

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

UNIVERSITE « Dr. TAHAR MOULAY » DE SAIDA

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE



MEMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de

MASTER

Spécialité : PHYSIQUE

Option : Physique des matériaux

Par

Nouaceur Aicha

Sur le thème

Investigation et modélisation micromécanique de l'effet de l'endommagement en cisaillement sur la performance des composites hybrides Carbone (HM-HR)/Basalte/Polyester

Soutenu le : 18/06/2020 devant le jury composé de :

M. ELKEURTI Mohammed	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Président
M. MOKADDEM Allel	MCA	Centre universitaire Nour Bachir El Bayadh	Encadreur
M. DOUMI Bendouma	MCA	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Co-encadreur
M. BOUDALI Abdelkader	Pr	Université Dr. Tahar Moulay de Saida	Examineur

Année Universitaire 2019 - 2020

Dédicaces

*À la fontaine irrésistible de celle qui a tissé mon bonheur avec des fils tissés de son cœur à « **ma chère mère** »*

*À ceux qui ont cherché et souffert pour le confort et le contentement, ce qui n'a pas fait grand chose pour me pousser vers le chemin du succès vers « **mon cher père** »*

*À ceux qui les aiment courir dans mes veines et crier leurs souvenirs, me conduisant à « **mes frères et sœurs** »*

*À qui nous nous sommes joints main dans la main alors que nous cueillons une fleur à mon amie « **Wiam** »*

*À ceux que nous avons marché ensemble, alors que nous ouvrons la voie ensemble pour le succès et la créativité à « **mes amis** »*

Remerciements

Je remercie le bon Dieu, tout puissant, de m'avoir guidé de mener à bien ce travail.

J'adresse mes sincères remerciements et ma grande gratitude à mes encadrants Messieurs, MOKADDEM Allel et DOUMI Bendouma qui voudraient bien vouloir accepter la supervision de ce travail et pour cela

Ils m'ont fourni beaucoup de conseils et de recommandations.

J'exprime également mes remerciements, ma reconnaissance et mon respect aux Professeurs ELKEURTI Mohammed et BOUDALI Abdelkader avoir accepté de juger ce travail.

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale1

Chapitre I : (Etude bibliographique sur les matériaux composites et composites hybrides)

1.1. Définition.....	3
2. Classification des matériaux composites.....	3
2.1 Classification basée sur la matrice.....	3
2.1.1 Les composites à matrice métallique(MMC).....	4
2.1.2 Les composites à matrice céramique(CMC).....	4
2.1.3. Les composites à matrice polymère(PMC).....	4
2.2 Classification des composites basée sur le renforcement.....	4
2.2.1 Composites à fibres.....	4
2.2.2 Composites à particulaires.....	5
3 Différents types de constituants de base.....	5
3.1 Renfort.....	5
3.1.1 Fibres de verre.....	5
3.1.2 Fibres de carbone.....	6
3.1.3 Fibre de bore.....	7
3.2 Matrice.....	7
3.2.1 Thermodurcissables.....	7
3.2.2 Thermoplastiques.....	8
4. Caractéristiques des matériaux composites.....	8
5. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites.....	9
6. Fibre naturelle.....	10
7. Matériaux Biocomposites.....	11
8. Matériaux hybride.....	12
8.1 Définition.....	12
8.2 Classification des matériaux hybrides.....	12
8.3 Caractérisation des matériaux hybrides :.....	13
9. Bio-composite hybride.....	14
Références.....	15

Chapitre II : Endommagement des matériaux composites

1. Introduction	17
2. Endommagement des matériaux composites.....	17
3. L'interface	19
4. Interface Fibre/Matrice.....	19
5. Rôle des interfaces	19
6. L'interphase	19
7. Caractéristiques des mécanismes d'endommagement	20
7.1 Fissuration de matrice	20
7.2 Décohésion fibre-matrice	21
7.3 Délaminage	22
7.4 Rupture de fibres.....	22
8. Comportement d'un composite unidirectionnel	23
A- Cas d'une interface très forte	23
B- Cas d'une interface très faible.....	24
C- Cas d'une interface relativement faible	24
9. Le modèle de Cox	24
9.1 Modèle de Cox : transfert de charge élastique	25
9.2 Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface.....	26
9.2.1 L'équilibre des forces de cisaillement.....	26
9.2.2 L'équilibre des contraintes dans une portion dx de fibre	27
10. Formalisme probabiliste de Weibull.....	29
11. Méthode graphique.....	32
Référence.....	33

Chapitre III : Les algorithmes métaheuristiques

1. Introduction	35
2. Les algorithmes de colonies de fourmis.....	35
2.1 Introduction.....	35
2.2 Anatomie	36
2.3 Entomologie de la fourmi.....	37
2.3.1 L'habitat des fourmis	37

2.3.2 La vie sociale des fourmis	37
2.4 Les communications entre les fourmis.....	38
2.5 Principe d'un algorithme de colonies de fourmis	39
2.6 Relation avec l'informatique	40
2.7 Comportement de la fourmi.....	40
2.7.1 Les piste de phéromones.....	40
3. Les algorithmes de Monté-Carlo	41
3.1 Intégration de Monte Carlo.....	42
3.2 Simulation de variables aléatoires.....	42
3.2.1 Loi uniforme	42
3.2.2 Méthode d'inversion.....	43
3.2.3 Méthode de rejet.....	45
3.2.4 Méthode par transformation.....	46
4. Les algorithmes génétiques	47
4.1 Les opérateurs de base d'un AG	49
4.1.1 La sélection	49
4.1.2 Le croisement	50
4.1.3 La mutation.....	51
4.2 La convergence d'un AG.....	52
4.3 Fondements des algorithmes génétiques	52
4.4 Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques.....	53
5. Conclusion.....	54
Référence.....	55

Chapitre IV : Résultats et Discussion

1. Introduction	57
2. Interface ou interphase fibre-matrice	57
3. Matériaux étudiés.....	58
3.1 Les fibres	58
3.1.1 La fibre de carbone (Haute Module et Haute Résistance).....	58
3.1.2 La fibre de Basalte.....	59
3.2 La matrice Polyester.....	61
4. Les modèles théoriques de simulation	62

4.1 Le formalisme de Weibull	62
4.2 Le modèle de cisaillement de l'interface de Cox.....	63
4.3 La modélisation génétique.....	63
4.3.1 Développement	63
4.3.2 L'organigramme de notre algorithme.....	64
5. Résultats et discussion de la modélisation génétique.....	65
5.1. Carbone HM /Basalte/Polyester.....	65
5.2. Carbone HM/Basalte /Polyester.....	67
6. Conclusion.....	69
Référence.....	70
Conclusion générale.....	72

Liste des figures

Figure I. 1 : Classification des composites basée sur la matrice	3
Figure I.2 : Types de Matrices	7
Figure II.1 : Mécanismes d'endommagement dans les composites stratifiés	18
Figure II.2 : concepts d'interphase (a) et d'interface (b)	20
Figure II.3 : Différents types de fissuration de la matrice (longitudinale, transversale).....	21
Figure II.4 : Phénomène de décohésion fibre-matrice.....	21
Figure II.5 : Mécanisme de délaminage	22
Figure II.6 : Mécanisme rupture de fibre	23
Figure II.7 : Modes d'endommagement	24
Figure II.8 : volume élémentaire représentatif. Schéma simplifié du champ de contrainte autour de la fibre. (a) sans chargement; (b) chargé.....	25
Figure II.9 : équilibres de la matrice en cisaillement	26
Figure II.10 : Equilibre élastique d'une portion de fibre	27
Figure II.11 : Modèle de Cox -Profils de contrainte dans la fibre (σ_f) et à l'interface (τ_i)	29
Figure II.7 : Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull	31
Figure II.8 : Calcul de la contrainte moyenne à rupture	31
Figure. III.1 : Schéma anatomique d'une fourmi	36
Figure III.2 : Expérience de sélection des branches les plus courtes par une colonie de fourmis : (a) au début de l'expérience, (b) à la fin de l'expérience.....	41
Figure III.3 : principe générale des algorithmes génétiques	49
Figure III.4 : exemple de mutation	50
Figure III.5 : exemples d'opération de croisement	51
Figure IV.1 : Schématisation de l'interphase fibre/matrice dans un matériau composite	58
Figure IV.2 : Evolution mondiale de la demande en fibre de carbone.....	59
Figure IV.3 : L'état de surface d'une fibre de carbone : (a) avant traitement hydrolytique et (b) après, obtenues par MEB, 6000x.....	59
Figure IV.4 . Microscopie de fibre de basalte dans l'alkali	60
Figure IV.5 . Fibres Basalte B-EP de référence (gauche) et conditionnées (droite).....	60
Figure IV.6 : L'organigramme de l'algorithme génétique.....	64
Figure IV.7 : l'endommagement à l'interface : $\sigma=280 \text{ N/m}^2$	65
Figure IV.8 : l'endommagement à l'interface : $\sigma=325 \text{ N/m}^2$	66
Figure IV.9 : l'endommagement à l'interface : $\sigma=370 \text{ N/m}^2$	66
Figure IV.10 : l'endommagement à l'interface : $\sigma=280 \text{ N/m}^2$	67
Figure IV.11 : l'endommagement à l'interface : $\sigma=325 \text{ N/m}^2$	68
Figure IV.12 : l'endommagement à l'interface : $\sigma=370 \text{ N/m}^2$	68

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre	6
Tableau. I.2. Classification et exemples de fibres naturelles.....	10
Tableau II.1 : les résultats de Weibull.....	33
Tableau VI.1 : les propriétés physiques des trois fibres	61
Tableau IV.2 : Propriétés mécaniques des principales matrices utilisées dans les composites	62



Introduction Générale

Introduction générale

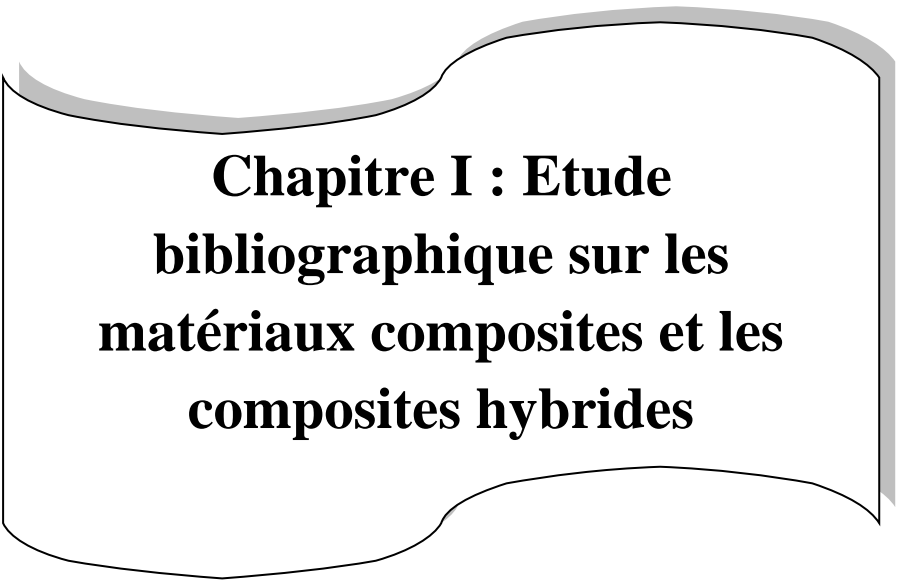
Les matériaux composites présentent une alternative très intéressante pour remplacer les matériaux dit traditionnels. Ces matériaux sont fabriqués à la demande des utilisateurs, disposant des propriétés mécaniques attirantes, et en même temps ils sont très légers pour être exploités dans le domaine de l'aéronautique. L'utilisation croissante des matériaux composites dans les différents domaines d'application exige aux concepteurs 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 ses exigences.

Le renfort (fibres, particules, ..) et la matrice (polymères) se sont les constituants de base d'un matériau composite, mais dans certains cas, et afin de diminuer le coût de fabrication et d'améliorer les propriétés mécaniques, les concepteurs utilisent plusieurs types de renforts dans le même polymère pour obtenir par la suite un nouveau matériau composite hybride. Les matériaux composites hybrides occupent une place importante dans les différents secteurs industriels et en particulier dans les domaines de haute technologie (aéronautique) et dans les secteurs de grande utilisation (automobile, habitat, emballages,...). Cette grande émergence est due principalement à la meilleure performance de ses matériaux (résistance et légèreté), et leurs coût de fabrication très faible comparant avec les autres matériaux dit traditionnels (compromis performance/coût/légèreté).

Notre objectif dans ce mémoire est d'étudier l'effet de l'endommagement en cisaillement de l'interface fibre-matrice sur la performance de deux matériaux composites hybrides qui ont constitués de la même matrice polyester et de trois fibres Carbone Haute Module (HM), Carbone Haute Résistance (HR) et la fibre de Basalte, nous avons appliqué une contrainte de traction uni-axiale sur le volume élémentaire représentatif (VER). Notre simulation génétique est basée sur le modèle probabiliste de Weibull afin de calculer l'endommagement à l'interface en utilisant les deux endommagements de la fibre et de la matrice de Weibull.

Afin d'atteindre cet objectif, notre mémoire est structuré en quatre chapitres, d'une introduction, et d'une conclusion générale.

Le premier chapitre a été consacré à la présentation d'une étude bibliographique sur les matériaux composites et les matériaux composites hybrides, en présentant les différents aspects caractérisant ces matériaux. Dans le deuxième chapitre, on a présenté quelques modèles analytiques et numériques relatifs à la modélisation de l'endommagement de l'interface fibre/matrice des matériaux composites. Les algorithmes probabilistes et les métaheuristiques ont été discutés dans le troisième chapitre. Dans le dernier chapitre, nous présentons nos résultats de simulation numérique avec une discussion approfondie de ses résultats. Nous terminons notre travail par une conclusion générale et de citer quelques perspectives pour les travaux à venir.



**Chapitre I : Etude
bibliographique sur les
matériaux composites et les
composites hybrides**

1. Définition

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de natures différentes. Se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques. [1]

2. Classification des matériaux composites

La plupart du temps ces matériaux sont constitués d'une matrice et d'un renfort (ex. de composites naturels : bois). [2] On peut appliquer la classification classique des composites suivant la nature de la matrice, dans l'ordre croissant de la température d'utilisation. [3] les renforts qui sont noyés dans une matrice dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. [4]

2.1. Classification basée sur la matrice

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.

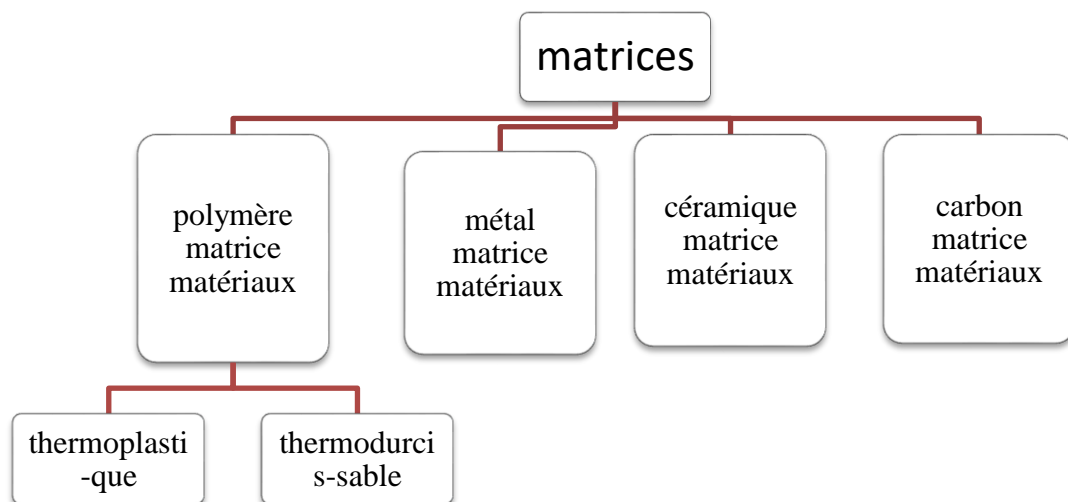


Figure I. 1 : Classification des composites basée sur la matrice [5]

2.1.1. Les composites à matrice métallique(MMC)

Dans ce cas la matrice est métallique ; les métaux les plus souvent utilisés sont : l'aluminium, le magnésium et le titane, pour les hautes températures c'est le cobalt (parfois allié avec du nickel). La matrice métallique donne au matériau composite de nouvelles propriétés. [6]

2.1.2. Les composites à matrice céramique(CMC)

Les composites à matrice céramique ou CMC sont des matériaux composites faisant partie des céramiques techniques. Ils sont caractérisés par un ensemble de fibres céramiques incorporées dans une matrice également céramique.

2.1.3. Les composites à matrice polymère(PMC)

Ces composites sont les plus répandus. Selon la nature des matrices et renforts il s'agit de composites de grande diffusion ou des composites à hautes et très hautes performances. Les matrices peuvent être des polymères thermoplastiques (polypropylène, polyéthylène, polyamide,...) ou thermodurcissables (polyesters insaturés et résines époxydes). [7]

2.2 Classification des composites basée sur le renforcement

En fonction de la forme de renforcement, les composites sont classé en deux grande classe: composites à particulaires et composites à fibres

2.2.1 Composites à fibres

Une fibre de renforcement est un matériau sous forme d'un filament fin possédant une bonne résistance à la rupture et un module d'élasticité élevé. [6] Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibre.les fibres utilisées se représente soit sous forme de fibres continues (longues), soit sous forme de fibres discontinues (courtes). [8] Les fibres permettent d'assurer la tenue mécanique et de solidifier le système. Mais la réaction du système dépend de la direction et du sens des efforts. [6]

2.2.2 Composites à particulières

Un matériau composite est un composite particulière lorsque le renfort se trouve sous forme de particule. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas une dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques. [8]

3. Différents types de constituants de base

3.1 Renfort

Les renforts peuvent être d'origine minérale (verre, bore, céramique...) ou organique (carbone ou aramide). Les fibres les plus employées sont les fibres de verre, les fibres de carbone sont privilégiées. [9,10]

3.1.1 Fibres de verre

Elles sont en général fabriquées à partir de la fusion et de l'extrusion de silice associée à divers oxyde (alumine, alcalins, alcalinoterreux). On distingue différents types de fibre :

- verre E: le plus courant, il possède de bonnes propriétés diélectriques.
- verre D: il est destiné aux applications de construction ou électronique, en raison de ses propriétés diélectriques supérieures aux autres fibres de verre.
- verre C: il est très résistant chimiquement et est principalement utilisé pour les applications anticorrosion.
- verre R ou S: il est destiné pour les applications haute performance du fait de sa résistance en traction et son module d'élasticité supérieurs aux autres fibres de verre.

