

# THÈSE

## En vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Sciences

*Présentée par : TADJEDIT Samir*

**La caractérisation de l'endommagement d'un Biocomposite**

*Faculté* : Physique

*Département* : Technologie des matériaux

*Spécialité* : Physique

*Option* :

*Devant le Jury Composé de :*

| <i>Membres de Jury</i>       | <i>Grade</i> | <i>Qualité</i>    | <i>Domiciliation</i>    |
|------------------------------|--------------|-------------------|-------------------------|
| <i>-M. HIADSI Said</i>       | <i>-Pr</i>   | <i>Président</i>  | <i>-USTO MB Oran</i>    |
| <i>-M.BOUTAOUS Ahmed</i>     | <i>-Pr</i>   | <i>Encadrant</i>  | <i>-USTO MB Oran</i>    |
| <i>-M.ZIADI Abdelkader</i>   | <i>-Pr</i>   | <i>Examineurs</i> | <i>-CU A.Temouchent</i> |
| <i>-M.BAHLOULI Samia</i>     | <i>-MCA</i>  |                   | <i>-USTO MB Oran</i>    |
| <i>-M.BOUDALI Abdelkader</i> | <i>-Pr</i>   |                   | <i>-U T M Saida</i>     |
| <i>-M.BENGUEDIAB Mohamed</i> | <i>-Pr</i>   |                   | <i>-U D L SBA</i>       |

*Année Universitaire : 2020/2021*

# Remerciements

*Je tiens tout d'abord à exprimer ma profonde reconnaissance pour mon Directeur de mémoire Monsieur **Ahmed BOUÏAOU**, professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf, qui a consacré à l'encadrement de ma thèse un temps et une disponibilité d'esprit considérable ainsi de m'avoir accueilli dans son Laboratoire, m'ouvrant ainsi les portes du monde de la recherche, sans oublier Monsieur **Allal MOKADEM** professeur au centre universitaire d'Elbeidh, qui m'a aidé beaucoup à l'aboutissement de ce travail.*

*Je remercie Monsieur **HIADSI Said**, Professeur à l'Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf d'Oran, d'avoir accepté de présider le jury de ma soutenance de thèse. Je remercie Madame **BAHLOULI Samia**, Maître de conférences à l'Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, et Monsieur **BOUDALI Abdelkader**, Professeur à l'Université Dr Tahar Moulay de Saida, ainsi que Monsieur **BENGVEDIAB Mohamed** Professeur à Université de Sidi Bel-Abbes et Monsieur **Ziadi Abdelkader** Professeur au Centre Universitaire de ainTemouchent, membres du jury de la soutenance de thèse.*

*Je suis également reconnaissant aux membres de ce laboratoire pour les nombreuses occasions où j'ai pu recourir à leur aide, leurs avis, leurs conseils.*

*Enfin, je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail, à ma famille, ma femme et tous mes amis.*

# Table des Matières

|                                                            |     |
|------------------------------------------------------------|-----|
| <b>Table des matières</b> .....                            | i   |
| <b>Liste des figures</b> .....                             | ii  |
| <b>Liste des tableaux</b> .....                            | iii |
| <b>Nomenclatures</b> .....                                 | iv  |
| <br>                                                       |     |
| <b>Introduction générale</b> .....                         | 1   |
| <br>                                                       |     |
| <b>Chapitre 1 –Généralités sur lesbio-composites</b> ..... | 4   |
| 1.1 Introduction .....                                     | 5   |
| 1.2 Les bio-Polymères .....                                | 7   |
| 1.3 Les fibres.....                                        | 8   |
| 1.3.1 Les fibres de verre.....                             | 10  |
| 1.3.2 Les fibres de carbone .....                          | 11  |
| 1.3.3 Les fibres céramique .....                           | 13  |
| 1.3.4 Les Fibres d’aramide.....                            | 14  |
| 1.3.5 Les fibres de basalte .....                          | 14  |
| 1.3.6 Les matières textiles.....                           | 15  |
| 1.3.7 Les fibres naturelles.....                           | 15  |
| 1.3.8 Propriétés des fibres végétales.....                 | 16  |
| 1.3.9 Classifications des fibres végétales.....            | 17  |
| 1.3.10 La fibre d’Alfa.....                                | 18  |

|       |                            |    |
|-------|----------------------------|----|
| 1.4   | La matrice .....           | 19 |
| 1.4.1 | Epoxydes .....             | 20 |
| 1.4.2 | Amidon.....                | 21 |
| 1.4.3 | L'Acide PolyLactique ..... | 21 |
| 1.5   | Conclusion .....           | 22 |
|       | Bibliographies .....       | 23 |

## **Chapitre 2 –Les interfaces Fibre-Matrice..... 26**

|       |                                                        |    |
|-------|--------------------------------------------------------|----|
| 2.1   | Introduction .....                                     | 27 |
| 2.2   | L'interphase .....                                     | 27 |
| 2.3   | Rôle des interfaces .....                              | 28 |
| 2.4   | Mouillabilité et adhésion .....                        | 28 |
| 2.4.1 | Qualité d'adhésion de l'interface (fibre/matrice)..... | 28 |
| 2.4.2 | Mouillabilité .....                                    | 30 |
| 2.5   | Modèles d'adhésion .....                               | 31 |
| 2.5.1 | Aspects chimiques .....                                | 31 |
| 2.5.2 | Aspects physiques.....                                 | 33 |
| 2.5.3 | Aspects mécaniques .....                               | 33 |
| 2.6   | Contraintes à l'interface.....                         | 34 |
| 2.7   | Essais micromécaniques .....                           | 35 |
| 2.7.1 | Test de Mc Garry .....                                 | 35 |
| 2.7.2 | Test de Broutman (fragmentation).....                  | 35 |
| 2.7.3 | Test de déchaussement.....                             | 36 |
| 2.7.4 | Test de micro-indentation.....                         | 36 |
| 2.8   | Conclusion .....                                       | 37 |
|       | Bibliographies .....                                   | 38 |

|                                                                     |    |
|---------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Chapitre 3 –Modélisation de l’interface Fibre-Matrice</b> .....  | 39 |
| 3.1 Introduction .....                                              | 40 |
| 3.2 Approche micromécanique .....                                   | 41 |
| 3.3 Etat de contrainte à l’interface.....                           | 41 |
| 3.3.1 Contraintes locales moyennes .....                            | 42 |
| 3.3.2 Contraintes aux extrémités (transfert de charge) .....        | 42 |
| 3.3.2.1 Modèle de Cox ; transfert de charge élastique .....         | 43 |
| 3.3.2.2 Profils de contraintes dans la fibre et à l’interface ..... | 43 |
| 3.3.2.3 Modèle de Kelly-Tyson .....                                 | 48 |
| 3.3.2.4 Modèle mixte.....                                           | 50 |
| 3.3.2.5 Statistique de Weibull .....                                | 51 |
| 3.4 Analyse micromécanique sur composites modèles .....             | 54 |
| 3.4.1 Essai de compression.....                                     | 54 |
| 3.4.2 Essai de fragmentation.....                                   | 56 |
| 3.4.3 Essai de micro-indentation.....                               | 57 |
| 3.4.4 Test de déchaussement.....                                    | 59 |
| 3.5 Les variables d’endommagement.....                              | 60 |
| 3.6 Conclusion .....                                                | 61 |
| Bibliographies .....                                                | 63 |
| <br><b>Chapitre 4 – Les Algorithmes Méta Heuristiques</b> .....     | 65 |
| 4.1.Introduction .....                                              | 66 |
| 4.2. Les méta-heuristiques à solution unique .....                  | 66 |
| 4.2.1 Méthode de descente.....                                      | 66 |
| 4.2.2 Le recuit simulé .....                                        | 67 |
| 4.2.3 La méthode de recherche avec tabous .....                     | 69 |

|                                                           |           |
|-----------------------------------------------------------|-----------|
| 4.2.4 Colonie de fourmis .....                            | 69        |
| 4.3 Les méta-heuristiques à population de solution .....  | 70        |
| 4.3.1 Algorithmes génétiques .....                        | 70        |
| 4.3.1.1 Principes .....                                   | 70        |
| 4.3.1.2 Etapes d'algorithme génétique .....               | 73        |
| - Codage et population initiale .....                     | 73        |
| - Opérateur de sélection .....                            | 73        |
| - Codage et population initiale .....                     | 73        |
| - Opérateur de croisement .....                           | 77        |
| - Opérateur de mutation .....                             | 78        |
| - Fonction d'évaluation.....                              | 80        |
| 4.4. Algorithmes génétiques appliqués aux composites..... | 80        |
| 4.4.1 Introduction .....                                  | 80        |
| 4.4.2 Les caractéristiques des gènes.....                 | 84        |
| 4.4.3 Génération de la population initiale.....           | 84        |
| 4.4.4 Evaluation des individus .....                      | 85        |
| 4.4.5 Classement des individus .....                      | 85        |
| 4.4.6 Génération de l'ensemble de reproduction .....      | 86        |
| 4.4.7 La reproduction .....                               | 87        |
| 4.4.8 La mutation .....                                   | 88        |
| 4.4.9 Evaluation des enfants .....                        | 88        |
| 4.4.10 Construction de la nouvelle génération.....        | 88        |
| 4.4.11 Convergence.....                                   | 89        |
| 4.5 Conclusion.....                                       | 90        |
| Bibliographies .....                                      | 91        |
| <b>Chapitre 5 –Résultats et Discussions.....</b>          | <b>94</b> |
| 5.1. Introduction .....                                   | 95        |

|                                                                                                     |            |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.2. Examen des modèles analytiques .....                                                           | 96         |
| 5.2.1 Modèle basé sur l'approche statique .....                                                     | 96         |
| 5.2.2 Modèle basé sur l'approche micromécanique .....                                               | 97         |
| 5.3 Propriétés mécaniques des composites étudiés .....                                              | 97         |
| 5.3.1 Structure et morphologie des fibres Alfa .....                                                | 97         |
| 5.3.2 Les propriétés mécaniques des fibres d'Alfa par rapport aux<br>autres fibres naturelles ..... | 100        |
| 5.3.3 Acidepolylactique (PLA) .....                                                                 | 101        |
| 5.4 Simulation numérique par un algorithme génétique (GA) .....                                     | 102        |
| 5.4.1 Développement .....                                                                           | 102        |
| 5.4.2 L'organigramme .....                                                                          | 103        |
| 5.5 Résultats de la simulation .....                                                                | 103        |
| 5.5.1. Verre / Epoxyde .....                                                                        | 104        |
| 5.5.2. Alfa / Epoxyde .....                                                                         | 104        |
| 5.5.3. Alfa / PLA .....                                                                             | 104        |
| 5.6. Conclusion .....                                                                               | 109        |
| Bibliographies .....                                                                                | 110        |
| <b>Conclusion générale .....</b>                                                                    | <b>113</b> |

# Liste des Figures

|                                                                                                                                     |        |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------|
| <i>Figure 1.1. Classification des bio-composites</i>                                                                                | 6      |
| <i>Figure 1.2. Les différentes familles de polymères biodégradables</i>                                                             | 7      |
| <i>Figure 1.3. Type des renforts</i>                                                                                                | 8      |
| <i>Figure 1.4. Différents types de renforts de fibres</i>                                                                           | 9      |
| <i>Figure 1.5. Différents types d'architecture de renfort</i>                                                                       | 9      |
| <i>Figure 1.6. Fibres de verre</i>                                                                                                  | 10     |
| <i>Figure 1.7. Fibres de carbone</i>                                                                                                | 12     |
| <i>Figure 1.8. Fibres d'aramide</i>                                                                                                 | 14     |
| <i>Figures 1.9. Classification des fibres végétales selon l'origine</i>                                                             | 18     |
| <i>Figures 1.10. Illustration de la plante d'Alfa à l'état brut</i>                                                                 | 19     |
| <i>Figure 1.11. Différente famille d'une matrice</i>                                                                                | 20     |
| <br><i>Figure 2.1. Interface fibre/ matrice</i>                                                                                     | <br>27 |
| <i>Figure 2.2. Concept de l'interphase (a) et l'interface (b)</i>                                                                   | 28     |
| <i>Figure 2.3. Mode de fissuration</i>                                                                                              | 29     |
| <i>Figure 2.4. Ensimage de la fibre de verre par dépôt de silane</i>                                                                | 32     |
| <i>Figure 2.5. Eprouvette de fragmentation en traction de Broutman</i>                                                              | 35     |
| <i>Figure 2.6. Test de déchaussement d'une micro-éprouvette de matrice (pull-out)</i>                                               | 36     |
| <i>Figure 3.1. Principes des tests de : (a) fragmentation; (b) slice</i>                                                            | 41     |
| <i>Figure 3.2. Rapport de la contrainte radiale à la contrainte longitudinale</i>                                                   | 42     |
| <i>Figure 3.3. Volume élémentaire représentatif</i>                                                                                 | 43     |
| <i>Figure 3.4. Equilibre élastique de la matrice en cisaillement</i>                                                                | 44     |
| <i>Figure 3.6. Modèle de Cox : Profils de contrainte dans la fibre (<math>\sigma_f</math>) et à interface (<math>\tau_i</math>)</i> | 47     |

|                                                                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <i>Figure 3.7. Modèle de Kelly –Tyson.</i>                                                                                                              | 49 |
| <i>Figure 3.8. Modèles de Kelly/Tyson et de cox des profils de contraintes de tension dans la fibre et de cisaillement à l'interface.</i>               | 50 |
| <i>Figure 3.9. Modèle Mixte</i>                                                                                                                         | 51 |
| <i>Figure 3.10. Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull</i>                                                                       | 53 |
| <i>Figure 3.11. Calcul de la contrainte moyenne de rupture</i>                                                                                          | 53 |
| <i>Figure 3.12. Essai de compression</i>                                                                                                                | 55 |
| <i>Figure 3.13. Schémas de technique expérimentale de mesure de l'effort et du déplacement de la fibre sous sollicitation mécanique de compression.</i> | 56 |
| <i>Figure 3.14. Essai de fragmentation</i>                                                                                                              | 57 |
| <i>Figure 3.15. Essai de micro indentation</i>                                                                                                          | 59 |
| <i>Figure 3.16. Schéma de l'essai d'indentation</i>                                                                                                     | 59 |
| <i>Figure 3. 17. dispositif de test de microindentation</i>                                                                                             | 60 |
| <i>Figure 3.18. Différents configurations de pull-out</i>                                                                                               | 60 |
| <i>Figure 3.19. Essai de déchaussement en traction</i>                                                                                                  | 61 |
| <i>Figure 4.1. Fonctionnement de l'algorithme de recuit simulé</i>                                                                                      | 68 |
| <i>Figure 4.2. Principe d'un algorithme évolutionnaire (EA)</i>                                                                                         | 71 |
| <i>Figure 4.3. Exemples de croisement</i>                                                                                                               | 72 |
| <i>Figure 4.4. Effet de sharing sur la répartition des solutions</i>                                                                                    | 76 |
| <i>Figure 4.5. Croisement standard en un seul point</i>                                                                                                 | 77 |
| <i>Figure 4.6. Croisement standard en deux points</i>                                                                                                   | 77 |
| <i>Figure. 4.7. Principe de l'opérateur de mutation</i>                                                                                                 | 78 |
| <i>Figure 4.8a. Représentation génétique</i>                                                                                                            | 81 |
| <i>Figure 4.8b. Représentation génétique</i>                                                                                                            | 81 |
| <i>Figure 4.9. Structure de l'algorithme génétique</i>                                                                                                  | 83 |

|                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Figure 5.1. Fibres composées de filaments de cellulose</i>                                          | 98  |
| <i>Figure 5.2. Section transversale des fibres</i>                                                     | 98  |
| <i>Figure 5.3. Section transversale d'un faisceau de fibres d'alfa</i>                                 | 99  |
| <i>Figure 5.4. Section transversale d'une tige d'alfa</i>                                              | 99  |
| <i>Figure 5.5. Procédé de production de l'acide polylactique (PLA).</i>                                | 101 |
| <i>Figure 5.6. L'organigramme de l'algorithme génétique</i>                                            | 103 |
| <i>Figure 5.7. Niveau d'endommagement de l'interface verre/Epoxyde avec <math>\sigma = 80N</math></i>  | 105 |
| <i>Figure 5.8. Niveau d'endommagement de l'interface verre/Epoxyde avec <math>\sigma = 100N</math></i> | 105 |
| <i>Figure 5.9. Niveau d'endommagement de l'interface verre/Epoxyde avec <math>\sigma = 120N</math></i> | 106 |
| <i>Figure 5.10. Niveau d'endommagement de l'interface Alfa/Epoxyde avec <math>\sigma = 80N</math></i>  | 106 |
| <i>Figure 5.11. Niveau d'endommagement de l'interface Alfa/Epoxyde avec <math>\sigma = 100N</math></i> | 107 |
| <i>Figure 5.12. Niveau d'endommagement de l'interface Alfa/Epoxyde avec <math>\sigma = 120N</math></i> | 107 |
| <i>Figure 5.13. Niveau d'endommagement de l'interface alfa/PLA avec <math>\sigma = 80N</math></i>      | 108 |
| <i>Figure 5.14. Niveau d'endommagement de l'interface alfa/PLA avec <math>\sigma = 100N</math></i>     | 108 |
| <i>Figure 5.15. Niveau d'endommagement de l'interface alfa/PLA avec <math>\sigma = 120N</math></i>     | 109 |

# Liste des Tableaux

|                                                                                                              |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| <i>Tableau 1.1. Composition des différentes fibres de verre</i>                                              | 11  |
| <i>Tableau 1.2. Caractéristiques des fibres de verre</i>                                                     | 11  |
| <i>Tableau 1.3. Caractéristiques des fibres de carbone</i>                                                   | 13  |
| <i>Tableau 1.5. Caractéristiques des fibres d'aramide</i>                                                    | 14  |
| <i>Tableau 1.6. Composition chimique en % de différentes fibres végétales</i>                                | 16  |
| <i>Tableau 1.7. Propriétés physiques de différentes fibres végétales</i>                                     | 17  |
| <i>Tableau 1.8. Propriétés mécaniques en traction de quelques fibres végétales</i>                           | 17  |
| <i>Tableau 1.9. Caractéristiques des résines époxydes</i>                                                    | 21  |
| <i>Tableau 4.1. Codage d'un individu en utilisant deux chromosomes</i>                                       | 82  |
| <i>Tableau 4.2. Décodage d'un individu composé de deux chromosomes</i>                                       | 82  |
| <i>Tableau 4.3. Quatre individus et leur mesure de performance</i>                                           | 82  |
| <i>Tableau 4.5. Critères d'arrêt</i>                                                                         | 90  |
| <i>Tableau 5.1. Les propriétés mécaniques de traction des principales fibres naturelles et synthétiques.</i> | 100 |
| <i>Tableau 5.2. Les propriétés mécaniques des différents constituants des matériaux biocomposites.</i>       | 102 |

