidité** lorsqu'ils sont exposés à des conditions hygrothermiques, cette quantité absorbée change et affecte certaines **propriétés physiques et mécaniques**. Dans ce contexte, nous allons étudier en utilisant une **modélisation génétique** basée sur des modèles **probabilistes** de l'effet de la **diffusion d'humidité** sur l'endommagement de l'interface d'un composite hybride.

### **التلخيص :**

المواد المركبة تمتص كمية كبيرة من الرطوبة عندما يتعرضون لظروف الرطوبة الحرارية، وهذا يمتص الصريف ويؤثر الخصائص الفيزيائية والميكانيكية. وفي هذا السياق، سندرس باستخدام النمذجة مقرها الوراثة، النماذج الاحتمالية للنشر تأثير الرطوبة على الضرر واجهة من مركب هجين.