

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

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



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : PHYSIQUE

Option : Physique des Matériaux

Par

Mlle KHARCHI Hadjira

Sur le thème

**Etude et modélisation par algorithme métaheuristique de l'effet
de la contrainte thermique sur l'endommagement
d'un Bio-composite hybride**

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

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

Année Universitaire 2017-2018

Dédicaces

A Mes Pères Parents

A Mes Frères et Sœurs

A toute Ma Famille

Je dédis ce modeste travail.

Remerciements

Ce mémoire de master a été réalisé à l'universitaire Docteur Moulay Tahar de SAIDA (ALGERIE).

Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur MOKADDEM Allel rapporteur de ce mémoire, maître de conférences au centre universitaire Nour Bachir d'El Bayadh, et à Monsieur DOUMI Bendouma co-encadreur, maître de conférences à l'université Dr. Tahar Moulay de Saïda, pour ses conseils et encouragements. Je les remercie pour ses esprits scientifiques, ses compréhensions, ses disponibilités et la patience qu'ils m'ont témoignée pendant toute la période de ce travail. Qu'ils trouvent ici l'expression de mon profond respect et ma grande estime.

Mes plus sincères remerciements aux membres de jury pour l'honneur qu'ils me font en acceptant de juger ce travail. Ma profonde gratitude à monsieur ELKEURTI Mohammed professeur à l'université de Saïda pour l'honneur qu'il me fait en acceptant la présidence de ce jury. Je tiens à remercier monsieur BOUDALI Abdelkader et Mme. HACHEMAOUI Malika maîtres de conférences à l'université de Saïda, qui m'ont fait l'honneur en acceptant de faire partie de ce jury pour examiner ce mémoire de master.

Etude et modélisation par algorithme métaheuristique de l'effet de la contrainte thermique sur l'endommagement d'un Bio-composite hybride.

Résumé

Les études récentes montrent que la tenue thermique des polymères est très nettement améliorée par l'incorporation de fibres d'origine végétale. Dans ce contexte, nous avons investigué en utilisant une modélisation métaheuristique basée sur des modèles probabilistes de l'effet de la contrainte thermique sur l'endommagement d'un matériau Bio-composite hybride. Notre simulation numérique fait ressortir que le bio-composite hybride Chanvre-sisal/Amidon est le plus résistant aux contraintes thermiques comparant avec le bio-composite Chanvre/Amidon. Les résultats obtenus dans notre étude sont en bon accord avec les résultats d'Antoine et al, qui ont montré par les essais expérimentaux que les fibres naturelles améliorent parfaitement les propriétés mécaniques des matériaux bio-composites.

Study and modeling by metaheuristic algorithm of the effect of the thermal stress on the damage of a hybrid Bio-composite material.

Abstract

The recent studies show that the thermal resistance of polymers is very much improved by the incorporation of fibers of plant origin. In this context, we have investigated using metaheuristic modeling based on probabilistic models of the effect of thermal stress on the damage of a hybrid Bio-composite material. Our numerical simulation shows that the hemp-sisal/starch hybrid bio-composite is the most resistant to thermal stresses compared with the hemp / starch bio-composite. The results obtained in our study are in good agreement with the results of Antoine et al, which showed by experimental tests that natural fibers perfectly improve the mechanical properties of bio-composite materials.



SOMMAIRE

Table de matières

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale.....01

Références.....03

Chapitre I

(Etude bibliographique sur les bio-composites hybrides).....04

I.1 Introduction.....05

I.2. Les matériaux composites..... 05

I.2.1. Définition.....05

I.2.2 Les différents types de matériaux Composites.....06

I.3 Définition d'un matériau bio-composite.....07

I.4 Les Matériau hybrides.....07

I.4.1 Définition.....07

I.4.2 Caractérisation des matériaux hybrides08

I.5 Les bio-composites hybrides.....08

I.6 Les matrice.....11

I.6.1 Définition..... 11

I.6.2 Les résines thermoplastiques.....11

I.6.3 Résines thermodurcissables.....12

I.6.4 La résine époxyde.....	13
I.7 Renforts.....	14
I.7.1 Fibre de verre.....	14
I.7.2 Fibre de carbone.....	15
I.7.3 Fibre d'aramide.....	16
I.8 Les charges.....	17
I.9 Fibres naturelles.....	18
I.9.1 Définition.....	18
I.9.2 Les caractéristiques des fibres naturelles.....	19
I.9.3 Définition de la fibre végétale.....	20
I.9.3.1 La fibre de chanvre.....	20
I.9.3.2 La fibre de sisal.....	21
I.10 l'amidon.....	22
I.11 Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux chanvre, sisal et la matrice amidon.....	23
I.12 Conclusion.....	23
Références.....	24

Chapitre II

(Modélisation et Simulation de l'endommagement de l'interface fibre- matrice).....	27
---	-----------

Partie I : Modélisation de l'endommagement

II.1.1 Introduction.....	28
--------------------------	----

II.1.2 Généralités sur l'endommagement des composites.....	28
- A l'échelle microscopique.....	28
- A l'échelle mésoscopique.....	28
- A l'échelle macroscopique.....	29
II.1.3 L'interface fibre/matrice.....	29
II.1.4 Comportement d'un composite unidirectionnel	30
A- Cas d'une interface très forte.....	30
B- Cas d'une interface très faible.....	31
C- Cas d'une interface relativement faible.....	31
II.1.5 Mécanismes de rupture.....	32
II.1.6 Statistique de Weibull.....	32
II.1.7 Le modèle de Cox	35
II.1.7.1 Le modèle micromécanique de Cox	35
II.1.7.2 Modèle de Cox : Transfert de charge élastique.....	35
II.1.8 Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface.....	36
II.1.8.1 Equilibre des forces de cisaillement.....	36
II.1.8.2 Equilibre des contraintes dans une portion dx de fibre.....	38
 Partie II : Les Algorithmes génétiques	
II.2.1 Introduction.....	42
II.2.2 Les algorithmes génétiques.....	42
II 2.3 Les opérateurs des algorithmes génétiques	43
II 2.3.1 La Sélection.....	43
II 2.3.1 Reproduction (croisement).....	43
II 2.3.1 Mutation.....	44
II 2.4 Le codage	44
II 2.4.1 Codage binaire.....	44
II 2.4.2 Codage réel.....	45

II 2.4.3 Codage à l'aide de suite alphabétique.....	45
II.2.4.4 Codage sous forme d'arbre.....	46
II.2.5 Fondements des algorithmes génétiques.....	46
Références.....	48

Chapitre III

(Résultats et Discussions).....51

III.1. Introduction.....	52
III.2. Modélisation et simulation numérique.....	52
III.2.1. Algorithme génétique.....	52
III.2.2 Organigramme.....	53
III.3 Les modèles analytiques de simulation.....	53
III.3.1 La contrainte thermique.....	53
III.3.2 Le Modèle probabiliste de Weibull.....	54
III.4 Résultats de simulation.....	55
III.4.1. Chanvre /Amidon.....	56
III.4.2. Chanvre-Sisal /Amidon.....	56
III.5. Conclusion.....	60
Références.....	61
Conclusion générale.....	62

Liste des figures

Figure I.1 : Compositions d'un matériau composite.....	06
Figure I.2 : Classification des résines composites en fonction de la taille des particules de charges.....	10
Figure I.3 : Types de Matrices.....	11
Figure I.4 : Fibre de verre.	15
Figure I.5 : Fibre de carbone.....	16
Figure I.6 : Fibre d'aramide.....	16
Figure I.7 : les types des renforts.....	17
Figure I.8 : Classification des fibres naturelles.....	19
Figure I.9 : Dessin anatomique du chanvre.....	21
Figure I.10 : La fibre de sisal.....	22
Figure II.1 : Représentation schématique des différentes échelles d'analyse d'un matériau composite à matrice polymère et fibres longues.....	29
Figure II.2 : Modes d'endommagement.....	31
Figure II.3 : Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull.....	34
Figure II.4 : calculs de la contrainte moyenne à rupture.....	35
Figure II.5 : volumes élémentaires représentatifs.....	37
Figure II.6 : équilibres de la matrice en cisaillement.....	37
Figure II. 7 : Équilibre élastique dans une portion de fibre.....	39
Figure II. 8 : modèles de Cox : profil des contraintes fibre/interface.....	40
Figure II.9 : Exemple d'un croisement.....	43

Figure II.10 : Exemple d'une mutation.....	44
Figure II.11 : Exemple d'un codage binaire d'un chromosome.....	45
Figure II. 12 : Exemple d'un codage réel d'un chromosome.....	45
Figure II. 13 : Codage alphabétique d'un chromosome.....	45
Figure II. 14 : Exemple de codage sous forme d'arbre.....	46
Figure III.1 : L'organigramme de l'algorithme génétique.....	53
Figure III.2 : L'influence de la température sur l'endommagement de l'interface σ (105N/m ²).....	57
Figure III.3 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface σ (115N/m ²).....	57
Figure III.4: L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface σ (125N/m ²).....	58
Figure III.5: L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface σ (105N/m ²).....	58
Figure.III.6: L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface σ (115N/m ²).....	59
Figure III.7: L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface σ (125N/m ²).....	59

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Taille moyenne des particules de charges des résines composites hybrides.....	10
Tableau I.2 : les Caractéristiques mécanique des résines thermoplastiques.....	12
Tableau I.3 : les Caractéristiques des résines thermodurcissables.....	12
Tableau I.4 : Tableau comparatif entre la matrices TP et la matrices TD.....	13
Tableau I.5 : Quelques caractéristiques des fibres naturelles.....	20
Tableau I.6 : Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux chanvre, sisal et la matrice amidon.....	23

Introduction

Introduction générale

Au cours de ces dernières années, les industries de la transformation des matériaux composites ont bénéficié d'une croissance rapide et régulière, soutenue en particulier par la diversité des applications.

Par définition, un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de propriétés différentes et complémentaires. Il s'agit le plus souvent d'un renfort noyé au sein d'une matrice permettant d'obtenir un matériau aux propriétés intermédiaires. Le renfort contribue à améliorer la résistance mécanique du matériau alors que la matrice assure le double rôle d'élément de transfert des charges vers le renfort et de protection de celui-ci [1].

Les composites ne cessent d'évoluer vers des produits qui sont, soit les moins coûteux possibles, soit les plus performants, ou bien les deux à la fois. De plus, dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique, les composites tendent à intégrer un caractère écologique. Pour réduire les fibres traditionnelles de coût élevé (carbone, verre et aramide), de nouveaux composés ont été développés. Des recherches ont porté leur attention sur les composites renforcés par les fibres naturelles. Ces composites combinent de bonnes propriétés mécaniques avec une faible densité [2-3]. De tels composés offrent un certain nombre d'avantages bien connus qui incluent le coût, la disponibilité des ressources naturelles renouvelables, la biodégradabilité, etc... [4].

Plusieurs de ces composites à base de fibres naturelles présentent des propriétés mécaniques susceptibles d'être utilisées dans les domaines techniques. En effet, l'utilisation industrielle de fibres végétales comme renfort de matériaux composites est croissante dans de nombreux secteurs d'activités (automobile, bâtiment...). Ce succès incontestable est lié aux propriétés intrinsèques des renforts naturels. Cependant, dans l'industrie automobile, les textiles ont été employés pendant des années pour renforcer

des plastiques utilisés dans des voitures, particulièrement dans les « Trabant ». Les fibres cellulosiques assurent aussi une excellente isolation [5].

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 amidon renforcée par la fibre de sisal et la fibre de chanvre.

Notre mémoire est composé de trois chapitres, d'une introduction, et d'une conclusion générale :

Le premier chapitre présente des généralités sur les bio-composites hybrides, dans le deuxième, nous allons présenter 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 et ses applications.

Dans le dernier chapitre, nous présentons l'ensemble des résultats obtenus par notre modèle génétique.

[1] J.-M. Berthelot. Matériaux Composites. Comportement mécanique et analyse des structures, Éditions TEC & DOC, 4ème édition (2006).

[2] B.F. Abu-Sharkh, H. Hamid, degradation study of date palm fiber/polypropylene composites in natural and artificial weathering: mechanical and thermal analysis, Poly. Dég. Stab. 85, 967-973 (2004).

[3] A.K. Bledzki, J. Gassan, Composite reinforced with cellulose based fibers, Prog. Poly. Sci. 24, 221-274 (1999).

[4] L.A. Pothan, Z. Oommen, S. Thomas, Dynamic mechanical analysis of bananas fiber reinforced polyester composites, Comp. Sci. Tech. 63, 283-293 (2003).

[5] C. Baley, Fibre naturelle de renfort pour matériaux composites, Tech. Ing. AM 5130.