# Nomenclatures

HR : Fibres Haute Résistance

HM : Fibres haut module

PLA : Acide Polylactique

PVC : Polychlorure de Vinyle

PS : Polystyrène

PP : Polypropylène

PAI : Polyamide-imide

PEI : Polyéther-imide

PPS : Polysulfure de phénylène

PLLA : Poly-L-lactide

PET : Poly (éthylène téréphtalate)

PES : Polyéther-sulfone

PP : Polypropylène

PA : Polyamide

TD : Matrices Thermodurcissables

UD : Unidirectionnel

$x$ : direction

$w$  : déplacement de la matrice selon la direction  $x$

$\partial$ : dérivée

L'indice  $f$  : signifie que le paramètre se rapporte à un fibre

L'indice  $m$  : signifie que le paramètre se rapporte à une matrice

$S_d$ : la zone endommagée

$S_e$ : la zone efficace de la résistance

$S$ : le volume superficiel élémentaire

$n$ : norme

VER : Volume élémentaire représentatif

|                 |                                                                    |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|
| $A$             | Allongement à la rupture [%]                                       |
| $\rho$          | Masse volumique [Kg.m <sup>-3</sup> ]                              |
| $E_f$           | Module d'Young de la fibre [GPa]                                   |
| $E_m$           | Module d'Young de la matrice [GPa]                                 |
| $\varepsilon_f$ | Déformation de la fibre à la rupture [%]                           |
| $G_f$           | Module de cisaillement de la fibre [MPa]                           |
| $G_m$           | Module de cisaillement de la matrice [MPa]                         |
| $G$             | Module de cisaillement [MPa]                                       |
| $\sigma_f$      | Contrainte à la Rupture de la fibre [MPa]                          |
| $\sigma_m$      | Contrainte à la rupture de la matrice [MPa]                        |
| $\sigma_d$      | Contrainte de décohésion [MPa]                                     |
| $\sigma_{mu}$   | Contrainte ultime à la rupture de la matrice [MPa]                 |
| $\sigma_{fu}$   | Contrainte ultime à la rupture de la fibre [MPa]                   |
| $\sigma_{max}$  | Contrainte maximale appliquée [MPa]                                |
| $\sigma_f^D$    | Contrainte critique de décohésion [MPa]                            |
| $\tau_m$        | Contrainte de cisaillement de la matrice [MPa]                     |
| $\tau_f$        | Contrainte de cisaillement de la fibre [MPa]                       |
| $\tau_{mu}$     | Contrainte ultime en cisaillement à la rupture de la matrice [MPa] |
| $\tau_{fu}$     | Contrainte ultime en cisaillement à la rupture de la fibre [MPa]   |
| $\tau_d$        | Contrainte de de décohésion au cisaillement [MPa]                  |
| $\tau_i$        | Contrainte de cisaillement à l'interface [MPa]                     |
| $R$             | Distance entre les fibres [m]                                      |
| $r_f$           | Rayon de la fibre [m]                                              |
| $l$             | Epaisseur de l'échantillon [m]                                     |
| $L, L_1, L_2$   | Longueur de la fibre [m]                                           |

|                        |                                                                                                    |
|------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $s = L/a$              | Rapport d'aspect de la fibre                                                                       |
| $L_{equi}$             | Longueur des fibres aurait la même rupture dans une manière cohérente [m]                          |
| $X$                    | Etant un nombre aléatoire entre 0 et 1                                                             |
| $D_f$                  | Endommagement de la fibre                                                                          |
| $D_m$                  | Endommagement de la matrice                                                                        |
| $D$                    | Endommagement étant un nombre aléatoire entre 0 et 1                                               |
| $T_g$                  | Température de transition vitreuse [°C]                                                            |
| $T_0, T_e, T$          | $T_0$ la température ambiante, $T_e$ la température d'élaboration, $T$ la température d'essai [°C] |
| $\Delta T$             | Coefficient de dilatation thermique [°C <sup>-1</sup> ]                                            |
| $\alpha_f$             | Coefficient de dilatation de la fibre [°C <sup>-1</sup> ]                                          |
| $\alpha_m$             | Coefficient de dilatation de la matrice [°C <sup>-1</sup> ]                                        |
| $\nu$                  | Coefficient de poisson                                                                             |
| $\sigma$               | Contrainte appliqué [N]                                                                            |
| $\sigma_f^D$           | Contrainte critique de décohésion                                                                  |
| $\sigma_\theta$        | Contraintes circonférentielles                                                                     |
| $V_m$                  | Volume de la matrice                                                                               |
| $m_m$ et $\sigma_{0m}$ | Paramètres de Weibull                                                                              |



# Introduction Générale

# Introduction Générale

Depuis le début de la civilisation, les fibres naturelles et les biopolymères avaient un rôle fondamental pour la société. Les fibres naturelles ainsi que les biopolymères ont été utilisées par l'homme dans ses divers travaux manuels et activités quotidiennes. Ces fibres peuvent être issues à partir d'une vaste gamme de plantes disponibles telles que les feuilles de sisal, les capsules de coton, les tiges de jute, le chanvre, le lin ou encore le palmier et l'alfa.

Au courant du demi-siècle précédant, la demande en fibres végétales a été beaucoup diminuée suite au développement technologique et qui a entraîné par la suite une réduction considérable des surfaces cultivées. Par conséquent, les fibres naturelles ont été remplacées par des fibres synthétiques ou artificielles produites en masse à partir de produits pétrochimiques avec des propriétés mécaniques uniformes et contrôlables. Le succès des produits synthétiques tel que le nylon, le polyester et le polypropylène, est dû principalement à leur faible coût de revient, contrairement aux fibres naturelles produits par les agriculteurs. [Per06, Deg09].

Cependant, depuis les années 2000, les industriels et les institutions mondiales exposent un besoin éminent et important pour l'utilisation des fibres végétales et les biopolymères pour les raisons suivantes :

- d'un point de vue économique : réduction du coût, particulièrement après l'augmentation des prix des produits pétroliers ;
- d'un point de vue environnemental : réduire l'impact des produits industriels sur l'environnement.

Ces fibres d'origine végétale séduisent de plus en plus par l'ensemble de leurs propriétés telles que : une bonne résistance mécanique, de faible poids, la biodégradabilité et de faible coût [FRD12].

De nos jours, les fibres naturelles sont introduites dans l'industrie des composites, suite à leurs propriétés spécifiques intéressantes, la faible densité et la biodégradabilité ce qui ouvrent des perspectives prometteuses [BOU 14]. Ces matériaux ont connu un essor très important au cours de ces dernières décennies, telles que les fibres végétales d'Alfa qui sont en abondance dans le territoire algérien, et présentent de bonnes résistances dans son environnement naturel, c'est pour ces raisons, plusieurs chercheurs ont investi dans ce type de

fibre comme renfort dans les matériaux biocomposites.

Parmi les biopolymères les plus utilisés dans le domaine des matériaux verts on trouve l'Acide polylactique (PLA). Ce biopolymère a été obtenu grâce à la transformation de l'acide lactique sur la base de la fermentation de sucres alimentaires issus du maïs, de betterave, de tapioca ou encore de canne à sucre. Le PLA présente des caractéristiques physico-chimique et mécanique très intéressantes, à savoir : la perméabilité à l'eau, la rigidité élevée, favorisant la diminution d'épaisseur avec un aspect naturellement brillant et très transparent, ces caractéristiques ont permis de l'utiliser dans des applications potentielles et importantes telles que le textile, les emballages alimentaires et le biomédical (fil de suture, capsule pour libération de principe actif, matériel chirurgical.) [PEN17,CUT06].

Le développement de ces nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs qui exigent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps (le compromis coût/poids/résistance). La mise en œuvre des matériaux n'est pas un concept nouveau car la nature nous a proposé beaucoup de matériaux très performants. [ELH08].

L'idée proposée à travers cette étude part du fait que les matériaux fabriqués à base des fibres naturelles et des biopolymères sont beaucoup plus résistants et ils ont en même temps un impact environnemental très faible [Dui08, Dui09, Bad07]. Ce travail nous permettra d'apprécier les performances du renfort naturel ALFA avec le biopolymère PLA qui peuvent être utilisés comme constituants de base de notre matériau biocomposite.

Dans ce contexte, nous avons étudié l'importance et l'utilité, de la fibre végétale Alfa et la matrice PLA, et nous avons calculé certaines propriétés physiques et mécaniques afin d'apprécier la contribution majeure et potentielle de ses deux constituants. L'objectif est d'utiliser une approche génétique basée sur le modèle de Cox et le modèle probabiliste de Weibull, pour comparer la résistance mécanique des trois matériaux composites et bio-composites Verre/Epoxyde, Alfa/Epoxyde et Alfa /PLA, suite à l'application de différentes contraintes mécaniques de traction ( $\sigma = 80 \text{ N/m}^2$ ,  $\sigma = 100 \text{ N/m}^2$  et  $\sigma = 120 \text{ N/m}^2$ ), pour calculer les endommagements à l'interface fibre-matrice de ses matériaux composites et biocomposites.

Afin d'atteindre cet objectif, nous avons organisé notre mémoire de thèse de la manière suivante : ce manuscrit est composé de cinq chapitres. Le premier chapitre présente des généralités sur les matériaux bio-composites tel que ses différents constituants et leurs

architectures ainsi leurs caractéristiques, le second s'intéresse à l'interface fibre-matrice. Le troisième et le quatrième chapitre, présentent respectivement la modélisation de l'interface définie par le modèle de Cox, et le formalisme probabiliste de Weibull, et les différents modèles numériques de calcul Meta heuristique définis en plus particulier les algorithmes génétiques, qui sont issus d'une famille d'algorithmes basée sur la théorie de l'évolution par la sélection naturelle, énoncée par Charles Darwin. En terminant ce travail par la discussion de l'ensemble de nos résultats de simulation numériques obtenus par notre approche génétique dont on s'est intéressé à les valider par une comparaison avec les résultats théoriques et expérimentaux disponibles dans la littérature. Nous avons clôturé notre travail par une conclusion générale qui a été consacrée à la discussion des principaux résultats et à la présentation des perspectives essentielles à la préparation des travaux à venir.

## Bibliographies

- [Bod07] Bodros, E., et al. *Could biopolymers reinforced by randomly scattered flax fibre be used in structural applications?* CompSci & Technol, 67(3-4), 462-470 (2007).
- [Bou14] Mohamed El Hadi Bourahli., *Caractérisation d'un composite verre/époxy*. Thèse doctorat en sciences. Université Ferhat Abbas – Sétif 1 (2014).
- [CUT06] C. N. Cutter., *Opportunities for bio-based packaging Technologies to improve the quality and safety of fresh and further processed muscle foods*, Meat Science, 74, 131–142 (2006).
- [Deg09] D. Deguillement., L. Dupayage., et N. Righi. *Marché et enjeux d'aujourd'hui et de demain pour les agro-ressources*. Journée Agro-ressources & Matériaux Textiles. Institut Français du Textile et de l'Habillement – IFTH (2009).
- [Dui08] Antoine Le Duigou., et al. *Effect of recycling on mechanical behaviour of biocompostable flax/poly (l-lactide) composites*. Comp. Part A, 39(9), 1471-1478. (2008)
- [Dui09] Antoine Le Duigou., Peter Davies., Christophe Baley., *Etude de la liaison interfaciale fibre de lin/acide poly (L-lactique)*. JNC16, Toulouse. AMAC.hal-00388871(2009).
- [ELH08] El Hadji Babacar L.Y. *Nouveaux matériaux composites thermoformables à base de fibres de cellulose*. Matériaux. Institut National Polytechnique de Grenoble. HAL Id: tel-00268828 (04/2008).
- [FRD12] Fibres Recherche Développement (FRD). *Fibres et renforts végétaux Solutions composites*. Troyes – France (03/2012).
- [PEN17] Christian Penu., Marion Helou. *Acide polylactique (PLA)*. Techniques de l'Ingénieur - Réf : AM3317v1 (10/07/2017).
- [Per06] C. Perret., L. Bossard. Le Coton. *Atlas de l'intégration régionale en Afrique de l'Ouest – Série économie*. CEDEAO-CSAO/OCDE (08/2006).

# Chapitre 1

## Généralités sur les bio-composites

---

*Ce chapitre est une présentation bibliographique touchant des généralités sur les bio-composites tels que ses différents constituants et leurs architectures ainsi que ces caractéristiques.*

---

## 1.1. Introduction

Le mélange de fibres naturelles avec d'autres matériaux pour former des composites date depuis les années 1500 avant Jésus-Christ, les premiers Egyptiens et les colons mésopotamiens utilisaient déjà un mélange d'argile et de paille pour construire des bâtiments rigides et durables. La paille a continué à servir de renfort aux produits composites antiques comprenant la poterie et les canoés [Luc14].

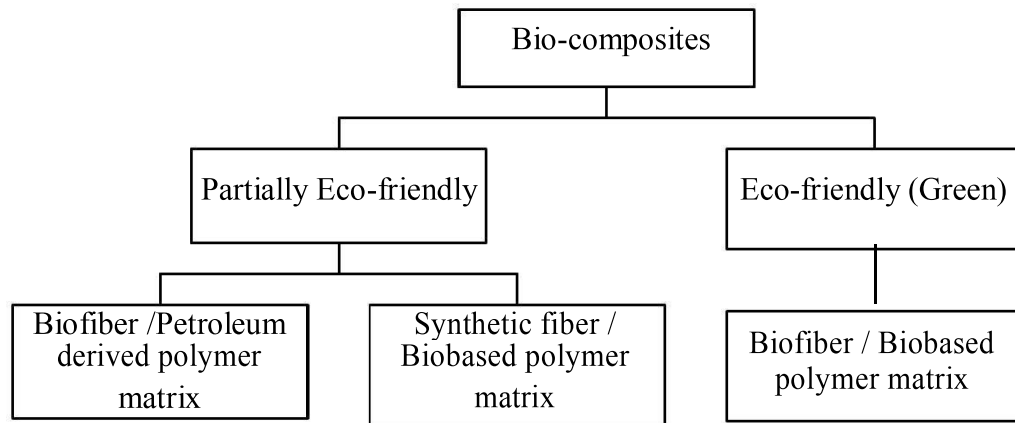
Le matériau composite est constitué d'au moins deux constituants non miscibles à structures différentes, différentes formes, aussi bien que par leurs propriétés mécaniques ou chimiques, dont les qualités individuelles se combinent et se complètent en donnant à l'ensemble des performances globales améliorées dont aucun composant ne possède séparément.

Les propriétés des matériaux composites résultent de leur [Dal98] :

- *Propriétés des matériaux constituants ;*
- *Distribution géométrique ;*
- *Interaction.*

Ces matériaux sont impliqués dans de nombreux secteurs tel que l'aéronautique, automobiles, bâtiment, ...etc. Les données économiques et les cahiers des charges environnementales sont de plus en plus exigeants pour l'utilisation de composites à base de renforts naturels et végétales avec des matrices organiques. La recherche sur le sujet s'est ainsi fortement dynamisée au cours de ces dernières années et un certain nombre de produits commencent à apparaître sur le marché (balustrades, bardage, palettes, fenêtres...). De nouvelles applications et des composites plus performants sont déjà anticipés, mais les connaissances restent insuffisantes et des études doivent être menées afin de mieux comprendre certains mécanismes [Rouam 2].

Un bio-composite est un matériau composite dont l'une des parties au moins, renfort ou matrice, est issue de ressources renouvelables. Un schéma de ces catégories de composites est présenté dans la figure 1.1.



*Figure 1.1. Classification des bio-composites*

Dans ce mémoire, nous nous intéressons uniquement aux bio-composites "vert-vert", autrement dit dont la composition est à 100% bio-sourcé : une matrice en bio-polymère et un renfort en fibres naturelle. Le produit final est utilisé essentiellement dans le domaine de l'emballage ; un bioplastique. Ces Bioplastiques constituent une alternative renouvelable potentielle aux plastiques issus du pétrole, ils permettraient de réduire la pollution sur le long terme ainsi que notre dépendance aux combustibles fossiles. Généralement, ils se caractérisent par de bonnes propriétés mécaniques et thermiques qui dépend des constituants utilisés. De nombreux bio-polymères possédant des propriétés physico-chimiques différentes sont disponibles, ce qui donne plusieurs types de bioplastiques qui ne sont donc pas toujours destinés aux mêmes usages et applications, en fonction de leur origine, ils acquièrent des caractéristiques bien définies qui les destinent préférentiellement à des applications particulières. Les bio-plastiques peuvent être utilisés dans différentes applications, nous citons quelques-unes :

- **Le secteur des emballages** : sous forme d'emballage alimentaire, sacs-poubelles, sacs de caisse, sacs fruits et légumes, couverts, gobelets, boîtes etc.
- **Produits d'hygiène et cosmétiques** : des bioplastiques peuvent être incorporés dans des produits variés : cotons-tiges, couches et produits d'hygiène.
- **Applications agricoles** : utilisés comme de films de paillage biodégradables, pots de culture, agrafes pour les plantes.

- **Secteur automobile** : les bioplastiques peuvent aussi servir de composant pour des pneumatiques de véhicules ou entrer dans la fabrication de pièces automobiles.
- **Applications diverses** : des applications à durées de vie variables, sont également disponibles, comme des liens de parachutes, des manches de couteaux suisses, des coques de téléphone...