Les fibres de verre sont fragiles et sensibles à l'abrasion. Pour cette raison, elles sont revêtues d'une résine ou ensimage qui a pour fonction de protéger les fibres mais qui favorise également l'adhésion de la matrice.

Les caractéristiques mécaniques des fibres de verre décrites ci-dessus sont résumées dans le Tableau 1.

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Résistance en traction (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module en traction (GPa)	73.5	52.5	70	86.5	86.5
Allongement à la rupture (%)	4.5	4.5	4.0	5.3	5.3

Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres de verre [9,10]

3.1.2 Fibres de carbone

Les fibres de carbone ont la structure du graphite. Elles proviennent de fibre acrylique et du brai. Actuellement, il existe deux procédés de préparation de la fibre de carbone : l'une des voies permet d'obtenir les fibres de types HM (Haute Module) et THM (Très Haut Module), l'autre donne les fibres HR (Haute Resistance) et HT (Haute Ténacité).

Une étape de graphitisation, réalisée après les étapes d'oxydation et de carbonisation, dans le procédé de préparation des fibres HM et THM différencie les deux voies.

La graphitisation permet d'obtenir les fibres HM et THM. [9,10,11]

3.1.3 Fibre de bore

Elles sont obtenues par le dépôt chimique de chlorure de bore (BCl) et de l'hydrogène (H₂) sur un fil de tungstène de diamètre 13µm, chauffé à une température comprise entre 1100 et 1300° C par effet joule.

3.2 Matrice

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 [11,12]

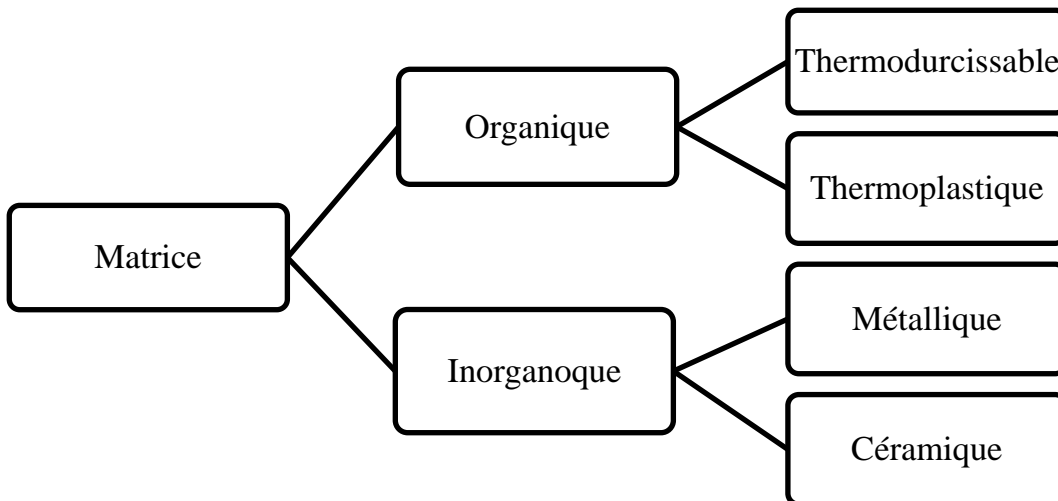


Figure.1.2 Types de Matrices

3.2.1 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, 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. [12,13]

3.2.2 Thermoplastiques

Les résines thermoplastiques ont des propriétés mécaniques faibles. Ces résines sont solides et nécessitent une transformation à très haute température. Le 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. [12,13]

4. Caractéristiques des matériaux composites

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

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

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- le gain de masse
- la bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée)
- l'absence de corrosion
- l'absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- le vieillissement sous l'action de l'humidité et de la sensibilité aux certains produits chimique
- tenus aux impacts et aux chocs
- très forte anisotropie.

5. Les avantages et les inconvénients des matériaux composites

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à :

- faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion
- Insensibilité aux produits chimiques
- Comparez aux métaux ils présentent une résistance élevée.
- Ils ont une faible densité.
- La rigidité du matériau est améliorée à haute température, ils maintiennent aussi le poids.
- Possibilité de prendre plusieurs formes (pièces complexes).
- Bonne tenue au feu (attention aux dégagements toxiques).
- La ténacité est également améliorée.
- La production est inférieure.
- La fabrication est également moins chère.
- La résistance à la fatigue et au fluage est meilleure.
- La conductivité électrique mesurée est possible. [9,10]

Cependant certains inconvénients freinent leur diffusion :

- Comparez avec les métaux forgés, les composites sont plus fragiles et sont facilement endommagée.
- Les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- Les métaux coulés ont également tendance à être fragiles pendant le transport, le matériel nécessite un refroidissement.
- Des équipements spéciaux sont nécessaires et un durcissement à chaud est également nécessaire pour le processus de durcissement, il faut du temps pour le traitement à froid ou à chaud.
- Après l'achèvement du dernier rivet, le processus est terminé.

- La gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.
- Les rivets sont enlevés sans causer de dommages.
- Avant de commencer la réparation, le composite doit être nettoyé. [9,11,13]

6. Fibre naturelle

Les fibres naturelles sont classées généralement en fonction de leurs origines : animale, végétale et minérale. Les fibres d’origine végétale sont constituées majoritairement de cellulose et possèdent des propriétés mécaniques supérieures à celles d’origine animale. Ces dernières, telles que la laine et la soie, sont largement utilisées dans le domaine du textile. Les fibres d’origines végétales peuvent être classées en sous familles selon d’où elles ont été extraites ; graines, fruits, écorce, feuilles, bois, tiges ou canne. [14]

Origine	Provenance	Exemples
Végétale	Graines	Cotton, kapok,
	Fruits	Asclépiade Noix de coco
	Ecorces	Lin, chanvre, jute, ramie,
	Feuilles	kénaf.
	Bois	Sisal, henequen, abaca,
	Tiges	Ananas
	Cannes et roseaux	
Animale	Laine/poil	Laine, poils, Cachemire
	Vers à soie	Soie de tussah, soie de mûrier
Minérale		Amiante, Wollastonite

Tableau. I.2.Classification et exemples de fibres naturelles [14,15]

Les fibres naturelles ont réussi à acquérir un intérêt croissant en tant que renfort dans les composites. Cela est dû à leurs [14] :

- propriétés mécaniques, leurs densités particulièrement faibles et les coûts de production bas.
- Les rendements de plantes en fibres sont assez hauts.
- Le prix de la main d'œuvre est relativement bon marché dans les pays de culture des plantes sources qui peuvent être dans certains cas récoltées plusieurs fois dans l'année.
- Le coût d'obtention de fibres naturelles est trois fois inférieur à celui des fibres de verre, quatre fois plus faible que les fibres d'aramide, et cinq fois inférieur au coût de fibres de carbone.

7. Matériaux Biocomposites

Les biocomposites sont des matériaux composites fabriqués à partir de fibres naturelles / bio-fibres et de polymères non biodégradables dérivés du pétrole (PP, PE) ou de polymères biodégradables (PLA, PHA).

Cette dernière catégorie, c'est-à-dire les biocomposites dérivés de fibres dérivées de plantes (naturelles / bio-fibres) et de cultures / de plastiques issus de la biodiversité (bio-polymères / bioplastiques) sont probablement d'être plus respectueux de l'environnement et ces composites sont appelés composites verts. [13-17]

Les biocomposites sont des matériaux composites comprenant une ou plusieurs phases dérivées d'une origine biologique. En termes de renforcement, cela pourrait inclure des fibres végétales telles que le coton, le lin, le chanvre et similaires, ou des fibres de bois recyclé ou de vieux papiers, ou même des sous-produits de cultures vivrières. [12,14-19]

8. Matériaux hybride

8.1. Définition

Un matériau hybride est un matériau qui inclut 2 composantes (l'une organique et l'autre inorganique) mélangées à l'échelle moléculaire (diamètre d'un atome 0.2 nm). Le système est homogène. [12-17]

Ces hybrides sont l'objet de nombreuses recherches car ils permettent de développer de nouvelles applications en alliant les propriétés des deux composantes (organiques et inorganiques). Ces hybrides trouvent leurs applications dans divers domaines tels que l'optique (optique non linéaire, optique intégrée et optique ophtalmique), le cosmétique et la protection solaire, la fabrication de diodes électroluminescentes (utilisées dans des dispositifs d'affichage ou d'éclairage de faibles épaisseurs), le domaine biomédical (biocapteurs chimiques, sonde IRM, vectorisation de médicaments). [13-16]

8.2. Classification des matériaux hybrides

La structure des matériaux hybrides peut être divisée en deux classes et cela en fonction du type d'interaction ou de liaisons entre les composantes:

a. Classe I :

La composante organique (simple molécule (orga ou bio), oligomère, polymère de faible poids moléculaire) et la composante inorganique échangent des interactions faibles de type van der Waals, liaison hydrogène ou ionique.

b. Classe II :

Les 2 composantes sont liées totalement ou partiellement par des liaisons chimiques fortes covalentes ou iono-covalentes (fort recouvrement orbitalaire)

En fait, la transition est continue entre interactions faibles et fortes donc pas vraiment deux classes séparées. [12-20]

c. Intérêts de la classe I [12-20]:

- facilité de synthèse du matériau
- non nécessité de précurseurs métallo-organiques hétéro fonctionnels
- facilité d'élimination si nécessaire de la phase organique
- création facilitée d'architectures fonctionnelles par auto-assemblage (spontané).

d. Intérêts de la classe II [12-20] :

- possibilité de synthèse de matériaux nouveaux à partir d'alcoxydes fonctionnalisés
- minimisation des séparations de phase
- meilleure définition de l'interface organique-inorganique qui permet par exemple un ajustement plus aisé de la balance hydrophile-hydrophobe.

e. Un avantage de la classe II par rapport à la classe I [12, 17-21]:

Le greffage des fonctions organiques au réseau inorganique permet d'éviter un inconvénient des composés hybrides de classe I qui est le départ éventuel des composantes organiques au cours de l'utilisation du matériau.

8.3 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 : [20,21]

- 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).

9. Bio-composite hybride

Un matériau bio-composite hybride est une combinaison de "hybride" et "bio-composite". Ce matériau est simplement une hybridation de matériaux biocomposites. La signification de "hybride" dans les matériaux biocomposites hybrides est l'hybridation dans la structure macroscopique à l'échelle métallographique. [12-15]

Références

- [1] Djebbloun Youcef. Contribution à la caractérisation des matériaux composites renforcés de fibres végétales. Thèse de doctorat en sciences. Université Mohamed Khider, Biskra. (2018)
- [2] A. Raskin. Les résines composites. Université Médicale Virtuelle Francophone. P : 11. (2009-2010).
- [3] Maurice Reyne, les plastiques, Edition hermès, paris. p : 189 (1990).
- [4] C.A.R.M.A centre d'animation régional en matériaux avances. Glossaire des matériaux composites. P : 3. (octobre 2006).
- [5] R.E. Shalin. Polymer Matrix Composites. Chapman & Hall, London. (1995)
- [6] Stéphane Hertz-Clemens. Etude d'un composite aéronautique à matrice métallique sous chargements de fatigue: sollicitation mécano-thermique et propagation de fissures. Mécanique [physics.med-ph]. École Nationale Supérieure des Mines de Paris, (2002).
- [7] D. Gay. Matériaux composites". Edition Hermès, Paris, pp.30-38. (1987).
- [8] Jean-Marie Berthelot. Mécanique des matériaux et structures composites, partie 1. (Les Mans, France). P : 5,6. (2010).
- [9] Renard. J. Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère. Lavoisier, (2005).
- [10] Touimi Amina. Etude comparative sur le comportement élastique des matériaux composites à base des fibres végétales : Bambou/Epoxyde et Coco/Epoxyde. Université DR. Tahar Moulay de Saida. P : 15,16. (2019).
- [11] Toufik Achour. Etude des techniques de réparation des structures composites endommagées. Université Mentour Constantine. P : 8-20 (2011).
- [12] Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. P : 1-4. (2008).
- [13] Maya Jacob John, Sabu Thomas. Biofibres and biocomposites. University Priyadarshini Hills P.O. Kottayam, Kerala 686 560, India. P : 346. (2007).

- [14] Sofien Bouzouita. Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel. L'École Centrale de Lyon. P : 6,7. (2011)
- [15] Paul A Fowler, J Mark Hughes and Robert M Elias. Biocomposites: technology, environmental credentials and market forces. University of Wales, Bangor LL57 2UW, UK. 1781 (2006).
- [16] B. Boulard, C. Chassenieux, A. Ribaud, M. Barré. Matériaux hybrides et mésoporeux, biomatériaux. P: 9, 12, 13, 14, 15. http://perso.univ-lemans.fr/~aribaud/Master1/137EN005/137EN005_1_Introduction_mat%20E9riaux_hybrides.pdf. (Consultée en mars 2020).
- [17] Taoufik Hellali, Afifa Hafidh, Neji Gharbi, Ridha Kossai. Elaboration de matériaux hybrides organique-inorganique obtenues par réaction chimique de polyméthylhydrosiloxane et molécules hétérocycliques BI-fonctionnelles. Université de Tunis. P : 2. (2013).
- [18] A. R. Sanadi, M. R. PIGGOTT. Strength and modulus with short aligned fibres: Part 1, Journal of materials Science 20, 421- 430 (1985)
- [19] Kaouche Naima, prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites. P : 20. (2017)
- [20] Jérôme Vinas. Matériaux Hybrides polymères-particules de silice : synthèse et caractérisation. P : 1-50. (29/02/2008).
- [21] 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. P : 19-25, (02/2010).



**Chapitre II :Endommagement
des matériaux composites**

1. Introduction

En raison de leurs propriétés spécifiques élevées, les matériaux composites sont de plus en plus utilisés pour la conception de structures hautes performances et ce pour un large spectre d'applications industrielles. [1]

Cette diversité d'applications industrielles est possible car ces matériaux peuvent supporter de manière satisfaisante tant les chargements mécaniques que d'autres types de sollicitations (abrasion, agents chimiques, hautes températures), issue des fonctionnalités spécifiques auxquelles sont destinées les structures impliquant ces matériaux, ou encore des environnements auxquels ces matériaux sont exposés. Lors d'une sollicitation quelconque sur un matériau composite, le développement de l'endommagement au sein du matériau commence assez tôt. [2]

L'évolution des dégradations dans des stratifiés composites est un phénomène complexe qui résulte de différents modes d'endommagements souvent couplés, comme la fissuration matricielle, le délaminage entre les couches, la rupture des fibres, etc.... Dans un stratifié à fibres longues, sous l'influence de sollicitations monotones ou cycliques, mécaniques ou thermiques, la « fissuration transverse » est en général le premier endommagement observé dans la matrice d'un pli le plus désorienté par rapport à l'axe de sollicitation. Des fissures transverses peuvent apparaître très tôt dans la durée de vie de la structure et elles peuvent constituer des zones d'amorçage pour d'autres mécanismes d'endommagement plus dangereux. La connaissance de la fissuration transverse est donc un préalable indispensable aux études ayant pour but d'assurer l'intégrité de la structure. [3]

2. Endommagement des matériaux composites

L'endommagement est l'apparition de dommages dans un matériau caractérisé par une extension de surface libre à l'intérieur du matériau, accompagnée d'une augmentation de fraction volumique de vide. Cette apparition est causée par une attaque physique ou chimique. Il conduit à une dégradation de ses capacités physiques pouvant conduire à la rupture. [2]

D'une manière générale, l'endommagement est défini comme un ensemble de changements microstructuraux au sein du matériau qui occasionnent une détérioration irréversible plus ou moins importante. Ce phénomène d'endommagement et de rupture dans les matériaux composites est caractérisé par une rupture précédée d'une dégradation progressive. Ces dégradations peuvent résulter de plusieurs mécanismes élémentaires :

- la rupture transverse de la matrice.
- la rupture longitudinale de la matrice.
- la rupture des fibres.
- la rupture de l'interface "fibre-matrice", auquel s'ajoute, dans le cas de stratifiés, un mécanisme de rupture entre couches, appelé rupture par délaminage.

Ces divers mécanismes coexistent et se développent suivant la nature des matériaux, l'orientation des fibres et les conditions de sollicitations mécaniques sont imposées. [4]

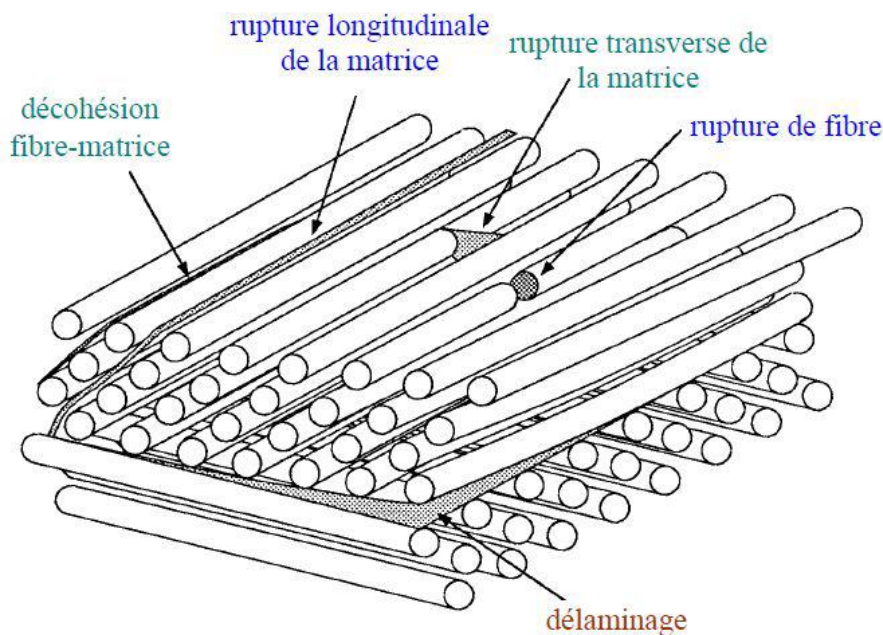


Figure II.1 : Mécanismes d'endommagement dans les composites stratifiés. [4]

Il existe différentes échelles d'observation pour définir le type d'endommagement au sein d'une structure stratifiée à plis unidirectionnels ou tissés. Les plus significatifs sont les suivants [4]:

- A l'échelle microscopique apparaissent les ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice : c'est le phénomène de décohésion fibre/matrice.
- A l'échelle mésoscopique, on observe l'apparition de nombreuses fissures intralaminaires mais également la rupture de fibres intervient au stade ultime de la ruine du matériau.
- A l'échelle macroscopique, on observe le phénomène de décollement inter pli ou encore le phénomène de délaminage.