Chapitre I

*Etude bibliographique sur les bio-composites
hybrides*

I.1 Introduction

Ces dernières années, la demande des marchés pour des produits plus respectueux de l'environnement sont de plus en plus demandés. Le développement de matériaux composites à base de fibres naturelles présente de nombreux avantages du fait de leur biodégradabilité, faible coût, faible masse volumique et qu'elles sont dérivées d'une ressource naturelle renouvelable. [1]

Certains concepts de base dans la construction de bio composites sont discutés, tels que les différents types de bio composites, les classes de matériaux de composition, et les familles générales des techniques de production. Les technologies de traitement de fabrication conventionnelles, à base de solutions et additives pour les bio composites sont décrites et leur applicabilité et les exigences de matériaux de base, [2]

I.2. Les matériaux composites

I.2.1. Définition

Le matériau composite est un assemblage d'au moins deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion). Cela constitue un nouveau matériau aux propriétés supplémentaires que chaque élément seul ne possède pas. Ainsi, le phénomène qui se produit permet d'augmenter la qualité de la matière pour certaines utilisations. La matière devient ainsi plus légère, rigide, etc. Pour toutes ces raisons et pour la qualité du matériau, Le Composite est de plus en plus utilisé et pour de diverses applications. [3]

Il est composé d'un matériau de base (matrice ou liant : polymère, céramique ou métal) renforcés par des fibres, ou agrégats, d'un autre matériau afin de combiner au mieux les avantages des deux. Les deux corps, de structure différente, ne se mélangent pas (structure hétérogène) au contraire d'un alliage (structure homogène). [4]

La figure suivante présente les compositions d'un matériau composite

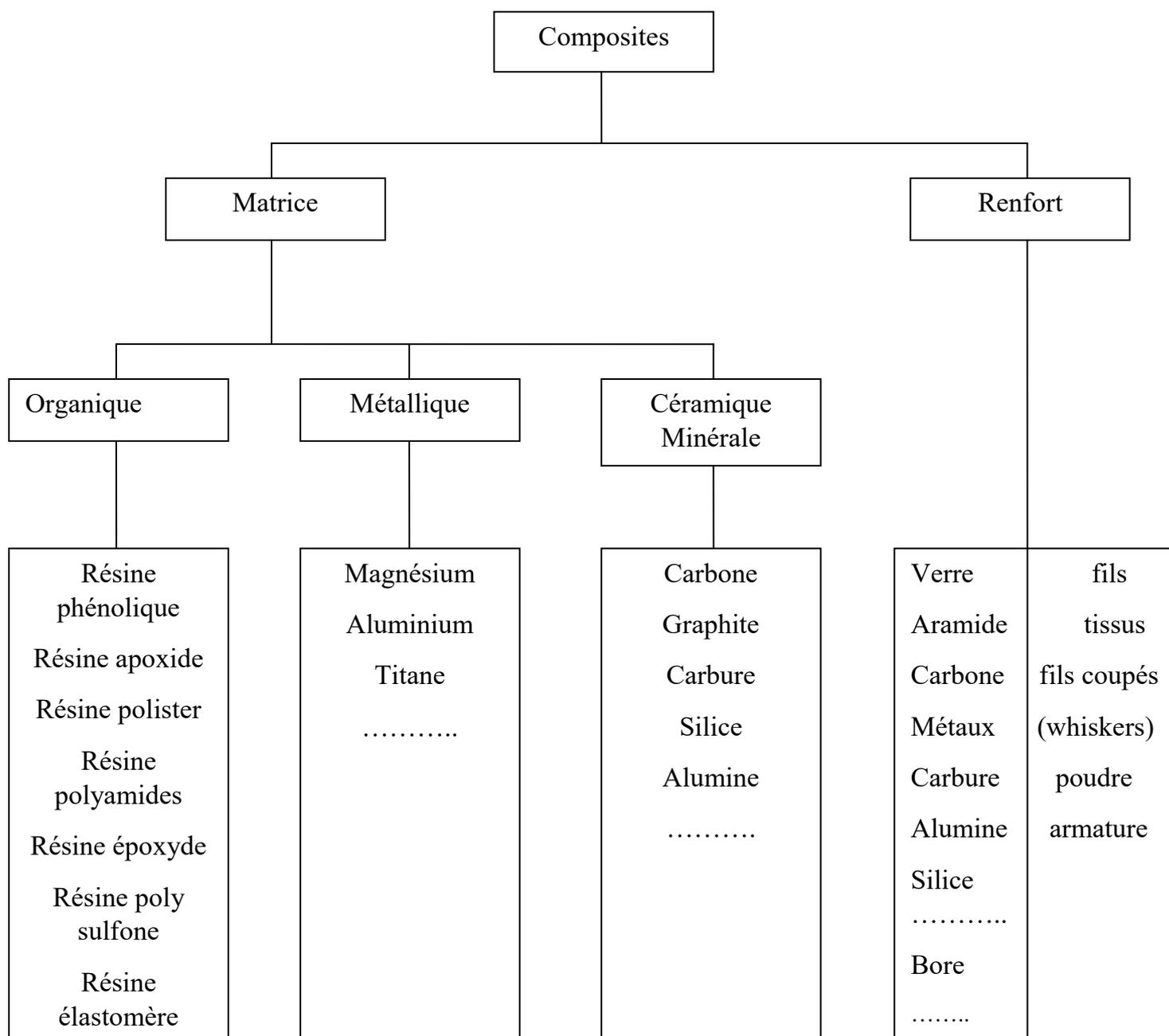


Figure I.1 : Compositions d'un matériau composite

I.2.2 Les différents types de matériaux Composites

Il existe 3 grandes familles qui répertorient les matériaux composites en fonction de la matrice qui les compose :

- Le CMO (ou composite à matrice organique) qui est le plus utilisé aujourd'hui

grâce à son coût plus bas permettant une production en série.

- Le CMC (ou composite à matrice céramique) qui est majoritairement utilisé pour des domaines très spécifiques à haute technicité et à température élevée : spatial, militaire ou encore nucléaire
 - Le CMM (ou composite à matrice métallique) qui est composé d'aluminium, zinc ou magnésium par exemple qui peut être utilisé pour diverses applications comme l'automobile, les loisirs ou encore l'électronique.
- Pour chacune de ces familles, les renforts utilisés pour compléter la matrice sont différents.

Dans la famille de composite la plus répandue aujourd'hui, le composite à matrice organique, on distingue deux catégories :

- Le composite à grande diffusion : est le moins coûteux à produire et est utilisé dans la fabrication de pièces de toutes sortes.
- Le composite à haute performance : est plus cher à produire bien qu'il ait des qualités mécaniques supérieures. Il est ainsi utilisé dans les secteurs de l'aéronautique, le nautisme, le sport et les loisirs. [3]

I.3 Définition d'un matériau bio-composite

Les matériaux verts ou bio-composites englobent les bio-polymères et les fibres naturelles (NF) provenant de ressources renouvelables, ce qui contribue à éliminer les déchets non renouvelables, à réduire l'utilisation de matières premières et à réduire les émissions de gaz à effet de serre. Cet article avait pour but d'évaluer et de développer des bio composites spécifiques en termes de propriétés mécaniques, préparés par laminage et par compression. [5]

I.4 Les Matériau hybrides

I.4.1 Définition

Un système hybride est un ensemble dans lequel coexistent à la fois des espèces organiques et inorganiques. La nature hybride des matériaux leur confère non

seulement des propriétés intermédiaires entre le minéral et l'organique mais également des comportements nouveaux. Les précurseurs utilisés sont appelés ORMOCERS (ORganically MODified CERamics) si l'élément minéral est un métal quelconque (titane, zirconium, aluminium...) et plus spécifiquement des ORMOSILS (ORganically MODified SIloxanes) si l'élément minéral est l'atome de silicium. La formule générale des ORMOSILS est $R_xSi(OR')_{4-x}$. R est une partie organique soit inerte soit susceptible de polymériser par voie thermique ou par insolation UV. OR' est un groupement alcoxyde permettant de former le réseau minéral par hydrolyse et condensation. [6]

I.4.2 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 [7.8]

- 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.5 Les bio-composites hybrides

Un matériau composite hybride est une combinaison de "hybride" et "composite" [9]. Ce matériau est simplement une hybridation de matériaux composites, par

exemple des composites renforcés par deux ou plusieurs types de fibres ou un matériau composite laminaire constitué de métaux renforcés par des fibres et de minces feuilles métalliques. La signification de "hybride" dans les matériaux composites hybrides est l'hybridation dans la structure macroscopique à l'échelle métallographique. [9]

Dans certains cas concernant des matériaux fonctionnels, le terme "matériaux hybrides" peut être préférable. Parce que les composites structuraux tels que les composites carbone / carbone et les composites à matrice métallique ont été très populaires, le terme «composites» peut sembler conventionnel pour les chercheurs de matériaux fonctionnels. [9]

Les matériaux hybrides décrits dans cette section sont des composites avec une hybridation de mélanges macroscopiques. Les propriétés de ces matériaux peuvent être comprises à partir de la combinaison des propriétés des matériaux constitutifs, par exemple, la règle du mélange. Ces matériaux devraient être appelés "matériaux à structure hybride" parce que l'hybridation de la structure macroscopique est le but de la combinaison ou du mélange de matériaux. [9]

La plus grande famille, toutes viscosités confondues, est celle des composites HYBRIDES. Ces matériaux sont commercialisés depuis les années 80. Ils contiennent un mélange de particules de différentes tailles et de différentes compositions qui a permis d'augmenter le pourcentage de charges et les propriétés des matériaux. Compte tenu de l'importance et de la diversité de cette famille, elle a été subdivisée en fonction de la taille moyenne des particules de charges et de la présence de nano charges (2 à 70 nm) obtenues par la « nanotechnologie » : en MICROHYBRIDES (taille moyenne des charges < 1 μm) et en MICROHYBRIDES NANOCHARGES (taille moyenne des charges < 0,4 μm). Ils ont des propriétés mécaniques et physiques identiques aux composites hybrides et un potentiel esthétique ainsi qu'une aptitude au polissage identiques à ceux des micro-chargés. [10]

Taille des charges (taille moyenne)	Résines composites hybrides
< 10 μm	Hybrides
< 5 μm	Hybrides à fines particules
< 3 μm	Hybrides à particules ultrafines
< 1 μm	Hybrides submicroniques

Tableau I.1 : Taille moyenne des particules de charges des résines composites hybrides [10]

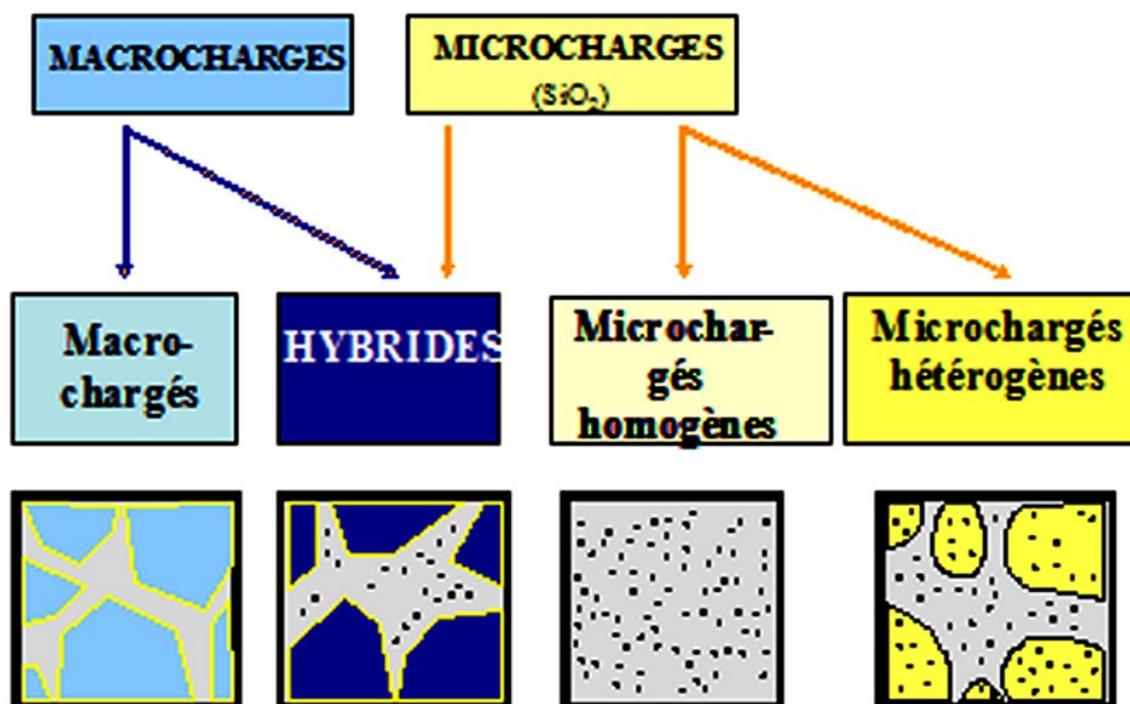


Figure I.2 : Classification des résines composites en fonction de la taille des particules de charges [10]

I.6 Les matrices

I.6.1 Définition

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. [11]

La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée [12]

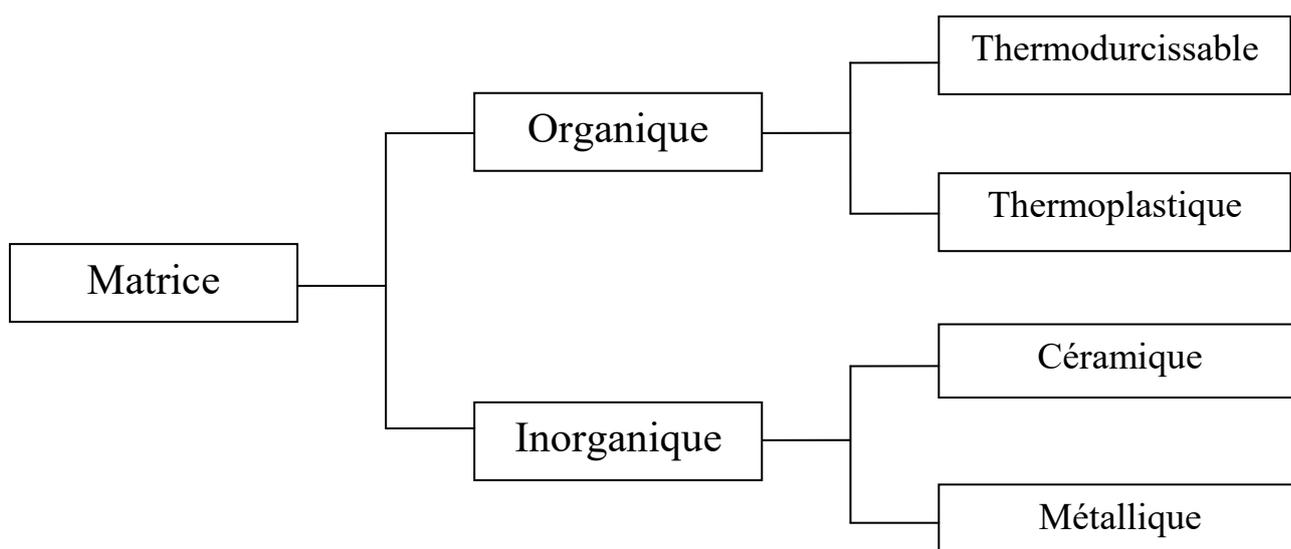


Figure I.3 : Types de Matrices [12]

I.6.2 Les résines thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Les polychlorures 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 2 [13]

Résines	Température de fusion $T_f(^{\circ}\text{C})$	Masse volumique ρ (kg / m^3)	Résistance à la traction σ_t^R (Mpa)	Module d'élasticité en traction (E, Young) (Gpa)
Polyamide	65 - 100	1140	60 - 85	1.2 - 2.5
Polypropylène	900	1200	20 - 35	1.1 - 1.4

Tableau I.2 : les Caractéristiques mécanique des résines thermoplastiques [12]

I.6.3 Les 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, aminoplastes, uraniques) 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 [11]

Résines	$T_f(^{\circ}\text{C})$	ρ (kg / m^3)	Renforte ε_t^R (%)	σ_t^R (Mpa)	σ_c^R (Mpa)	E(Gpa)
Polyesters	60a100	1140	2-5	50-85	90-200	2.8-3.6
Phénoliques	120	1200	2-5	40	250	3-5
Epoxydes	290	1100-1500	2-5	60-80	250	3-5

Tableau I.3 : les Caractéristiques des résines thermodurcissables [12]

Le tableau suivant présente une comparaison entre Les thermoplastiques et Les thermodurcissables [13]

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.4 : Tableau comparatif entre la matrices TP et la matrices TD [13]

I.6.4 La résine époxyde

Résine époxyde composé contenant des groupes époxydiques susceptibles de réagir avec un durcisseur pour donner un film de peinture très résistant. Les résines époxy sont des résines thermodurcissables présentant de bonnes propriétés mécaniques, une bonne tenue à la température, une bonne résistance chimique et un faible retrait au séchage.