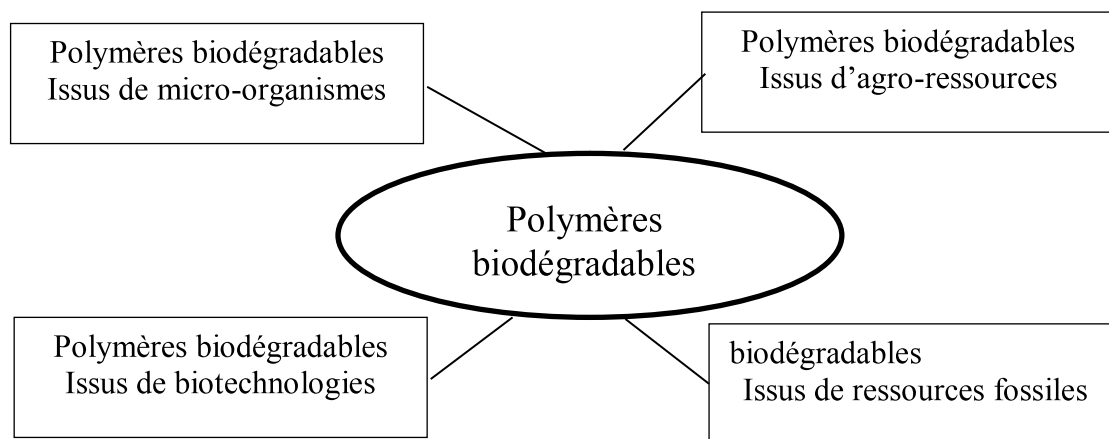
## 1.2. Les bio-Polymères

Les bio-polymères sont des polymères issus exclusivement d'organismes vivants ou de polymères synthétisés à partir de ressources renouvelables. Ces polymères connaissent depuis quelques années un réel essor du fait de leurs origines biologiques et surtout de leur caractère biodégradable.

Un polymère est un enchaînement de motifs simples appelés monomères qui peuvent être identiques ou non. Le nombre de motifs monomères constituant la macromolécule est appelé degré de polymérisation. Les polymères sont en général polymoléculaires, c'est à dire qu'ils sont composés de mélanges de molécules de tailles différentes. Les matériaux biodégradables sont des matériaux qui sont aptes à subir un processus de décomposition sous forme de dioxyde de carbone, de méthane, d'eau, de composés non organiques ou de biomasse, sous l'action enzymatique des micro-organismes [Jar08].

Il est très important de différencier un bio-polymère ou **polymère bio-sourcé** qui est issu de ressources renouvelables et un **polymère biodégradable** qui peut être issue d'origine pétrochimique pouvant être biodégradé.

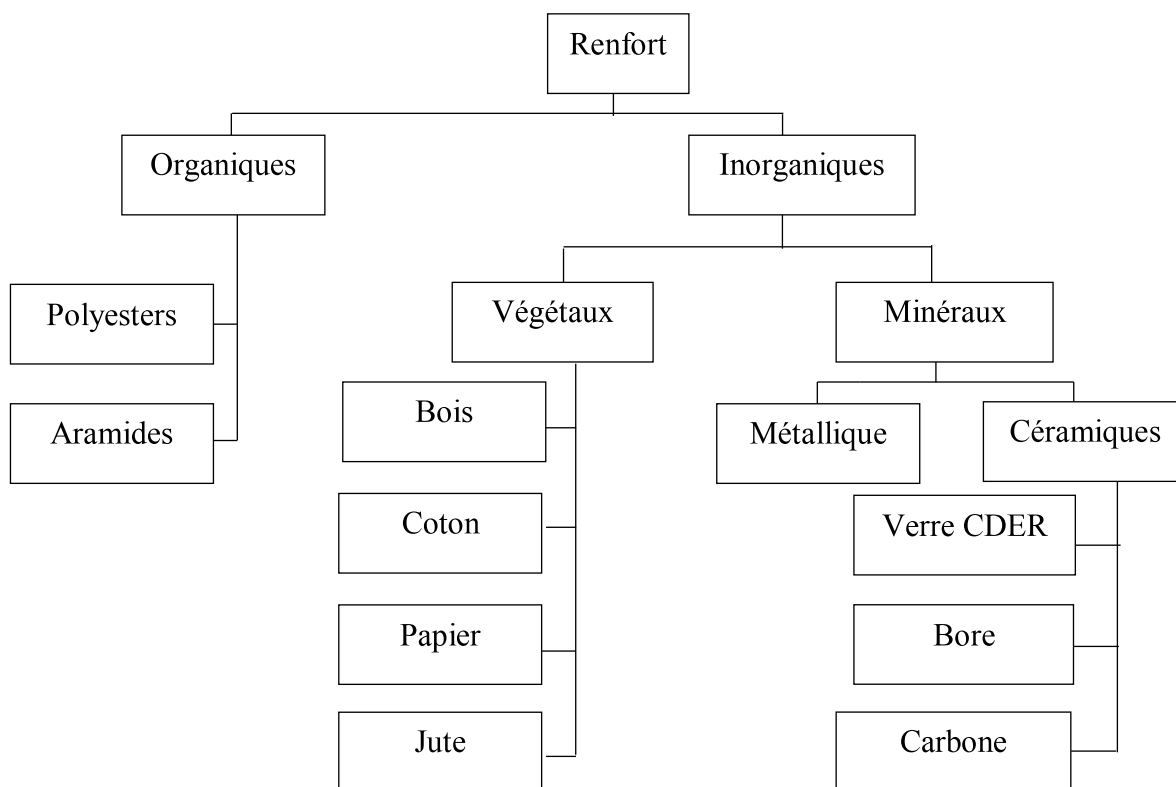
Les polymères biodégradables ou bio-polymères peuvent être produits à partir de ressources renouvelables et fossiles. Les polymères biodégradables peuvent être divisés en 4 familles différentes [Ave14, Sch04] figure 1.2.



*Figure 1.2. Les différentes familles de polymères biodégradables*

### 1.3. Les fibres

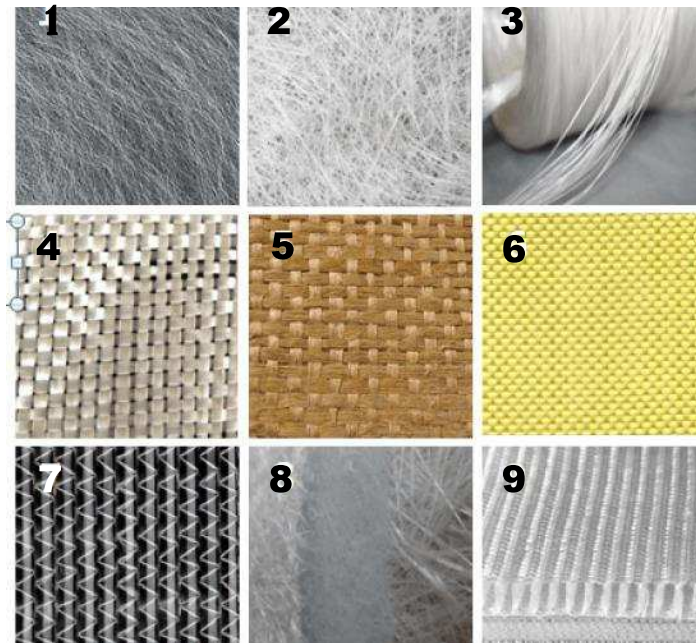
Le rôle de renfort est d'assurer la tenue mécanique du composite et est souvent de nature filamenteuse : fibres organiques ou inorganiques [Gor11]. Les fibres sont constituées par plusieurs centaines ou milliers de filaments de diamètres variant de 5 à 15  $\mu\text{m}$ , ce qui permet de traiter les mèches sur des machines textiles. Les différents types de renforts sont cités dans l'organigramme (Figure 1.3), ainsi sont représentés sur la figure 1.4.



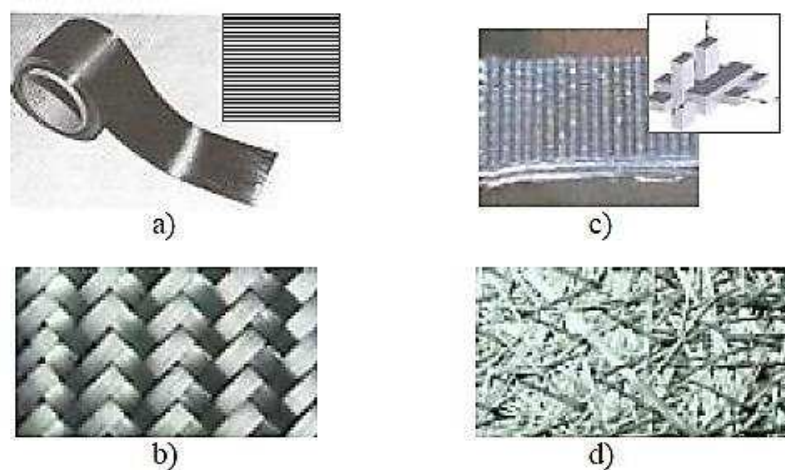
**Figure 1.3. Type des renforts [Gak06, Sol11]**

Il existe diverses formes du renfort des matériaux composites : filaments courts (0.5 mm), fibres courtes, fibres longues ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écailles ou de poudre). On utilise généralement les fibres longues pour des composites hautes performances, mais pour les composites de grande diffusion, on utilise les fibres courtes. Les renforts peuvent être de nature inorganique (verre, carbone) ou organique (polyaramide appelé kevlar). Ils ont le rôle d'assurer la bonne tenue mécanique des composites et sont disposés au sein du matériau en fonction des propriétés recherchées. Pour créer une structure résistante adaptée aux contraintes mécaniques, il existe plusieurs architectures de renforts [Goh08] : unidirectionnelle (nappes ou roving), bidirectionnelle non texturée (matelas appelé mat) ou texturée (tissus ou complexes 2D), tridimensionnelle (fibres orientées suivant trois ou plusieurs directions), multidirectionnelle aléatoire (fibres

coupées et broyées, mat) (Figure 1.5). Les renforts les plus couramment utilisés sont les fibres, généralement de verre, de carbone ou d'aramide.



**Figure 1.4. Différents types de renforts de fibres.** (1) Voile de surface de fibres de verre. (2) Mat de brin coupés (CSM) de verre. (3) Brins de fibres de verre (roving). Armure en (4) toile de fibre de verre. (5) toile de fibres de lins et (6) de toile de fibres aramides (Kevlar® 49) tissées. (7) Tissu unidirectionnel de fibres de carbone HM et de fibres de verre tissées. (8) Mat à infusion avec cœur de polypropylène. (9) Tissu biaxial tridimensionnel de fibres de verre (pour créer des doubles parois) (<http://fyjr.biz/plastiques-renforcees-de-fibres/les-renforts-de-fibres/>)



**Figure 1.5. Différents types d'architecture de renfort :** (a) unidirectionnelle, (b) bidirectionnelle (tissus), (c) tridimensionnelle et (d) multidirectionnelle aléatoire (mat) [Goh08]

Les structures composites sont anisotropes. La plupart des renforts travaillent bien en traction, mais offrent de moins bonnes performances en compression et cisaillement [Mar14]. Il est donc impératif de jouer sur la texture et la géométrie des renforts pour créer une architecture adaptée.

### 1.3.1. Les Fibres de verre

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibres (figure 1.6) de faibles diamètres (quelques dizaines de microns), le verre filamentaire acquiert de bonnes caractéristiques mécaniques. Les fibres de verre élaborées à partir d'un filable, appelé verre textile, est composé de silice, alumine, chaux, magnésie, etc... [Ber92]. Ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simples d'élaboration, confèrent aux fibres de verre un excellent rapport performances/prix, cet avantage les place au premier rang des renforts utilisés actuellement dans les matériaux composites.

Suivant leurs compositions, différents types de verre filables peuvent être obtenus [Bou15, Ber92, Wei83]. Dans la pratique, le verre de type « E » constitue la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement. Les autres verres, représentent une faible quantité (environ 1 %), sont réservés à des applications spécifiques (Tableau 1.1).



*Figure 1.6. Fibres de verre*

| Constituants<br>En % en point                  | Verres<br>polyvalents | Verres résistants<br>aux acides | Verres à hautes<br>résistances<br>mécaniques |         | Verres<br>diélectriques |  |
|------------------------------------------------|-----------------------|---------------------------------|----------------------------------------------|---------|-------------------------|--|
|                                                | Types E               | Types C                         | Types R                                      | Types S | Types D                 |  |
| Silice SiO <sub>2</sub>                        | 53 à 54               | 60 à 65                         | 60                                           | 62 à 65 | 73 à 74                 |  |
| Alumine Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>         | 14 à 15.5             | 2 à 6                           | 25                                           | 20 à 25 | <0.5                    |  |
| Chaux CaO                                      | 20 à 24               | 14                              | 6                                            | -       | 0.5 à 0.6               |  |
| Magnésie MgO                                   |                       | 1 à 3                           | 9                                            | 10 à 15 |                         |  |
| Oxyde bore B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>       | 6.5                   | 2 à 7                           | -                                            | 0 à 1.2 | 22 à 23                 |  |
| Fluor F                                        | 0 à 0.7               | -                               | -                                            | -       | -                       |  |
| Oxyde de sodium<br>Na <sub>2</sub> O           | ≤1                    | 8 à 10                          |                                              | 0 à 1.1 | 1.3                     |  |
| Oxyde de<br>Zirconium ZrO <sub>2</sub>         |                       | 0.5                             |                                              |         | -                       |  |
| Oxyde de<br>potassium K <sub>2</sub> O         |                       | 1.5                             |                                              |         |                         |  |
| Oxyde de Fer<br>Fe <sub>2</sub> O <sub>2</sub> |                       |                                 |                                              |         |                         |  |
| Oxyde de Titane<br>TiO <sub>2</sub>            |                       |                                 |                                              |         |                         |  |

*Tableau 1.1. Composition des différentes fibres de verre [Ber92, Wei83]*

Les caractéristiques de ces différents types de verre sont données par le tableau 1.2 suivant :

| Caractéristiques                                                | Verre E              | Verre R              | Verre S |
|-----------------------------------------------------------------|----------------------|----------------------|---------|
| Caractéristique en traction :                                   |                      |                      |         |
| Résistance à la rupture (MPa)                                   | 3400 à 3500          | 4400                 | 4600    |
| Module d'Young (GPa)                                            | 73                   | 86                   | 87      |
| Allongement à la rupture (%)                                    | 4.6 à 4.8            | 5.2                  | 5.4     |
| Masse volumique ( $\text{g/cm}^3$ )                             | 2.54                 | 2.55                 | 2.54    |
| Coefficient de dilatation thermique ( $^{\circ}\text{C}^{-1}$ ) | $0.5 \times 10^{-5}$ | $0.3 \times 10^{-5}$ |         |

*Tableau 1.2. Caractéristiques des fibres de verre [Rig91]*

### 1.3.2. Les Fibres de carbone

Les fibres de carbone (Figure 1.7) sont faites à partir d'un polymère de base, appelé précurseur. Elles possèdent de très fortes propriétés mécaniques. De nos jours, on utilise des fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN) comme fibres précurseurs. La qualité des fibres de carbone finales dépend fortement des qualités du précurseur. Dans le

principe d'élaboration, le PAN subit un traitement thermique sans fusion des fibres aboutissant à une graphitisation. Le brai, qui est un résidu de raffinerie issu du pétrole ou de la houille, est également utilisé pour produire des fibres de carbone.



**Figure 1.7. Fibres de carbone (<http://www.fmc-composites.com/materiaux-composites-29>)**

La fibre de carbone est définie comme une forme de graphite dont les feuilles formées de plans d'atomes de carbone liés en cycles hexagonaux, sont longues et fines. On peut les imaginer comme des rubans de graphite. Des paquets de ces rubans s'assemblent pour former des fibres, d'où le nom "fibres de carbone". Une fibre de carbone est préparée à partir de fibres de polymères organiques. Ces polymères s'allongent et forment des fils parallèles devenant ainsi les axes de fibres.

Ces polymères sont le plus souvent poly-acrylonitriles. Les polymères sont ensuite chauffés à haute température (environ 1500°C) sous atmosphère inerte et subissent une pyrolyse qui les transforme en fibres de carbone. Si pendant le traitement, la température dépasse 2500°C, la fibre de carbone formera du graphite. Malgré sa finesse, la fibre de carbone est un matériau très résistant et il faut lui appliquer une grande force pour la rompre. Elle est très rigide mais peut s'étirer ou se comprimer. Ces fibres ne sont pas utilisées telles quelles. On les utilise pour renforcer des matériaux comme les résines époxydes et d'autres polymères thermodurcissables de manière à obtenir des « matériaux composites ». Les composites renforcés par des fibres de carbone sont très résistants par rapport à leur poids. Ils sont souvent plus résistants que l'acier, mais plus légers. De ce fait, ils peuvent remplacer

les métaux dans beaucoup d'applications, par exemple des parties d'avions ou de navette spatiale, ou entrer dans la fabrication de raquettes de tennis, de clubs de golf ou de parties de bateaux.

On distingue deux types de fibres :

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

Les caractéristiques de fibre de carbone sont données par le tableau 1.3 :

| Caractéristiques                                                                                                                                                                                                                                  | HR                     |             | IM              | HM                     |                 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------|-------------|-----------------|------------------------|-----------------|
|                                                                                                                                                                                                                                                   | (1)                    | (2)         |                 | (1)                    | (2)             |
| Caractéristique en traction :                                                                                                                                                                                                                     | 3000 à 3500            | 4000 à 4500 | 4700 à 7200 (3) | 1800 à 2500            | 2000 à 4200 (3) |
| Résistance à la rupture (MPa)                                                                                                                                                                                                                     | 220 à 240              | 275 à 300   | 350 à 500       | 350 à 500              | 350 à 500       |
| Module d’Young (GPa)                                                                                                                                                                                                                              | 1.2 à 1.5              | 1.4 à 1.6   | 0.5 à 0.7       | 0.5 à 0.7              | 0.3 à 0.5       |
| Allongement à la rupture (%)                                                                                                                                                                                                                      |                        |             |                 |                        |                 |
| Masse volumique (g/cm³)                                                                                                                                                                                                                           | 1.75 à 1.8             | 1.75 à 1.8  | 1.7 à 1.8 1     | 1.8 à 1.95             | 1.8 à 1.95      |
| Coefficient de dilatation thermique (° C <sup>-1</sup> )                                                                                                                                                                                          | 0.02 ×10 <sup>-5</sup> |             |                 | 0.08 ×10 <sup>-5</sup> |                 |
| HR : haut résistance. (1) Qualité standard (1er génération).<br>IM : module intermédiaire. (2) Qualité très performante commercialisée récemment (2* génération) ou en cours de développement.<br>HM : haut module.(3) En cours de développement. |                        |             |                 |                        |                 |

**Tableau 1.3. Caractéristiques des fibres de carbone [Rig91]**

### 1.3.3. Les fibres céramiques

Les matériaux composites de type céramique sont souvent constitués de renforts et de matrices en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. On retrouve ces fibres dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs. Quelques exemples de fibres céramiques :

- **les fibres de Carbure de Silicium** : Elles sont produites comme le verre, par fusion, et sont essentiellement utilisées pour leur haute tenue chimique et thermique dans les tuyères pour moteur de fusée.
- **les fibres de Bore** : Fibres de haut module et insensibles à l'oxydation à hautes températures, elles sont obtenues par dépôt en phase gazeuse sur un substrat en tungstène.