3. L'interface

L'interface n'est pas une entité bien définie, c'est un maillon très important au niveau d'un matériau composite. Elle est la surface de jonction entre deux matériaux en contact et assure la continuité physique d'un constituant à l'autre à travers tout le matériau en empêchant, par exemple, la formation de porosités ou l'accumulation d'humidité et transmet les efforts, dont les fibres du composite travaillent ensemble, la matrice sert à répartir et transmettre les efforts entre fibres, mais ces efforts doivent passer par l'interface. [5]

4. Interface Fibre/Matrice

C'est l'élément qui conditionne le degré de synergie de l'association fibre/ matrice et qui s'établit entre les constituants lors de l'élaboration du composite. A l'échelle macroscopique l'interface est une surface sans épaisseur qui peut être classée en deux groupes [5]:

- les interfaces générées par le procédé de mise en œuvre du matériau. L'interface inter plis, défini par la superposition des plis et intra-plis ou inter-mèches au niveau d'un pli.
- les interfaces liées à la structure elle-même du composite, créées par l'association des composants de base (matrice/renfort).

5. Rôle des interfaces

Il existe plusieurs rôles essentiels sont attribués aux interfaces pour un bon comportement du composite [5]:

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

6. L'interphase

L'interphase est un milieu continu qui peut être une zone de réaction chimique formée par les constituants du composite lors de son élaboration, ou une couche d'épaisseur fine (en général de quelques 10 ou 100 nm) et de nature chimique définie, introduite volontairement dans le but de protéger la fibre ou de contrôler la liaison inter-faciale, ou bien encore de contribuer à

améliorer la compatibilité chimique fibre/matrice. Elle joue un rôle fondamental dans le comportement mécanique des composites car elle est le siège des mécanismes d'interaction entre les fibres et la matrice. Elle permet d'optimiser les phénomènes de déviation de fissures, de transfert de charge fibre/matrice et parfois même de ralentir l'accès de l'oxygène jusqu'à la fibre. [2]

La figure (a) présente le concept d'interphase et II.2(b) d'interface [2].

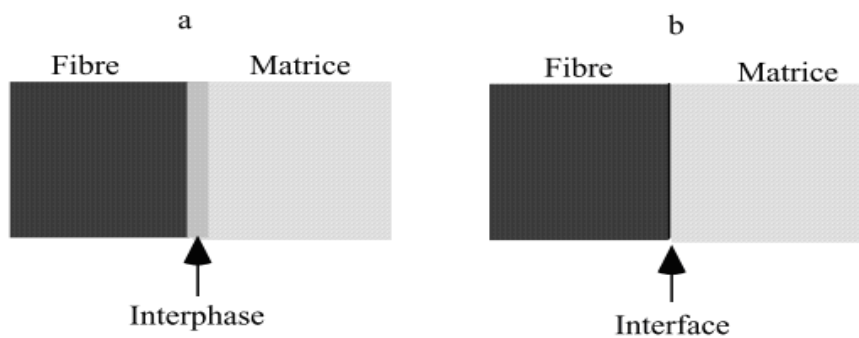


Figure II.2 : concepts d'interphase (a) et d'interface (b) [2]

7. Caractéristiques des mécanismes d'endommagement

L'identification des dommages par la microscopie a permis de développer l'analyse d'endommagement. Il a été montré que la température, la vitesse de sollicitation, les chocs, la nature chimique d'un environnement agressif, le chargement monotone ou cyclique influencent l'évolution de l'endommagement. La ténacité de la matrice et la qualité de l'interface influence la résistance aux dommages. Les mécanismes d'endommagement potentiels d'un matériau hétérogène, notamment les composites soumis à une sollicitation mécanique, peuvent se regrouper en quatre principaux modes différents selon le site où ils opèrent :

7.1 Fissuration de matrice

La complexité des matériaux composites introduit plusieurs types d'endommagements à l'échelle microscopique. La matrice étant le constituant qui s'endommage le premier, son seuil de déformation à l'endommagement est plus faible par rapport à celle des fibres. Les microfissures se produisant au sein de la matrice apparaissent aux niveaux des porosités et des inclusions constitue le principal mécanisme de dégradation des composites par le phénomène

de fissuration transversal ou par fissuration longitudinale. Ce dernier mode de rupture se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à celle de cisaillement. Cette fissuration se propage selon la direction perpendiculaire à la sollicitation et elle peut provoquer une décohésion fibre-matrice. [2]

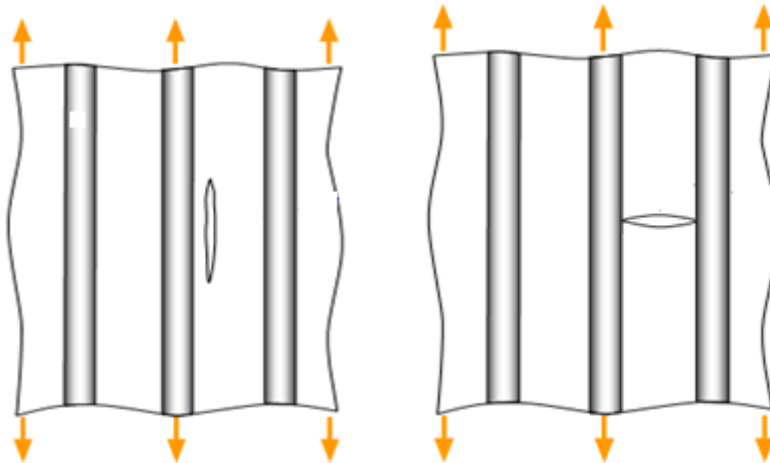


Figure II.3 : Différents types de fissuration de la matrice (longitudinale, transversale) [2]

7.2 Décohésion fibre-matrice

Suite à la fissuration matricielle, les microfissures arrivent au niveau de l'interphase, où elles peuvent être arrêtées ou réorientées. C'est la zone de l'interface où s'effectue le transfert de charge de la matrice vers le renfort. On constate donc une perte d'énergie, liée à la nécessité de création de nouvelles microfissures dans l'interphase.

Parallèlement, des fissures longitudinales apparaissent le long des axes du renfort (Dans ce cas, il intervient le phénomène de décohésion fibre-matrice).

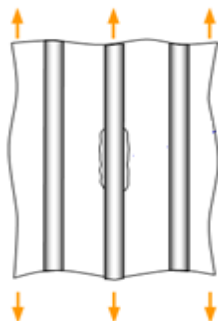


Figure II.4 : Phénomène de décohésion fibre-matrice [2]

L'intensité de la liaison matrice-fibre, en relation intime avec les propriétés de l'interphase et la compatibilité fibre-matrice, est le paramètre qui influe sur la longueur de décohesion selon le chargement appliqué.

Lors d'une interface ayant des propriétés intermédiaires, présentée par la Figure 2.4 la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface ou une fissuration longitudinale de la matrice

Finalement dans le cas d'une interface très forte : Si l'adhérence entre fibres et matrice est très forte, on aura une propagation de la fissure initiée par rupture de fibres.

7.3 Délaminage

Le processus de délaminage est le résultat d'une chronologie de divers types d'endommagement. Les propriétés mécaniques de la matrice et de la fibre ainsi que les propriétés adhésives et cohésives de l'interface gèrent cette chronologie en révélant des types d'endommagement fréquemment rencontrés comme la micro fissuration de la matrice, la rupture des fibres et la rupture des interfaces. A cela, on associe un réseau très important de fissures intra-laminaires qui sont eux aussi induites par les fissures inter-laminaires par différents moyens (rupture de matrice, de fibre et d'interface) allant jusqu'au décollement total des deux plis. Ce type d'endommagement contribue largement à la dégradation des propriétés mécaniques de la structure.

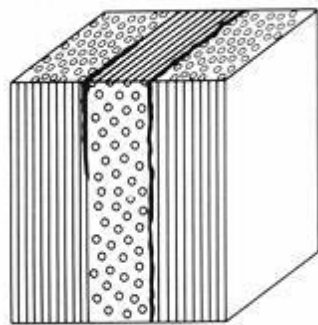


Figure II.5 : Mécanisme de délaminage [2]

7.4 Rupture de fibres

Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint la contrainte à la rupture σ_r (Figure 2.7). Cette rupture provoquera une concentration de contraintes au

voisinage et une rupture des constituants voisins, et ce de proche en proche jusqu'à la ruine du volume sollicité.

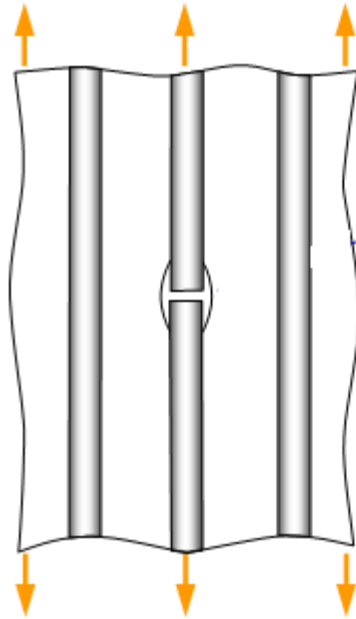


Figure II.6 : Mécanisme rupture de fibre [2]

8. 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 :

-Cas des fibres et matrice subissent la même déformation :

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

A- Cas d'une interface très forte

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

Il n'y a aucun déplacement relatif entre fibre et matrice, le transfert de charge s'effectue par l'intermédiaire d'une forte contrainte de cisaillement dans la matrice, dont l'intensité décroît lorsqu'on s'éloigne radialement de la fibre (figure. II.7). [6]

B- Cas d'une interface très faible

Si l'interface est trop faible, la fissure matricielle est bien déviée à l'interface, mais la décohésion entre fibres et matrice s'étend sur une très grande distance sur laquelle la matrice n'intervient donc plus. Là également, la résistance du composite est très faible, mode II et III. [6]

C- Cas d'une interface relativement faible

Si l'adhérence entre fibres et matrice est relativement faible, la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire (mode II de la rupture) en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface. Le mode II, ou mode de glissement droit, est la situation recherchée dans la déviation de fissure, avec le mode III (glissement vis). En règle générale, la propagation de la fissure est en mode mixte combinant le mode I et les deux autres modes (II et III) voir figure. II.7. [6]

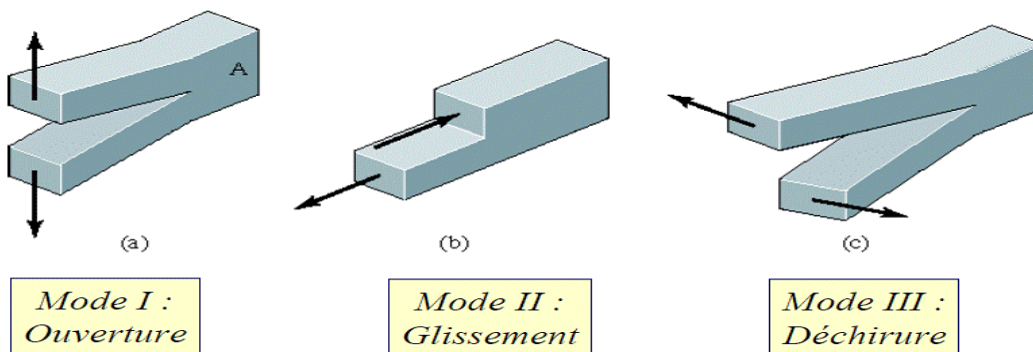


Figure. II.7 : Modes d'endommagement [6]

9. Le modèle de Cox

Un composite ne peut remplir pleinement sa fonction mécanique que si les charges appliquées au matériau peuvent être transmises de la matrice à la fibre. Ce transfert de charge est bien entendu largement conditionné par la réponse mécanique de la zone de contact entre la fibre et la matrice, autrement dit de l'interface ou de l'interphase. [7]

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. [7]

9.1 Modèle de Cox : transfert de charge élastique

On considère le VER constitué d'un fragment de fibre de rayon (a) enrobé dans un cylindre de matrice de rayon R fixé par la teneur en fibre V_f , en fonction des hypothèses faites sur l'arrangement des fibres. Ce V.E.R. est soumis à ses extrémités à une déformation en traction ϵ_1 . Seules les composantes axiales des contraintes générées dans la fibre et la matrice sont considérées. Il s'agit donc d'une approche monodimensionnelle dans laquelle la contrainte axiale dans une section donnée de la fibre est supposée uniforme.

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

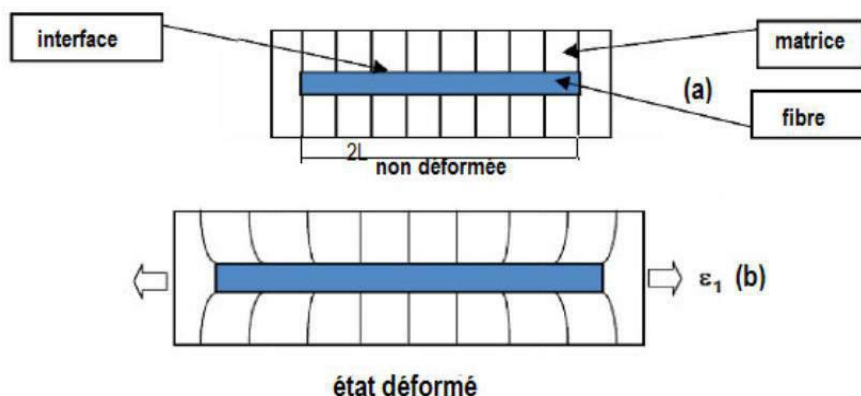


Figure II.8 : volume élémentaire représentatif. Schéma simplifié du champ de contrainte autour de la fibre. (a) sans chargement; (b) chargé. [7]

9.2 Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface

9.2.1 L'équilibre des forces de cisaillement

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

$$2\pi r dx = 2\pi a \tau_i dx \quad (01)$$

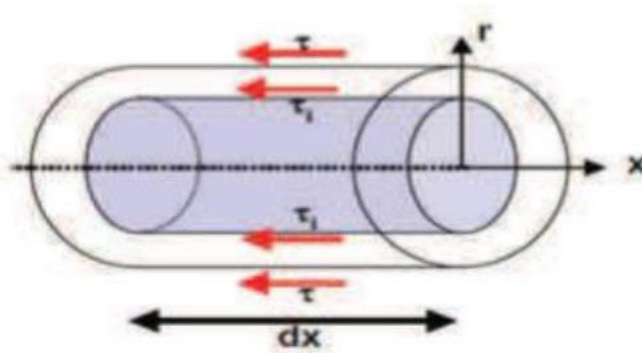


Figure. II.9 : équilibres de la matrice en cisaillement [7]

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

$$\tau = \frac{a\tau_i}{r} \quad (02)$$

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

$$\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau}{G_m} = \frac{a\tau_i}{G_m r} \quad (03)$$

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 inter faciale en fonction du déplacement de la matrice en $r = a$ (w_a) et $r = R$ (w_R):

$$\int_a^R dw = \frac{\tau_i a}{G_m} \int_a^R \frac{dr}{r} \quad (04)$$

Soit :

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

a)

$$\tau_i = \frac{G_m(w_R - w_a)}{a \ln(R/a)} \quad (05)$$

9.2.2 L'équilibre des contraintes dans une portion dx de fibre

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

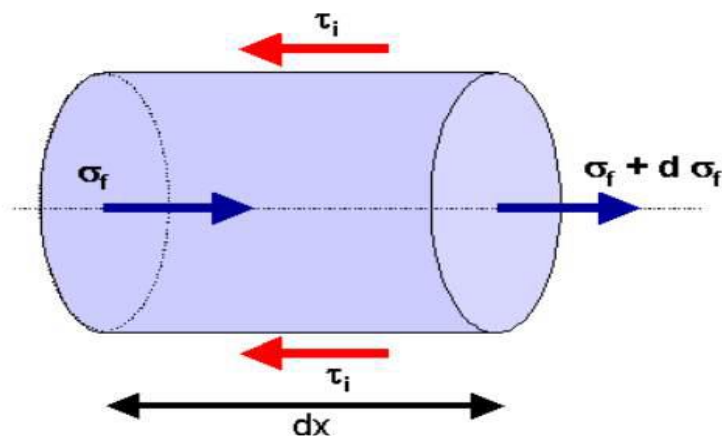


Figure II.10: Equilibre élastique d'une portion de fibre. [7]

$$\pi a^2 d\sigma_f = -2\pi a \tau_i dx \quad (06)$$

Ce qui permet d'écrire: $\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2\tau_i}{a}$

$$\frac{d^2\sigma_f}{dx^2} = -\frac{2}{a} \frac{d\tau_i}{dx} \quad (07)$$

D'après (05) on obtient:

$$\frac{d\tau_i}{dx} = \frac{G_m}{a \ln(R/a)} \left(\frac{aw_R}{dw} - \frac{dw_a}{dx} \right) \quad (08)$$

Pour $r = R$: on suppose que la déformation de la matrice est égale à la déformation appliquée ε_1 :

$$\frac{dw_R}{dx} = \varepsilon_m = \varepsilon_1 \quad (09)$$

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

$$\frac{dw_a}{dx} = \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (10)$$

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

$$\frac{d^2\sigma_f}{dx^2} = \frac{\beta^2}{a^2} (\sigma_f - E_f \varepsilon_1) \quad \text{Avec: } \beta^2 = \frac{2G_m}{E_f \ln(R/a)} \quad (11)$$

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

- **Contrainte axiale dans la fibre**

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_1 \left\{ 1 - \frac{\cosh(\beta x/r)}{\cosh(\beta s)} \right\} \quad (12)$$

- **Contrainte de cisaillement à l'interface**

$$\sigma_f = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_1 \frac{\sinh(\beta x/a)}{\cosh(\beta s)} \quad (13)$$

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

Les profils de contrainte correspondant aux équations de contrainte (05) et (06) sont représentés ci-dessous :

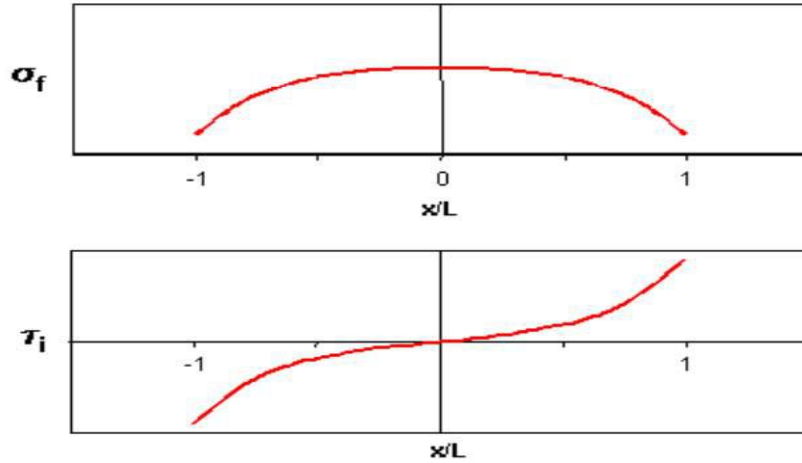


Figure II.11: Modèle de Cox - Profils de contrainte dans la fibre (σ_f) et à l'interface (τ_i). [7]