Le terme exact est résine polyépoxyde mais il est admis de parler d'époxyde et par abus de langage, d'époxy. Un revêtement époxy est constitué de deux composants principaux, une résine de base et un durcisseur à incorporer ensemble. La résine de

base est généralement de couleur transparente, alors que le durcisseur est de couleur ambrée.

L'époxy est un revêtement fréquemment utilisé pour recouvrir les surfaces en béton telles que les planchers de garage ou d'atelier. Ce type de résine est reconnu pour sa durabilité, sa solidité et sa souplesse. Elle résiste très bien aux chocs, aux rayures, à l'abrasion et aux usures répétitives. Elle possède une excellente tenue aux acides, aux bases, aux solvants et aux autres produits chimiques en général. [14]

Elles entrent dans un très grand nombre d'applications dont certaines sont d'un niveau de technologie élevé telles que : [15]

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

I.7 Renforts

Dans les composites, les renforts assurent la tenue mécanique du matériau. Ils sont généralement sous forme de fibres et contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés. Ils sont différents des charges. [16,17].

Comme leur nom l'indique, les renforts d'origine naturelle sont des matériaux renouvelables, neutres en CO₂, pouvant fournir des propriétés de renfort dans les composites et/ou agir comme charges pour réduire la consommation de matière pétrochimique en matières plastiques de base [18].

I.7.1 Fibre de verre

Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elle est obtenue à partir de sable (silice) et d'additifs (alumine, carbonate de chaux, magnésie, oxyde de bore). On distingue trois types de fibres : [19]

- E : pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;
- R : pour les composites hautes performances ;
- D : pour la fabrication de circuits imprimés (propriétés diélectriques).

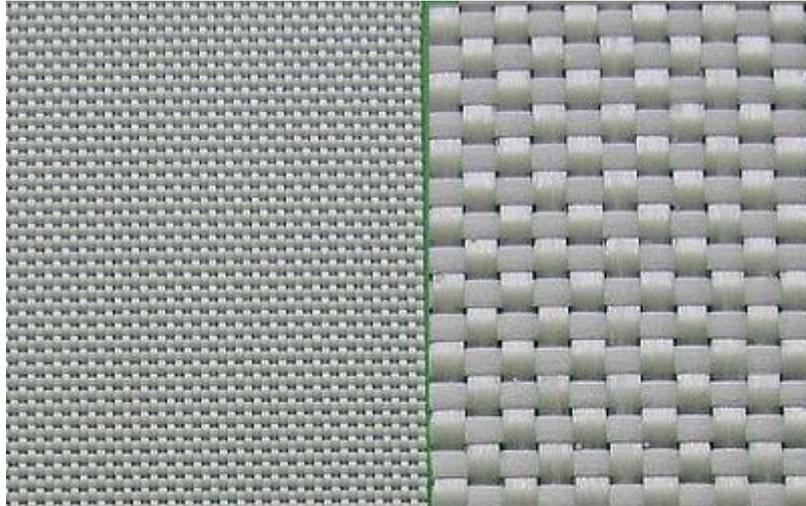


Figure I.4 : Fibre de verre [20]

I.7.2 Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile). Selon la température de combustion, on distingue deux types de fibres : [19]

- fibres haute résistance (HR) : pour une combustion de 1000 à 1500 °C ;
- fibres haut module (HM) : pour une température de combustion de 1800 à 2000 °C.

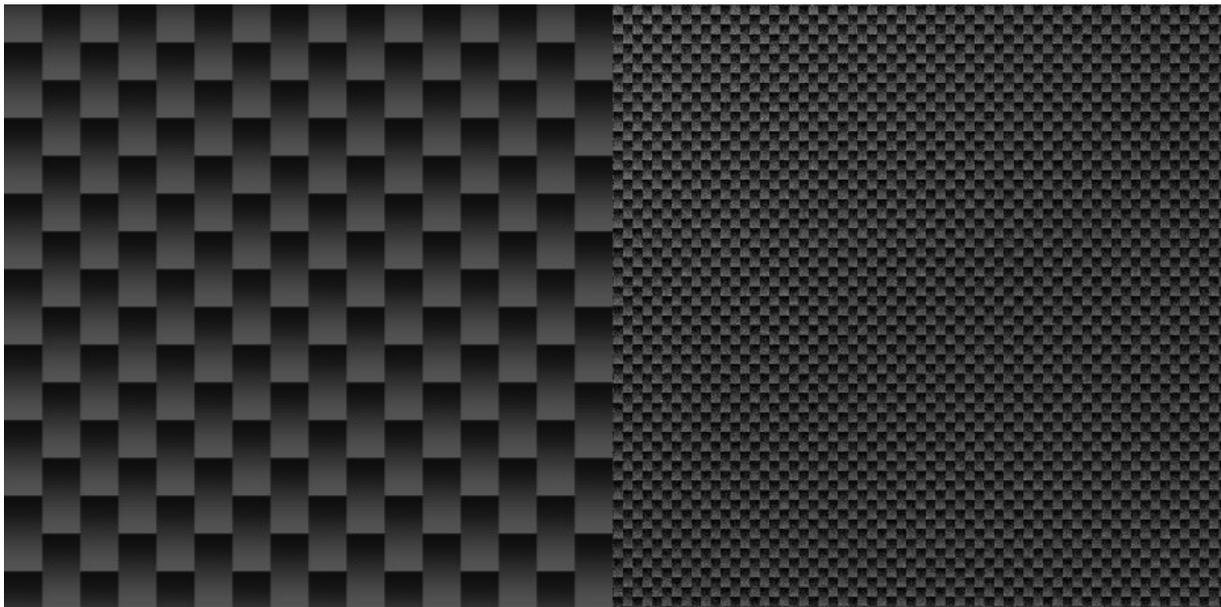


Figure I.5 : Fibre de carbone [21]

I.7.3 Fibre d'aramide

Souvent appelée KEVLAR, la fibre d'aramide est issue de la chimie des polyamides aromatiques. Il est possible de trouver deux types de fibres d'aramide de rigidités différentes :

- les fibres bas module : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;

- la fibre haute module : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances. [19]



Figure I.6 : Fibre d'aramide

La figure suivant présente les différents types de renforts : [22]

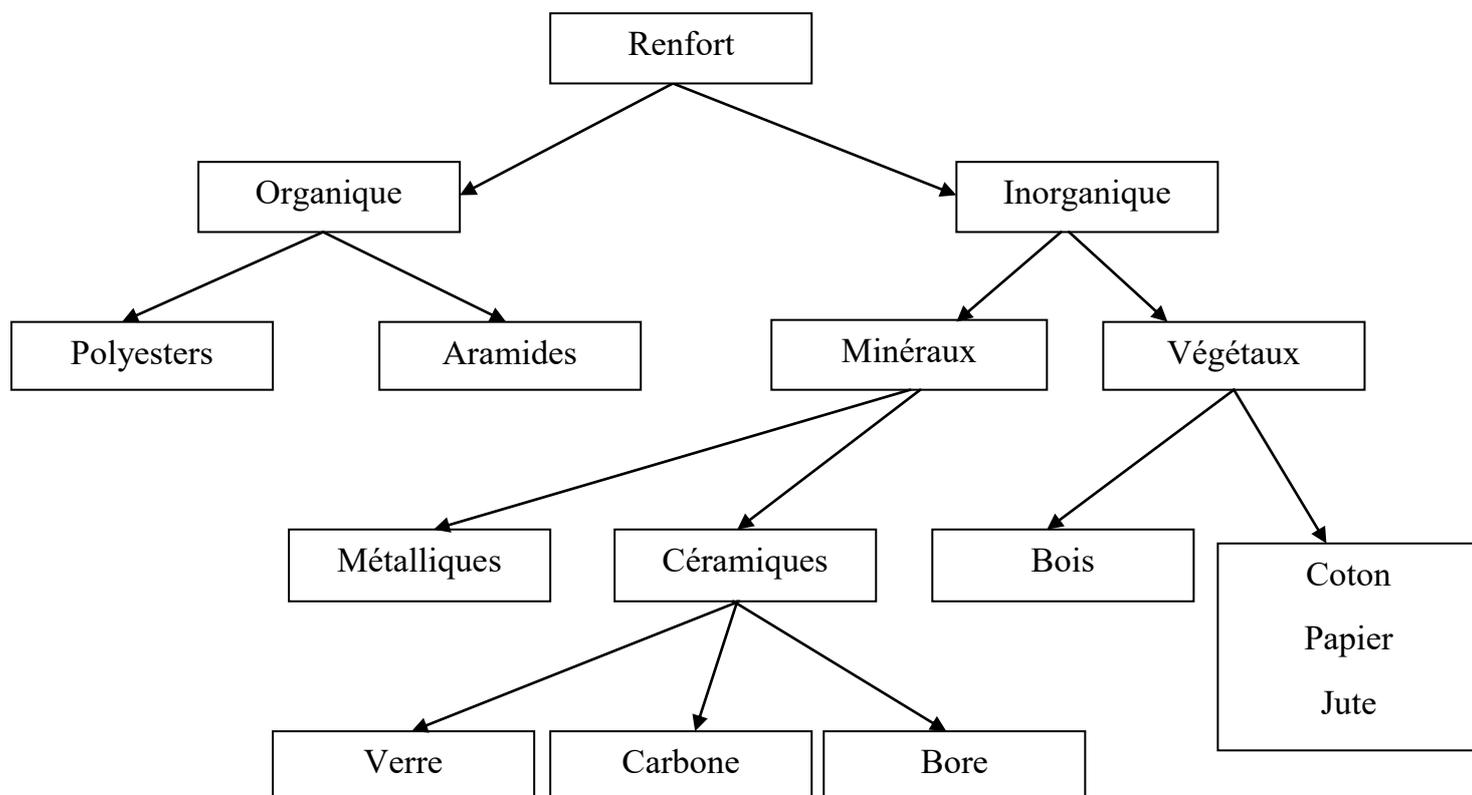


Figure I.7 : les types des renforts

I.8 Les charges

Les charges sont sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou de liquides, et qui modifient une propriété de la matière à laquelle ils sont ajoutés (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu, etc.) [16, 17].

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou végétale qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé. A l'inverse des matières thermoplastiques, les matières thermodurcissables ont toujours contenu des charges de nature et de forme variée, à des taux souvent élevés pouvant atteindre 60 % en masse. Pour un polymère donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour l'objet fini. Mais, d'une manière générale, les

substances utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences [16, 17] :

- Compatibilité avec la résine de base
- Mouillabilité
- Uniformité de qualité et de granulométrie
- Faible action abrasive
- Bas prix de revient

I.9 Fibres naturelles

I.9.1 Définition

Les fibres naturelles sont utilisées depuis 3000 ans dans les composites, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangés pour construire des murs. Au cours de la dernière décennie, les composites renforcés de fibres naturelles ont reçu une attention croissante, tant auprès du monde universitaire que de diverses industries. Il existe une grande variété de fibres naturelles qui peuvent être utilisées pour le renforcement ou comme charges (Figure) [18, 19].