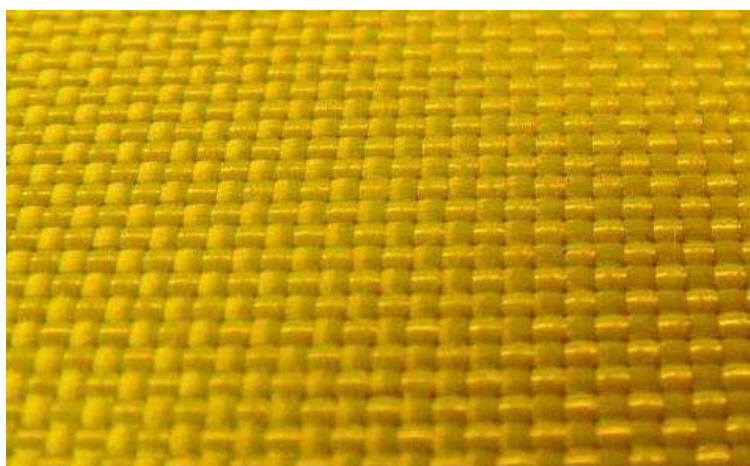
### 1.3.4. Les Fibres d'aramide

En traction et comme les carbones, les fibres aramides (Figure 1.8) ont des propriétés mécaniques élevées mais ils ont une faible résistance en compression. Cette dernière est due à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y

remédier, différents ensimages de fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres aramides.

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

- **Les fibres bas module** : utilisées pour les câbles et les gilets pare-balles ;
- **Les fibres haut module** : employées dans le renforcement pour les composites hautes performances.



*Figure 1.8. Fibres d'aramide (<http://www.fmc-composites.com/materiaux-composites-29>)*

Les caractéristiques des fibres d'aramide données par le tableau 1.5:

| Caractéristiques                     | Haut module | Standard |
|--------------------------------------|-------------|----------|
| <b>Caractéristique en traction :</b> |             |          |
| Résistance à la rupture (MPa)        | > 3000      | > 2760   |
| Module d'Young (GPa)                 | 120 à 130   | 60 à 70  |
| Allongement à la rupture (%)         | 1,9 à 2,5   | 4 à 4,4  |
| Masse volumique (g/cm <sup>3</sup> ) | 1,45        | 1,44     |

*Tableau 1.5. Caractéristiques des fibres d'aramide [Rig91]*

### 1.3.5. Les fibres de basalte

Ce type de fibres est naturelle issue de la roche volcanique formée à partir de magma refroidi confère des propriétés exceptionnelles à la fibre de basalte, trois fois plus chère, légère et plus résistante que la fibre de verre. Très utilisée dans quelques domaines pour ses propriétés thermiques, elle est incombustible, possède de bonnes propriétés mécaniques et couvre une large plage de température qui lui confère un réel avantage en matière d'isolation thermique : -260°C à +1 200° C.

### 1.3.6. Les matières textiles

Depuis son existence, « se vêtir » est apparu comme un besoin fondamental pour l'Homme, juste après « manger et boire ». Il ne cesse d'afficher un intérêt croissant très remarquable aux matières textiles, il les transforme et les adapte à ses besoins, notamment, de protection thermique. Aujourd'hui, ce besoin fondamental a évolué et les matériaux fibreux nous entourent, ils tiennent notre corps au chaud, ils nous protègent, ils sont étroitement liés à notre bien-être, ils réfléchissent notre personnalité et ils sont omniprésents dans nos usages quotidiens. Ces applications diverses et variées exigent l'utilisation de matériaux avec des propriétés bien spécifiques, d'où le spectre très large de matières textiles recensées aujourd'hui. La filière textile-habillement est très riche de matières fibreuses issues d'origines très variées, et les destinations des produits finis sont de plus en plus diversifiées. Les fibres textiles peuvent être classées selon leurs origines : Naturelle ou Chimique. Ces deux catégories basiques peuvent encore être subdivisées en sous catégories, ainsi, les fibres naturelles peuvent être d'origine végétale, animale ou minérale. Quant aux fibres chimiques, elles sont synthétiques ou artificielles selon l'origine du polymère utilisé.

### 1.3.7. Les fibres naturelles

#### - Les fibres végétales :

Les fibres végétales sont issues de la biomasse, elles peuvent être extraites du fruit, de la tige ou de la feuille d'une plante. Elles sont principalement composées de cellulose, d'hémicelluloses, de lignines et de pectines. Elles sont surtout utilisées pour leurs avantages inégalés : leur faible densité, leur pouvoir d'isolant thermique, leurs propriétés mécaniques, et notamment pour leur biodégradabilité et atouts écologiques [FRD12].

#### - Les fibres animales :

La petite part du marché que tiennent ces fibres (à peine 2%) sur l'ensemble des fibres textiles utilisées dans le monde d'un point de vue tonnage ne reflète pas la proportion économique plus importante [Mor08]. La fibre la plus importante et la plus utilisée est la fibre de laine connue pour ses qualités de bon isolant thermique, son pouvoir absorbant élevé (16-18%) et son élasticité importante (45%) [Klo69].

#### - Les fibres minérales :

L'amiante est la seule fibre minérale naturelle. Il a attiré l'attention des industriels pour sa résistance à la chaleur, au feu, aux agressions électriques et chimiques et pour son pouvoir

absorbant. Il a été utilisé pour les patins de freins ou en garniture de chaudières ou fours électriques, ou encore dans diverses installations électriques (ex : plaques chauffantes) avant de l'interdire progressivement à cause des risques cancérigènes qu'il présente [Wik12-Ser04].

### 1.3.8. Propriétés des fibres végétales

L'attrait des fibres végétales et leur retour comme matériaux potentiels dans le secteur du textile et des composites sont dûs aux différents avantages qu'elles présentent. Bien entendu, l'effet de ces avantages varie d'une fibre à une autre et dépend de la composition chimique et physique, la structure, le pourcentage de cellulose, l'angle microfibrillaire, la section et le degré de polymérisation (Tableau 1.6), (Tableau 1.7) et (Tableau 1.8) [Bat98-Muk86].

| Fibres  | Cellulose | Hémicellulose | Lignine | Pectine | Cire |
|---------|-----------|---------------|---------|---------|------|
| Coton   | 85-90     | 5.7           | 0.7-1.6 | 0.1     | 0.6  |
| Lin     | 71        | 18.6-20.6     | 2.2     | 2.3     | 1.7  |
| Chanvre | 70-74     | 17.9-22.4     | 3.7-5.7 | 0.9     | 0.8  |
| Jute    | 61.1-71.5 | 13.6-20.4     | 12-13   | 0.2     | 0.5  |
| Ramie   | 68.6-76.2 | 13.1-16.7     | 0.6-0.7 | 1.9     | 0.3  |
| Sisal   | 66-78     | 10-14         | 10-14   | 10      | 2    |
| Coco    | 32-43     | 0.15-0.25     | 40-45   | 3.4     | -    |
| Alfa    | 45        | 24            | 24      | 5       | 2    |

*Tableau 1.6. Composition chimique en % de différentes fibres végétales*

| Fibres         | Cellulose % | Angle Microfibrillaire (°) | Diamètre (μm) | Longueur (mm) | Rapport (L/d) |
|----------------|-------------|----------------------------|---------------|---------------|---------------|
| <b>Coton</b>   | 85-90       | 33                         | 19            | 35            | 1842          |
| <b>Lin</b>     | 71          | 10                         | 5-76          | 4-77          | 1687          |
| <b>Chanvre</b> | 70-74       | 6.2                        | 10-51         | 5-55          | 960           |
| <b>Jute</b>    | 61.1-71.5   | 8                          | 25-200        | 9-70          | 110           |
| <b>Ramie</b>   | 68.6-76.2   | 7.5                        | 16-126        | 40-250        | 3500          |
| <b>Sisal</b>   | 66-78       | 20                         | 7-47          | 0.8-8         | 100           |
| <b>Coco</b>    | 32-43       | 45                         | 12-24         | 0.3-1         | 35            |
| <b>Alfa</b>    | 45          | -                          | 5-95          | 5-50          | 1964          |

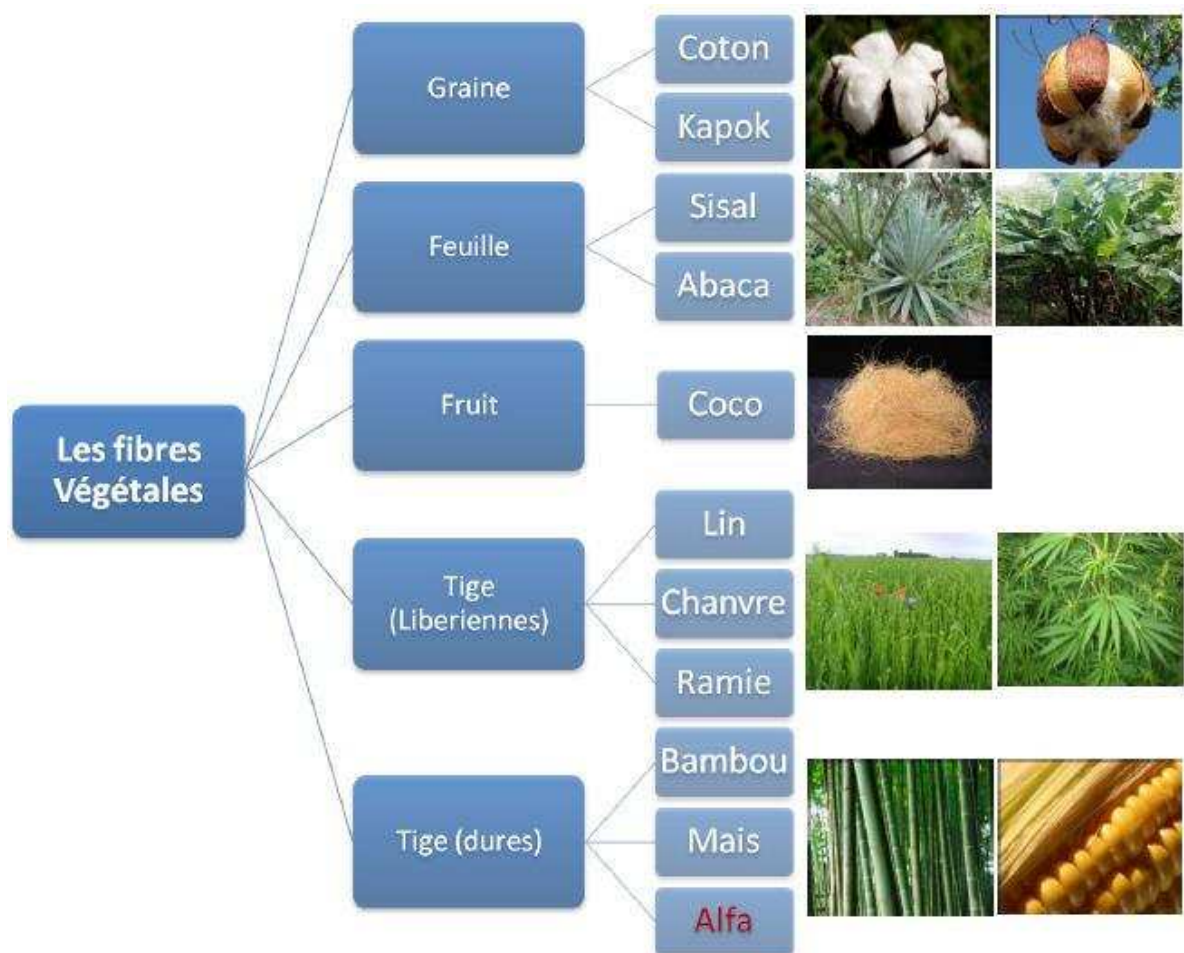
*Tableau 1.7. Propriétés physiques de différentes fibres végétales*

| Fibres         | E (GPa)  | All(%)  | $\sigma$ (MPa) | densité |
|----------------|----------|---------|----------------|---------|
| <b>Coton</b>   | 5.5-12.6 | 7-8     | 287-597        | 1.5-1.6 |
| <b>Lin</b>     | 58       | 3.27    | 1339           | 1.53    |
| <b>Chanvre</b> | 35       | 1.6     | 389            | 1.07    |
| <b>Jute</b>    | 26.5     | 1.5-1.8 | 393-773        | 1.44    |
| <b>Ramie</b>   | 61.4-128 | 1.2-3.8 | 400-938        | 1.56    |
| <b>Sisal</b>   | 9-21     | 3-7     | 350-700        | 1.45    |
| <b>Coco</b>    | 4-6      | 15-40   | 131-175        | 1.15    |
| <b>Alfa</b>    | 12.7     | 1.6     | 75-154         | 1.51    |

*Tableau 1.8. Propriétés mécaniques en traction de quelques fibres végétales*

### 1.3.9. Classifications des fibres végétales

Nous pouvons subdiviser les fibres végétales en 5 groupes selon leur origine (Figure 1.9). Les fibres provenant des poils séminaux de graines (coton, kapok), les fibres libériennes extraites de liber de plantes (lin, chanvre, jute, ramie), les fibres extraites de feuilles (sisal, abaca), d'enveloppes de fruits (noix de coco) ou les fibres dures extraites des tiges de plantes.



*Figures 1.9. Classification des fibres végétales selon l'origine [Frd12]*

### 1.3.10. La fibre d'Alfa

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes. Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête, le désert commence (Figure 1.10) [Gim54].



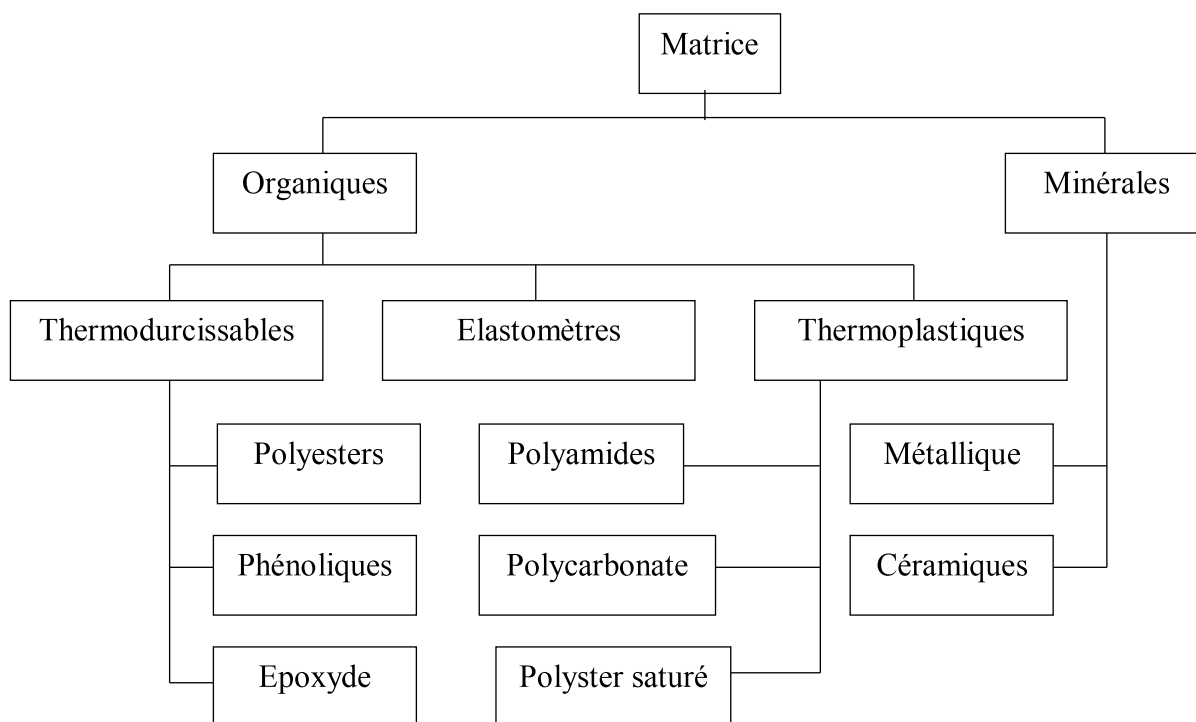
*Figures 1.10. Illustration de la plante d'Alfa à l'état brut*

Par ailleurs, c'est l'une des espèces xérophiles qui caractérise le mieux les milieux arides méditerranéens à l'exclusion des secteurs désertiques. Sa terre d'élection est l'Afrique du Nord, et tout particulièrement les hauts plateaux du Maroc (3.186.000 ha ) et de l'Algérie ( 4.000.000 ha). Mais cette espèce est présente aussi en Espagne (300.000 ha), au Portugal, aux Baléares, et elle s'étend vers l'est jusqu'en Égypte en passant par la Tunisie (600.000 ha) et la Libye (350.000 ha). En France, elle serait présente uniquement dans le département du Var. Au sud et à l'est, la limite naturelle de l'Alfa est déterminée par la sécheresse en bordure du Sahara. En revanche, au nord et à l'ouest, c'est l'humidité croissante du climat qui l'élimine de la flore, elle est beaucoup plus rare dans les étages subhumide et surtout humide [Rha09-Hou95]. La répartition territoriale connue à ce jour est estimée à [Por02] :

#### **1.4. La matrice**

La matrice assure la cohésion entre les renforts de manière à recevoir toutes les sollicitations et répartir les efforts dans tout le matériau afin de protéger le renfort [Ber10], ainsi répartir les contraintes sollicitées (résistance à la compression ou à la flexion), la tenue chimique de la structure et de donner la forme désirée au produit. Par définition, c'est un polymère ou une résine organique. La maîtrise de l'élaboration de matériaux composites nécessite la connaissance des propriétés individuelles des constituants de base des

matériaux. La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres on peut retrouver les différentes familles des matrices dans l'organigramme présenté sur la figure 1.11.