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. [7]

10. Formalisme probabiliste de Weibull

La fibre est supposée constituée d'un assemblage de maillons ayant chacun leur résistance propre à la rupture. La fracture de la fibre intervient quand le maillon le plus faible se rompt. On divise la fibre en N segments dans lesquels la contrainte est supposée uniforme est égale à σ_i . La probabilité pour qu'un segment soit rompu à la contrainte σ_i est $F(\sigma_i)$. A $F(\sigma_i)$, on associe la fonction de densité de probabilité $f(\sigma)$ définie par [8,9]:

$$F(\sigma_i) = \int_0^{\sigma_i} f(\sigma) d\sigma \quad (20)$$

Si σ_r est la résistance théorique à rupture du matériau :

$$F(\sigma_r) = \int_0^{\sigma_r} f(\sigma) d\sigma = 1 \quad (16)$$

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

$$R = \prod_{i=1}^N (1 - F(\sigma_i)) \quad (17)$$

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

$$R=(1 - F(\sigma))^N \quad (18)$$

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

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

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

$$(1 - F(\sigma))^N = \exp(-NF(\sigma)) \quad (20)$$

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 :

$$\begin{aligned} \Phi(\sigma) &= \frac{(\sigma - \sigma_u)^m}{\sigma_0} ; \sigma > \sigma_u \\ \Phi(\sigma) &= 0 ; \sigma \leq \sigma_u \end{aligned} \quad (21)$$

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 :

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

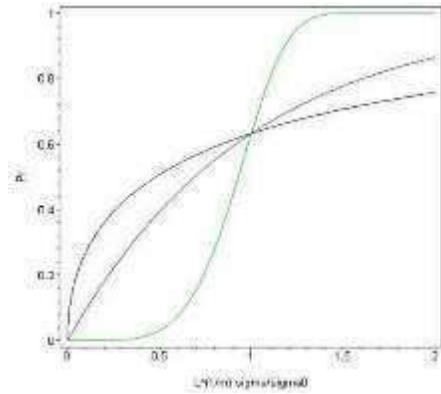


Figure II.7 : Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull [8,9]

$$\Pr(\sigma) = 1 - \exp \left[-L \left[\frac{\sigma}{\sigma_0} \right]^m \right] \quad (22)$$

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

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^1 \sigma dP_r \quad (23)$$

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

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty (1 - \rho_r) d\sigma \quad (24)$$

Soit à partir de l'équation (11) :

$$\sigma_r = \int_0^\infty \exp \left[-L \left[\frac{\sigma}{\sigma_0} \right]^m \right] d\sigma \quad (25)$$

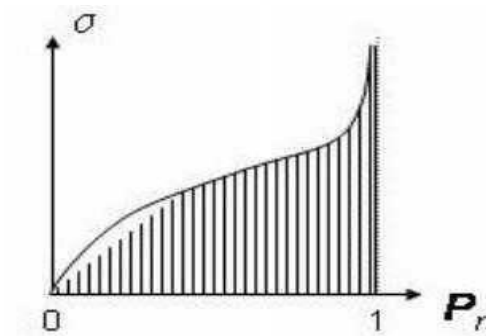


Figure II.8 : Calcul de la contrainte moyenne à rupture [8,9]

On effectue les changements de variable suivants :

$$t=L\left[\frac{\sigma}{\sigma_m}\right]^m$$

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

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

L'équation (25) devient :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty e^{-t} t^{\frac{1-m}{m}} \frac{\sigma_0}{mL^{1/m}} dt \tag{26}$$

Soit :

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_0}{L^{1/m}} \Gamma\left(1 + \frac{1}{m}\right) \tag{27}$$

Où Γ est la fonction Gamma définie comme suit :

$$\Gamma = \int_0^\infty t^{z-1} e^{-t} dt \tag{28}$$

11. Méthode graphique

La méthode graphique peut être dérivée à partir de l'équation :

$$\ln\left(\ln\left(\frac{1}{1-\rho_i}\right)\right) = m \ln(\sigma) - m \ln(\sigma_0) + \ln(l) \tag{29}$$

Le problème principal de la méthode réside dans l'estimation des valeurs de l'estimateur ρ_i de telle manière que les valeurs de m et σ_0 calculées à partir des estimateurs impartiaux des valeurs réelles. [8]

Généralement la valeur de ρ_i est estimée par une fonction connue sous le nom d'indice de probabilité (ou estimateurs). Quatre fonctions différentes des indices ont :

$$P = \frac{i}{n+1}$$

Avec :

n : le nombre total d'échantillons testés

i : le numéro d'ordre de l'éprouvette

Le tableau II.1 illustre les résultats obtenus par l'estimateur de Weibull :

Module de Young estimé par le modèle Weibull [MPa]	Déformation estimé par le modèle Weibull [%]	Contrainte estimé par le modèle Weibull [MPa]
8.875	2.67	165.20

Le tableau II.1 : les résultats de Weibull [8,9]

Références

- [1] Frédéric Laurin, N. Carrière, C. Huchette, J.-F. Maire. Proposition d'une approche hybride d'endommagement et de rupture pour la prévision de la tenue de structures composites. (1). <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00598107> Poitiers, 17èmes Journées Nationales sur les Composites (JNC17), Jun (2011).
- [2] Toufik Achour, Étude des Techniques de réparation des structures composites endommagées. Mémoire présente pour l'obtention du diplôme de magister en génie mécanique. Université Mentouri Constantine. (2011).
- [3] Anh Thang Vu. Endommagement de stratifiés aéronautiques à fibres de carbone et matrice polymères soumis à des chargements monotones ou cycliques à plusieurs températures. Expériences et modélisation. Sciences de l'ingénieur [physics]. ISAE-ENSMA Ecole Nationale Supérieure de Mécanique et d'Aérotechnique - Poitiers, (2010).
- [4] Salah Amroun. Caractérisations mécaniques et étude de l'endommagement des matériaux composites renforcés par des fibres de palmier. Docteur de l'université du 8 mai 1945 Guelma. (93) (2016).
- [5] Tadjedit Samir. Optimisation par un algorithme génétique de l'endommagement de l'interface fibre/ matrice d'un nano composite graphite – époxy. Magister université USTO-MB, Oran. (2014).
- [6] Kaouche Naima. Prise en compte du vieillissement et de l'endommagement dans le dimensionnement de structures en matériaux composites. Magister université USTO-MB, Oran, 27,28 (2017).
- [7] Cox H.L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials, British journal of applied physics.12,72–79. (1952)
- [8] Weibull, W. A statistical theory of the strength of materials. Royal Swedish Academy of English Science Proceedings, 151, 1–45 (1939)
- [9] I. J. DAVIES. Best estimate of Weibull modulus obtained using linear least squares analysis: An improved empirical correction factor. Journal of Material Science 39, 1441–1444, (2004).



**Chapitre III : Les algorithmes
métaheuristiques**

1 Introduction

Face aux difficultés rencontrées par les heuristiques pour avoir une solution réalisable de bonne qualité pour des problèmes d'optimisation difficiles, les métaheuristiques ont fait leur apparition. [1]

Ces algorithmes sont plus complets et complexes qu'une simple heuristique, et permettent généralement d'obtenir une solution de très bonne qualité pour des problèmes issus des domaines de la recherche opérationnelle ou de l'ingénierie dont on ne connaît pas de méthodes efficaces pour les traiter ou bien quand la résolution du problème nécessite un temps élevé ou une grande mémoire de stockage. [1]

La plupart des métaheuristiques utilisent des processus aléatoires et itératifs comme moyens de rassembler de l'information, d'explorer l'espace de recherche et de faire face à des problèmes comme l'explosion combinatoire. Une métaheuristique peut être adaptée pour différents types de problèmes, tandis qu'une heuristique est utilisée à un problème donné. [1]

Plusieurs d'entre elles sont souvent inspirées par des systèmes naturels dans de nombreux domaines tels que : la biologie (algorithmes évolutionnaires et génétiques) la physique (recuit simulé), et aussi l'éthologie (algorithmes de colonies de fourmis). [1]

2. Les algorithmes de colonies de fourmis

2.1. Introduction

Le terme "fourmi" est la pierre angulaire de cette thèse. Derrière ce mot se profilent plusieurs domaines : celui de la biologie ou plus précisément de la myrmécologie qui est l'étude du comportement naturel des fourmis, celui de la robotique qui utilise leur comportement pour concevoir des nouvelles machines, et celui de l'informatique où ces créatures sont modélisées pour la simulation ou la création d'algorithmes. Nous allons définir rapidement l'anatomie de la fourmi et la situer dans l'écosystème. [2]

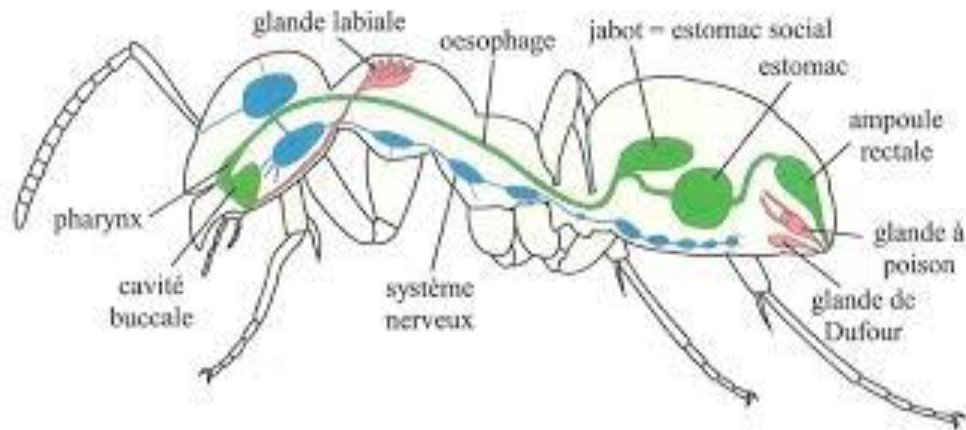


Figure. III.1 : Schéma anatomique d'une fourmi [2]

2.2. Anatomie

La taille des fourmis (1mm à 3cm) varie selon l'espèce. On estime que 9500 espèces sont connues à l'heure actuelle, et que le nombre total est le double. Leur anatomie (Fig.1) se décompose en trois segments (tête, thorax et abdomen), bien différenciés, qui sont unis entre eux par d'étroits pédoncules. Leur tête porte deux antennes formées de plusieurs segments articulés. Leurs pattes, au nombre de six, sont attachées à leur thorax. La possession des ailes est liée à la division en castes ; seuls les mâles et les femelles fécondes, ou reines, en sont munies. Il s'agit d'un reliquat hérité d'un ancêtre commun avec les abeilles. De nombreuses espèces sont dotées d'un aiguillon plus ou moins développé à l'extrémité de leur abdomen. On peut observer que cet aiguillon est alimenté par deux glandes [2] :

- une glande acide, venimeuse, dorsale qui débouche dans un réservoir situé à la base de l'aiguillon ;
- une glande alcaline appelée glande de Dufour, plus discrète, ventrale, qui débouche à la base de l'appareil vulnérant.

Le composé chimique volatil sécrété par cette glande, lorsqu'il est déposé sur le sol par un individu, forme une trace odorante qui a pour but d'inciter ses congénères à emprunter le même chemin. Lorsqu'une fourmi se trouve face à une source de nourriture importante, elle en découpe une partie qu'elle emporte, puis sécrète une trace odorante qu'elle dépose sur le chemin menant à la fourmilière. Le composé déposé sur le sol a pour but d'inciter

les autres individus à se diriger vers la source de nourriture. Cette substance, qui est un outil de communication chez les fourmis, est appelée phéromone. [2]

2.3 Entomologie de la fourmi

La fourmi est un insecte social de la superfamille des Formicoïdes et appartient à l'ordre des hyménoptères comme les abeilles et les guêpes. Elle vit en colonies dans des habitations collectives à la structure complexe, les fourmilières. [2]

2.3.1 L'habitat des fourmis

Chez beaucoup d'espèces, les fourmilières sont constituées de chambres et de galeries creusées sous des souches, des pierres ou à même le sol. Ces structures peuvent s'étendre sur plusieurs mètres en profondeur. Pour d'autres espèces, comme les fourmis tisserandes, le nid est fait à base de feuilles. Chez les fourmis rousses des bois, ce sera un amas d'aiguilles de pin et autres débris végétaux placés à la surface du sol et dont la hauteur varie en fonction du climat. Plus le climat est rude, plus le dôme est élevé, jusqu'à atteindre 1m de haut. A l'intérieur, se trouve une véritable cité très organisée : les ouvrières d'entretien nettoient les galeries sans relâche et les issues sont ouvertes régulièrement pour assurer l'aération. [2]

2.3.2 La vie sociale des fourmis

Les fourmis sont apparues sur terre il y a 100 millions d'années, contre 90000 ans pour l'homo sapiens. Le nombre d'individus par colonie est très variable. Chez les magnans on peut compter jusqu'à 20 millions d'individus, contre guère plus de 20 chez d'autres espèces. Chaque colonie est divisée en castes, constituées d'individus qui ont des rôles et des aspects différents.

C'est aussi le cas pour d'autres insectes sociaux comme les termites, les abeilles et les guêpes. On y trouve :

- la caste des reproducteurs qui comprend des femelles (reines) et des mâles.
- la caste des ouvrières spécialisées, constituée de nombreuses petites femelles stériles, qui ont comme rôle, soit la recherche de la nourriture, soit la construction et la réparation du nid, soit le nettoyage, soit les soins des larves, soit encore comme chez les fourmis charpentières, n'importe quelle activité en cas de nécessité.

- la caste des soldats, spécialisée dans l'attaque et la défense de la communauté, présente chez diverses fourmis comme les magnans d'Afrique.

Les fourmis sont les insectes les plus répandus sur la surface de la terre : elles sont présentes des steppes de l'Oural en passant par la forêt amazonienne jusque dans des déserts. On ne trouve pas un kilomètre carré dépourvu de ces insectes. Elles ne pèsent qu'un millionième de notre poids, mais si nous considérons leur masse totale, elles peuvent nous disputer le titre d'organisme social prédominant à la surface du sol. L'entomologiste britannique C.B. Williams a tenté de donner quelques chiffres : il estime le nombre d'insectes à 10^{18} , dont les fourmis représentent environ 1%, ce qui donne un poids de fourmis du même ordre de grandeur que celui de l'humanité.

Les espèces hautement sociales d'insectes sont au nombre de 13500 sur 750000 espèces d'insectes répertoriées, et parmi ces espèces sociales 9500 sont des fourmis. [2]

2.4. Les communications entre les fourmis

Les fourmis ont développé des mécanismes de communication très élaborés. Il a été défini douze types de réponse mettant en œuvre une forme de communication tels que : l'alarme, l'attraction simple, le recrutement,...

La communication chez les fourmis peut-être de différentes natures : chimique, sonore, tactile, visuelle. Les principaux moyens de communication sont [3]:

- **La communication tactile** : lorsque deux fourmis se rencontrent, elles procèdent à quelques attouchements d'antennes ou de pattes, et se reconnaissent aussitôt comme membres de la même fourmilière.
- **La communication sonore** : les fourmis peuvent également utiliser des stimuli vibratoires comme moyen de communication. Elles frappent les parois de la fourmilière avec leur abdomen pour prévenir les autres. Elles tapotent aussi leurs antennes pour se parler. Ce signal est utilisé en fonction de l'espèce comme signal de détresse en cas de danger, comme signal de qualité de l'alimentation pour le recrutement pour une source de nourriture, comme signal de demande d'aide en cas où la nourriture trouvée est de grande taille.

- **La communication visuelle** : développée chez certaines espèces, permet aux fourmis de retrouver leur chemin, guidées par des marqueurs visuels.
- **La communication chimique** : les fourmis sont équipées de glandes produisant des phéromones, substances chimiques volatiles et odorantes qu'elles peuvent sentir par leurs antennes. Ce signal chimique porte l'information à la fois sur l'espèce, la société mais aussi la caste et le stade de développement auxquelles appartiennent les fourmis rencontrées. C'est en sécrétant cette substance qu'une fourmi éclaireuse marque le chemin qu'elle a utilisé et revient avertir ses pairs de la présence de nourriture ou d'un danger, ainsi que de sa localisation. C'est le moyen de communication le plus efficace et plus utilisé par toutes les espèces de fourmis.

[3]

2.5. Principe d'un algorithme de colonies de fourmis

Un algorithme de colonies de fourmis fortement inspiré du déplacement des groupes de fourmis, cette méthode a pour but de construire les meilleures solutions à partir des éléments qui ont été explorés par d'autres individus. Chaque fois qu'un individu découvre une solution au problème, bonne ou mauvaise, il enrichit la connaissance collective de la colonie. Ainsi, chaque fois qu'un nouvel individu aura à faire des choix, il pourra s'appuyer sur la connaissance collective pour pondérer ses choix. [4]

Pour reprendre la dénomination naturelle, les individus sont des fourmis qui vont se déplacer à la recherche de solutions et qui vont sécréter des phéromones pour indiquer à leurs congénères si un chemin est intéressant ou non. Si un chemin se retrouve fortement phéromone, cela signifiera que beaucoup de fourmis l'ont jugé comme faisant partie d'une solution intéressante et que les fourmis suivantes devront la considérer avec intérêt. [4]

Un risque apparaît lorsqu'un chemin non optimal est marqué. En effet, les fourmis qui s'en trouveront à proximité seront tentées d'y passer augmentant encore le niveau de phéromone de ce chemin. Pour diminuer le risque d'enfoncer la colonie dans un minimum local du problème, on pourra prendre soin de diminuer automatiquement le niveau de phéromone de tout le système, pour rehausser l'intérêt des autres chemins qui pourraient faire partie de la solution optimale. Ce paramètre, correspondant au taux d'évaporation des phéromones, est l'un des paramètres principaux de l'algorithme. [4]

De la même manière, aucun chemin ne devra être inondé de phéromones et aucun chemin ne devra être totalement invisible, on pourra donc aussi contrôler le niveau de phéromone de chaque chemin pour le maintenir entre des bornes minimum et maximum. Un chemin inondé de phéromones masquerait tous les autres à proximité et un chemin pas des tout phéromones ne serait jamais choisi par une fourmi, en conséquence nous devons conserver ces chemins avec des valeurs raisonnables. Ces bornes min et max sont aussi des paramètres de l'algorithme. [4]

2.6. Relation avec l'informatique

En observant une colonie de fourmis à la recherche de nourriture dans les environs du nid, on s'aperçoit qu'elle résoud des problèmes tels que celui de la recherche du plus court chemin. Les fourmis résolvent des problèmes complexes par des mécanismes assez simples à modéliser. Il est ainsi assez simple de simuler leur comportement par des algorithmes. [5]

2.7. Comportement de la fourmi

Ce comportement permet de trouver le chemin le plus court vers la nourriture lorsque les pistes de phéromones sont utilisées par la colonie entière. Autrement dit, lorsque plusieurs chemins marqués sont à la disposition d'une fourmi, cette dernière peut connaître le chemin le plus court vers sa destination. [4]

2.7.1 Les piste de phéromones

En marchant du nid à la source de nourriture et vice-versa (ce qui dans un premier temps se fait essentiellement de façon aléatoire), les fourmis déposent au passage sur le sol une substance odorante appelée phéromones. Cette substance permet ainsi donc de créer une piste chimique, sur laquelle les fourmis s'y retrouvent. En effet, d'autres fourmis peuvent détecter les phéromones grâce à des capteurs sur leurs antennes.