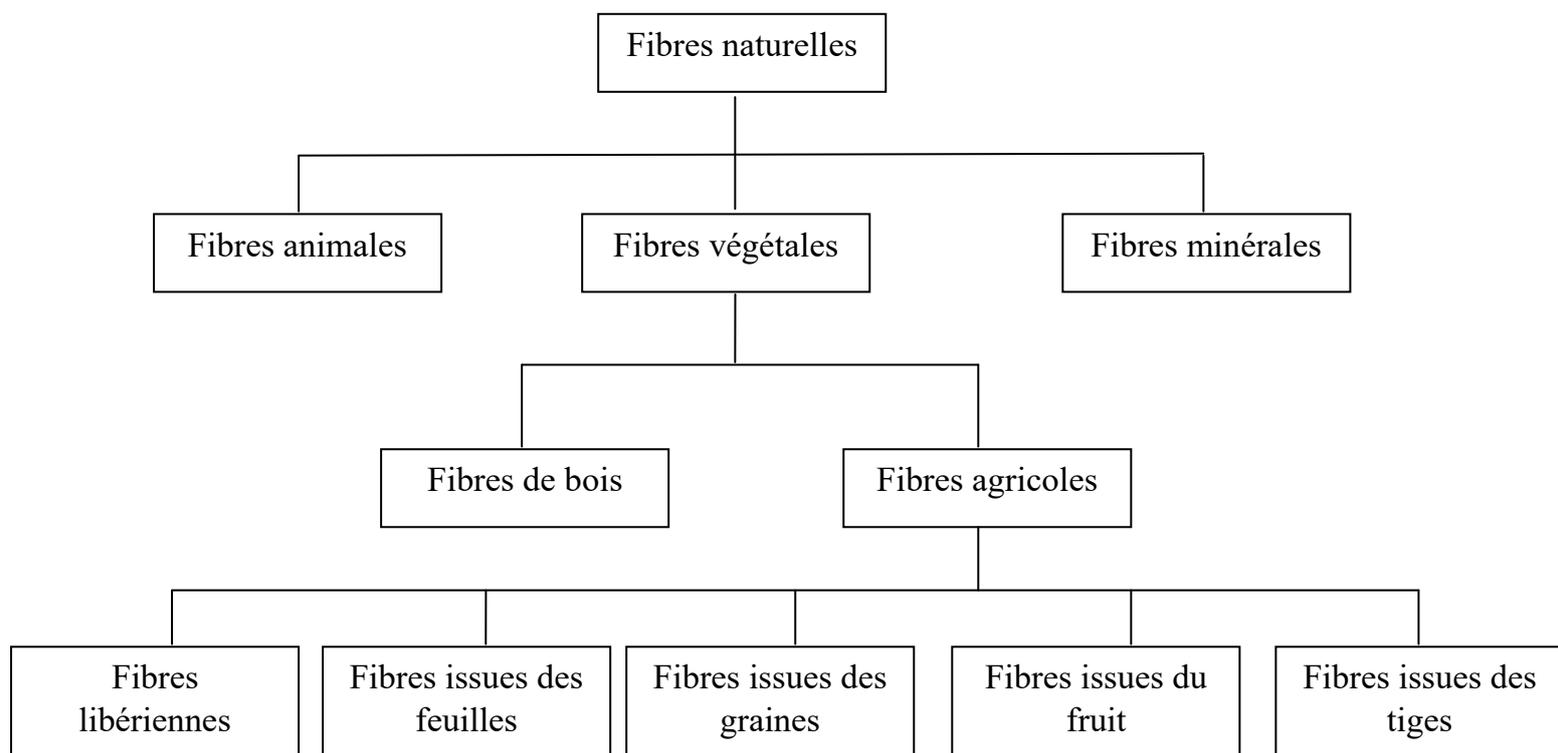


Figure I.8 : Classification des fibres naturelles. [20]

I.9.2 Les caractéristiques des fibres naturelles

Le tableau suivant présente les caractéristiques des fibres naturelles. [21]

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

Tableau I.5 : Quelques caractéristiques des fibres naturelles [21]

I.9.3 Définition de la fibre végétale

Les fibres végétales sont des structures biologiques fibrillaires composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine. En proportion relativement faible d'extractibles non azoté, de matière protéique brute, de lipide et de matières minérales. Les proportions de ces constituants dépendent énormément de l'espèce, de l'âge et des organes de la plante [22].

Les fibres végétales sont classées en quatre groupes suivant leur provenance. A s'avoir: les fibres de feuille, de tiges, de bois et de surface.

Les fibres végétales sont issues de la graine (le coton), la tige (le chanvre et le lin), la feuille (le sisal) ou l'écorce (la bourre de coco). [23]

I.9.3.1 La fibre de chanvre

Le chanvre Une fibre vendu dans le monde entier pour fabriquer des vêtements, des cordes et du papier. Cette fibre extrêmement résistante est de plus en plus utilisée pour fabriquer des matériaux de construction et des bioplastiques destinés à l'industrie

automobile. Les derniers progrès réalisés dans la "cotonisation" pourraient permettre de commercialiser des vêtements de qualité supérieure. [23]



Figure I.9 : Dessin anatomique du chanvre [24]

A : les parties apicales mâles, en B : les parties apicales femelles, en C : Les anthères sont représentées individuellement et en D : l'inflorescence mâle, rassemblant les anthères en grappe. E. Les graines de chanvre sont présentées. F. Les différents stades de maturité de la fleur femelle sont représentés. Les fleurs s'organisent en grappe sur la tige.

I.9.3.2 La fibre de sisal

Sisal Une plante succulente adaptée aux climats chauds, elle pousse même dans les régions arides. Le sisal, impropre à la fabrication de vêtements, se substitue à l'amiante et à la fibre de verre dans un grand nombre de matériaux composites. Les produits dérivés du sisal entrent dans la composition de biogaz, d'ingrédients pharmaceutiques et de matériaux de construction. [23]

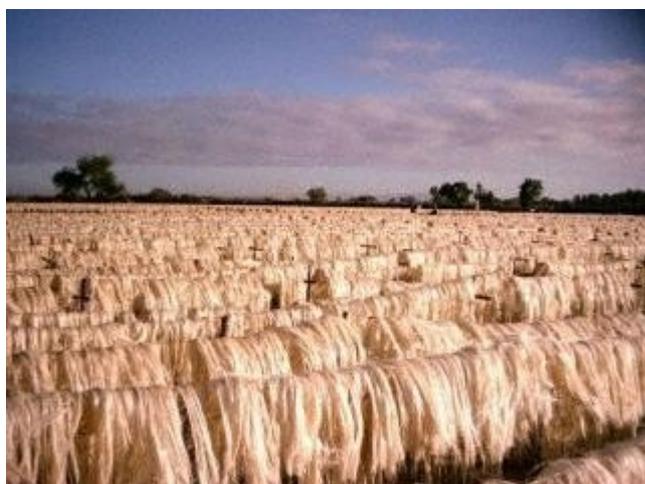


Figure I.10 : La fibre de sisal [25]

I.10 l'amidon

L'amidon est la substance organique de réserve énergétique principale des végétaux [26]. Amidon est également une substance indispensable à l'alimentation de l'homme et des animaux. Présent dans tous les organes végétaux, l'amidon natif se concentre préférentiellement : Dans les graines de céréales (ex. : blé, avoine, maïs) et de légumineuses (ex. : pois, fèves). Dans les fruits (ex. bananes). Dans les parties souterraines (ex. : pommes de terre, rhizomes du manioc etc.). Bien que l'amidon soit présent dans tous les organismes végétaux supérieurs, il n'y a que quelques plantes qui soient vraiment cultivés pour la production de ce composé à l'échelle industrielle. Le maïs, la pomme de terre et le blé sont les principales plantes utilisées pour la production des 35 millions de tonnes d'amidon natif consommés mondialement [27].

Cet amidon est ensuite utilisé sous forme native ou sous forme modifiée dans plusieurs secteurs industriels tels que les textiles, l'industrie alimentaire, les pâtes et papiers et le domaine pharmaceutique.

I.11 Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux chanvre, sisal et la matrice amidon

Le tableau suivant résume les propriétés mécaniques et physiques des matériaux chanvre, sisal et la matrice amidon :

Fibres	Références	Densité (g/cm ³)	Allongement à la rupture (%)	Résistance à la traction (MPa)	Module de Young (GPa)
chanvre	[28]	1.7	1.6	690	35
Sisal	[29]	--	2.6	278	--
	[30]	1.37	5.2	363	15.2
	[31]	1.5	2.0-2.5	511-635	9.4-22.0
amidon	[32]	--	15-30	--	20-50

Tableau I.6 : Les propriétés mécaniques et physiques des matériaux chanvre, sisal et la matrice amidon

I.12 Conclusion

Les matériaux composites, définis comme des matériaux constitués d'un renfort et d'une matrice, se distinguent des autres produits plastiques de synthèse par des caractéristiques qui leur permettent, avec des propriétés d'inaltérabilité et de faible poids, de se substituer à des pièces en métal. Depuis quelques années, le marché des matériaux composites ne cesse de croître. De nombreux secteurs d'activité intègrent ces nouveaux matériaux dans la conception de leurs produits : le médical, le sport, l'automobile, l'énergie verte, etc. Nouvelles sources d'innovations, les matériaux composites offrent de nouvelles opportunités de croissance pour l'industrie. [33]

Références

- [1] A. Belaadi, A. Bezazi, M. Bouchak, F. Scarpa, Tensile static and fatigue behaviour of sisal fiber, *Mater Desig*, 46 (2013) 76–83.
- [2] L.K cardon, K.J Ragaert, R.De santis, A. Gloria « biomedical composite (Second Edition) » 2017 pages 17-36
- [3] Z.A Sud-6 impasse de l’Océan 85150 La Capelle Achard « AMP Composite » Tél.0220159905
- [4]Matériaux : Généralité sur
www.zpag.net/Tecnologies_Industrielles/Materiaux_Generalite.htm
- [5] Seyed Meysam Khoshnava. Raheleh Rostami. Mohammad Ismail. Abdul Razak Rahmat. Babatunde Ezekiel Ogunbode « Construction et matériaux de construction » Volume 154 ,15 novembre 2017, Pages 155-166
- [6] J. Livage, M. Henry and C. Sanchez, *Progress in Solid State Chemistry* 18 (1988), p. 259.
- [7] Jérôme Vinas, Matériaux Hybrides polymères-particules de silice : synthèse et caractérisation »le 29/02/2008, page : 1-50.
- [8] 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.
- [9] M. Uemura, *Hybrid Composites*, Ed. par M. Uemura et H. Hukuda, CMC Publishing Co., Tokyo, Japon, (2002) 1-9. [en japonais]
- [10] A. RASKIN Société Francophone de Biomatériaux Dentaires 2009-2010
- [11] Renard J. “Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère”, collection Lavoisier, Paris (2005).
- [12] Laurent Gornet « Généralités sur les matériaux composites » Engineering school .2008 page : 1-4.

[13] Centre d'animation régional en matériaux avancés : GLOSSAIRE DES MATERIAUX COMPOSITES actualisation octobre 2006.

[14] Lionel GENDRE « Les grandes familles de matériaux composites » Edité le 04/05/2011

[15] P. BARDONNET, "Résines époxydes (EP)," Techniques de l'Ingénieur, vol. A3465.

[16] Centre d'Animation Régional en Matériaux Avancés (C.A.R.M.A.). Glossaire des matériaux composites. In: <http://www.materiatech-carma.net>; 2004.

[17] Gornet L. Généralités sur les matériaux composites. Ecole Centrale Nantes; In <http://hal.archives-ouvertes.fr>; 2008.

[18] M. Abdelmouleh, S. Boufi, M.N. Belgacem, A. Dufresne, 2007; Short natural-fibre reinforced polyethylene and natural rubber composites: Effect of silane coupling agents and fibres loading; *Composites Science and Technology* 67, 1627-1639.

[19] Suganti Ramarad; Preparation and properties of kenaf bast fiber filled (plasticized) poly (lactic acid) composites; Master, 2008.

[20] Nyström B. Natural fiber composites: optimization of microstructure and processing parameters [Doctoral thesis]. Department of Applied Physics and Mechanical Engineering: Lulea University of Technology; 2007.

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

[22] F. Michaud, "Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : Aptitude post formage" thèse Phd, univ Laval, 2003.

[23] découvrez les fibres naturelles « 15 fibres naturelles » 2009 sur <http://www.naturalfibres2009.org/fr/fibres/index.html>

[24]Koehler en 1897 et disponible sur
commons.wikimedia.org/wiki/File:Koeh026.jpg.

[25] Les fibres végétales sur
laboitadoc.majeloc.ch/Page2/Docs/fibres%20vegetales.pdf

[26]A. Guiibot,C Mercier, Gerald O.Aspinall editeur Academic
Pressinc.,Orlando(1985),3.

[27] Jung-Ahan, Seung-Taik Lim , Carbohydrate polymers ,55(2004)193-199.

[28] J.Bonnaudet, Propriétés mécaniques de fibres d'origine diverse 2007.

[29] BLEDZKI, A. K and GASSAN. J., Composites reinforced with cellulose based
fibers ?, ELSEVIER, Progress in polymer science, volume 24, pp.221-274, 1999.

[30] SAVASTANO, Jr.H., AGOPYAN,V., Transition zone studies of vegetable
cement paste composites .cement and concrete, composites , 21, pp.49-57, 1999.

[31] SWAMY, R.N., Properties of high-strength concrete ? Cement concrete and
agregates vol.8, N°1, pp.33-41,1986.

[32]A. Rindlav-westling,M. Stading, A.-M. Hermansson, and P. Gatenholm,
« Stucture, mechanical and barrier properties of amilose and amilopectin films, »
cabahydr.polym.vol.36,pp.217-224,1998.

[33] Jean-Luc Wertz Les biocomposites et composites polymère-chanvre en particulier
Juillet 2014 J'innove/ Les matériaux composites, 2013

Chapitre II

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

Chapitre II

Partie I : Modélisation de l'endommagement

II.1.1 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]

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. [1]

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.1.2 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. [2]

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 [2] s'est d'ailleurs intéressé à la détermination de la part de chacune des sollicitations uni axiales élémentaires (longitudinale, transversale, cisaillement) dans l'endommagement d'un stratifié.