*Figure 1.11. Différente famille d'une matrice [Sol11]*

#### 1.4.1. Epoxydes

En les comparants aux résines polyesters (Tableau 1.3), les époxydes sont des résines plus efficaces mais leurs retraits sont plus faibles. Elles sont souvent utilisées pour des stratifiés à tolérances serrées. Les époxydes ont un rôle important dans la construction de pièces pour l'industrie aéronautique où le rapport résistance/poids est un critère essentiel. Les conditions de travail doivent être contrôlées, les proportions doivent être respectées scrupuleusement. Elles résultent de la polyaddition de l'épichlorhydrine sur un polyalcool et constitue la résine type des composites hautes performances HP. On distingue deux classes de résines en fonction :

- Du durcissement à chaud ou à froid ;
- De la tenue en température (120-130°C, ou 180-200°C).

Les résines époxydes présentent de nombreux avantages (Tableau 1.9)

| Avantages                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | Inconvénients                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <ul style="list-style-type: none"> <li>• Excellente propriété mécanique</li> <li>• Densité 1.2 à 1.4</li> <li>• Bonne résistance à la fatigue</li> <li>• Faible retrait (1% à 2%)</li> <li>• Excellente adhérence sur fibres</li> <li>• Auto-extinguibilité</li> <li>• Mise en œuvre facile, sans solvant</li> <li>• Bonne résistance chimique aux bases et solvants</li> <li>• Propriétés thermique élevées</li> <li>• Bonne stabilité dimensionnelle</li> <li>• Pouvoir adhésif important</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Vieillissement sous température</li> <li>• Prix élevé</li> <li>• Sensibilité à l'humidité</li> <li>• Sensibilité aux chocs</li> <li>• Temps de polymérisation</li> <li>• Cycle de moulage long</li> <li>• Nécessite de démoulant appropriés</li> <li>• Tenue thermique en continue limitée à 180 °C</li> </ul> |

**Tableau 1.9. Caractéristiques des résines époxydes [Car04]**

### 1.4.2. Amidon

L'amidon est un polysaccharide d'origine végétale composé d'unités glucose  $C_6H_{12}O_6$ . C'est la principale matière glucidique de réserve pour les végétaux et un constituant essentiel de l'alimentation humaine. Il représente une fraction pondérale importante de matières agricoles telles que les céréales (30 à 80 % de matières sèche), les tubercules (60 à 90%) et les légumineuses (25 à 50 %). C'est la plus importante source de glucides de l'alimentation humaine, il peut être produit principalement à partir du maïs ou d'autres cultures telles que la pomme de terre, le blé, l'orge, le riz et les légumes (pois, lentilles...) [Col05].

L'amidon est contenu dans les cellules des plantes sous forme de granules libres comme dans la pomme de terre où il se trouve dans le cytoplasme des cellules. Dans ce cas, son isolation est relativement simple : la plante est broyée provoquant la rupture des cellules, les granules libérés sont lavés à l'eau et laissés sédimenter à partir du "lait d'amidon" obtenu puis séchés. Pour les céréales, l'amidon est inclus dans une matrice protéinique qui nécessite un processus de séparation plus complexe. En effet, les graines doivent subir, avant le broyage, un ramollissement préalable dans des conditions bien définies telles que la température, le temps et le pH [Sch04].

### 1.4.3. L'Acide PolyLactique

L'acide polylactique désigné sous l'acronyme PLA provenant du terme anglais *polylactic acid*. C'est une matière plastique créée par une synthèse classique, comme pour

les matières plastiques synthétiques. Il s'agit en fait d'un polymère créé à partir du monomère d'acide lactique produit grâce à un processus de fermentation du glucose. Ce n'est qu'à partir des années 1990 que ce polymère connut un succès grandissant et fut produit industriellement. Il est devenu le premier polyester bio-sourcé fabriqué de manière industrielle en raison de la chute de ses coûts de production, de sa disponibilité commerciale et de ses applications potentielles.

## 1.5. Conclusion

Les bio-composites sont des matériaux très variés, disponibles partout dans la nature. Cette diversité mérite d'effectuer des investigations dans le choix des constituants (la matrice, le renfort, les charges et les additifs). Le choix d'une association entre un renfort et une matrice est très délicat. Afin d'avoir les meilleures qualités qui dépend de :

- Propriétés des constituants ;
- Distributions géométriques des constituants ;
- L'interaction entre les différents constituants, etc.

Les choix de ces matières, la technique et le procédé de fabrication à une influence directe sur l'architecture et le comportement mécanique du matériau.

## Bibliographies

- [Ave14] Averous L. *Biodégradable et biosourcé*, l'actualité chimique n° 375-376, 2014.
- [Bat98] S. K. Batra « *Other long vegetable fibers* », In: Handbook of fibre Science and Technology, Ed. M. Lewin and E.M.Pearce, New York. Marcel Dekker, Vol. 4, Fibre Chemistry, pp. 505-575 (1998)
- [Ber92] J.M. Berthelot. “*Matériaux composites : Comportement mécanique et analyse des structures*”. Ed. MASSON, Paris, 1992, 620P.
- [Ber10] J. M. Berthelot. “*Matériaux composites*”. Editions Eyrolles, 2010.
- [Boi03] M. Boissiere, Thèse de doctorat. (2003).
- [Bou15] R. Boubeker, M. Hecini. “*Analyse de la concentration des contraintes dans les plaques orthotropes munies d’un trou circulaire*”. Revue des composites et des matériaux avancés, vol. 25, n° 1-2015, p. 47-68.
- [Col05] Colonna P. *La chimie verte*, édition Tec & Doc. Paris : Lavoisier, 2005.
- [Dal98] F. Dalmaso et J. Mézières, *Calcul des propriétés élastiques des tissus utilisés dans les matériaux composites*, Institut Français du Pétrole. 1998
- [Dan04] M. C. Daniel, D. Astrue. Chem. Rev, 104, 293-346, (2004).
- [Esc91] K. Escher. E. “*Hornbogen. Aspects of two-way shape memory in NiTi-Silicon composite materials*”. Journal de physique IV, Vol.1, N°.C4, pp.427-432, (1991).
- [FRD12] « *Fibres et renforts végétaux Solutions composites* », Fibres Recherche Développement (FRD), Troyes – France (Mars 2012)
- [Jar08] Jarroux N. *Les biopolymères : différentes familles, propriétés et applications*, Technique de l’ingénieur, am3580, 2008.
- [Gak06] M. Gakwaya. “*Compensation des déformations induites thermiquement dans les matériaux composites à l’aide d’un piezocomposite*”. Memoire de Maitre des Sciences : Faculté des Sciences et de Génie – Université de Laval Quebec, 2006. 87p.
- [Gim54] G. G. Giménez « *Aportaciones a la química del esparto español* ». Anales de la Universidad de Murcia. Vol 13, N° 1. Curso 1954-55
- [Goh08] G. Gohori anu. “*Interaction entre les défauts d’usinage et la tenue en matage d’assemblages boulonnées en Carbone/Epoxy*”. Thèse doctorat

- université de Toulouse. 2008
- [Gor11] L. Gornet. “*Généralité sur les matériaux composites*”. ECN, Centre Nantes, 2011.
- [Hou95] H. N. Le Houérou « *Considérations biogéographiques sur les steppes arides du nord de l'Afrique* », Sécheresse, Vol 6, n° 2, pp. 167-182 (1995)
- [Kha10] Khalafa. Amar, *Etude de comportement mécanique d'un matériau composite stratifié*. Mémoire de magister, M'hamed Bouguera, Boumerdes. Algerie. 2010.
- [Klu69] H. P. Klug and L. E. Alexander « *X-ray diffraction procedures* », Ed. Wesley, London (1969)
- [Liv88] J. Livage, M. Henry and C. Sanchez. *Progress in Solid State Chemistry* 18 (1988), p. 259.
- [Luc14] Lucintel. *Opportunities in natural fiber composites*. USA,: In: [www.lucintel.com](http://www.lucintel.com); March 2011. Dernière visite Juillet 2014.
- [Mar14] M. Marzano. “*Les matériaux composites*”. ANFA / édition 2014
- [Mor08] W. E. Morton and J. W. S. Hearle « *Equilibrium absorption of water* », *Physical properties of textile fibres*, Fourth Edition, Woodhead Publishing in Textiles: Number 68 (in association with The Textile Institute), CRC Press Cambridge, England, pp.178-194 (2008)
- [Muk86] P.S. Mukherjee and K.G. Satyanarayana « *Structure and properties of some vegetable fibers. II. Pineapple fibre. II. Pineapple fibre* », *Journal of Materials Science*, Vol 21, pp.51-56 (1986)
- [Por02] « *L'alfa : Importance écologique et socio-économique* », Portail de l'agriculture marocaine, Terre et Vie, N°61-62, (Novembre 2002)
- [Rig91] J-C. Rigal, A. Negrier. “*Présentation des matériaux composites, plastiques et composites*”. Technique de l'ingénieur, 1991.
- [Rha09] M. Rhanem « *L'alfa (Stipa tenacissima L.) dans la plaine de Midelt (haut bassin versant de la Moulouya, Maroc) –Éléments de climatologie* », *Physio-Géo* [En ligne], Vol 3 (janvier 2009)
- [San94] C. Sanchez and F. Ribot, “*Design of organic-inorganic materials synthesized via sol-gel Chemistry*”. *New journal of chemistry*, Vol. 18, p 1007, (1994).
- [Ser04] « *Amiante* », Service de la santé et de la sécurité du travail – Service du répertoire toxicologique, Canada (Octobre 2004)

- [Sch84] H. Schmidt, Mat. Res. Soc. Symp. Proc. 32 (1984) 327.
- [Shi00] A. N. Shipway, E. Kats, I. Willner, Chemplys. Chem. 1, 18-52, (2000).
- [Sch04] Schwach E, *Etude de systèmes multi phases biodégradables a base d'amidon de blé plastifié relations structure – propriétés approche de la comptabilisation*, thèse de doctorat, université de Reims – Champagne Ardenne, 2004.
- [Sol11] M. Sola. “*Caractérisation de matériaux composites à structure sandwich comportant des modifications*”. Mémoire de Maîtrise ès sciences appliquées, Ecole polytechnique de Montréal, Canada. 2011.
- [Son00] G.Q. Song, Q.P. Sun. “*Effet of microstructure on the mechanical behaviour of NiTi shape memory alloy reinforced aluminium matrix composite*”. Smart materials and structures Vol.9, pp.693-700, (2000).
- [Tri01] O. Trindade; N. Brian; L. Pickett. Chem. Mater.13, 3843-63858, (2001).
- [Wei83] J. Weiss, C. Bord. “*Les matériaux composites, Tome I: Structure, constituants, fabrication*”. Ed. l'Usine nouvelle, Paris, 1983, Partie: A-B-C.
- [Wik12] « *Amiante* », Wikipédia (Source électronique), disponible sur : <http://fr.wikipedia.org/wiki/Amiante> (Novembre 2012)
- [Whi83] W. White, European Patent N° 83/01250 (1983).

# Chapitre 2

## Les interfaces Fibre-Matrice

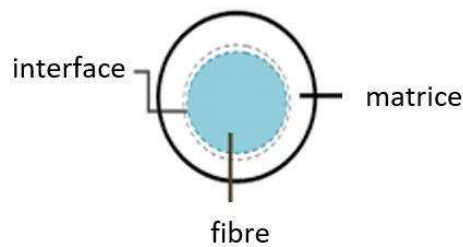
---

*Les matériaux composites présentent en générale de nombreuses interfaces de natures variées. L'importance du rôle mécanique de l'interface dans les phénomènes de renforcement et de rupture (transfert de charge), justifie sa prise en considération comme troisième constituant des composites en plus de la fibre et de la matrice. Le problème réside en effet dans le fait que la notion d'interface est relativement floue. En raison d'une influence prépondérante de la liaison fibre/matrice sur le comportement mécanique du matériau.*

---

## 2.1. Introduction

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 (figure 2.1).



*Figure 2.1. 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.

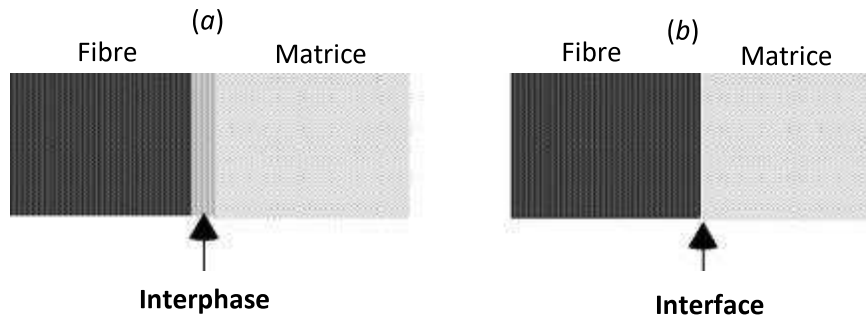
A l'échelle macroscopique l'interface est une surface sans épaisseur qui peut être classée en deux groupes :

- 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) [Dje06].

## 2.2. 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  $\mu m$ ) 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. La figure II.2.a présente le concept d'interphase et II.2.b d'interface [Lou01].



*Figure 2.2. Concept de l'interphase (a) et l'interface (b) [Lou01]*

### 2.3. Rôle des interfaces

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

- 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) [Rey90].

### 2.4. Mouillabilité et adhésion

#### 2.4.1. Qualité d'adhésion de l'interface (fibre/matrice)

##### - Interface fibre/matrice très forte (interface liée)

L'adhésion entre la fibre et la matrice est parfaite et la déformation des deux constituants est élastique. Il n'y a aucun déplacement relatif entre la fibre et la matrice, et donc le transfert s'effectue par l'intermédiaire d'une forte contrainte de cisaillement dont la matrice voit la relation 2.1, dont l'intensité décroît lorsqu'on s'éloigne rapidement de la fibre et de la discontinuité.

$$\tau = \tau_i \frac{R_f}{r} \quad (2.1)$$

Où

$R_f$  : Le rayon de la fibre

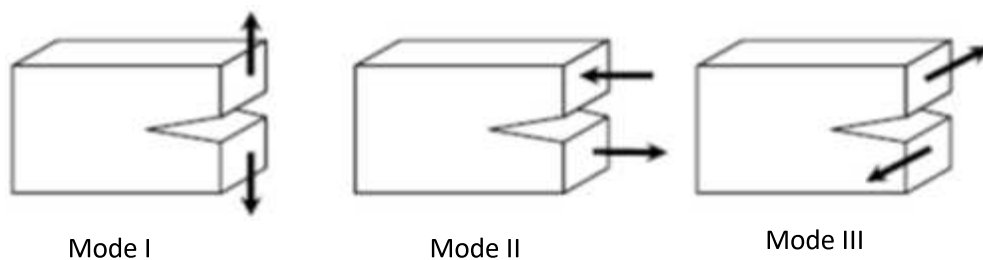
$\tau_i$  : La contrainte de cisaillement à l'interface fibre/matrice

Ou ( $r = R_f$ )  $r$  : la distance radiale à partir du centre de la fibre.

Dans la matrice les fissures peuvent se propager de différente façon, qui correspondent à des modes de propagation des fissures dans les matériaux.

Dans ce cas-là, une fissure se propageant en mode I (ouverture) dans la matrice se propagera de la fibre également en mode I, sans consommation d'énergie importante. Il en suit une rupture prématurée de la fibre, qui ne peut jouer son rôle de renfort. Ce type de matériau possède un comportement fragile.

A l'échelle de la fibre, le mode I, dit le mode ouverture, constitue le cas le plus critique, puisqu'il est responsable de la rupture catastrophique des composites. Le mode II (le mode de glissement droit), est la situation recherchée dans la déviation de fissure, avec le mode III (glissement vis). En règle générale, la progression de la fissure est en mode mixte combinant le mode I et les deux autres modes (II et III). La consommation d'énergie dans ce cas est plus importante. Ces critères sont généralement obtenus avec des interphases à structure lamellaire, que l'on trouve avec le pyrocarbone et le nitrure de bore hexagonal. Dans la figure (2.3) en représente les trois modes de fissuration cite dans ce paragraphe.



**Figure 2.3. Mode de fissuration**

#### - Interface fibre/ matrice très faible (non liée)

Dans le cas des liaisons fibre/matrice faibles, les modèles supposent que les fibres et la matrice ne sont pas ou plus physiquement liées sur une certaine distance, et le déplacement relatif entre les deux se fait avec un frottement inter-facial constant. Dans le cas des composites à matrice céramique, l'intensité de cette contrainte ( $\tau^*$ ) résulte de la superposition de plusieurs phénomènes intervenant à l'interface fibre/matrice, et peut s'écrire de la façon suivante :

$$\tau^* = \tau_0 + \mu(\sigma_i^{TH} + \sigma_i^p) \quad (2.2)$$

Où

$\tau_0$  : Constante associée à la rugosité de la fibre ;

$\mu$  : Coefficient de frottement de Coulomb-Amontons ;

$\mu\sigma_i^{TH}$  : Contribution constante apportée par la contrainte résiduelle radiale dans l'hypothèse où la fibre est frettée thermiquement par la matrice ( $\sigma_i^{TH} < 0$ );

$\mu\sigma_i^p$  : Un terme dépendant du rapport des coefficients de poisson de la fibre et de la matrice.

Lorsqu'une contrainte de traction est appliquée sur une fibre selon son axe, la valeur de  $\tau$  augmente et atteint une valeur limite,  $\tau^*$ , qu'est considérée ensuite constante :  $\tau = \tau^*$ , on peut observer un déplacement relatif de la fibre dans la matrice.