Les phéromones ont un rôle de marqueur de chemin : quand les fourmis choisissent leur chemin, elles ont tendance à choisir la piste qui porte la plus forte concentration de phéromones. Cela leur permet de retrouver le chemin vers leur nid lors du retour. D'autre part, les odeurs peuvent être utilisées par les autres fourmis pour retrouver les sources de nourritures trouvées par leurs congénères. [5]

En effet, comme l'illustre la figure III.2, les fourmis le plus rapidement arrivées au nid, après avoir visité la source de nourriture, sont celles qui empruntent les deux branches les plus courtes. Ainsi, la quantité de phéromone présente sur le plus court trajet est légèrement plus importante que celle présente sur le chemin le plus long. Or, une piste présentant une plus grande concentration en phéromone est plus attirante pour les fourmis, elle a une probabilité plus grande d'être empruntée. La piste courte va alors être plus renforcée que la longue, et, à terme, sera choisie par la grande majorité des fourmis.

On constate qu'ici le choix s'opère par un mécanisme d'amplification d'une fluctuation initiale. Cependant, il est possible qu'en cas d'une plus grande quantité de phéromone déposée sur les grandes branches, au début de l'expérience, la colonie choisisse le plus long parcours. [6]



Figure.III.2 : Expérience de sélection des branches les plus courtes par une colonie de fourmis : (a) au début de l'expérience, (b) à la fin de l'expérience. [6]

3. Les algorithmes de Monté-Carlo

La méthode de Monte-Carlo est une méthode statistique de calcul numérique. Cette approche permet une compréhension intuitive de la méthode grâce aux images statistiques de transport corpusculaire qui accompagnent habituellement le développement d'algorithmes. À partir de ce type d'algorithmes, nous proposons une démarche méthodologique permettant de développer une formulation intégrale de la grandeur estimée. Cette écriture intégrale permet notamment d'utiliser diverses techniques d'optimisation, essentiellement en vue d'une diminution des temps de calcul. [7]

L'utilisation de la méthode de Monte-Carlo est devenue possible grâce à l'amélioration des performances des ordinateurs car pour obtenir des estimations suffisamment exactes de la grandeur recherchée, il faut réaliser le calcul d'un très grand nombre de cas particuliers et dépouiller ensuite la statistique d'un volume énorme de données. Le grand avantage de cette méthode est sa simplicité. Or son inconvénient est le temps de calcul. Les méthodes Monte Carlo permettent une bonne exploration puisque tout point à une probabilité identique d'être atteint, toutefois, elles ne permettent pas d'exploitation des résultats déjà obtenus. [8]

3.1. Intégration de Monte Carlo

L'approche originale de Monte-Carlo était une méthode développée par les physiciens pour utiliser la génération de nombres aléatoires pour calculer les intégrales.

Supposons que nous souhaitons calculer une intégrale complexe :

$$\int_a^b h(x)dx \quad (1)$$

Si nous pouvons décomposer $h(x)$ en produit d'une fonction $f(x)$ et d'une fonction de densité de probabilité $p(x)$ définie sur l'intervalle (a, b) , alors notons que

$$\int_a^b h(x)dx = \int_a^b f(x)p(x)dx = E_{p(x)}[f(x)] \quad (2)$$

De sorte que l'intégrale peut être exprimée comme une attente de $f(x)$ sur la densité $p(x)$. Ainsi, si nous tirons un grand nombre x_1, \dots, x_n de variables aléatoires de la densité $p(x)$, alors :

$$\int_a^b h(x)dx = E_{p(x)}[f(x)] \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n f(x_i) \quad (3)$$

C'est ce qu'on appelle l'intégration de Monte-Carlo. [9]

3.2. Simulation de variables aléatoires

3.2.1. Loi uniforme

En pratique un ordinateur ne sait engendrer que des suites de nombres déterministes : il est incapable de générer une suite "réellement" aléatoire. Par contre, il est possible de construire des suites de nombres qui se comportent (statistiquement) comme des suites aléatoires. [10]

Les suites les plus courantes produites par les ordinateurs sont calculées à partir d'un nombre M d'entiers $\{0, \dots, M - 1\}$. En divisant par M , on obtient ainsi une suite sur $[0, 1[$. Elles sont construites sur la base de récurrences de la forme

$$u_{n+1} = g(u_n), \quad n \in \mathbb{N}$$

Où g est une fonction de $\{0, \dots, M - 1\}$ dans lui-même u_0 et, appelé graine, est à initialiser dans $\{0, \dots, M - 1\}$. On pose alors

$$x_n = \frac{u_n}{M} \in [0, 1[, n \in \mathbb{N}.$$

L'exemple le plus simple est celui de la congruence mixte :

$$g(u) = (Au + C) \bmod M$$

Où A et C sont des réels positifs à choisir (dans le cas $C = 0$, on parle de congruence multiplicative).

Une fois que nous pouvons simuler la loi $u_{[0,1]}$, il est possible de simuler la loi $u_{[a,b]}$ pour $a \leq b$ en utilisant le fait que si $Y \sim u_{[0,1]}$ alors $a + (b - a)Y \sim u_{[a,b]}$.

3.2.2 Méthode d'inversion

La méthode d'inversion (de la fonction de répartition) est basée sur le résultat suivant.

Proposition 1. Soit Y une variable aléatoire réelle à valeurs dans \mathbb{R} de fonction de répartition F_Y . On pose

$$F_Y^{-1}(u) := \inf\{y \in \mathbb{R} : F_Y(y) \geq u\} \quad u \in [0, 1]$$

Notons $\text{dom}(F_Y^{-1}) := \{y \in \mathbb{R} : F_Y^{-1}(y) \neq \pm\infty\}$. Si $U \sim u_{\text{dom}(F_Y^{-1})}$ alors $F_Y^{-1}(U)$ et Y ont la même loi.

Démonstration. Par définition de F_Y^{-1} nous avons

$$P[F_Y^{-1}(U) \leq y] = P[U \leq F_Y(y)]$$

Pour tout $y \in \mathbb{R}$.

Notons que ce résultat permet de simuler également des variables aléatoires à support discret. Si Y a pour loi $P[Y = y_k] = p_k, k \in \mathbb{N}$, alors si $U \sim u_{[0,1]}$

$$\tilde{Y} = y_0 I_{U \leq p_0} + \sum_{i \geq 1} y_i I_{\sum_{j=0}^{i-1} p_j < U \leq \sum_{j=0}^i p_j}$$

a même loi que Y. Pour simuler Y, on simule donc $U \sim u_{[0,1]}$ et on utilise la boucle

$p = p_0; j = 0;$

Tant que ($p < U$)

Faire $\{j = j + 1; p = p + p_j\}$

Fin Tant que

$Y = y_j;$

Notons que cela peut être très coûteux si la loi de Y est très dispersée. Nous présentons deux exemples dans la suite.

Le premier concerne la loi exponentielle. Supposons que $Y \sim \varepsilon(\lambda)$ avec $\lambda > 0$. Alors

$$F_Y(y) = 1 - e^{-\lambda y}, y \in \mathbb{R}$$

Nous obtenons donc $F_Y^{-1}(u) = -\frac{1}{\lambda} \log(1 - u)$. Ainsi si $U \sim U_{(0,1)}$ et en utilisant le fait que

$1 - U \sim U_{(0,1)}$, nous obtenons que $\tilde{Y} = -\frac{1}{\lambda} \log(u)$ suit la même loi que Y.

Le second exemple concerne la loi de Bernoulli. Supposons que $Y \sim B(p)$ avec $p \in]0; 1[$. Si $U \sim U_{(0,1)}$ alors Y a même loi que $I_{u \leq p}$. Avec ce procédé, on peut également simuler une loi binomiale de paramètre (n, p) en utilisant la variable aléatoire $\sum_{i=1}^n I_{u_i \leq p}$ où u_1, \dots, u_n sont i.i.d de loi $u_{(0,1)}$. [10]

3.2.3 Méthode de rejet

a. Loi conditionnelle et loi uniforme sur un domaine

Proposition 2. Soit $(Z_n)_{n \geq 1}$ une suite de v.a. i.i.d. à valeurs dans R^d et soit $D \subset R^d$ tel que $P[Z_1 \in D] > 0$. On pose

$$v_1 := \inf\{k \geq 1 : Z_k \in D\}$$

$$v_{n+1} := \inf\{k > v_n : Z_k \in D\}$$

$$Y_n := Z_{v_n} \text{ pour } n \geq 1.$$

Alors, $(Y_n)_{n \geq 1}$ est une suite de v.a. i.i.d. de loi ρ donnée par

$$\rho(A) = P[Z_1 \in A | Z_1 \in D]$$

Pour A borélien de R^d .

Cette proposition nous permet alors de construire des variables aléatoires de loi uniforme sur un ensemble donné.

Corollaire 1. En reprenant les notations de la Proposition 2 et en supposant que les Z_n suivent la loi uniforme sur $\prod_{i=1}^d [a_i, b_i]$ alors les Y_n suivent la loi uniforme sur D .

b. Lois à densité

La méthode de rejet peut également être utilisée lorsqu'on connaît la densité de Y .

Proposition 3. Soit f une densité sur R^d , $(Z_n)_{n \geq 1}$ une suite de variables aléatoires indépendantes de densité g sur R^d , et soit $(U_n)_{n \geq 1}$ une suite de variables aléatoires indépendantes suivant une loi uniforme sur $[0,1]$, indépendantes de la suite $(Z_n)_{n \geq 1}$.

On pose

$$v_1 := \inf\{k \geq 1 : f(Z_k) > a U_k g(Z_k)\}$$

$$v_{n+1} := \inf\{k > v_n : f(Z_k) > a U_k g(Z_k)\}$$

$$Y_n := Z_{v_n} \text{ pour } n \geq 1,$$

Où a est un réel fixé vérifiant $f(z) \leq ag(z)$ pour tout $z \leq R^d$. Alors, la suite $(Y_n)_{n \geq 1}$ est une suite de variables aléatoires indépendantes de même densité f . [10]

3.2.4. Méthode par transformation

a. Cas Gaussien. La méthode par transformation permet de simuler les variables aléatoires gaussiennes. Nous commençons par les gaussiens standards pour lesquelles nous proposons deux méthodes.

b. L'algorithme de Box-Muller

L'algorithme de Box-Muller est l'un des exemples les plus connus de transformation. Il permet de générer des variables aléatoires gaussiennes $N(0, 1)$ à partir de la génération de variables aléatoires uniformes sans avoir recours à l'évaluation et à l'inversion de sa fonction de répartition Φ . [11,12]

- **Version cartésienne.** Soit $(U, V) \sim U_{[0,1]}$ et

$$X := \sqrt{-2 \log(U)} \cos(2\pi V), \quad Y := \sqrt{-2 \log(U)} \sin(2\pi V).$$

Alors $(X, Y) \sim N(0,1)$.

- **Version polaire.** Soit (U, V) une variable aléatoire de loi uniforme sur le disque unité $\{(u, v) \in R^2: 0 < u^2 + v^2 < 1\}$. Posons

$$R^2 := u^2 + v^2 \text{ et}$$

$$X := U \sqrt{-2 \log(R^2)/R^2}, \quad Y := V \sqrt{-2 \log(R^2)/R^2}.$$

Bien que populaire, cette transformation n'est pas la façon la plus rapide d'obtenir des réalisations de $N(0, 1)$. Elle est en effet moins performante que l'inversion numérique de la fonction de répartition.

c. Simulation d'un vecteur gaussien

Soit $X = (X_1, \dots, X_d)$ un vecteur aléatoire de R^d de loi normale multivariée $N(\mu, \Gamma)$. Lorsque la matrice de covariance Γ est diagonale, il suffit de générer d variables X_i indépendantes de loi normale. En revanche lorsque la matrice de covariance n'est pas diagonale cette méthode n'est pas envisageable et on utilise le résultat suivant

Proposition 3. Soit μ un vecteur de R^d et Γ une matrice de $R^{d \times d}$ définie positive.

(1) Il existe $A \in R^{d \times d}$ telle que $AA^* = \Gamma$ (A une matrice triangulaire inférieure).

(2) Si $Y \sim N(0, I_d)$, alors $X = \mu + AY$, suit une loi normale multivariée $N(\mu, \Gamma)$.

Pour simuler un vecteur gaussien de loi $N(\mu, \Gamma)$ on procède donc ainsi. On commence par calculer la matrice A en utilisant l’algorithme de décomposition de Cholesky. On simule ensuite un vecteur $Y \sim N(0, I_d)$ en utilisant la formule de Box-Müller ou l’algorithme polaire, puis, on calcule $\mu + AY$.

d. Loi et processus de Poisson

Théorème : soit $(T_n)_{n \geq 1}$ une suite de v.a. i.i.d, qui suit une loi exponentielle de paramètre $\lambda > 0$. On lui associe un processus de comptage $\{N(t), t \geq 0\}$ en convenant que le n-ième top a lieu à l’instant $S_n = T_1 + \dots + T_n$. En posant $S_0 = 0$, on suppose donc :

$$N(t) = \sum_{n \geq 1} \mathbf{1}_{\{S_n \leq t\}}$$

1. Pour tout $t > 0$, la variable aléatoire $N(t)$ (qui représente le nombre de tops se produisant dans l’intervalle de temps $[0, t]$) suit la loi de Poisson de paramètre λt .

2. La loi conditionnelle de (S_1, \dots, S_n) sachant $N(t) = n$ est la loi de la statistique d’ordre $(U_{(1)}), \dots, U_{(n)}$ de n v.a. i.i.d. U_i de loi uniforme sur $[0, t]$. [11,12]

4. Les algorithmes génétiques

L’algorithme génétique (AG) est un algorithme de recherche basée sur les mécanismes de la sélection naturelle et de la génétique. Il combine une stratégie de ”survie des plus forts” avec un échange d’informations aléatoires mais structurées. Pour un problème pour lequel une solution est inconnue, un ensemble de solutions possibles est créé aléatoirement. On appelle cet ensemble la population. Les caractéristiques (ou variables à déterminer) sont alors utilisées dans des séquences de gènes qui seront combinées avec d’autres gènes pour former des chromosomes et par après des individus. Chaque solution est associée à un individu, et cet individu est évalué et classifié selon sa ressemblance avec la meilleure,

mais encore inconnue, solution au problème. Il peut être démontré qu'en utilisant un processus de sélection naturelle inspiré de Darwin, cette méthode convergera graduellement à une solution.

Comme dans les systèmes biologiques soumis à des contraintes, les meilleurs individus de la population sont ceux qui ont une meilleure chance de se reproduire et de transmettre une partie de leur héritage génétique à la prochaine génération. Une nouvelle population, ou génération, est alors créée en combinant les gènes des parents. On s'attend à ce que certains individus de la nouvelle génération possèdent les meilleures caractéristiques de leurs deux parents, et donc qu'ils seront meilleurs et seront une meilleure solution au problème.

Le nouveau groupe (la nouvelle génération) est alors soumis aux mêmes critères de sélection, et par après générer ses propres rejetons. Ce processus est répété plusieurs fois, jusqu'à ce que tous les individus possèdent le même héritage génétique. Les membres de cette dernière génération, qui sont habituellement très différents de leurs ancêtres, possèdent de l'information génétique qui correspond à la meilleure solution au problème. L'algorithme génétique de base comporte trois opérations simples qui ne sont pas plus compliquées que des opérations algébriques :

- sélection
- Reproduction
- Mutation

L'algorithme génétique fut développé par Holland. [13-15]

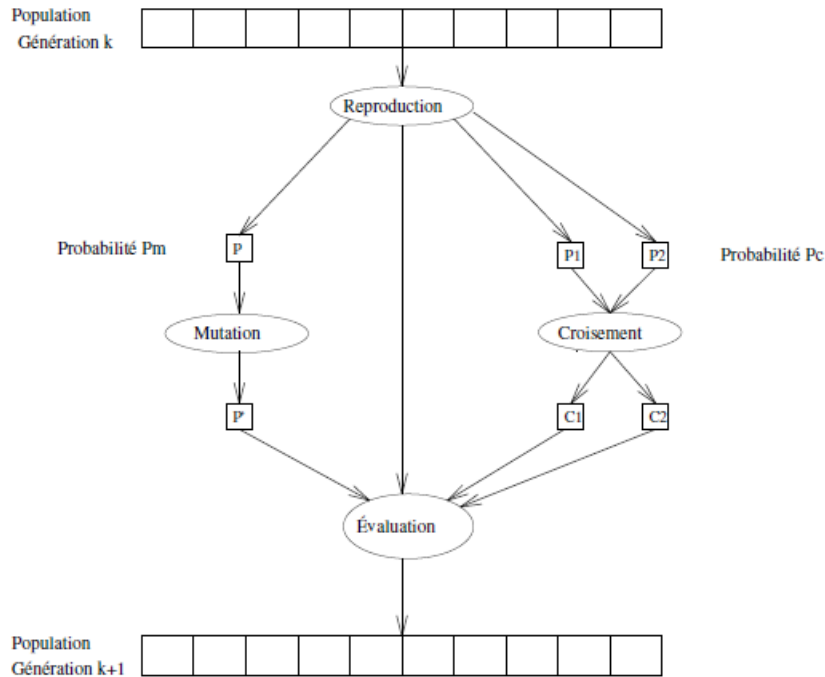


Figure. III.3 : principe générale des algorithmes génétiques [13-15]

4.1. Les opérateurs de base d'un AG

Les opérateurs sont fondamentaux pour implanter le processus reproductif caractéristique d'un AG. De nombreux opérateurs génétiques existent ainsi que différentes stratégies d'implantation. Par contre, dans ce paragraphe nous n'aborderons que les opérateurs les plus simples et les plus utilisés à savoir : l'opérateur de sélection, de croisement et de mutation, pour ne pas complexifier la méthode et perdre le sens physique des paramètres de réglage. [13,16]

4.1.1. La sélection

L'opérateur de sélection est chargé de "favoriser" les meilleurs individus. Plus formellement, l'opérateur de sélection va générer à partir de la population courante une nouvelle population par copie des individus choisis de la population courante. La copie des chaînes s'effectue en fonction des valeurs de la fonction d'adaptation. Ce procédé permet de donner aux meilleures chaînes, une probabilité élevée de contribuer à la génération suivante.