Ainsi, les différents mécanismes d'endommagement (Figure.1) 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. [2]

- **A l'échelle mésoscopique**, ou 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. [2]
- **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. [2]

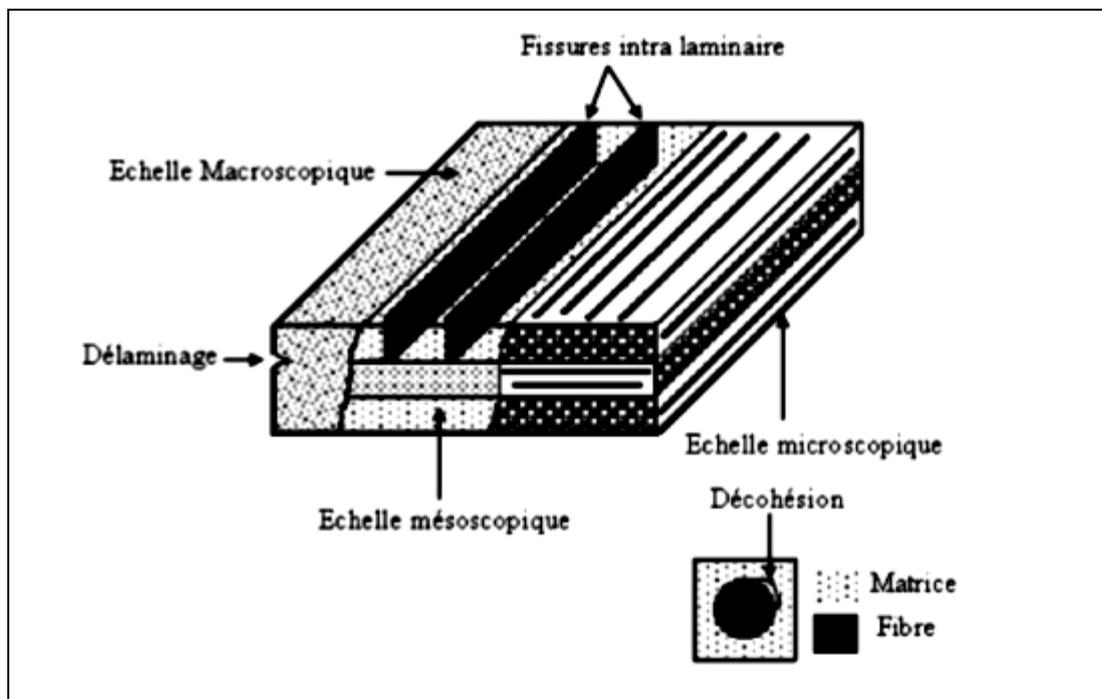


Figure. II.1: Représentation schématique des différentes échelles d'analyse d'un matériau composite à matrice polymère et fibres longues. [3]

II.1.3 L'interface fibre/matrice

L'interface est une zone assez critique qui joue un rôle très important sur le comportement mécanique du composite. Elle assure la transmission des efforts entre la matrice et le renfort lors d'une sollicitation. La résistance au cisaillement de l'interface

influence largement les propriétés finales du composite. En effet, un des modes d'endommagement dans les composites est la rupture à l'interface [4].

La résistance de l'interface dépend non seulement des propriétés des composants mais aussi de sa formation. Pour ces raisons, l'étude de l'interface est indispensable. Pourtant, les méthodes de caractérisation de l'interface présentent des limites, soit dans la méthodologie (préparation des éprouvettes), soit dans la procédure expérimentale. D'autre part, les interactions moléculaires entre deux solides (la fibre et la matrice de polymère) au niveau de l'interface sont importantes à prendre en compte lors d'une étude sur l'interface [5].

Premièrement ce sont les forces de liaison de type dipolaire (Van de Waals). Ensuite, il y a les liaisons type accepteur-donneur d'électron (acide-base) de quelques nanomètres de portée. Ces liaisons sont difficiles à quantifier mais jouent un rôle fondamental dans l'adhésion fibre/matrice. Troisièmement, on considère des liaisons chimiques (liaisons covalentes) de très courtes portées et très résistantes. Finalement, il y a les interactions structurales qui jouent un rôle un peu moins important dans l'adhésion. En se basant sur les interactions fondamentales de l'interface, quelques théories sur l'adhésion ont été proposées. Ces théories permettent aussi d'expliquer les phénomènes qui se produisent à l'interface.

II.1.4 Comportement d'un composite unidirectionnel :

Dans un composite thermoplastique unidirectionnel sollicité parallèlement aux fibres, le comportement à rupture peut être imaginé comme étant constitué des séquences suivantes [6]:

Cas des fibres et matrice subissent la même déformation

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

A- Cas d'une interface très forte:

Si l'adhérence entre fibres et matrice est très forte, la fissure continue sa propagation comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle, mode I (mode d'ouverture). Cela entraîne aussi des concentrations de contraintes sur les fibres voisines et provoque la rupture catastrophique du composite. Le comportement du composite est celui d'un matériau fragile et les fibres n'exercent aucun effet de renforcement sauf éventuellement par leur énergie de rupture. Qui ne peut plus jouer son rôle de renfort. Ce type de matériau possède un comportement fragile, comme une céramique

monolithique. Alors la déformation des deux constituants est élastique. Il n'y a aucun déplacement relatif entre fibre et matrice, le transfert de charge s'effectue par l'intermédiaire d'une forte contrainte de cisaillement dans la matrice, dont l'intensité décroît lorsqu'on s'éloigne radialement de la fibre (figure.2).

B- Cas d'une interface très faible:

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

C- Cas d'une interface relativement faible:

Si l'adhérence entre fibres et matrice est relativement faible, la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire (mode II de la rupture) en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface. Le mode II, ou mode de glissement droit, est la situation recherchée dans la déviation de fissure, avec le mode III (glissement vis). En règle générale, la propagation de la fissure est en mode mixte combinant le mode I et les deux autres modes (II et III) voir figure 2.

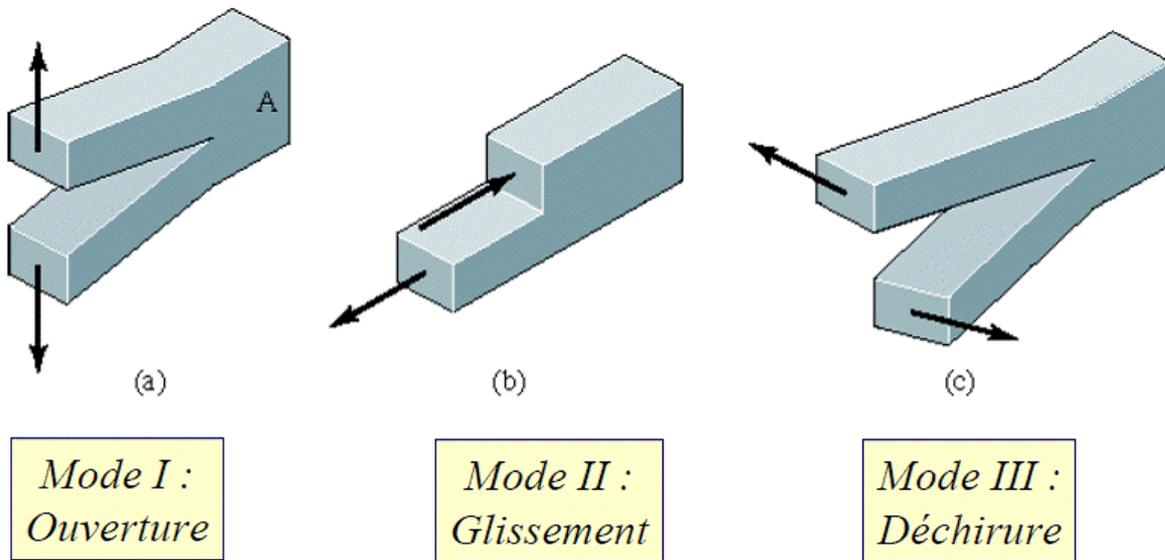


Figure. II.2 : Modes d'endommagement. [7]

II.1.5 Mécanismes de rupture

Les principaux mécanismes dissipateurs d'énergie sont les suivants: [8, 9, 10]

- la multi-fissuration de la matrice ;
- la déviation de la fissure principale ;
- la décohésion de l'interface fibre/matrice ;
- l'extraction des fibres (pull out) par glissement dans les gaines de matrice ;
- le pontage des surfaces de la fissure par des fibres.

Tous ces mécanismes sont liés à la qualité de l'interface fibre/matrice. En effet, celle-ci est dépendante à la fois de la compatibilité chimique et mécanique et/ou des propriétés physiques de ces deux constituants [11,12].

Une simulation numérique est développée par Pérès [11] sur la propagation d'une fissure en présence de fibres. Il s'est basé sur les travaux de Griffith pour le calcul de «G» en fond de fissure. Cette énergie, qui est périodique en relation avec la position des fibres.

II.1.6 Statistique de Weibull

La fibre est supposée constituée d'un assemblage de maillons ayant chacun leur résistance propre à la rupture. La fracture de la fibre intervient quand le maillon le plus faible se rompt. [13]

On divise la fibre en N segments dans lesquels la contrainte est supposée uniforme est égale à σ_i . La probabilité pour qu'un segment soit rompu à la contrainte σ_i est $F(\sigma_i)$. A $F(\sigma_i)$, on associe la fonction de densité de probabilité $f(\sigma)$ définie par : [13]

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

si σ_r est la résistance théorique à rupture du matériau :

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Le nombre de maillons est supposé proportionnel à la longueur L de la fibre, ce qui permet d'écrire $NF(\sigma) = L\Phi(\sigma)$ où la fonction Φ reste à déterminer. Weibull a proposé pour cette fonction la forme empirique suivante : [13]

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

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

Avec

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

Dans la plupart des cas pratiques, le seuil de rupture est très faible et l'on peut considérer que $\sigma_u \approx 0$. La probabilité de rupture d'une fibre subissant une contrainte σ est alors donnée par : [13]

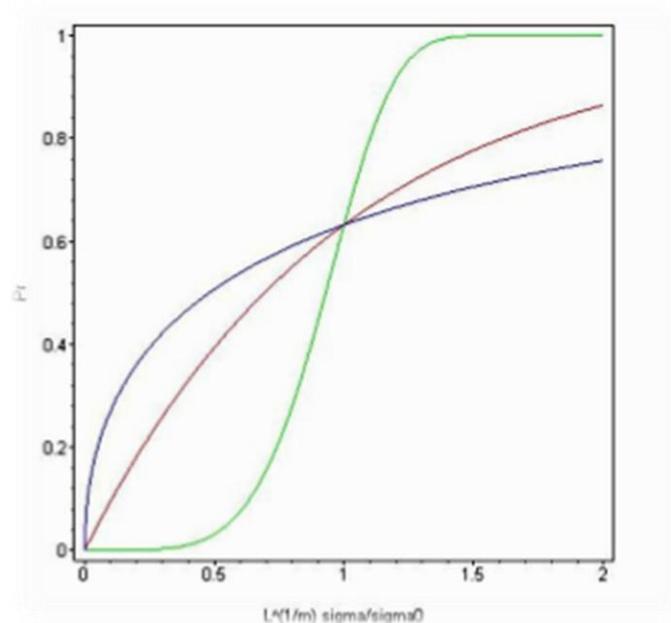


Figure. II.3 : Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull. [13]

Bleu : $m = 0.5$; rouge : $m = 1$; vert : $m = \infty$.

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

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

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^1 \sigma dP_r \quad (II.10)$$

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

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty (1 - P_r) d\sigma \quad (II.11)$$

Soit à partir de l'équation (9) :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty \exp \left[-L \left(\frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] d\sigma \quad (II.12)$$

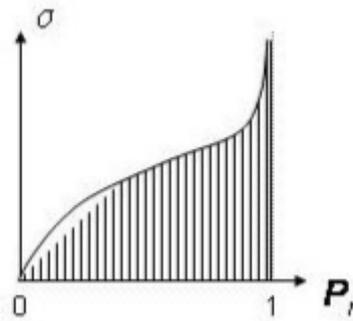


Figure II.4 : calculs de la contrainte moyenne à rupture [13]

On effectue les changements de variable suivants :

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

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

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

L'équation (12) devient

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\frac{1-m}{m}} \frac{\sigma_0}{mL^{1/m}} dt \quad (II.13)$$

Soit

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_0}{L^{1/m}} \Gamma \left(1 + \frac{1}{m} \right) \quad (II.14)$$

Où Γ est la fonction Gamma définie comme suit : [13]

$$\Gamma = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (II.15)$$

II.1.7 Le modèle de Cox

II.1.7.1 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 [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. [14]

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. [14]

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. [14]

II.1.7.2 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. [14]

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. [14]

La fibre et la matrice sont supposées parfaitement élastiques et la liaison fibre/matrice parfaite. [14]

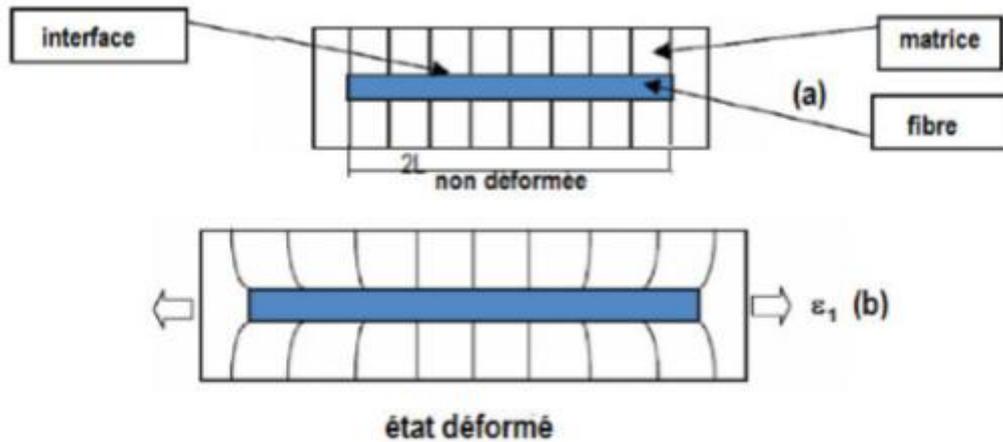


Schéma simplifié du champ de contrainte autour de la fibre.

(a) sans chargement; (b) chargé.