La contrainte limite de cisaillement fibre/matrice,  $\tau^*$ , est représentative d'un frottement de Coulomb. Dans ce cas, le profil de la contrainte longitudinale croît (ou décroît) linéairement à partir du point de rupture de la fibre (ou de la matrice) sur une distance de  $d/2$ .

Une fissure matricielle est déviée en mode II (glissement droit) à l'interface fibre/matrice, et le renfort, non rompu, supporte seule la charge appliquée au droit de la fissure matricielle.

#### - Interface fibre/ matrice intermédiaire (faible)

Dans le cas d'une force de liaison fibre/matrice intermédiaire, le composite présente un comportement dit pseudo-ductile, provenant de la multi-fissuration progressive de la matrice et du transfert des efforts des zones rompues vers des zones plus rigides. La rigidité du matériau diminue progressivement au cours de la sollicitation. Ce type de comportement permet au composite d'avoir une contrainte à la rupture plus élevée que dans les deux cas précédents. Ce dernier cas est bien entendu celui souhaité pour un composite optimal [Rey90].

### 2.4.2. Mouillabilité

Les paramètres responsables de l'adhésion sont nombreux et ont des origines très différentes, ils se répartissent en trois classes :

- Ceux concernant le renfort (nature et composition du renfort, influence du taux et de la taille du renfort) ;
- Ceux concernant la matrice ;

- et enfin ceux relatifs à l'interface (épaisseur, forces inter-faciales renfort –matrice, mouillabilité du renfort par la matrice, influence des impuretés).

Au cours de la fabrication du matériau composite, la matrice est très souvent présente à l'état liquide. L'adhésion du renfort et de la matrice dépend alors de la mouillabilité.

On définit la condition de mouillabilité complète d'une goutte liquide sur un substrat par :

$$\gamma_{LS} + \gamma_{LV} = \gamma_{SV} \quad (2.3)$$

Où  $\gamma$  est la tension de surface.

Si  $\theta$  est l'angle de la goutte avec la surface solide, l'équilibre des forces est donné par :

$$\gamma_{LS} + \gamma_{LV} \cos \theta = \gamma_{SV} \quad (2.4)$$

Soit :

$$\theta = \cos^{-1} \left| \frac{\gamma_{SV} - \gamma_{LS}}{\gamma_{LV}} \right| \quad (2.5)$$

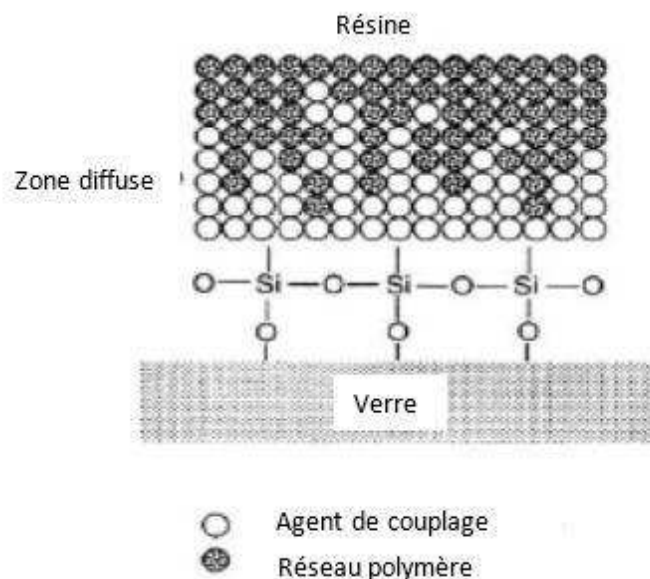
Dans le cas où  $\theta=180$  et  $\theta=0$ , le mouillage est respectivement réputé nul et par fait entre ces deux valeurs extrêmes, la mouillabilité est définie par l'angle  $\theta$ .

La bonne mouillabilité de la fibre est généralement obtenue par le traitement de surface (agents de couplage, ensimage, dépôt) [WB91].

## 2.5. Modèles d'adhésion

### 2.5.1. Aspects chimiques

Le modèle de la liaison chimique postule la formation de liaisons covalentes entre le renfort et la matrice. Ce modèle est celui généralement adopté pour expliquer le mécanisme d'action des agents de couplage tels les titanates ou les silanes. Par exemple, l'ensimage modifie chimiquement la surface des fibres de verre, ce qui facilite la formation de liaison chimiques avec la matrice (Figure 2.4).



**Figure 2.4. Ensimage de la fibre de verre par dépôt de silane.**

Dans le cas des fibres de carbone, l'organisation des atomes est primordiale pour assurer de bonnes liaisons chimiques. Ceux-ci doivent être orientés dans le sens radial de la fibre, afin de créer des liaisons avec la matrice organique. Pour ce faire, un traitement de surface, par attaque chimique ou par oxydation, est pratiqué sur les fibres afin d'organiser les atomes de carbone.

Par ailleurs, à température suffisamment élevée (1500°C), la plupart des fibres minérales réagissent chimiquement avec la matrice métallique, aux dépens de leur pouvoir renforçant. Il y a incompatibilité thermodynamique.

Pour certains composites, notamment les composites à matrice métalliques, l'adhésion résulte de la couche de diffusion créée à l'interface renfort/matrice. En effet, lors de l'élaboration, il y a inter diffusion entre les atomes et les molécules des plans superficiels, créant ainsi une couche forte couche de transition entre les deux matériaux. Pour ce faire, les fibres peuvent être modifiées par greffage, enrobage ou revêtement (afin d'améliorer ou de limiter les réactions chimiques et les phénomènes de diffusion) : les fibres de bore, lorsqu'elles sont noyées dans une matrice métallique liquide, sont préalablement recouvertes d'un revêtement de carbure de bore (B<sub>4</sub>C) ou de silicium (SiC), afin d'assurer la compatibilité chimique à haute température et d'éviter ainsi des réactions chimiques qui dégradent les propriétés des fibres.

### 2.5.2. Aspects physiques

Pour une adhésion correcte, le modèle le plus général est le modèle de l'absorption thermodynamique, concernant l'étude de la mouillabilité des solides. En effet, une bonne adhésion ne saurait être obtenue que s'il existe un contact intime entre les matériaux destinés à être assemblés. L'adhésion devient donc un critère de mouillabilité. Ainsi, des corrélations entre les caractéristiques mouillages telles que l'angle de contact ou les énergies superficielles et interface renfort/matrice et les performances des composites, sont-elles utilisées.

Un autre modèle, celui de la couche inter-faciale de faible cohésion, propose un système de deux solides adhérents ne puis donner lieu à une rupture apparemment interfaciale que dans la mesure où le joint « impropre », c'est-à-dire lorsqu'il existe à l'interface une couche de plus faible cohésion, par exemple de l'air occlus ou des impuretés. La conséquence immédiate de ce modèle est qu'un joint « propre » ne peut se rompre que de manière cohésive et que les performances d'un composite ne dépendraient pas de la nature de la liaison de l'interface. De manière générale, les couches de faible cohésion proviennent d'un mauvais mouillage.

### 2.5.3. Aspects mécaniques

Le modèle mécanique fait appel à un phénomène d'accrochage, d'ancrage mécanique de la matrice dans les pores et aspérités du renfort après solidification. Des relations quantitatives montrent que l'adhésion d'un composite est directement proportionnelle, toutes choses égales par ailleurs, à la rugosité du renfort. Dans le cas d'une composite fibre de graphite/résine époxy, un accroissement de la rugosité de la fibre par oxydation se traduit par une augmentation des caractéristiques mécaniques du composite.

Dans le cas des composites à matrice métallique, de nombreuses fibres minérales sont mal mouillées par les métaux liquides, ce qui rend difficile l'élaboration de ceux-ci par voie d'infiltration liquide. C'est le cas, par exemple, des fibres de carbone qui subissent un traitement de surface assez complexe (immersion dans du sodium puis de l'étain liquide, dépôt chimique en phase vapeur, traitement par des métaux à l'état colloïdal) pour être mouillées par aluminium liquide.

Dans le cas où le liquide (résine ou prépolymère par exemple en fusion) n'est pas capable de pénétrer dans les interstices du substrat, il y a création de porosités inter-faciales pouvant constituer des amorces de rupture.

Après l'examen des différents modèles de l'adhésion, on peut conclure que le principal critère de formation d'une interface est un critère de mouillabilité du renfort, les phénomènes ultérieurs de diffusion, d'attraction électrique, de formation de liaisons chimiques pouvant être considérés comme les conséquences plus ou moins importantes et efficaces d'un contact intime entre le renfort et la matrice [WB91].

## 2.6. Contraintes à l'interface

La différence des coefficients thermoélastiques entre la fibre et la matrice provoque des contraintes locales à l'interface, si l'on admet qu'il y a continuité des déformations (interface intacte, parfaitement liée, sans décollement, fissure porosité). L'interface est donc le siège de contraintes résiduelles, fonctions de la différence des coefficients de dilatation et de l'écart entre la température d'élaboration et la température de référence.

Pour  $E_f > E_m$  et  $\alpha_f > \alpha_m$ , la fibre est comprimée par la matrice de façon axial et radiale. La contrainte radiale  $\sigma_R$  est donnée approximativement par :

$$\sigma_R = E_m \times \Delta T \times \Delta \alpha \quad (2.6)$$

Avec

$E_f$  : Le module de Young de la fibre ;

$E_m$  : Le module de Young de la matrice ;

$\alpha_f$  : Le coefficient de dilatation de la fibre ;

$\alpha_m$  : Le coefficient de dilatation de la matrice ;

$\Delta \alpha$  : La différence des coefficients de dilatation entre fibre et matrice ;

$\Delta T$  : l'écart entre la température du moulage et ambiance.

Dans le cas du carbone ou du verre entouré de résine, est de l'ordre de la moitié de la résistance à la rupture.

La contrainte axiale peut provoquer, dans le pire des cas, un micro-flambage voire même la rupture de la fibre après retour à l'ambiante. Ces contraintes résiduelles et éventuellement, celles ayant pour l'origine un retrait de la matrice ou son gonflement (dû à l'humidité) vont se superposer au chargement en service.

## 2.7. Essais micromécaniques

### 2.7.1. Test de Mc Garry

Une fibre est immergée dans une éprouvette profilée. Par le jeu des coefficients de poisson, une compression sur l'éprouvette engendre un effet de traction entre fibre et matrice. Un calcul analytique donne la contrainte de traction inter-faciale :

$$\sigma = \frac{\varepsilon_x \cdot (v_m \cdot v_f) \cdot E_m \cdot E_f}{(1 + v_m)E_f + (1 - v_f - v_f^2)E_m} \quad (2.7)$$

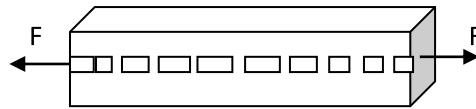
Ou :

$v_f$  et  $v_m$  : les coefficients de poisson respectifs de la fibre et de la matrice,

$\varepsilon_x$  : La déformation de l'éprouvette en compression au moment où le décollement s'amorce.

### 2.7.2. Test de Broutman (fragmentation)

Une fibre est immergée dans une éprouvette parallélépipédique. Cette éprouvette subit une compression. La rupture s'amorce à l'extrémité de la fibre et se propage sur une longueur critique  $l_c$  à vitesse constante. La vitesse de propagation croît ensuite brusquement. On détermine la charge en compression au moment critique (Figure 2.5).



*Figure 2.5. Eprouvette de fragmentation en traction de Broutman*

On vérifie le modèle de Cox. La valeur moyenne de la contrainte de cisaillement est alors donnée par :

$$\tau = \frac{\sigma_{fr} \cdot r_f}{l_c} \quad (2.8)$$

Où

$r_f$  : est le rayon de la fibre ;

$\sigma_{fr}$  : est la contrainte de traction à rupture de la fibre,

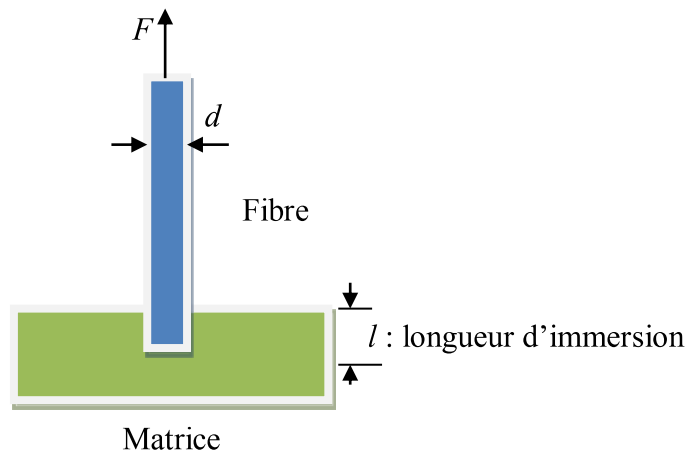
On détermine  $l_c$  :

- par comptage en microscopie optique, si la matrice est transparente ;
- par comptage après pyrolyse de la matrice, si elle est opaque [Wei91].

### 2.7.3. Test de déchaussement

C'est une méthode qui a beaucoup été utilisée. La contrainte moyenne de cisaillement à l'interface fibre/matrice est donnée par la formule suivante (Figure 2.6) :

$$\sigma = \frac{F}{\pi dl} \quad (2.9)$$



*Figure 2.6. Test de déchaussement d'une micro-épreuve de matrice (pull-out)*

### 2.7.4. Test de micro-indentation

La fibre est directement soumise à un effort de compression. Cet essai est intéressant, car il peut s'effectuer sur le composite unidirectionnel final. Mais il faut respecter certaines conditions :

- coupe bien perpendiculaire aux fibres ;
- nécessité d'un appareillage spécifique.

## **2.8. Conclusion**

Le comportement des interfaces dépend de la nature et de la structure des interphases présentes entre fibre et matrice, La représentation fidèle de cette dernière est déjà un problème mathématique délicat ; certaines études s'y attachent. Mais cette interface joue un rôle conséquent sur les performances (en particulier à la rupture) des composites. Le rôle de l'interface est d'autant plus fondamental qu'un composite est un matériau possédant des défauts.

D'un point de vue industriel, cette optimisation doit être réalisée non seulement vis-à-vis des performances respectives de la fibre et de la matrice, mais encore vis-à-vis du procédé d'élaboration utilisé, pour limiter les défauts potentiels de mise en œuvre. Et l'accumulation des mécanismes d'endommagement qui coexistent généralement dans le composite et qui conduisent à la rupture finale du matériau font l'objet de chapitre 3.

## Bibliographies

- [Dje06] M. DJELIL. *Caractérisation mécanique et physicochimique de matériaux composites à matrice organique dans les prothèses*, Mémoire de magister (2006).
- [Lou01] Louis Berreur Bertrand de Maillard. *L'industrie française des matériaux composites, Etude stratégique réalisée par pour le compte de la DiGITIP / SIM*. Rév. 2 du 13 mai 2002 Stanislas Nösperger 17 décembre 2001
- [Rey90] Maurice REYNE. *Technologie des composites*, Edition HERMES, Paris, 1990
- [Wei91] Jean WEISS ET Claude BORD. *Les matériaux composites*, T1 et T2, Ed. de l'usine nouvelle 1991.

# Chapitre 3

## Modélisation de l'interface Fibre-Matrice

---

*La nécessité de développer et de valider des modèles de comportement des interfaces fibre/matrice, exige des mesures précises des propriétés de ces interfaces. Cependant, le degré de cette précision dépend fortement du type d'informations que l'on peut extraire à partir des moyens de caractérisation dont on dispose ; sont plus directs et simples dans le principe ces moyens, plus grandes seront les chances d'obtenir des résultats fiables de la réponse de l'interface à tel ou tel type de sollicitation mécanique. Plusieurs types d'essais s'imposent. Plusieurs techniques ont été développées pour la mesure directe du déplacement de la fibre en fonction de l'effort appliqué. La plupart de ces techniques utilisent des éprouvettes monofilamentaires.*

---

### 3.1. Introduction

L'effet de l'interface dans un composite a fait l'objet d'un grand nombre de travaux. Diverses méthodes d'évaluation des propriétés mécaniques de l'interface ont été mises en œuvre et nous pouvons les classer en deux catégories [Ibr06] :

➤ **Méthodes indirectes** : Elles consistent à solliciter un composite dans son ensemble et l'utilisation d'un modèle micromécanique est nécessaire pour déduire les caractéristiques de l'interface. Ces méthodes impliquent par exemple :

- la mesure de la distance entre microfissures ;
- la mesure de l'ouverture des fissures à la charge et décharge ;
- la mesure de la longueur de déchaussement ;
- l'analyse des cycles de charge/décharge.

➤ **Méthodes directes** : Elles consistent à solliciter une fibre unitaire dans son environnement composite ou dans un système supposé reproduire ses caractéristiques (composite modèle). L'exploitation des résultats est supposée conduire de manière directe au comportement de l'interface. Selon la méthode de sollicitation, on distingue :

- Le test déchaussement “ Pull-out ” (traction sur une seule fibre afin de l'extraire de sa gaine matricielle) ;
- Les tests d'indentation : l'indentation classique et le "push-out" et le "push-back" (Enfoncement d'une fibre afin de la faire glisser dans la matrice) ;
- Le test de fragmentation sur un composite monofilamentaire (le composite modèle est sollicité en traction), figure 3.1.a;
- Le test “slice” (compression d'un composite modèle entre deux plaques : inférieur rigide et supérieur ductile), Figure III.1.b.

Les tests micromécaniques les plus pratiques pour étudier l'interface fibre/matrice dans les composites sont le test d'extraction “ Pull-out ” et les tests d'indentation. Nous décrirons par la suite ces méthodes en détail.

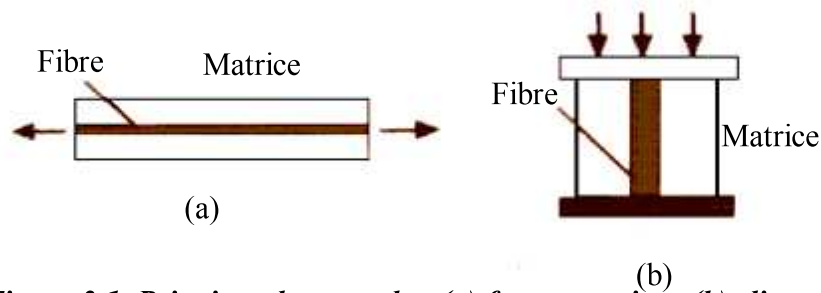


Figure 3.1. Principes des tests de : (a) fragmentation; (b) slice.