Cet opérateur est bien entendu une version artificielle de la sélection naturelle, la survie darwinienne des chaînes les plus adaptées. Plusieurs stratégies sont possibles pour effectuer une telle sélection parmi lesquelles nous abordons [13-15] :

1. La sélection par classement : elle consiste à ranger les individus de la population dans un ordre croissant (ou décroissant selon l'objectif) et à retenir un nombre fixé de génotypes.

Ainsi, seuls les individus les plus forts sont conservés. L'inconvénient majeur de cette méthode est la convergence prématurée de l'algorithme génétique.

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

4.1.2. Le croisement

La naissance d'un nouvel individu, nécessite la prise aléatoire d'une partie des gènes de chacun des deux parents. Ce phénomène, issu de la nature est appelé croisement (cross over). Il s'agit d'un processus essentiel pour explorer l'espace des solutions possibles. Une fois la sélection terminée, les individus sont aléatoirement répartis en couples. Les chromosomes parents sont alors copiés et recombinaison afin de produire chacun deux descendants ayant des caractéristiques issues des deux parents. Dans le but de garder quelques individus parents dans la prochaine population, on associe à l'algorithme génétique une probabilité de croisement, qui permet de décider si les parents seront croisés entre eux ou s'ils seront tout simplement recopiés dans la population suivante. Il existe plusieurs types de croisement parmi lesquels on trouve : le croisement en 1 point, le croisement en deux points et le croisement en N points, ces types sont résumés dans la figure suivante [13,17] :

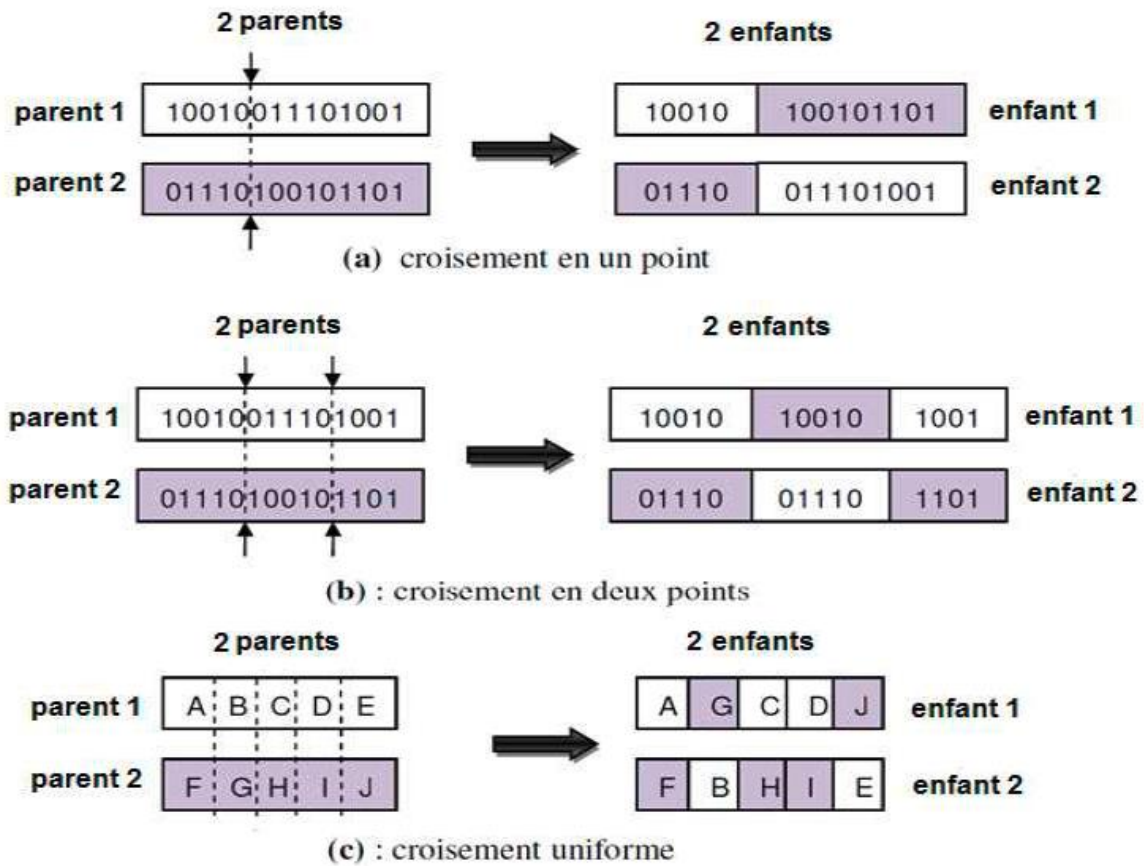


Figure.III.4 : exemples d'opération de croisement [13,14]

4.1.3 La mutation

L'opérateur de mutation, en générant de nouveaux gènes, a pour rôle de permettre d'explorer la totalité (en théorie) de l'espace d'état, ce qui correspond à la propriété d'ergodicité de parcours d'espace, essentielle aux AG pour leurs propriétés de convergence. En effet les preuves théoriques de convergence des AG peuvent fonctionner sans croisement, mais pas sans mutation.

L'opérateur de mutation fonctionne comme suit. Pour les problèmes discrets, un gène du chromosome est tiré aléatoirement et sa valeur est remplacée par une des autres valeurs possibles (tirée aléatoirement elle aussi). Dans le cas des problèmes continus, le gène est également tiré aléatoirement, et remplacé par une valeur aléatoire du *domaine d'extension des gènes* (espace d'état). La figure suivante montre un exemple de mutation. [13-15]

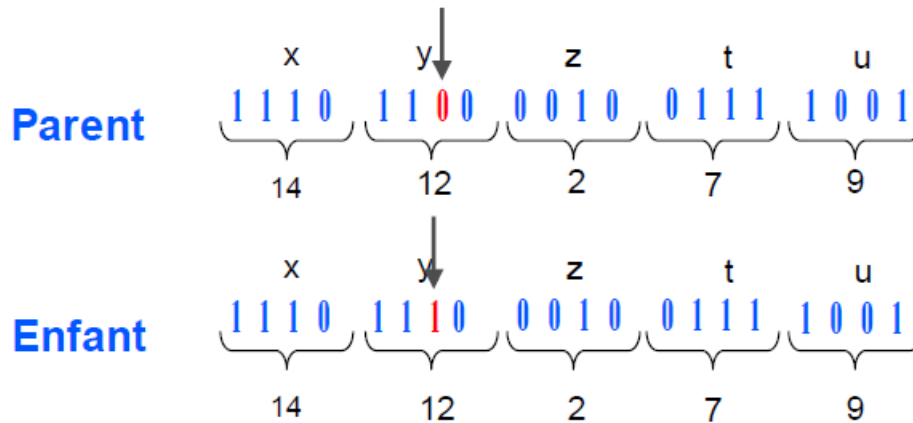


Figure.III.5: exemple de mutation [13,15]

4.2 La convergence d'un AG

Le cycle de génération et de sélection de population est répété jusqu'à ce qu'un critère d'arrêt soit satisfait ; ce critère peut être notamment un nombre maximum de générations, un temps maximal de calcul, une valeur de fitness minimale, ou/et une convergence vers une solution satisfaisante. Les valeurs de tels paramètres dépendent fortement de la problématique étudiée. Ainsi il n'existe pas de paramètres qui soient adaptés à la résolution de tous les problèmes qui peuvent être posés à un algorithme génétique. Cependant, certaines valeurs sont souvent utilisées (définies dans la littérature) et peuvent être de bons points de départ pour démarrer une recherche de solutions à l'aide d'un AG. [13,14]

- La probabilité de croisement est choisie dans l'intervalle [0.7, 0.99].
- La probabilité de mutation est choisie dans l'intervalle [0.001, 0.01].

4.3. Fondements des algorithmes génétiques

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. [14,15]

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. [13-16]

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. [14-17]

4.4. Avantages et inconvénients des algorithmes génétiques

Parmi les plus importants avantages des algorithmes génétiques ce sont ceux qui autorisent la prise en compte de plusieurs critères simultanément, et qu'ils parviennent à trouver de bonnes solutions sur des problèmes très complexes. Le principal avantage des algorithmes génétiques par rapport aux autres techniques d'optimisation consiste en une combinaison de [14-16] :

- L'exploration de l'espace de recherche, basée sur des paramètres, grâce à une recherche parallèle. Cette méthode permet de traiter des espaces de recherche importants.
- L'exploration de meilleures solutions disponibles à un moment donné. Elle doit simplement déterminer la meilleure des deux solutions, afin d'opérer leurs sélection. Leur utilisation se développe dans divers domaines tels que l'économie, la bioinformatique ou la programmation des structures mécaniques des robots...
- L'élimination de solutions non valides.
- Nombre de solutions important.
- Relativité de la qualité de la solution selon le degré de précision demandé.

Néanmoins, ils présentent, aussi, un certain nombre de limitation :

- Choix délicat de la fonction d'évaluation.
- Les nombreux paramètres qui les contrôlent sont délicats à régler.
- Afin de garantir la robustesse des algorithmes génétiques, le calcul d'un très grand nombre de fitness parfois de l'ordre de plusieurs centaines de milliers est généralement nécessaire avant l'obtention d'une bonne solution. Ce nombre important de calcul peut s'avérer problématique quand le coût de calcul de la fitness est important surtout, lorsqu'on travaille par exemple en grande dimension sur des fonctions à complexité importante.
- Ils peuvent éprouver des difficultés à gérer des contraintes nombreuses et complexes.
- Ils ne peuvent pas assurer que la solution trouvée est la meilleure, mais juste une approximation de la solution optimale.
- Problèmes des optimums locaux.

5 Conclusion

Nous pouvons conclure que les métaheuristiques présentent une classe de méthodes approchées adaptables à une grande variété de problèmes d'optimisation combinatoire et mènent à des résultats pertinents. Mais il existe assez peu de contributions permettant de comprendre la raison de cette efficacité, et aucune preuve ne peut montrer qu'une métaheuristique sera plus efficace qu'une autre sur un problème donné. Certaines métaheuristiques présentent l'avantage d'être simples à mettre en œuvre, comme le cas du recuit simulé, d'autres sont bien adaptées à la résolution de certaines classes de problème, très contraints, comme le système de colonies de fourmis. La qualité des solutions trouvées par les métaheuristiques dépend de leur paramétrage, et de l'équilibre entre un balayage de tout l'espace des solutions (diversification) et une exploration locale (l'intensification). [1]

Références

- [1] Sidi Mohamed Douiri, Souad Elbernoussi, Halima Lakhbab. Cours des Méthodes de Résolution Exactes Heuristiques et Métaheuristiques. Université Mohammed V, Faculté des Sciences de Rabat. Site web consultée le Mars (2020).
- [2] Olivier Roux. La mémoire dans les algorithmes à colonie de fourmis : applications à l'optimisation combinatoire et à la programmation automatique. Université du Littoral Cote d'Opale .p :28, 29. (2001).
- [3] Benyamina Ahmed. Application des algorithmes de colonies de fourmis pour l'optimisation et la classification des images. P : 20, 21. (2013).
- [4] Pierre Schwartz. Application d'un algorithme de colonie de fourmis au problème du voyageur de commerce. (2008).
- [5] Costanzo Andrea, Luong Thé Van, Marill Guillaume. Optimisation par colonies de fourmis. P : 4, 5, 8, 9. (2006).
- [6] Johann Dréo. Adaptation de la métaheuristique des colonies de fourmis pour l'optimisation difficile en variables continues. Application en génie biologique et médical. Français. P : 20. (2006).
- [7] Maxime Roger. Modèles de Sensibilité dans le cadre de la méthode de Monte-Carlo : illustration en transfert radiatif. Université Paul Sabatier Toulouse. P : 22. (2006).
- [8] Naima Zerari. Les algorithmes génétiques en maintenance (2006).
- [9] Markov Chain. Monte Carlo and Gibbs Sampling. Lecture Notes for EEB 581, version 26 April 2004 °c B. Walsh (2004).
- [10] Idris Kharrobi. Méthodes de Monte Carlo. Sorbonne Université. P : 15, 16, 17, 18,19. <http://docplayer.fr/146468335-Methodes-de-monte-carlo-idris-kharroubi-sorbonne-universite.html>. page web consultée Mars (2020).
- [11] Julien STOEHR. Méthodes de Monte Carlo. UNIVERSITÉ PARIS DAUPHINE. (2019).
- [12] Foata-Fuchs. Processus stochastiques. P : 32. (2014)
- [13] Holland, Adaptation in Natural and Artificial Systems. University of Michigan Press: Ann Arbor. (1975).
- [14] Nicolas Barnier, Pascal Brisset. Optimisation par algorithme génétique sous contraintes. Technique et science informatique. Volume 18 – n°1/1999. P : 5. (2014).

- [15] Mohamed Assaad Hamida. Introduction aux méthodes de contrôle intelligent. P : 43-45. (2015).
- [16] Lassouaoui Nadia, Hamami Latifa, Nouali Nadia. Les algorithmes génétiques application à la segmentation des images. P : 28. (2004).
- [17] Hajji Omessaad. Contribution au développement de méthodes d'optimisation stochastiques application à la conception des dispositifs électrotechniques. (2003).

Chapitre IV

Résultats et discussion

1. Introduction

Les matériaux composites hybrides occupent une place importante dans les différents secteurs industriels et en particulier dans les domaines de haute technologie (aéronautique) et dans les secteurs de grande utilisation (automobile, habitat, emballages,...). Cette grande émergence est due principalement à la meilleure performance de ses matériaux (résistance et légèreté), et leurs coût de fabrication très faible comparant avec les autres matériaux dit traditionnels (compromis performance/coût/légèreté).

Dans ce travail, nous allons étudier l'effet de l'endommagement en cisaillement de l'interface fibre-matrice sur la performance de deux matériaux composites hybrides qui ont constitués de la même matrice polyester et de trois fibres Carbone Haute Module (HM), Carbone Haute Résistance (HR) et la fibre de Basalte, pour nous permettre de comparer la fiabilité et la résistance de chaque matériau composite hybride parmi les deux matériaux précités. Nous avons appliqué une contrainte de traction uni-axiale sur le volume élémentaire représentatif. Notre simulation génétique est basée sur le modèle probabiliste de Weibull [1] et la fonction objective a été calculée par les différentes variables du modèle de cisaillement de Cox [2].

2. Interface ou interphase fibre-matrice

L'interface est définie comme la surface séparant la phase matrice de la phase renfort [3,4]. Le nouvel éclaircissement, aujourd'hui, définit l'interface fibre-matrice autrement. Cette région plusieurs fois été montré qu'elle présente une épaisseur non nulle. Dans cette surface, la structure et les propriétés changent et c'est pourquoi la notion d'interphase tend à remplacer celle de l'interface dans le domaine des composites fibreux [3, 4]. Il s'agit en effet d'une troisième phase. Il en résulte une structure complexe combinant de nombreux phénomènes physico-chimiques. La structure chimique, les propriétés d'adhésion et de cohésion de cette interphase déterminent en grande partie les propriétés finales du composite. La Figure IV.1 [5] schématise l'interphase d'un composite à matrice organique. Bien que le terme interphase paraisse mieux décrire la région séparant la matrice du renfort, le terme interface sera systématiquement employé afin d'être en cohérence avec la terminologie usuellement employée dans la littérature.

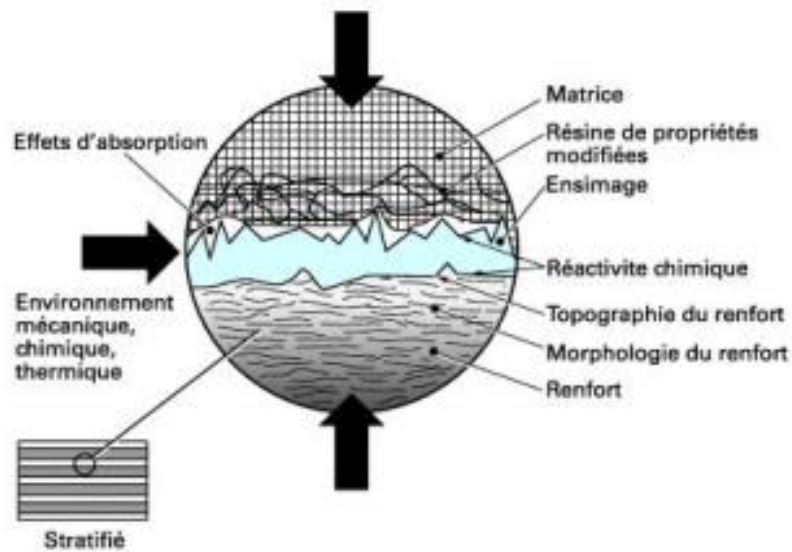


Figure IV.1. Schématisation de l'interphase fibre/matrice dans un matériau composite [5]

3. Matériaux étudiés

3.1 Les fibres

3.1.1 La fibre de carbone (Haute Module et Haute Résistance)

La fibre de carbone est largement utilisée dans des différentes applications technologiques, elle présente une alternative intéressante aux alliages légers tels que l'aluminium pour la réalisation des structures mécaniques à haute performance [6]. Les fibres de carbone, de verre ou encore d'aramide se sont les plus utilisées dans l'industrie aéronautique et spatiale, les fibres qui peuvent être courtes ou longues sont alors noyées dans une matrice de type époxyde, cyanate-ester... [6]. Les fibres de carbone se sont utilisées dans les applications comparables à l'acier, elles présentent une très bonne propriété mécanique pour une masse volumique généralement inférieure à 2000Kg/m^3 [7]. Les propriétés importantes des deux fibres de carbone se sont résumées dans le tableau IV.1. La figure IV.2 présente l'évolution mondiale de la demande en fibre de carbone. [8]