Figure II.5 : volumes élémentaires représentatifs [14]

II.1.8 Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface

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:

$$2\pi r dx = 2\pi a \tau_i dx \quad (II.16)$$

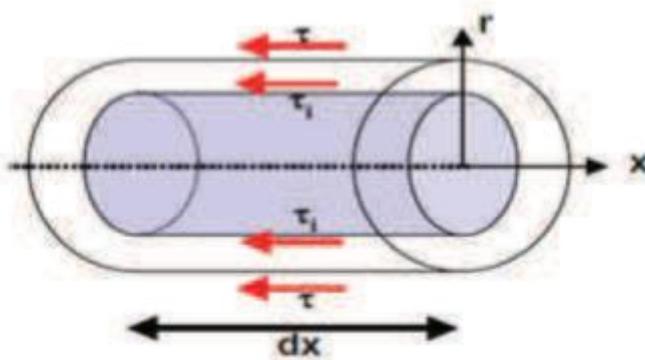


Figure II.6 : équilibres de la matrice en cisaillement [14]

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

$$\tau = \frac{a\tau_i}{r} \quad (II.17)$$

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

$$\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau}{G_m} = \frac{a\tau_i}{G_m r} \quad (II.18)$$

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

$$\int_a^R dw = \frac{\tau_i a}{G_m} \int_a^R \frac{dr}{r} \quad (II.19)$$

Soit :

$$w_R - w_a = \frac{\tau_i a}{G_m} \ln\left(\frac{R}{a}\right) \quad (II.20)$$

$$\tau_i = \frac{G_m (w_R - w_a)}{a \ln(R/a)} \quad (II.21)$$

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:

$$\pi a^2 d\sigma_f = -2\pi a \tau_i dx \quad (II.22)$$

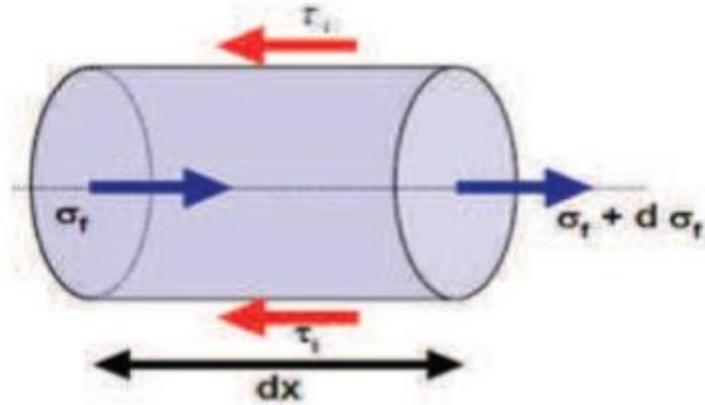


Figure. II. 7 Équilibre élastique dans une portion de fibre. [14]

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = -\frac{2}{a} \frac{d\tau_i}{dx} \quad (II.23)$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{d\tau_i}{dx} = \frac{G_m}{a \ln(R/a)} \left(\frac{dw_r}{dx} - \frac{dw_a}{dx} \right) \quad (II.24)$$

D'après (20) on obtient :

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_i}{a} \quad (II.25)$$

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

$$\frac{dw_R}{dx} = \varepsilon_m = \varepsilon_l \quad (II.26)$$

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

$$\frac{dw_a}{dx} = \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (II.27)$$

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

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = \frac{\beta^2}{a^2} (\sigma_f - E_f \varepsilon_l) \quad \text{avec} \quad \beta^2 = \frac{2G_m}{E_f \ln(R/a)} \quad (II.28)$$

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

- Contrainte axiale dans la fibre :

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_l \left\{ 1 - \frac{\cosh(\beta x/a)}{\cosh(\beta L/a)} \right\} \quad (II.29)$$

- Contrainte de cisaillement à l'interface :

$$\tau_i = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_l \sinh(\beta x/a) / \cosh(\beta L/a) \quad (II.30)$$

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

$$\tau_i = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_l \sinh(\beta x/a) / \cosh(\beta L/a) \quad (II.31)$$

Les profils de contrainte d'un V.E.R correspondant aux équations II.28 et II.30 sont représentés ci-dessous Figure 8:

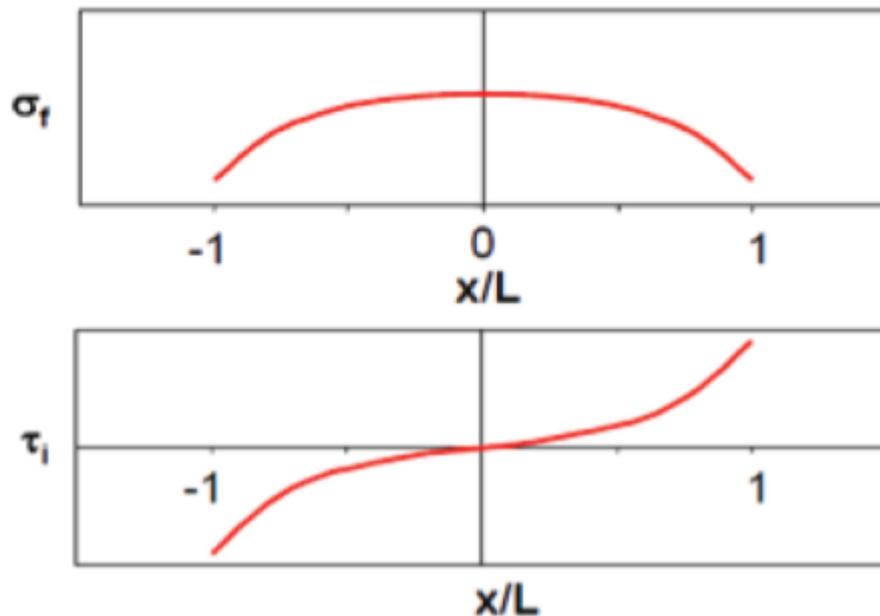


Figure. II. 8 : modèles de Cox : profil des contraintes fibre/interface. [14]

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. [14]

Où :

G_m : Le module de cisaillement de la matrice,

E_f : Le module de Young de la fibre,

ε : La déformation,

a : Un rayon de la fibre,

R : La distance entre les fibres,

τ : La contrainte de cisaillement de l'interface.

Partie II : Les Algorithmes génétiques

II.2.1 Introduction

L'identification de paramètres par méthodes inverses est souvent utilisée pour estimer les propriétés thermophysiques de matériaux. L'utilisation de plus en plus fréquente de matériaux anisotropes rend ces méthodes particulièrement intéressantes puisqu'elles s'adaptent à toutes situations. Certaines considèrent les paramètres thermophysiques indépendants de la température [15 ; 16], d'autres prennent en compte une dépendance linéaire [17] ou encore quadratique [18 ; 19]. Certaines expériences se font sous vide de façon à maîtriser davantage les conditions limites [20]. La conception optimale d'expérience permet d'améliorer la précision de l'estimation de paramètres. Si l'optimisation se fait « facilement » de façon graphique lorsque le nombre de paramètres est faible [15 ; 21 ; 22], elle atteint rapidement ses limites lorsque le nombre de paramètres augmente. Pour un nombre élevé de paramètres, la mise en œuvre d'algorithmes génétiques s'avère être une solution efficace.

II.2.2 Les algorithmes génétiques

Les algorithmes génétiques [23 ; 24] sont des méthodes d'optimisation inspirées de la théorie de l'évolution darwinienne et notamment des mécanismes de sélection naturelle mis en évidence depuis le 19ème siècle. Ils sont inclus dans une famille plus vaste appelée « algorithmes évolutionnaires », dont une partie est incluse dans l'ensemble des « métaheuristiques ».

Ils destinées à des problèmes complexes. Ils peuvent jouer un rôle intéressant dans le cadre de la protéomique [25-26]. Cette discipline est assez récente, elle étudie le patrimoine en protéines des individus. Elle produit des données de grande dimension. [26]

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. [26]

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. [26]

II 2.3 Les opérateurs des algorithmes génétiques

II 2.3.1 La Sélection

Processus où les individus sont copiés selon la valeur de leur fonction objective f . On peut décrire la fonction f comme une mesure de profit, utilité ou qualité que l'on veut maximiser (minimiser). [27]

Si on copie des individus selon leur valeur f , ceci implique que les individus ayant des valeurs plus élevées ont une plus grande probabilité de contribuer des rejetons à la prochaine génération. Ceci correspond à une version artificielle de la « survie des plus forts » (survival of the fittest) de Darwin. [27]

L'implantation de la sélection peut se faire de plusieurs façons. La plus facile est peut être la roue de roulette biaisée, où la probabilité de reproduction d'un individu dépend de sa valeur par rapport au total des valeurs de la population. [27]

II 2.3.1 Reproduction (croisement)

Processus où de nouveaux individus sont formés à partir de parents. Ces nouveaux individus, les rejetons, sont formés en effectuant un croisement entre deux parents. On choisit une position aléatoire k entre $[1, l-1]$ où l est la longueur de l'individu. Le croisement se fait en échangeant les bits de la position $k+1$ à l . [27]

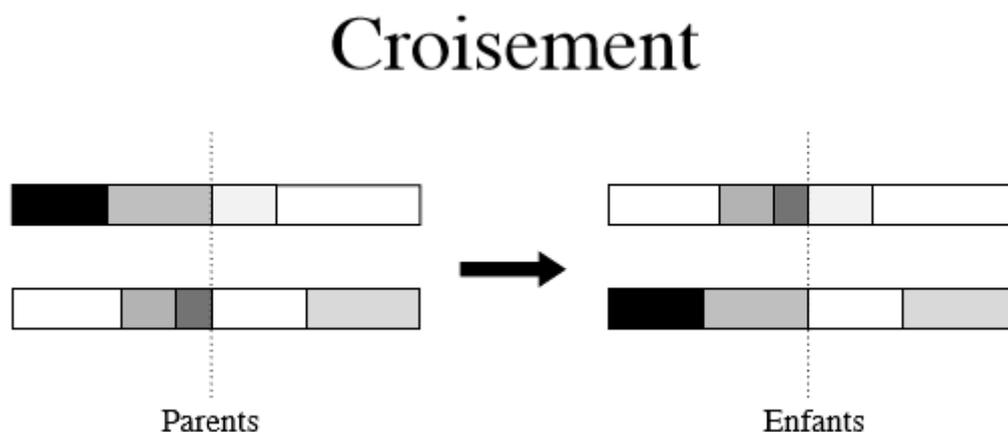


Figure. II.9 : Exemple d'un croisement [27]

Ce sont ces deux opérations, la sélection et la reproduction, qui sont à la base des algorithmes génétiques. Ceci peut paraître simple à première vue, puisque aucune opération mathématique complexe n'a été effectuée. Mais on peut comparer le processus précédent à l'innovation humaine : souvent, les découvertes n'arrivent pas

par chance. Elles sont le résultat d'un échange d'idées qui crée d'autres idées et finalement mènent à une solution désirée. [27]

II 2.3.1 Mutation

Processus aléatoire où un bit change de valeur. Ce processus joue un rôle secondaire dans l'algorithme génétique, mais il est quand même important. La mutation assure qu'aucun point dans l'espace de recherche à une probabilité nulle d'être atteint. [27]

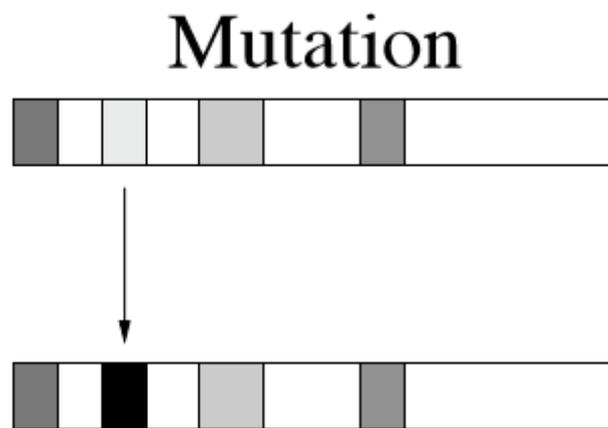


Figure. II.10 : Exemple d'une mutation [27]

II 2.4 Le 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 gènes qui facilite la description du problème et respecte ses contraintes. Il utilise principalement deux types de codage : le codage binaire, le codage réel. [28]

II 2.4.1 Codage binaire

Dans ce type de codage 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. Cependant, ce type de codage n'est pas toujours bon, il est parfois très difficile ou très lourd de coder des solutions de cette manière. En outre, dans certain cas la taille mémoire requise peut devenir prohibitive. [28]

1	0	0	1	1	0	1
---	---	---	---	---	---	---

Figure. II.11 : Exemple d'un codage binaire d'un chromosome. [29].

II 2.4.2 Codage réel

Dans ce type de codage, chaque chromosome est un vecteur dont les composantes sont les paramètres du processus d'optimisation. Par exemple, si on recherche l'optimum d'une fonction de n variables $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$, on peut utiliser tout simplement un chromosome contenant les n variables : $(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$, avec ce type de codage, la procédure d'évaluation des chromosomes est plus rapide vu l'absence des étapes de codage et de transcodage (du réel vers le binaire et vice-versa). [28]

3	5	2	1	4	6
---	---	---	---	---	---

Figure. II. 12 : Exemple d'un codage réel d'un chromosome [29]

II 2.4.3 Codage à l'aide de suite alphabétique

Une troisième approche est de représenter des individus dans un AG comme une suite de caractères, ou chaque caractère représente encore un aspect spécifique de la solution. Ce type de codage est utilisé dans de nombreux cas poussés des algorithmes génétiques comme en bioinformatique [29].