### 3.2. Approche micromécanique

L'approche micromécanique est généralement utilisée comme moyen au développement de traitements de surface des fibres visant à optimiser l'adhésion interfaciale. L'interface ayant un développement spatial réduit, son comportement est difficile à caractériser sur le composite global puisque la réponse est diluée (masquée par celle des constituants principaux). Des expériences ont cependant été conçues pour exalter cette réponse, expériences plus simples à analyser puisqu'elles se réalisent à l'échelle même de la fibre.

### 3.3. État de contrainte à l'interface

#### 3.3.1. Contraintes locales moyennes

La disparité des coefficients thermo-élastiques entre fibre et matrice fait de l'interface le siège de contraintes si l'on admet qu'il y a continuité des déformations (interface intacte, parfaitement liée, sans décollement ou fissure). Le calcul de ces contraintes pour une fibre ou une particule entourée d'un volume infini de matrice se fait facilement pour des géométries axisymétriques ou planes. À l'état initial, avant application de tout chargement extérieur, des contraintes résiduelles sont présentes, fonctions de la différence des coefficients de dilatation et de l'écart entre la température d'élaboration et la température de référence :

pour  $E_f > E_m$  et  $\alpha_f < \alpha_m$ , la fibre est comprimée par la matrice, radialement et axialement.

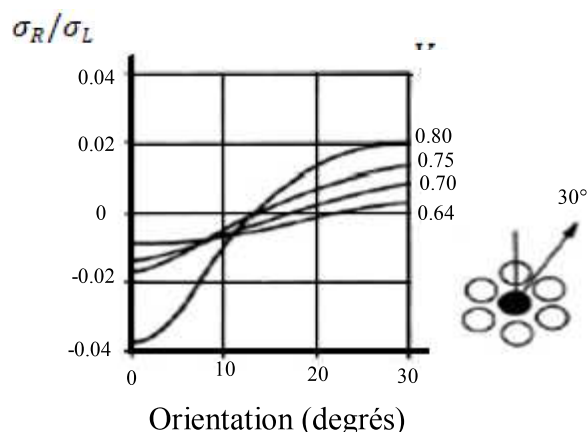
Un calcul simple montre que la contrainte radiale autour d'une fibre unique infiniment rigide atteint un maximum lorsqu'elle est entourée d'un cylindre de matrice 20 fois plus grand, et qu'elle est donné approximativement par :

$$\sigma_R \approx E_m \Delta T \Delta \alpha$$

Avec  $E_m$  : module d'élasticité de la matrice,  
 $\Delta T$  : écart entre la température du moulage et la température ambiante,  
 $\Delta \alpha$  : différence des coefficients de dilatation entre fibre et matrice.

Dans le cas du carbone ou du verre entouré de résine,  $\sigma_R$  est de l'ordre de la moitié de la résistance à rupture de la résine. Le retrait thermique s'exerce également dans le sens long puisque l'interface est censée avoir acquis pendant le chauffage une solidité suffisante.

Le calcul des contraintes à l'interface a d'abord été fait analytiquement et certaines vérifications sont effectuées à l'aide de modèles macroscopiques photoélastiques. Un résultat de calcul est donné sur la figure 2.2 pour une traction exercée suivant le sens des fibres disposées en arrangement hexagonal [Bro74].



**Figure 3.2. Rapport de la contrainte radiale à la contrainte longitudinale appliquée pour une fibre entourée de 6 voisines plus ou moins proches ( $V_p$ ) : on passe d'un état de compression à un état de traction selon la direction observée.**

On voit que, suivant la direction  $\theta$  autour de la fibre centrale, le signe du rapport de la contrainte radiale  $\sigma_R$  à la contrainte longitudinale appliquée  $\sigma_L$  change : c'est encore une compression dans la direction des fibres les plus proches mais c'est une traction suivant la direction à 30°. La prise en compte des contraintes résiduelles d'origine thermique ne fait qu'accentuer cette dissymétrie.

Les conclusions tirées de la figure 2.2 prévoient que la probabilité d'une rupture de l'interface est nulle en traction longitudinale, faible en traction transversale et élevée en cisaillement. Les analyses par éléments finis sont venues confirmer plus récemment ces calculs.

### 3.3.2. Contraintes aux extrémités (transfert de charge)

L'interface est le siège de transfert de charge entre la fibre et la matrice. Ce transfert de charge est bien entendu largement conditionné par la réponse mécanique de la zone de contact entre la fibre et la matrice. C'est cette transmission de charge qui permet au composite de remplir pleinement sa fonction mécanique.

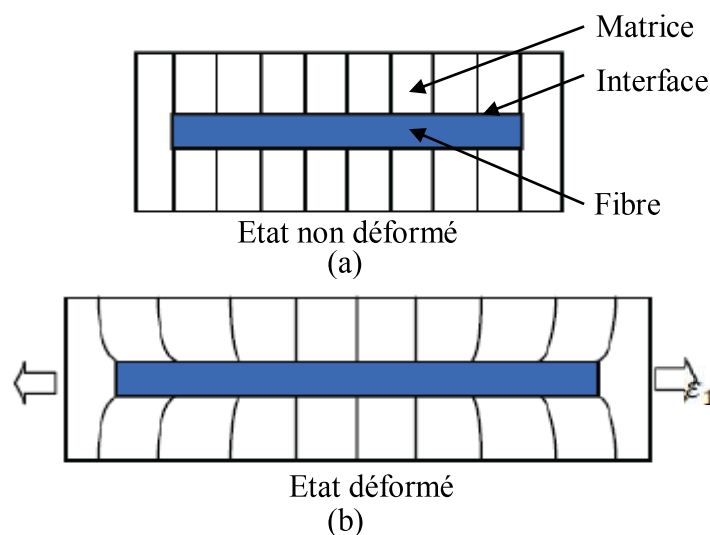
Il est possible de décrire les processus de transfert de charge par des modèles micromécaniques simplifiés considérant, par exemple, un V.E.R. (Volume Élémentaire Représentatif) constitué d'une fibre noyée dans un cylindre de matrice sur lequel est appliqué une contrainte de traction.

En fonction du comportement supposé de l'interface, différentes réponses peuvent être simulées. Trois modèles pionniers dans ce domaine, ceux de Cox (1952) et de Kelly-Tyson (1964) et celui mixte [Kel64].

### 3.3.2.1. Modèle de Cox ; Transfert de charge élastique

On considère le V.E.R (figure 3.3) 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  $\varepsilon_l$ . 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 est parfaite.



**Figure 3.3. Volume élémentaire représentatif**

**-(a) sans chargement - (b) chargé**

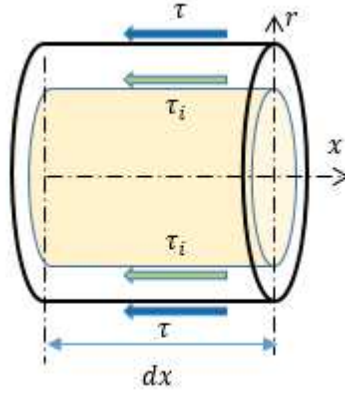
### 3.3.2.2. Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface :

#### a) Equilibre des forces de cisaillement :

On écrit que les forces de cisaillement générées dans la matrice à une distance ( $r$ ) de l'axe de la fibre ( $r > a$ ) sont équilibrées par la force de cisaillement à l'interface ( $r = a$ ) (figure 3.4) soit :

$$2\pi r \tau_m dx = 2\pi a \tau_i dx \quad (3.1)$$

Où  $\tau_i$  est la contrainte de cisaillement à l'interface.



**Figure 3.4. Equilibre élastique de la matrice en cisaillement**

La contrainte de cisaillement dans la matrice est donnée par :

$$\tau_m = \frac{a \tau_i}{r} \quad (3.2)$$

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

$$\gamma = \frac{dw}{dr} = \frac{\tau_m}{G_m} = \frac{a \tau_i}{G_m r} \quad (3.3)$$

Avec :

$w$  : le déplacement de la matrice selon la direction  $x$ .

$G_m$  : Module de cisaillement de la matrice.

Par intégration, on obtient une expression de la contrainte interfaciale en fonction du déplacement de la matrice en  $r = a(w_a)$  et  $r = R(w_R)$  :

$$\int_a^R dw = \frac{a \tau_i}{G_m} \int_a^R \frac{dr}{r} \quad (3.4)$$

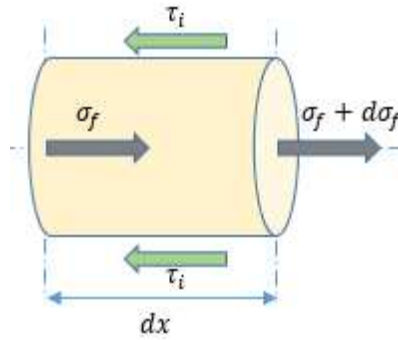
$$w_R - w_a = \frac{a \tau_i}{G_m} \ln\left(\frac{R}{a}\right)$$

Soit :

$$\tau_i = \frac{G_m (w_R - w_a)}{a \ln\left(\frac{R}{a}\right)} \quad (3.5)$$

**b) Equilibre des contraintes dans une portion  $dx$  de la fibre :**

On considère une portion de fibre en équilibre représenté par la figure 3.5 :



*Figure 3.5. Équilibre élastique dans une portion de la 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:

$$\pi a^2 d\sigma_f = -2\pi a \tau_i dx \quad (3.6)$$

D'où :

$$\frac{d\sigma_f}{dx} = -\frac{2r_i}{a} \quad (3.7)$$

Ce qui permet d'écrire :

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = -\frac{2}{a} \cdot \frac{dr_i}{dx} \quad (3.8)$$

D'après l'équation (3.5), on obtient :

$$\frac{dr_i}{dx} = \frac{G_m}{a \cdot \ln\left(\frac{r}{a}\right)} \left( \frac{dw_R}{dx} - \frac{dw_a}{dx} \right) \quad (3.9)$$

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

$$\frac{dw_R}{dx} = \varepsilon_m = \varepsilon_l \quad (3.10)$$

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

$$\frac{dw_a}{dx} = \varepsilon_f = \frac{\sigma_f}{E_f} \quad (3.11)$$

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

$$\frac{d^2 \sigma_f}{dx^2} = \frac{\beta^2}{a^2} (\sigma_f - E_f \varepsilon_l) \quad (3.12)$$

Avec :

$$\beta^2 = \frac{2G_m}{E_f \cdot \ln\left(\frac{R}{a}\right)} \quad (3.13)$$

Supposant la contrainte  $\sigma_f$  nulle aux extrémités de la fibre en  $(x = -L)$  et  $(x = L)$  , il est possible de résoudre l'équation différentielle (3.4). On obtient les solutions suivantes :

*Contrainte axiale dans la fibre :*

$$\sigma_f = E_f \varepsilon_l \left\{ 1 - \frac{\cosh\left(\frac{\beta x}{a}\right)}{\cosh(\beta s)} \right\} \quad (3.14)$$

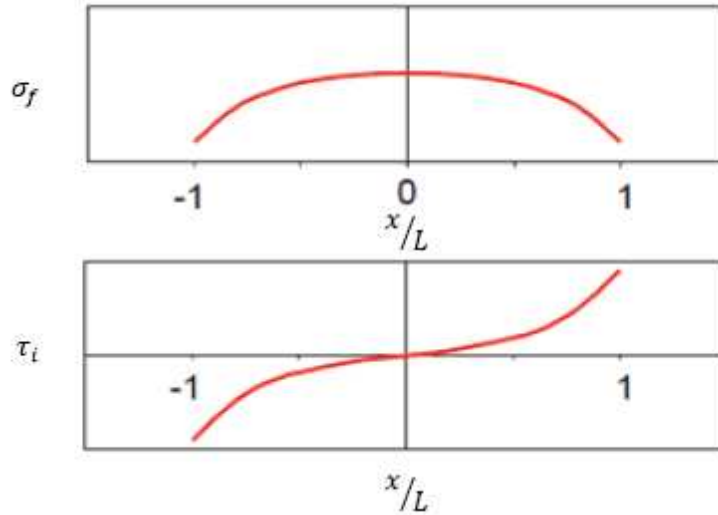
*Contrainte de cisaillement à l'interface :*

$$\tau_i = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_l \left\{ \frac{\sinh\left(\frac{\beta x}{a}\right)}{\cosh(\beta s)} \right\} \quad (3.15)$$

Où  $s = \frac{L}{a}$  est le rapport d'aspect de la fibre

$$\tau_i = \frac{1}{2} \beta E_f \varepsilon_l \left\{ \frac{\sinh\left(\frac{\beta x}{a}\right)}{\cosh\left(\frac{\beta L}{a}\right)} \right\} \quad (3.16)$$

Les profils de contrainte correspondant aux équations de contrainte axiale dans la fibre et contrainte de cisaillement à l'interface sont représentés sur la figure 3.6 suivante :



**Figure 3.6. Modèle de Cox : Profils de contrainte dans la fibre  $\sigma_f$  et à interface  $\tau_i$**

Le développement de contraintes de cisaillement aux extrémités du fragment de fibre sur le schéma 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 [Cox52].

Cette note décrit les approches statistiques couramment employées pour décrire la rupture de renforts fibreux fragiles. Celles-ci sont appliquées au cas de la rupture d'un écheveau de fibres.

Pour une seule fibre entourée par la matrice, de nombreuses solutions analytiques ont été intéressant de voir l'influence du contrainte thermique sur les dégâts de l'interface proposés par Cox [Cox52], ce qui donne la forme de la contrainte de cisaillement le long de la longueur fibre suivante :

$$\tau = \frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta_l \operatorname{th} \left\{ \frac{\beta_l L}{2} \right\} \quad (3.17)$$

Pour simplifier les calculs, nous prenons :

$$\beta_l^2 = \frac{2G_m}{E_f \cdot r_f^2 \ln \left( \frac{R}{r_f} \right)} \quad (3.18)$$

Avec :

$G_m$  : Le module de cisaillement de la matrice,

$E_f$  : Le module de Young de la fibre,

$\varepsilon$  : La déformation,

- $a$  : Le rayon de la fibre,  
 $R$  : La distance entre les fibres,  
 $\tau$  : La contrainte de cisaillement de l'interface.

Ces variables relatives à des composants d'un matériau composite (fibre et matrice) sont toutes prises en représentant par la formule (3.17).

### 3.3.2.3. Modèle de Kelly-Tyson

Le modèle de Kelly-Tyson a initialement été développé dans le contexte de matériaux à matrice métallique pour lesquels des mécanismes de plasticité sont activés au voisinage de l'extrémité des fibres.

Le modèle de Cox montre que le transfert de charge conduit au développement de contraintes interfaciales de cisaillement dont l'amplitude est maximale aux extrémités de la fibre.

Dans la réalité, ces concentrations de contraintes sont limitées par le seuil de plasticité de la matrice ou la mise en glissement de l'interface. Par ailleurs, l'approche élastique n'est plus valable à partir du moment que la contrainte de traction dans la matrice excède sa limite d'élasticité. Ces phénomènes ont été mis initialement en évidence par Kelly et ses collaborateurs dans le cas de composites à matrice de cuivre renforcés par des fibres de Tungstène et de Molybdène. La très faible limite d'élasticité de la matrice se traduit alors, sous chargement de traction, par le développement précoce et progressif d'une zone de déformation plastique à partir des extrémités de la fibre.

#### - Profils de contrainte dans la fibre et à l'interface

Afin de décrire ces processus, Kelly et al [Rey97] ont considéré que la contrainte interfaciale était constante aux extrémités de la fibre, dans la zone plastique. L'écriture de l'équilibre élastique de la fibre dans cette portion de fibre donne :

$$\sigma_f = \frac{2\tau_i}{a}(L - x) \quad (3.19)$$

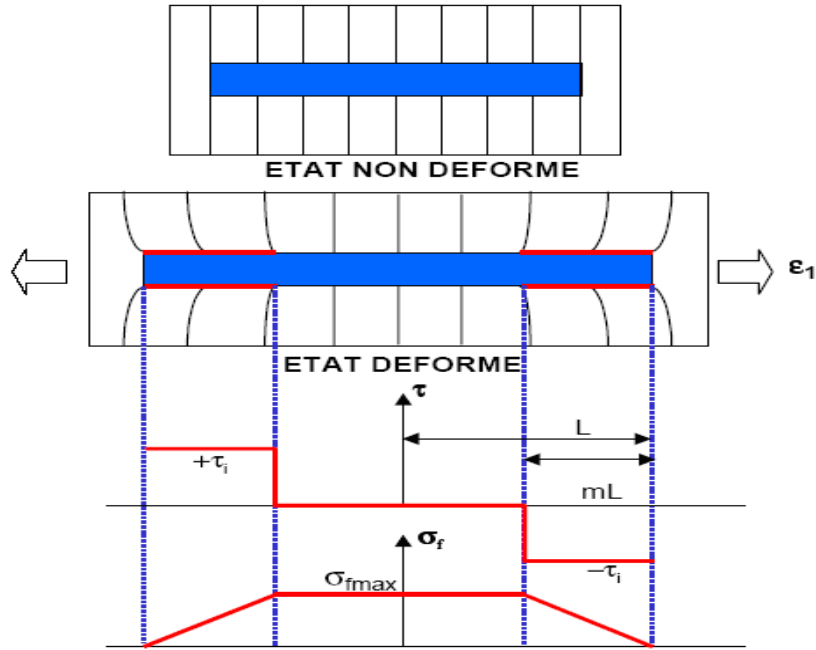
Cette relation s'applique également au cas où le mécanisme physique mis en jeu aux extrémités de la fibre correspond à un frottement à contrainte constante. En ce sens, l'utilisation du modèle de Kelly (Figure 3.7) peut être étendue aux composites à matrice élastique dans lesquels le renforcement s'effectue par glissement à l'interface.