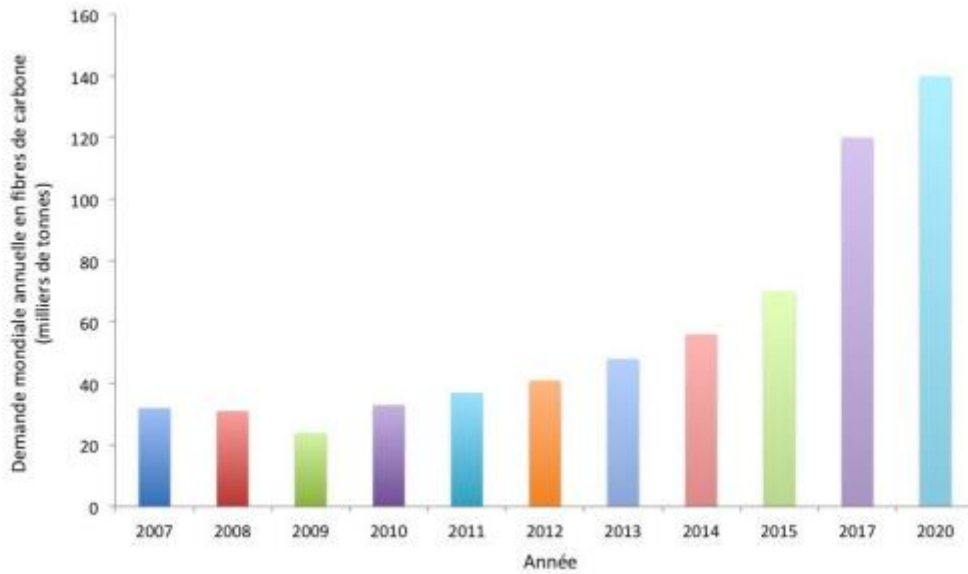


Figure IV.2. Evolution mondiale de la demande en fibre de carbone [8]

La figure IV.3 présente L'état de surface d'une fibre de carbone : (a) avant traitement hydrolytique et (b) après ce traitement, obtenues par MEB, 6000x [9]

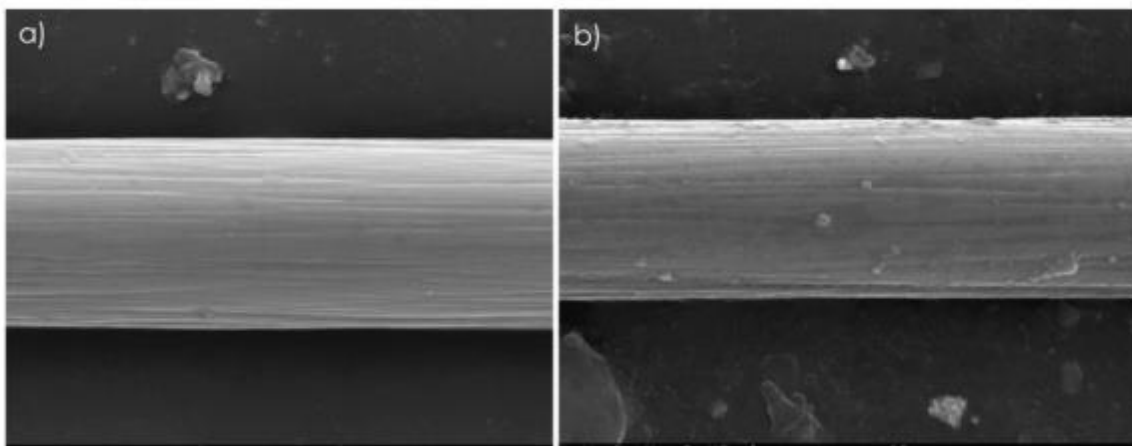


Figure IV.3. L'état de surface d'une fibre de carbone : (a) avant traitement hydrolytique et (b) après, obtenues par MEB, 6000x [9]

3.1.2 La fibre de Basalte

Les fibres de basalte disposent d'un module d'élasticité élevé, ce qui entraîne d'excellentes propriétés spécifiques en résistance équivalente à trois fois celle de l'acier. La fibre de basalte est similaire à la fibre de carbone et la fibre de verre mais possède de meilleures propriétés physico-mécaniques que la fibre de verre, elle est aussi moins chère que la fibre de carbone [7]. La fabrication de fibre de basalte nécessite la fusion de la roche

basaltique à environ 1400 °C. La roche en fusion est ensuite extrudée à travers de petites buses pour produire des filaments continus de fibre de basalte. Le tableau IV.1 présente quelques propriétés mécaniques de cette fibre qui ont été utilisées dans notre simulation numérique. La littérature présente les résultats microscopiques du conditionnement de fibres de basalte en solution alcaline (voir la figure IV.4)

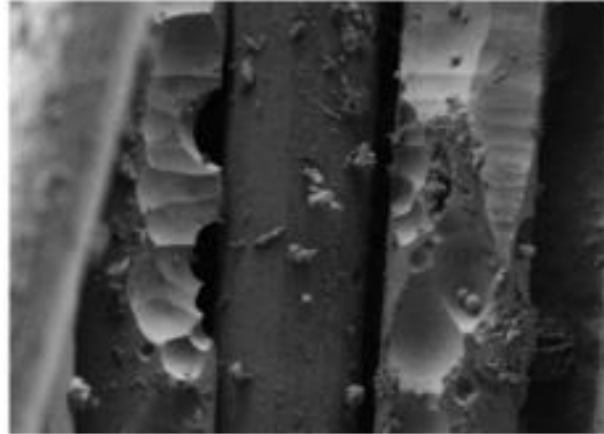


Figure IV.4. Microscopie de fibre de basalte dans l'alkali [10,11,12]

L'image microscope électronique à balayage présentée par [10,11,12] montre que les fibres de basalte en solution alcaline à 65°C pendant 7 jours sont rongées à plusieurs endroits. Le conditionnement à 66 jours à 55°C des fibres de basalte présente les mêmes résultats dans les deux cas, comme le montre la Figure IV.5.

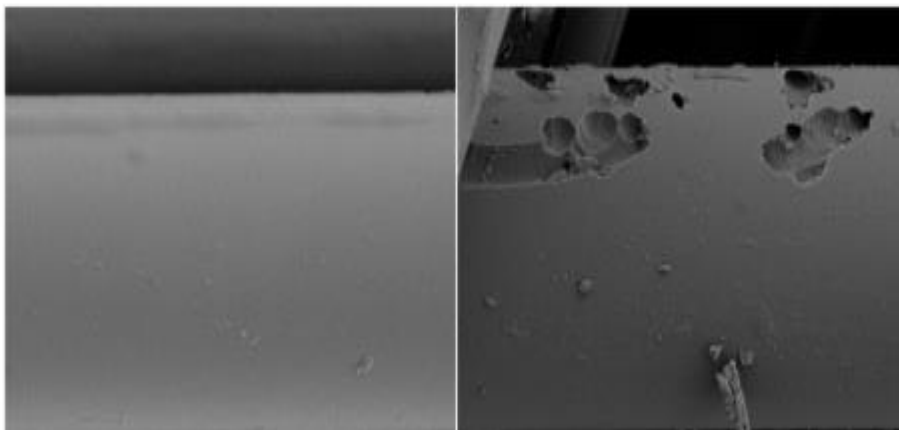


Figure IV.5. Fibres Basalte B-EP de référence (gauche) et conditionnées (droite) [10,11,12]

Tableau VI.1 : les propriétés physiques des trois fibres [7,13]

Fibres	Résistance en traction (MPa)	Module d'Young (GPa)	Allongement en rupture (%)	Densité (kg/m³)
Carbone (Haute Module)	2500-4000	50-500	0.5	1650
Carbone (Haute Résistance)	3500	240	1.1	1750
Basalte	4840	89	3.1	2800

3.2 La matrice Polyester

Les résines polyester s'adaptent bien à la transformation des composites à usage naval et présentent les propriétés générales suivantes : une bonne facilité de mise en œuvre de la résine liquide (imprégnation des renforts), une copolymérisation rapide par rapport aux époxydes, de bonnes propriétés mécaniques et isolantes, et peuvent aussi être colorées. [14]

Les résines polyester présentent de bonnes propriétés mécaniques surtout en termes de rigidité, leurs contrainte et allongement à rupture restent inférieurs à ceux des résines époxyde et vinylester (tableau IV.2). Pour des sollicitations statiques à température ambiante, le comportement mécanique des résines réticulées est modélisable par une loi élasto-plastique [14]. Au niveau macroscopique, les résines de stratification sont considérées comme isotropes. Leur comportement dépend de la température, il passe de l'état vitreux à l'état caoutchouteuse avec une augmentation de température. Comme tous les polymères, les therm durcissables ont aussi des propriétés mécaniques qui évoluent en fonction de la vitesse de sollicitation (comportement visqueux).

Tableau IV.2 : Propriétés mécaniques des principales matrices utilisées dans les composites [14,15,16,17]

Matrices (résines)	Module de Young (GPa)	Contrainte de rupture (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Polyester	3,0 - 4,0	40 - 50	1,5 - 2,2
Vinylester	2.5 - 3.0	60	3,0 - 4,0
Epoxy	2,7 – 3,1	50 - 60	2,5 – 4,0

4. Les modèles théoriques de simulation

4.1 Le formalisme de Weibull

L'endommagement de la matrice, est donné par la formule (1) de Weibull [1]

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

Avec :

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

Une fibre rompue est déchargée sur toute sa longueur [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.

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

Avec :

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

4.2 Le modèle de cisaillement de l'interface de Cox

Lorsque la fibre est sollicitée suivant son axe, les efforts sont transmis aux fibres par l'intermédiaire des forces de cisaillement à l'interface. La contrainte de cisaillement à l'interface (IFSS - InterFacial Shear Strength) peut s'exprimer de la façon suivante [2] :

$$\tau = \frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta t h(\beta l/2) \quad (3)$$

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

Avec :

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

4.3 La modélisation génétique

4.3.1 Développement

L'objectif de notre travail est d'étudier l'effet de l'endommagement en cisaillement sur la performance des deux composites hybrides à savoir Carbone (Haute Module)/Basalte/Polyester et Carbone (haute Résistance)/Basalte/Polyester sous l'effet des différentes valeurs de la contrainte de traction uni-axiale appliquée sur ses deux matériaux ($\sigma=280$ N/m², $\sigma=325$ N/m² et 370 N/m²). Notre approche génétique est basée sur l'approche probabiliste de Weibull pour calculer l'endommagement de l'interface et sur le modèle de Cox pour trouver et initialiser les différentes valeurs utilisées dans notre simulation. Nous avons utilisé les opérateurs génétiques (sélection, croisement, mutation) pour prévoir une population de 680 d'individus générés de manière aléatoire avec une production maximum de 340 en tant

que critère d'arrêt. Les gènes du chromosome représentent les variables définies par le modèle analytique de cisaillement de l'interface de Cox : modules de Young des deux fibres, module de cisaillement de la matrice, rayon de la fibre, la longueur de la fibre, la distance entre fibre R, \dots . L'endommagement à 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 de 0.34. Les individus trouvés sont classés et positionnés pour obtenir le meilleur d'entre eux, ces variables génétiques sont insérés dans la première rangée, en construisant une nouvelle génération, le processus est répété jusqu'à convergence. Nos résultats numériques sont obtenus par le logiciel Matlab.

4.3.2 L'organigramme de notre algorithme

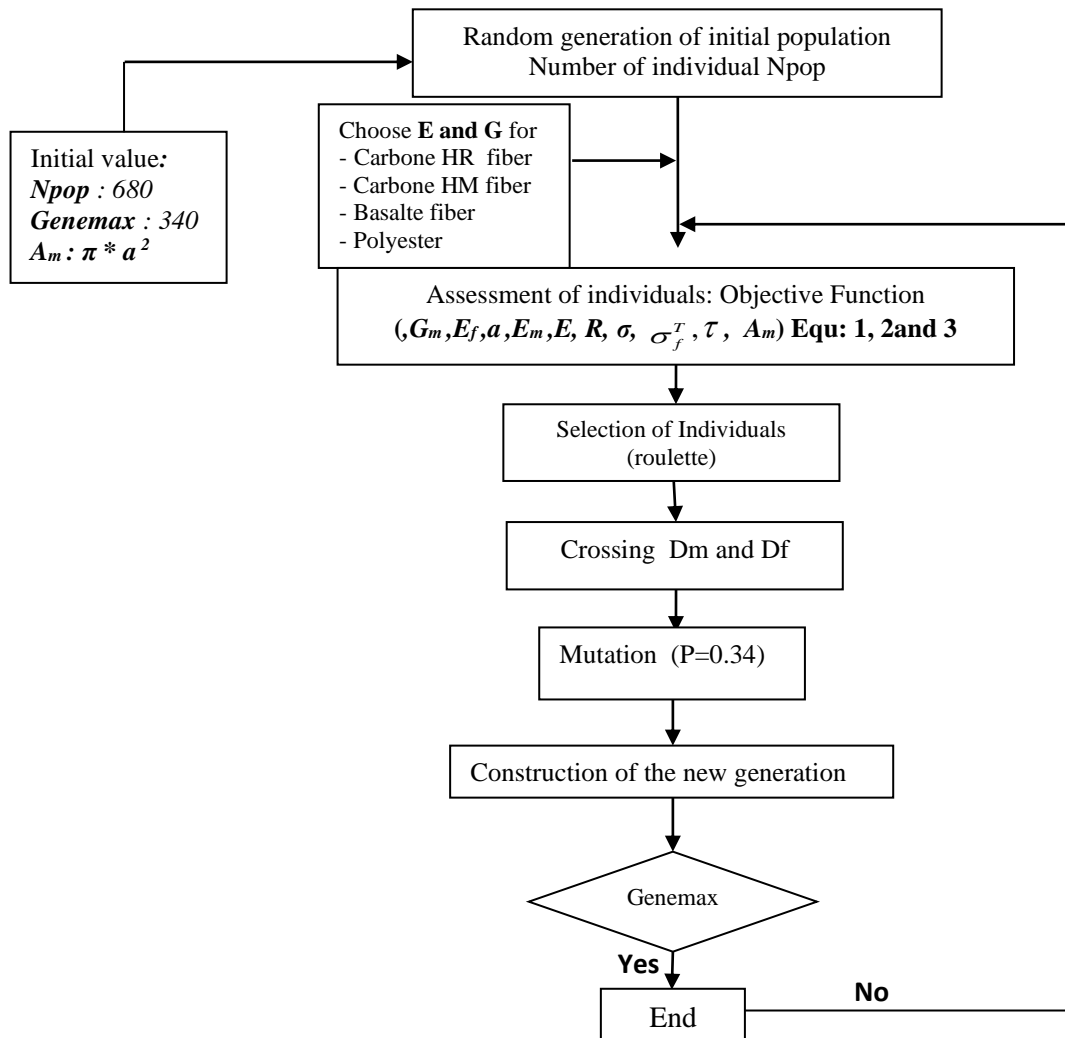


Figure.IV.6. L'organigramme de l'algorithme génétique

5. Résultats et discussion de la modélisation génétique.

Nos calculs ont été effectués sur deux types de matériaux composites hybrides Carbone (Haute Module)/Basalte/Polyester et Carbone (Haute Résistance)/Basalte/Polyester. Nous avons comparé et examiné la résistance de nos matériaux sous l’effet de différentes valeurs de la contrainte de traction appliquée ($\sigma = 280\text{N/m}^2$, $\sigma = 325\text{ N/m}^2$ et 370N/m^2), ce qui nous a permis de calculer l’endommagement en cisaillement de l’interface fibre/matrice en fonction de la longueur de la fibre. Les figures IV.7, IV.8, IV.9 et IV.10, IV.11, IV.12 montrent le niveau d’endommagement à l’interface pour les deux matériaux étudiés.

5.1. Carbone HM /Basalte/Polyester

Les figures IV.7, IV.8 et IV.9 montrent que le niveau d’endommagement en cisaillement commence pour une valeur d’endommagement $D=0.18$ (figure IV.7) quand $\sigma = 280\text{N/m}^2$, et il atteint une valeur maximale $D=0.26$ (figure IV.9) pour une contrainte maximale de $\sigma = 370\text{N/m}^2$. On a observé la présence d’une symétrie de l’endommagement au milieu de la fibre, les variables aléatoires représentées graphiquement par les points rouges ont montré une concentration importante de l’endommagement aux extrémités par rapport au milieu de la fibre. Ces résultats sont similaires aux résultats analytiques Cox [2].