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

Figure. II. 13 : Codage alphabétique d'un chromosome

II.2.4.4 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. [28]

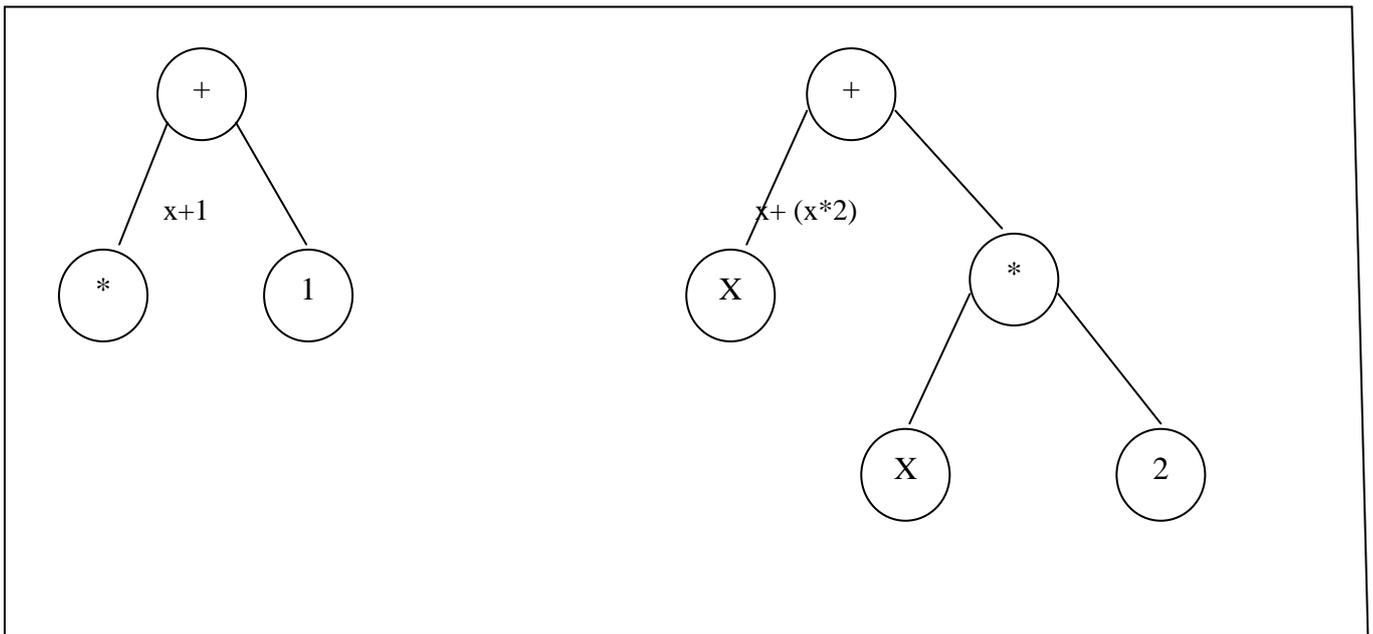


Figure. II. 14 : Exemple de codage sous forme d'arbre

II.2.5 Fondements des algorithmes génétiques [26-30]

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. [31-32] 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.

Références

- [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.
- [2] SANDHU R.S., «Non linear of unidirectionel angle-ply laminates», Journal Aircraft, 1975, Vol.13, pp 104-111
- [3] B. Bonnet. « Comportement au choc de matériaux composites pour applications automobiles ». Thèse de Doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, 2005.
- [4] M. Ragoubi, Contribution à l'amélioration de la compatibilité interfaciale fibres naturelles/matrice thermoplastique via un traitement sous décharge couronne. Thèse de doctorat, Université Henri Poincaré Nancy 1, 2010.
- [5] M. Nardin, "Interface fibre-matrice dans les matériaux composites," Revue des Composites et des Matériaux Avancés, vol. 16/1, pp. 49–62, 2006.
- [6] BERTHELOT, J. M. « Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures». Paris, Masson, 1992, 615 p.
- [7] Michel Delaboure cours et exercices. <http://www.cours-et-exercices.com/2016/05/concentration-des-contraintes-elements.html>
- [8] S.HASHIMI. J. MUGAN «Fracture mechanics of short glass fibre-reinforced Nylon composite», Journal of materials Science 28, 1993, PP: 3983-3990.
- [9] A. R. SANADI, M. R. PIGGOTT«Strength and modulus with short aligned fibres: Part 1», Journal of materials Science 20, 1985, PP: 421- 430.
- [10]- S. K. KHANNA, A. SHUKLA «Energy absorption mechanisms during dynamic fracturing of fibre-reinforced composites», Journal of materials Science 28, 1993, PP: 3722-3730.
- [11] F. CONCHIN, «Etude du comportement thermo-mécaniques de matériaux à renfort fibreux, SiC/C/SiC 2D», thèse de doctorat, INSA de Lyon,254p, 1994.
- [12] E. K. TSCHEGG, K. HUMER, W. WEBER «Fracture tests in mode -I- on fibre-reinforced plastics», Journal of materials Science 28, 1993, PP: 2471-2480.
- [13] Weibull, W. «A statistical distribution function of wide applicability ». Journal of Applied Mechanics (1951) 18, 293-296.
- [14] H.L.Cox, «L'élasticité et la résistance du papieret d'autres matières fibreuses», Brit. J. Appl. Phys., 12, 72-79(1952).

- [15] F. Mzali, L. Sassi, A. Jemni, S. BenNasrallah, D. Petit. Optimal experiment design for the identification of thermo-physical properties of orthotropic solids. *Inverse problems in Engineering*. Avril 2004, Vol. 12, 2, pp. 193-209
- [16] K. J. Dowding, J. V. Beck, B. F. Blackwell. Estimation of directional-dependent thermal properties in a carbon-carbon composite. *Int. J. of Heat Mass Transfer*. 1996, Vol. 39, 15, pp. 3157-3164
- [17] B. Sawaf, M. N. Özisik, Y. Jarny. An inverse analysis to estimate linearly temperature dependent thermal conductivity components and heat capacity of an orthotropic medium. *International Journal of Heat Mass Transfer*. 1995, Vol. 38, 16, pp. 3005-3010
- [18] Sun K. Kim, Bup Sung Jung, Hee June Kim, Woo Il Lee. Inverse estimation of thermophysical properties for anisotropic composite. *Experimental Thermal and Fluid Science*. 2003, Vol. 27, pp. 697-704
- [19] K. J. Dowding, J. V. beck, B. F. Blackwell. Estimating temperature-dependent thermal properties. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 1999, Vol. 13, 3
- [20] R.D. Sweeting, X.L. Liu. Measurement of thermal conductivity for fibre-reinforced composite. *Composites Part A: applied science and manufacturing*. 2004, Vol. 35
- [21] R. Taktak, J. V. Beck, E. P. Scott. Optimal experimental design for estimating thermal properties of composite materials. *Int. J. of Heat Mass Transfer*. 1993, Vol. 36, 12, pp. 2977-2986
- [22] Design of experiments to estimate temperature dependent thermal properties. K. J. Dowding, B. F. Blackwell. Port Ludlow, WA, USA, 1999. *Inverse Problems in Engineering: Theory and Practice*. 3rd Int. Conference on Inverse Problems in Engineering.
- [23] J. Dréo, A. Pétrowski, P. Siarry, E. Taillard. *Métaheuristiques pour l'optimisation difficile*. Paris : Editions Eyrolles, 2003. p. 70. 2-212-11368-4
- [24] Renders, J-M. *Algorithmes génétiques et réseaux de neurones*. Ed. Hermès, 1995. 2-86601-467-7
- [25] 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.
- [26] 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.
- [27] Goldberg, D.E., *Genetic Algorithms in Search, Optimization and Machine Learning*. Addison-Wesley : Reading, MA, 1989.
- [28] Dr. Mohamed Assaad HAMIDA cours <https://fr.scribd.com/document/367673369/CH-1>

[29] Layeb A, "Introduction aux metaheuristiques", Formations Academiques, 2009. Site: lmdacad.org/download/courses/m2/chapitre5_layeb_ROA.pdf.

[30] L. Davis. Handbook of genetic algorithms. Van Nostrand Reinhold, 1991.

[31] Le Riche, R., and Haftka, R. (1995). "Improved genetic algorithm for minimum thickness composite laminate design." *Composite Engineering* 5(2), 143-61.

[32] Z. Michalewicz. Genetic algorithms + data structures = evolution programs. SpringerVerlag, 1992.

Chapitre III

Résultats et Discussions

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter l'effet de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface fibre-matrice d'un Bio-composite hybride composé de deux fibres naturelles le Chanvre et le Sisal et la matrice d'Amidon. Notre modélisation génétique basée sur le modèle analytique de Cox, modèle probabiliste de Weibull, et le modèle de Lebrun décrivant la contrainte thermique par les deux coefficients de dilatation. La contrainte appliquée sur notre volume élémentaire représentatif est une contrainte de traction uni-axiale.

III.2. Modélisation et simulation numérique

III.2.1. Algorithme génétique

La modélisation de l'effet de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface en utilisant des modèles analytiques est difficile à réaliser, puisque l'interface a un comportement aléatoire et à chaque fois on ne sait pas l'origine de son endommagement, à cet effet une modélisation probabiliste est la plus appropriée pour simuler l'effet de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface fibre-matrice du biocomposite hybride Chanvre-Sisal/Amidon par un algorithme génétique en utilisant un modèle analytique basé sur l'approche probabiliste de Weibull et l'équation de Lebrun. Le principe de cet algorithme repose sur l'utilisation d'opérateurs génétiques (sélection, croisement, mutation) pour prévoir une population de cent (280) d'individus générés de manière aléatoire avec une production maximum de 140 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 125 N, module de Young de la fibre, module de cisaillement de la matrice, rayons des fibres, 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 0.4 et 0.5. Les individus trouvés sont classés et positionnés pour obtenir le meilleur d'entre eux, ces individus sont insérés dans la

première rangée, en construisant une nouvelle génération, le processus est répété jusqu'à convergence. Les calculs numériques sont effectués à l'aide du logiciel Matlab R2012a.[1]

III.2.2 Organigramme

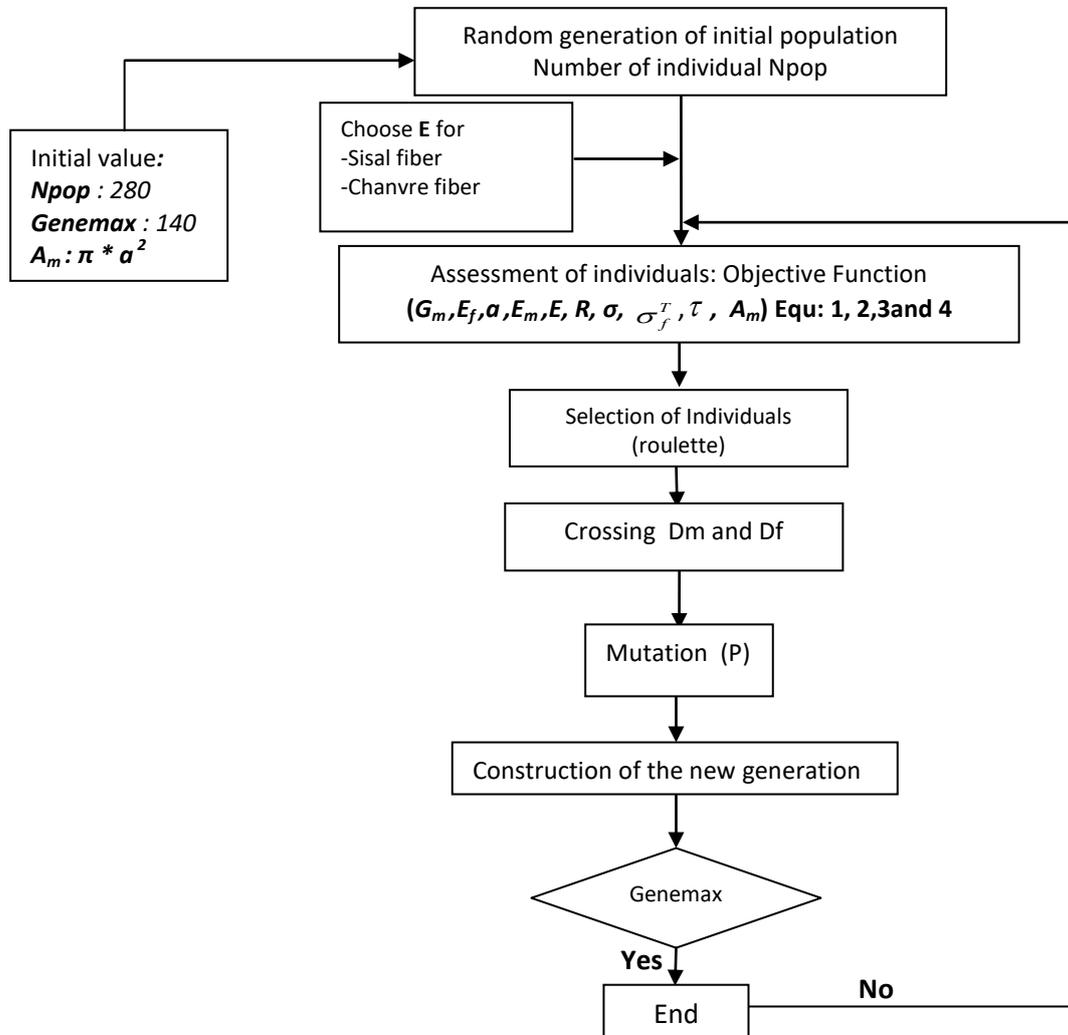


Figure III.1 : L'organigramme de l'algorithme génétique. [2]

III.3 Les modèles analytiques de simulation

III.3.1 La contrainte thermique

Les contraintes thermiques résultant de la dilatation différentielle des fibres et de la matrice lors du refroidissement après préparation du composite à haute température. Il est donné par les équations suivantes de Lebrun.

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

Avec:

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

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

T_0 la température ambiante, la température T_e de développement, T la température d'essai et enfin α_f et α_m représentent successivement les coefficients de dilatation de la fibre et de la matrice. [3]

III.3.2 Le Modèle probabiliste de Weibull

Lorsque la contrainte est uniforme, l'endommagement de la matrice, est donné par la formule (2) de Weibull [4] :

$$D_m = 1 - \exp \left\{ - \frac{V_{eff}}{V_0} \left[\frac{\sigma_m^T}{\sigma_{0m}} \right]^{m_m} \right\} \quad (2)$$

Avec : (m_m et σ_{0m})

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

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

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

Avec :

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

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

$$\tau = \frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta th(\beta l/2) \quad (4)$$

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

Avec :

- (G_m) : module de cisaillement de la matrice ;
- (E_f) : module de Young de la fibre ;
- (ε) : la déformation ;
- (a) : rayon de la fibre ;
- (R) : la demi distance ;
- (τ) : la contrainte de cisaillement de l'interface;

III.4 Résultats de simulation

Notre calcul est réalisé sur deux types de matériaux bio-composite et bio-composite hybrides Chanvre /amidon et Chanvre-Sisal/Amidon. D'après les résultats de simulation par un Algorithme génétique. Nous avons examiné la résistance de notre matériau par l'application de différentes contraintes ($\sigma(105)$, $\sigma(115)$, $\sigma(125 \text{ N/m}^2)$),

ce qui nous a permis de calculer l'endommagement de l'interface fibre matrice de composite en fonction de la contrainte thermique. Les figures 2, 3, 4 et 5, 6, 7 montrent le niveau de l'endommagement à l'interface pour les deux matériaux en fonction de la contrainte thermique.