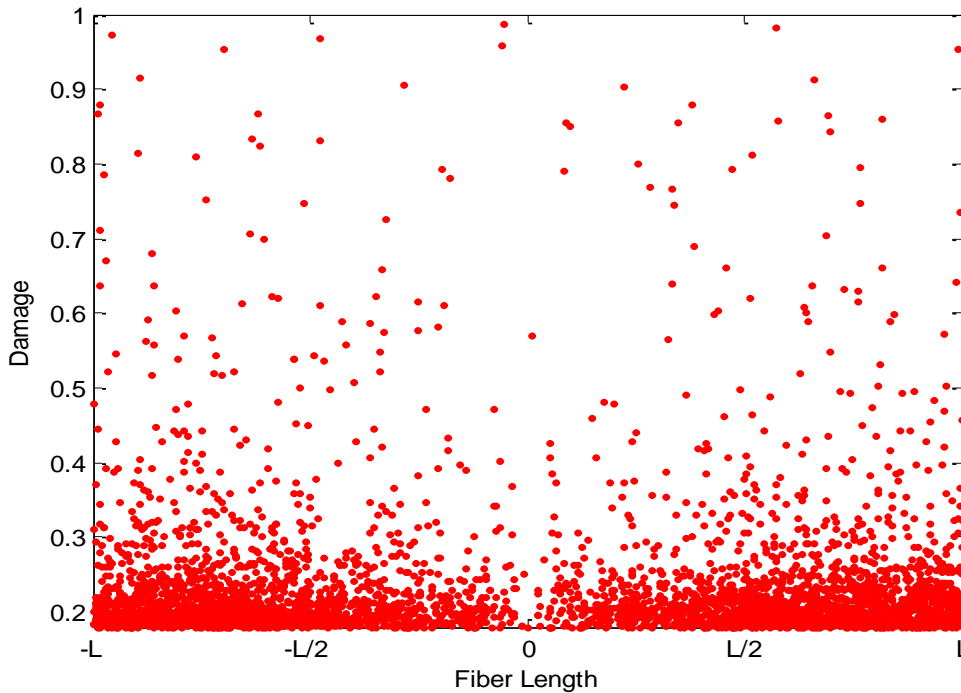


Figure.IV.7 : l’endommagement à l’interface : $\sigma = 280\text{ N/m}^2$

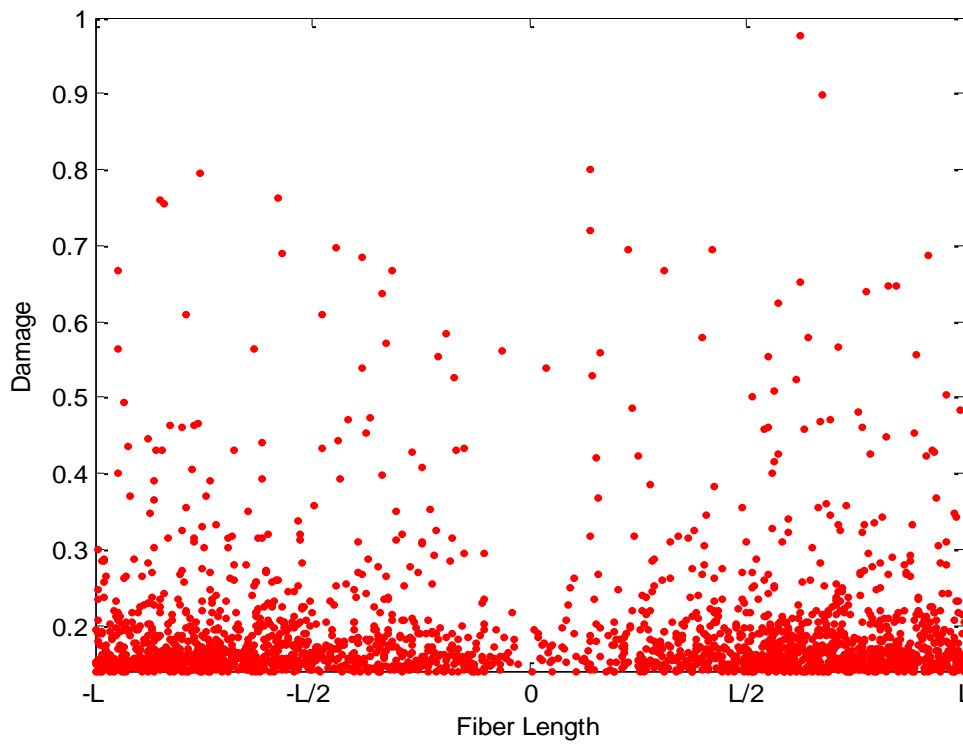


Figure.IV.8 : l'endommagement à l'interface : $\sigma=325 \text{ N/m}^2$

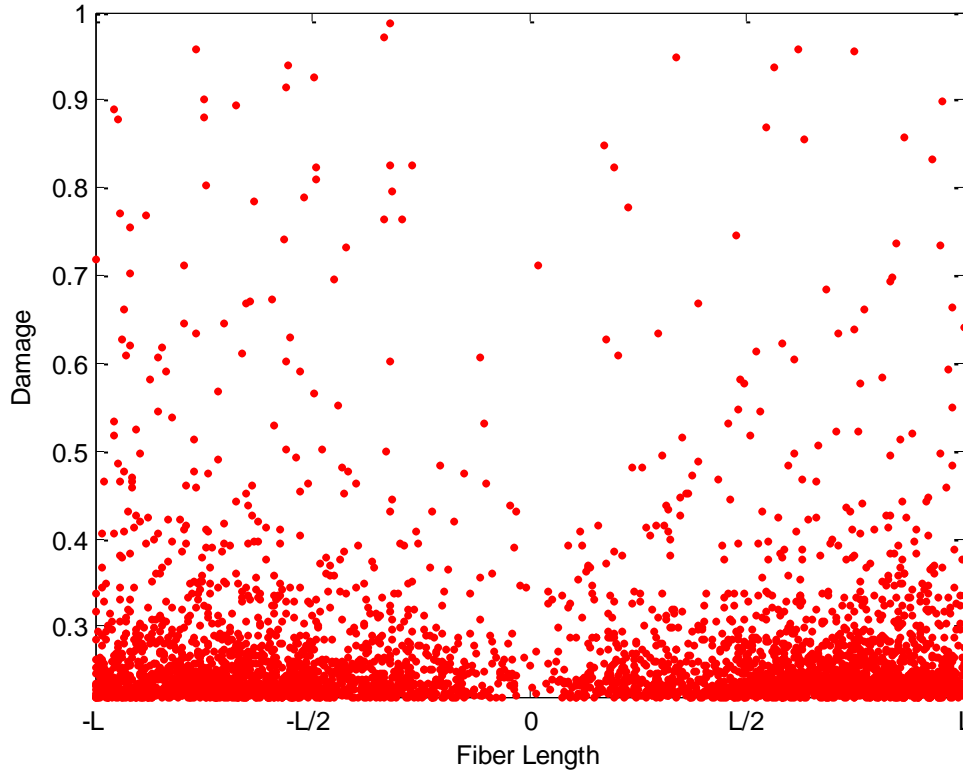


Figure.IV.9 : l'endommagement à l'interface : $\sigma=370 \text{ N/m}^2$

5.2. Carbone HR/Basalte /Polyester

Les figures IV.10, IV.11 et IV.12 montrent que le niveau d'endommagement en cisaillement commence pour une valeur d'endommagement $D=0.24$ (figure IV.10) quand $\sigma= 280\text{N/m}^2$, et il atteint une valeur maximale $D=0.39$ (figure IV.12) pour une contrainte maximale de $\sigma= 370\text{N/m}^2$. On a observé la présence d'une symétrie de l'endommagement au milieu de la fibre, les variables aléatoires représentées graphiquement par les points rouges ont montré une concentration importante de l'endommagement aux extrémités par rapport au milieu de la fibre. Ces résultats sont similaires aux résultats prouvés analytiquement par Cox [2].

Nos résultats génétiques ont montré fidèlement le comportement réel des deux matériaux suivant leurs propriétés mécaniques en particulier les valeurs des trois modules de Youngs.

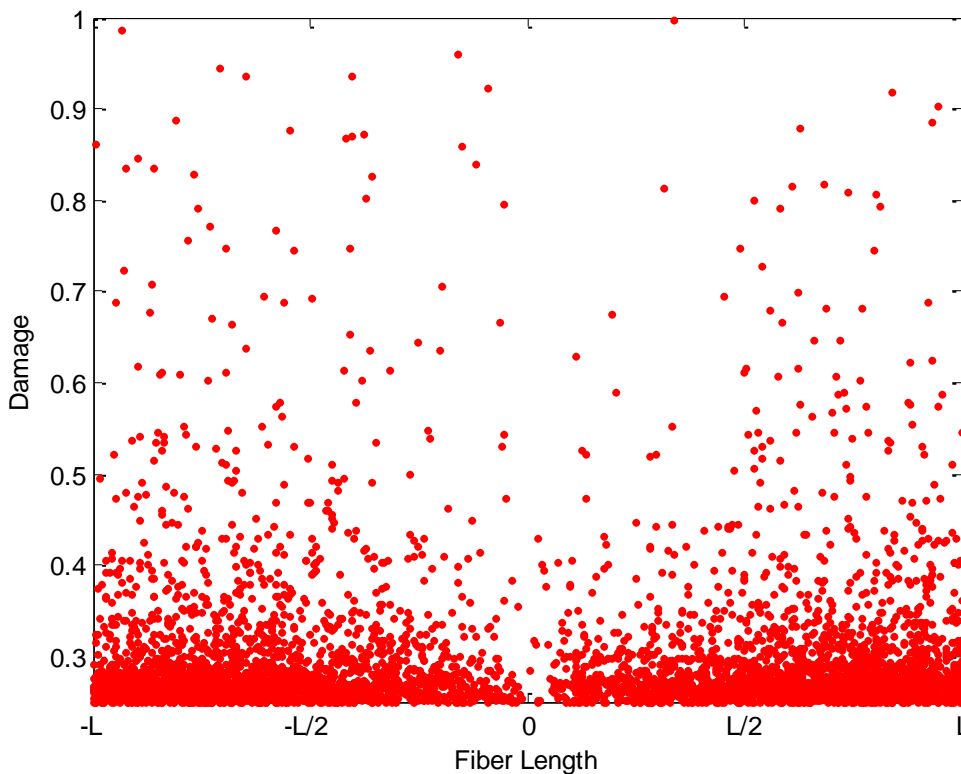


Figure.IV.10 : l'endommagement à l'interface : $\sigma=280 \text{ N/m}^2$

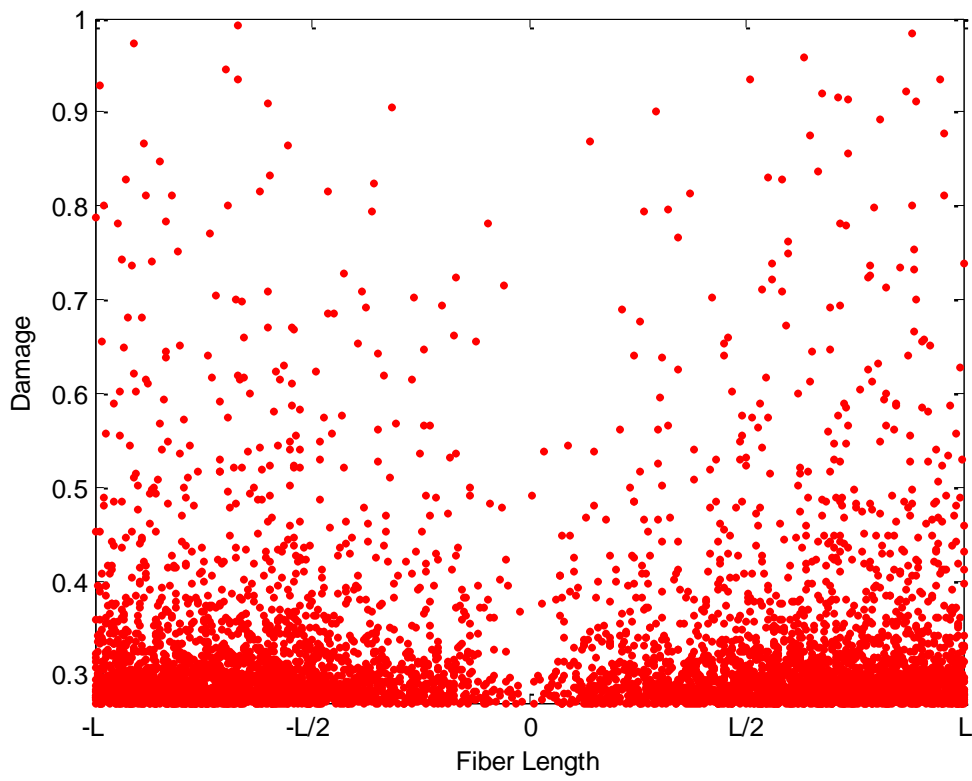


Figure.IV.11: l'endommagement à l'interface : $\sigma=325 \text{ N/m}^2$

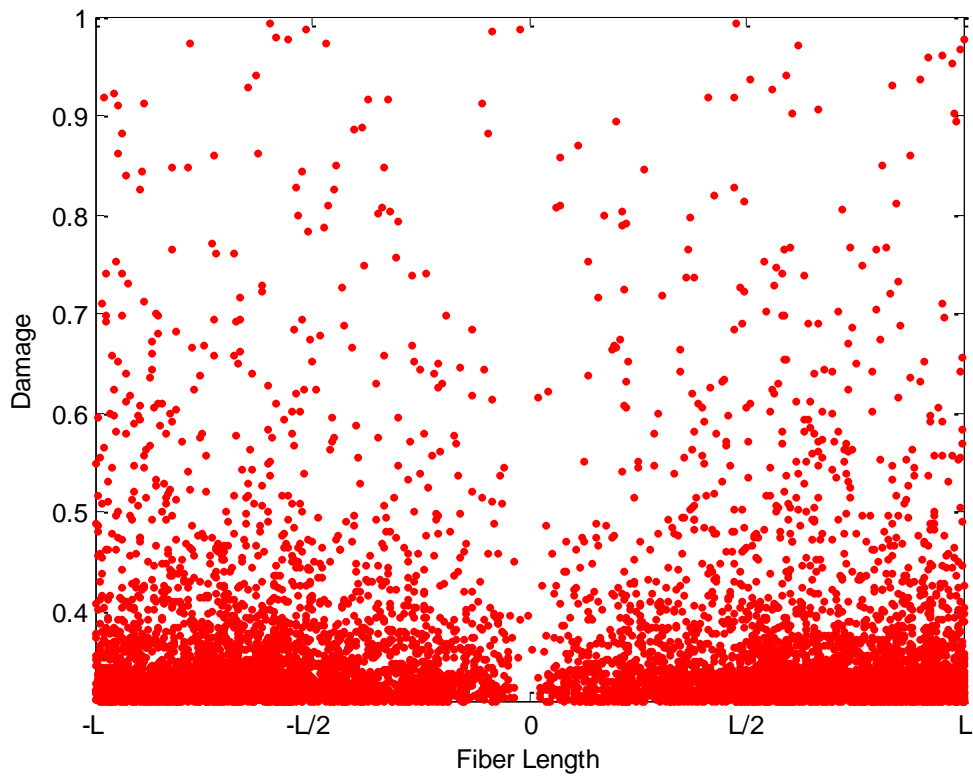


Figure.IV.12 : l'endommagement à l'interface : $\sigma=370 \text{ N/m}^2$

6. Conclusion

Les résultats obtenus par la modélisation génétique ont montré que le composite hybride Carbone HM /Basalte/Polyester est le plus résistant aux différentes valeurs de la contrainte mécanique appliquée comparant avec Carbone HR /Basalte/Polyester, Ses résultats ont été confirmé par le niveau d'endommagement à l'interface trouvés pour les deux matériaux étudiés, et que l'endommagement en cisaillement de l'interface du composite hybride Carbone HM /Basalte/Polyester et beaucoup plus inférieur de 13% par rapport à celui du Carbone HR /Basalte/Polyester. Nos calculs sont en très bon accord avec les résultats analytiques trouvés par Cox où il a démontré que le module de Young des fibres a une influence importante à la résistance aux cisaillements de l'interface.

Références

- [1] W. Weibull. Theory of the strength of materials. Royal Swedish Academy of Eng. Sci. Proc., 151, 1-45. (1939)
- [2] Cox H.L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. British journal of applied physics, 12, 72-79, (1952)
- [3] R.L. Clark Jr, R.G. Kander et B. Sauer . Nylon 66/poly(vinyl pyrrolidone) reinforced composites : 1. interphase microstructure and evaluation of fiber-matrix adhesion. Composites : Part. A, 30:29-36, (1999).
- [4] T.H. Cheng, J. Zhang, S. Yumitori, F.R. Jones et C.W. Anderson : Sizing resin structure and interphase formation in carbon fibre composites. Composites, 25:661-670, (1994).
- [5] A. Bergeret et P. Krawczak : Liaison renfort/matrice définition et caractérisation, am5305. www.techniques-ingenieur.fr, (2006).
- [6] Damien Busca. Identification du comportement de composites en fatigue bi-axiale. Thèse de doctorat, Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse). Université de Toulouse. lundi 15 septembre (2014).
- [7] Anne Hallonet. Développement et caractérisation d'un matériau composite à base de fibres de lin : application au renforcement de structures en béton par collage externe. Thèse de doctorat, Université de Lyon (2016).
- [8] Smithers Apex Market Intelligence: The future of carbon fiber to 2017: global market forecasts. (2012).
- [9] L. Yuyan, S. Guohua et M. Linghui : Recycling of carbon fibre reinforced composites using water in subcritical conditions. Materials Science and Engineering A, 520:179-183, (2009).
- [10] Wu, G., Dong, Z.-Q., Wang, X., Zhu, Y. et Wu, Z.-SPrediction of Long-Term Performance and Durability of BFRP Bars under the Combined Effect of Sustained Load and Corrosive Solutions. Journal of Composites for Construction, 19(3), 4014058. (2015).
- [11] Wu, G., Wang, X., Wu, Z., Dong, Z. et Zhang, G. Durability of basalt fibers and composites in corrosive environments. Journal of Composite Materials, 49(7), 873-887. doi:10.1177/0021998314526628. (2015).
- [12] Vianney Poisbeau. Modélisation de la durabilité des PRFB et PRFV en béton humide basé sur la dégradation fibre/matrice. Thèse de doctorat. UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE, Canada. (2017)
- [13] Hamelin, P. Polymères renforcés de fibres (FRP) – Identification et champs l'application. Technique de l'ingénieur, Réf C950, (2010).
- [14] Yves Perrot. Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites verre/polyester utilisés en construction navale de plaisance - Cas des résines polyester limitant les émissions de styrène. Thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud. (2006).

[15] J.C. Jannel. Polyester insaturées UP, Techniques de l'ingénieur. (2004)

[16] Crystic Polyester Handbook, Scott Bader, (1990).

https://www.scottbader.com/wp-content/uploads/3381_crystic-handbook-dec-05.pdf

[17] D. Gay. Matériaux composites. Hermès, (1997).



Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire, nous avons étudié l'effet de l'endommagement en cisaillement de l'interface fibre-matrice sur la performance de deux matériaux composites hybrides étudiés, et qui ont constitués de la même matrice polyester et de trois type de fibres à savoir : Carbone Haute Module (HM), Carbone Haute Résistance (HR) et la fibre de Basalte, notre objective consistait à investiguer la fiabilité et la résistance de chaque matériau composite hybride parmi les deux matériaux présentés. Nous avons appliqué une contrainte de traction uni-axiale sur le volume élémentaire représentatif (VER). Notre simulation génétique est basée sur le modèle probabiliste de Weibull afin de calculer l'endommagement à l'interface en utilisant les deux endommagements de la fibre et de la matrice de Weibull. La fonction objective a été obtenue par les différentes valeurs des variables définies dans le modèle de cisaillement de Cox.

Les résultats obtenus, par la modélisation génétique, ont montré que le composite hybride Carbone HM /Basalte/Polyester est le plus résistant aux différentes valeurs de la contrainte mécanique appliquée comparant avec celui du Carbone HR /Basalte/Polyester, Ces résultats ont été confirmés par le niveau d'endommagement à l'interface trouvés pour les deux matériaux étudiés, et que l'endommagement en cisaillement de l'interface du composite hybride Carbone HM /Basalte/Polyester est beaucoup plus inférieur de 13% par rapport à celui du Carbone HR /Basalte/Polyester. Nos calculs sont en bon accord avec les résultats analytiques de Cox, où il a démontré que le module de Young des fibres a une influence importante à la résistance aux cisaillements de l'interface fibre/matrice.

A travers cette étude, nous avons vu que les matériaux composites hybrides présentent actuellement une solution intéressante et pratique pour remplacer les matériaux composites dans les différents domaines d'application, l'origine de cet avantage est le faible coût de fabrication de ses matériaux, et que ses matériaux sont résistants aux différentes contraintes mécaniques appliquées comparant avec certains matériaux composites.

En perspectives, nous prévoyons de remplacer les deux fibres de carbone par les fibres de verre et d'étudier l'effet de l'humidité sur la résistance de ses nouveaux matériaux composites hybrides.