III.4.1. Chanvre /Amidon

Les figures 2, 3 et 4 montrent que l'endommagement "D" de l'interface commence au niveau de 0.3 de σ (105 N/m²), puis augmente jusqu'à une valeur maximale de 0.45 de σ (125N/m²), et lorsque la contrainte thermique augmente, l'endommagement augmente et atteint son maximum de 0.7 pour une valeur de la contrainte thermique de 100. 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.

III.4.2. Chanvre-Sisal /Amidon

Les figures 5, 6 et 7 montrent que l'endommagement "D" de l'interface commence au niveau de 0.15 de σ (105 N/m²), puis augmente jusqu'à une valeur maximale de 0.28 de σ (125N/m²), et lorsque la contrainte thermique augmente, l'endommagement augmente et atteint son maximum de 0.6. 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.

Chanvre /Amidon

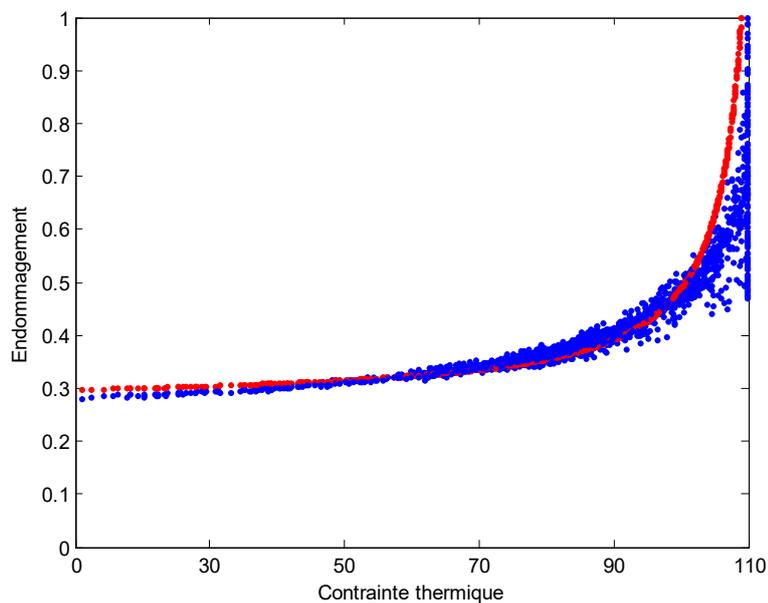


Figure III.2 : L'influence de la température sur l'endommagement de l'interface σ (105N/m²)

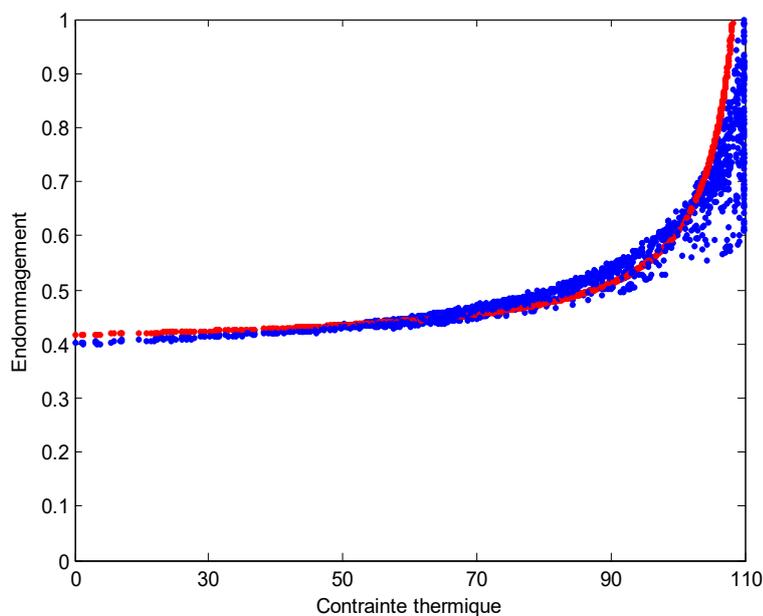


Figure III.3 : L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface σ (115N/m²)

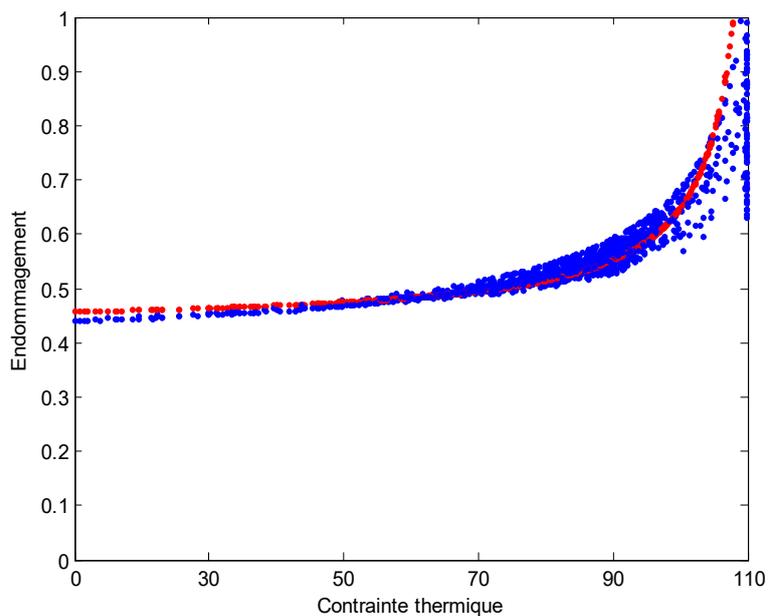


Figure III.4: L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface σ (125N/m²)

Chanvre-sisal / Amidon

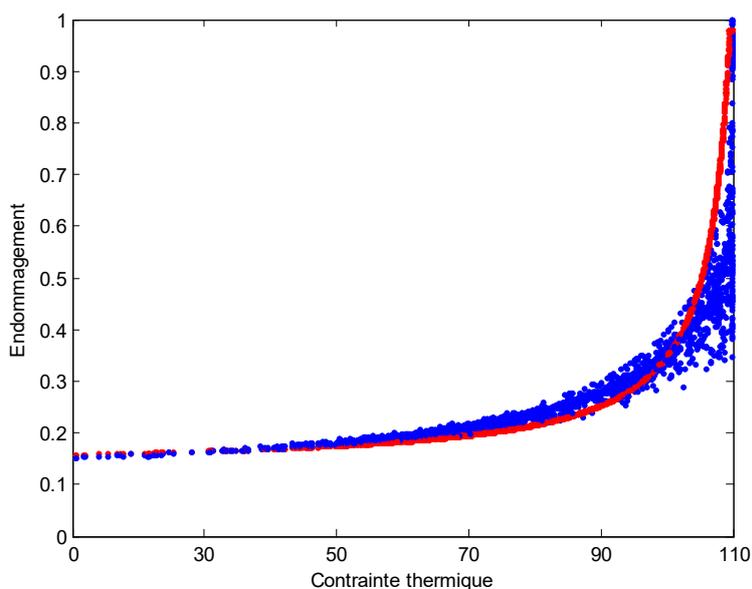


Figure III.5: L'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface σ (105N/m²)

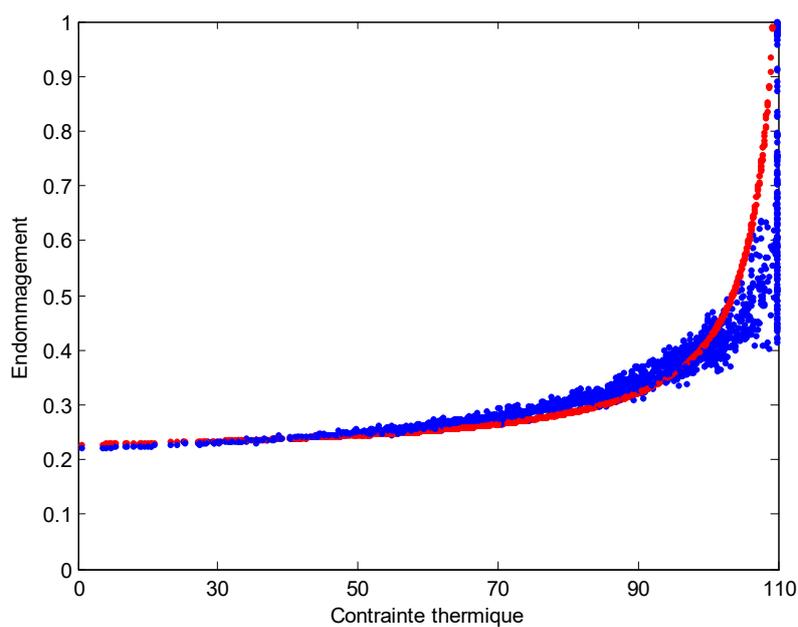


Figure.III.6: L'influence de la conainte thermique sur l'endommagement de l'interface σ (115N/m^2)

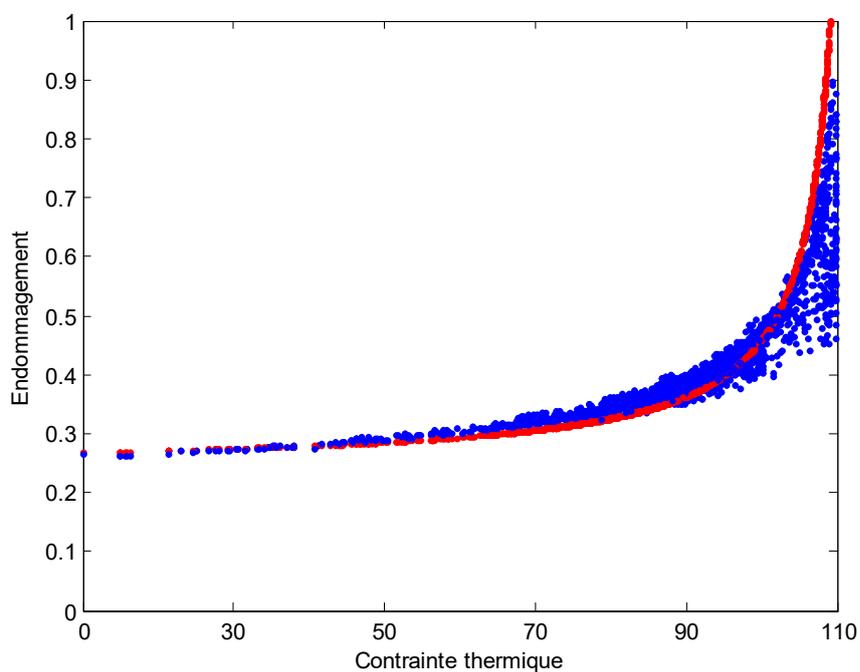


Figure III.7: L'influence de la conainte thermique sur l'endommagement de l'interface σ (125N/m^2)

III.5. Conclusion

L'approche génétique nous a permis de modéliser l'endommagement de l'interface fibre-matrice et de nous donner les possibilités d'analyse et d'interprétation nos différents résultats et ceci en absence des modèles analytiques qui décrivent l'endommagement de l'interface. Les résultats montrent que le niveau de l'endommagement est lié à la résistance de matériau pour les deux matériaux bio-composite et bio-composite hybride qui ont été étudiés Chanvre /Amidon et Chanvre-sisal/Amidon 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 le bio-composite hybride Chanvre-sisal/Amidon est le plus résistant aux contraintes thermiques comparant avec le bio-composite Chanvre/Amidon, et montrent aussi que les matériaux bio-composites hybrides ont une résistance aux contraintes appliqués (mécaniques et thermique) comparant avec les matériaux dit traditionnels et les matériaux bio-composites ordinaires. Les résultats obtenus dans notre étude coïncident parfaitement avec les résultats d'Antoine et al. [7], qui ont montré par les essais expérimentaux que les fibres naturelles améliorent parfaitement les propriétés mécaniques des matériaux bio-composites.

Références

- [1] 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.
- [2] S.Tadjedit, A.Mokaddem, L.Temimi, B.Doumi, A.Boutaous and N.Beldjoudi. Comparative study by a genetic algorithm on the mechanical properties of PLA and Epoxy Bio-composite Materials reinforced with natural fiber. N°3, Vol 20. *Mechanics and Mechanical Engineering*. 2016, 333-347.
- [3] G. A. Lebrun. Comportement thermomécanique et durée de vie de composites à matrice céramique : théorie et expérience ». Thèse de Doctorat n° 1606, 1996, Université de Bordeaux
- [4] W. Weibull. Theory of the strength of materials”, Royal Swedish Academy of Eng. Sci. Proc., (1939) 151, 1-45.
- [5] Lissart N. Damage and failure in ceramic matrix minicomposites :experimental study and model, *acta mater*, 45,1025-1044,1997
- [6] Cox H.L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. *British journal of applied physics*, 12, 72–79, 1952.
- [7] Antoine Le Digou, Peter Davies, Christophe Baley,C. Study of interfacial bonding of Flax fibre/Poly-L-lactide. JNC 16, Toulouse, France. AMAC, p10, 2009.

Conclusion

Conclusion générale

L'objectif de notre étude est porté essentiellement sur la modélisation de l'influence de la contrainte thermique sur l'endommagement de l'interface fibre-matrice d'un bio-composite Chanvre /amidon et bio-composite hybrides Chanvre-Sisal/Amidon.

Les résultats montrent que le niveau de l'endommagement est lié à la concentration des contraintes appliquées, pour les deux matériaux étudiés, la simulation numérique fait ressortir que le bio-composite hybride Chanvre-sisal/Amidon est le plus résistant aux contraintes thermiques comparant avec le bio-composite Chanvre/Amidon

les résultats que nous avons obtenus dans notre étude sont en bon accord avec les résultats d'Antoine et al, qui ont montré par les essais expérimentaux que les fibres naturelles améliorent parfaitement les propriétés mécaniques des matériaux bio-composites.

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

Il serait intéressant de confirmer, par la suite, par des essais expérimentaux appliqués sur notre matériau bio-composite hybrides, la crédibilité de nos résultats théoriques.