La déformation dans la fibre ne peut excéder la déformation du composite, ce qui signifie que la contrainte  $\sigma_f$  augmente linéairement (Equation 3.19) à partir de l'extrémité de la fibre,

jusqu'à la valeur  $E_f \varepsilon_l$  si la fibre est suffisamment longue. Cette dernière condition correspond au critère suivant :

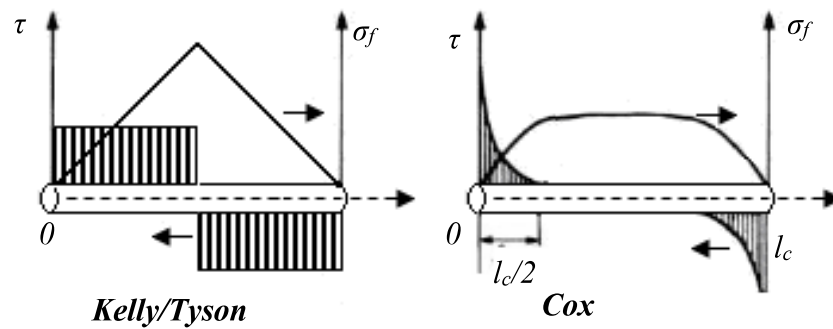
$$L_i \geq \frac{a E_f \varepsilon_l}{2\tau_i} \quad (3.20)$$

Où  $L_i$  est une longueur dite inefficace correspondant à la portion de fibre dans laquelle la contrainte de traction n'a pas encore atteint sa valeur maximale  $\sigma_{fmax} = E_f \varepsilon_l$ .



**Figure 3.7. Modèle de Kelly –Tyson.**

Il est important de noter que ce modèle prend seulement en compte le transfert de charge se produisant dans la zone plastique située aux extrémités de la fibre. Les effets de transfert de charge élastiques dans la portion centrale de la fibre sont par contre totalement négligés ( $\tau_i = 0$ ). Cette approche n'est valable que si le seuil de plasticité de la matrice (où le seuil de glissement à l'interface) est très bas. Dans ce cas, la déformation plastique (où le glissement) intervient dès le début de la mise en charge, sans phase de mise en charge élastique préalable.



**Figure 3.8. Modèles de Kelly/Tyson et de Cox des profils de contraintes de tension dans la fibre et de cisaillement à l'interface.**

L'analyse généralement adopté est celle de Kelly et Tyson [Rey97] qui considère que la contrainte de tension dans la fibre  $\tau(x)$  est linéairement croissante à partir des extrémités du fragment (Figure 3.8).

### 3.3.2.4. Modèle Mixte

Dans le modèle de Kelly, les effets de transfert de charge élastique sont totalement négligés, ce qui revient à considérer que la déformation plastique de la matrice, ou la mise en glissement de l'interface, interviennent à des déformations faibles. Dans la réalité, ces processus se produisent souvent après une phase de chargement élastique préalable qu'il convient de prendre en compte.

Dans le cas des composites à matrice polymère, la mise en glissement de l'interface se produit pour une valeur limite de la contrainte de cisaillement interfaciale,  $\tau_d$ , qui correspond physiquement à la décohésion fibre/matrice. Dans la zone de la fibre décollée, les processus de glissement dépendent de la valeur du coefficient de frottement fibre/matrice et des contraintes radiales appliquées sur la fibre.

Dans une telle situation, la valeur correspondante du cisaillement interfaciale,  $\tau_g$ , est très souvent inférieure à la valeur de la contrainte de décohésion  $\tau_d$ .

Afin de rendre compte de ces processus, on peut alors considérer un V.E.R (figure 3.9) dans lequel :

- La portion centrale de la fibre est soumise à un chargement élastique, la valeur du cisaillement interfacial étant limitée par la contrainte de décohésion  $\tau_d$ . Dans cette zone, nous écrivons exactement les mêmes équations d'équilibre élastique que celles introduites dans le modèle de Cox.

- Dès lors que  $\tau_i > \tau_d$ , on considère un glissement à contrainte constante  $\tau_g$ . Le transfert de charge dans cette zone s'effectue selon les hypothèses du modèle de Kelly.

La résolution des équations d'équilibre avec les conditions aux limites appropriées permet de calculer la relation contrainte/déformation suivante :

$$\sigma_l = [V_f E_f + V_m E_m] \varepsilon_l - \frac{V_f}{s} \left[ \frac{(E_f \varepsilon_l)^2 - (2\tau_d/n)^2}{4\tau_g} + \frac{2\tau_d}{n^2} \right] \quad (3.21)$$

Pour les faibles valeurs de  $\sigma$ , le deuxième terme du second membre de l'équation (3.21) induit une non linéarité dans la relation contrainte-déformation.

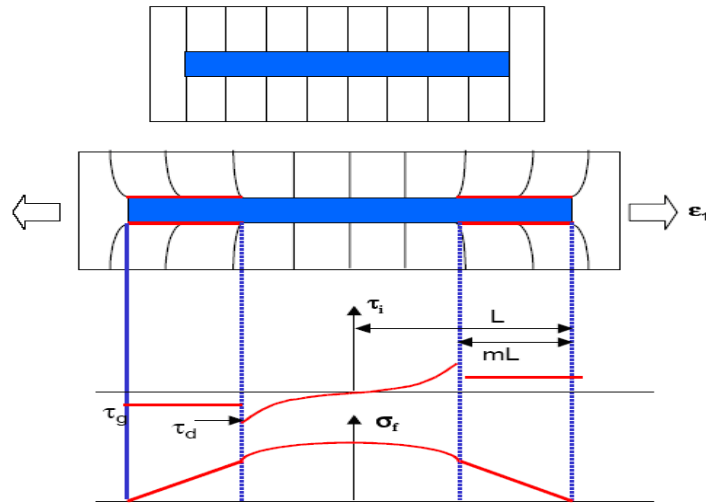


Figure 3.9. Modèle Mixte.

### 3.3.2.5. Statistique de Weibull

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

$$F(\sigma_i) = \int_0^{\sigma_i} f(\sigma) d\sigma \quad (3.22)$$

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

$$F(\sigma_r) = \int_0^{\sigma_r} f(\sigma) d\sigma = 1 \quad (3.23)$$

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

$$R = \prod_{i=1}^N (1 - F(\sigma_i)) \quad (3.24)$$

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

$$R = (1 - F(\sigma))^N \quad (3.25)$$

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

$$P_r(\sigma) = 1 - R = 1 - (1 - F(\sigma))^N \quad (3.26)$$

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

$$(1 - F(\sigma))^N = \exp(-NF(\sigma)) \quad (3.27)$$

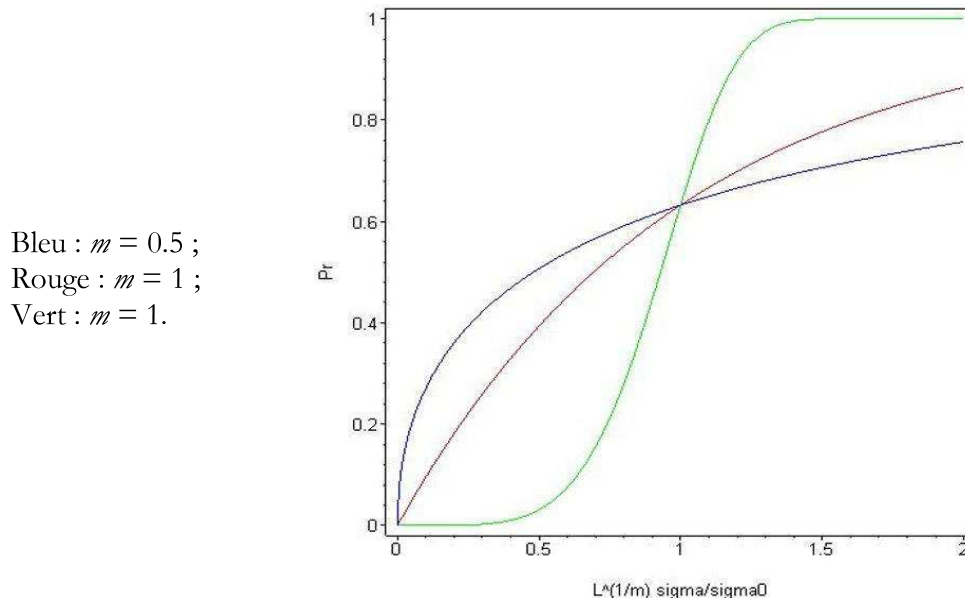
Le nombre de maillons est supposé proportionnel à la longueur  $L$  de la fibre, ce qui permet d'écrire  $NF(\sigma) = L\Phi(\sigma)$  où la fonction  $\Phi$  reste à déterminer. Weibull a proposé pour cette fonction la forme empirique suivante :

$$\Phi(\sigma) = \frac{(\sigma - \sigma_u)^m}{\sigma_0} ; \sigma > \sigma_u \quad (3.28)$$

$$\Phi(\sigma) = 0 ; \sigma \leq \sigma_u \quad (3.29)$$

Avec :

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



**Figure 3.10. Probabilité de rupture décrite par une statistique de Weibull**

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

$$P_r(\sigma) = 1 - \exp \left[ -L \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] \quad (3.30)$$

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

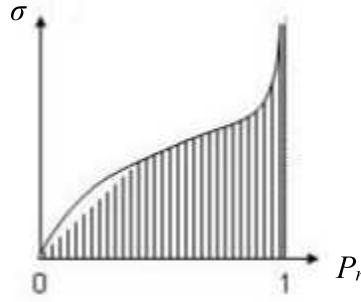
$$\bar{\sigma}_r = \int_0^l \sigma dP_r \quad (3.31)$$

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

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty (1 - P_r) d\sigma \quad (3.32)$$

Soit à partir de l'équation (3.30) :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^\infty \exp \left[ -L \left( \frac{\sigma}{\sigma_0} \right)^m \right] d\sigma \quad (3.33)$$



**Figure 3.11. Calcul de la contrainte moyenne de rupture**

On effectue les changements de variables suivants :

$$t = L \left( \frac{\sigma}{\sigma_m} \right)^m, \quad \sigma = \sigma_0 \left( \frac{t}{L} \right)^{1/m} \quad \text{et} \quad d\sigma = \frac{\sigma_0}{mL^{1/m}} t^{\frac{l-m}{m}} dt$$

L'équation (3.33) devient :

$$\bar{\sigma}_r = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{\frac{l-m}{m}} \frac{\sigma_0}{mL^{1/m}} dt \quad (3.34)$$

Soit :

$$\bar{\sigma}_r = \frac{\sigma_0}{L^{1/m}} \Gamma \left( 1 + \frac{l}{m} \right) \quad (3.35)$$

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

$$\Gamma = \int_0^{\infty} t^{z-1} e^{-t} dt \quad (3.36)$$

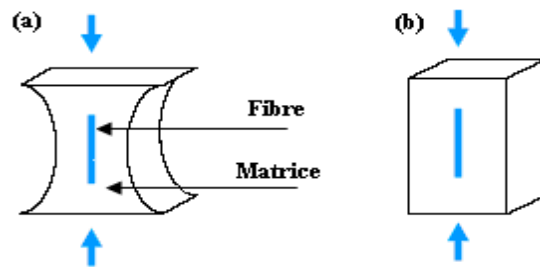
### 3.4. Analyse micromécanique sur composites modèles

Pour la détermination de la résistance d'interface, des tests micromécaniques permettent d'accéder localement à l'adhésion fibre/matrice. Il existe principalement quatre types d'essais sur éprouvettes modèles :

- Méthode de compression ;
- Méthode de fragmentation ;
- Micro-indentation ;
- Pull-out /microgoutte.

### 3.4.1. Essai de compression

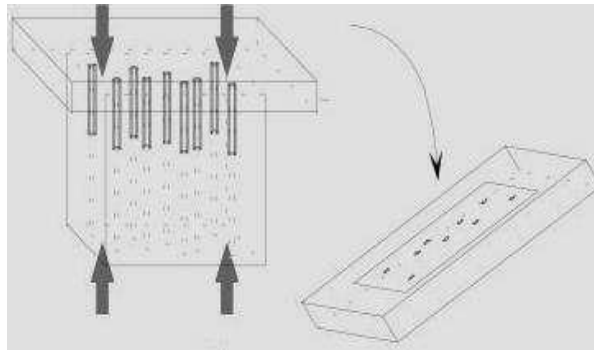
Cette méthode consiste à solliciter en compression des éprouvettes parallélépipédiques ou en forme d'haltères afin de déterminer la contrainte de compression  $\sigma_c$  pour laquelle un début de décohésion est détecté [Bro69]. Ce test sollicite à la fois les fibres et la matrice et interposer entre la surface du composite et les éléments de la machine de compression, une plaque métallique généralement en aluminium.



**Figure 3.12. Essai de compression a) test de MC Garry  
b) test de Broutman.**

La géométrie de l'échantillon ou la différence de coefficients de Poissons de la fibre et celui de la matrice et leurs rigidités engendrent des contraintes de cisaillement ou de traction à l'interface.

La décohésion aux interfaces est détectée soit au niveau de l'étranglement (Figure 3.12.a) [Bat05] soit au niveau des extrémités de la fibre et se propage sur une longueur critique  $L_c$  à vitesse constante qui croît ensuite brusquement (Figure 3.12.b) et s'amorce pendant le chargement. Si les fibres sont plus rigides que la matrice, la déformation de cette dernière est plus grande pendant le déplacement imposé de la traverse. Les fibres débordent de la matrice et laissent des empreintes sur la plaque métallique supposée parfaitement plastique (figure 3.13) [Cha98]. La profondeur de ces empreintes correspond au déplacement maximal des fibres pendant le chargement du composite, leur déplacement résiduel est mesuré directement sur le composite.



**Figure 3.13. Schémas de technique expérimentale de mesure de l'effort et du déplacement de la fibre sous sollicitation mécanique de compression.**

La détection de la décohésion est assurée optiquement au moyen d'une lampe (dans le cas des résines transparentes) ou par émission acoustique.

Le calcul de la résistance interfaciale en traction  $\sigma_{\perp}$  est réalisé par :

$$\sigma_{\perp} = \frac{\sigma_c (\nu_m - \nu_f) E_f}{(1 + \nu_m) E_f + (1 - \nu_f - 2\nu_f^2) E_m} \quad (3.37)$$

Le calcul de résistance interfaciale en cisaillement  $\tau_i$  est alors réalisé pour une éprouvette de dimension  $3,8 \times 1,3 \times 1,3$  :

$$\tau_i = 2,5 \sigma_c \quad (3.38)$$

Cette technique est utile notamment pour la caractérisation des composites de structure, du fait qu'elle ne nécessite pas d'éprouvettes de grandes dimensions pour les tests et actuellement peu utilisée en raison notamment des difficultés liées à la fabrication des éprouvettes et à l'application des critères d'endommagement en raison des effets de concentration de contraintes difficilement contrôlables. La mesure indirecte du déplacement des fibres rend ces essais difficiles à interpréter.

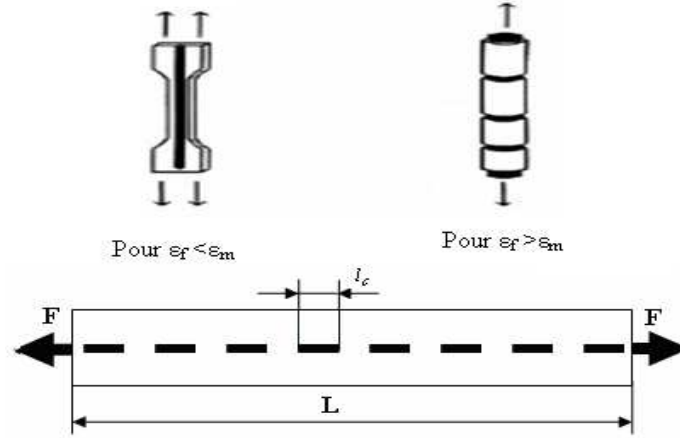
### 3.4.2. Essai de fragmentation

Cette méthode consiste à solliciter en traction une fibre unique totalement enchâssée dans une éprouvette de résine (Figure 3.14). La fibre subit de ruptures successives à chaque fois que sa résistance en traction est atteinte, et ce jusqu'à ce que les morceaux restants atteignent une longueur critique ne permettant plus au transfert de charge par cisaillement de générer des contraintes de traction égales à la résistance de la fibre [Rey97].

Ce test est efficace pour la détermination de la résistance de cisaillement de l'interface fibre/matrice surtout quand celle-ci est forte [Bat05], et la relation donnée par l'équation 3.39

$$\tau_i = \frac{\sigma_{fR}(l_c)d}{l_c} \quad (3.39)$$

Le calcul de cette résistance nécessite la détermination de deux termes  $\sigma_{fR}(l_c)$  et  $d/l_c$  auxquels il est possible d'accéder de différentes manières.



**Figure 3.14. Essai de fragmentation.**

La contrainte à la rupture d'une fibre  $\sigma_{fR}(l_c)$  peut être :

- Mesurée directement en utilisant une fibre de longueur  $l_c$ , qui est très délicat ;
- Déterminée par extrapolation à  $l=l_c$  des mesures obtenues pour différentes longueurs ;
- Approximée à partir de la distribution des résistances pour une longueur  $l$  donnée en appliquant la loi statique de Weibull.

Le facteur de forme  $d/l_c$  (diamètre / longueur critique de fibre) peut être :

- déterminé à partir de la distribution des longueurs en utilisant une loi de Weibull;
- calculé approximativement en utilisant la formule (3.40).

$$l_c = \frac{4}{3} \frac{L}{(N+1)} \quad (3.40)$$

Avec  $L$  longueur de l'éprouvette ;

$N$  nombre de rupture de la fibre.

On peut obtenir  $N$  et  $l$  par :

- par émission acoustique (une rupture = un événement acoustique d'où  $N$ );
- par microscopie à transmission en lumière polarisée (observation à travers une matrice transparente d'où  $N$  et  $l$ ) ;

Cette technique, relativement simple à mettre en œuvre, présente néanmoins l'inconvénient de ne pouvoir être utilisée qu'avec des matrices fortement déformables, ce qui est rarement le cas des résines commerciales [Fav89].

Dans le cas de systèmes verre/époxy, des problèmes de fissuration de la matrice et d'absence de décohésion interfaciale ont par exemple pu être constatés. Les propriétés des matrices n'ont conduit qu'à un nombre très limité de rupture de fibres dans la configuration classique du test de fragmentation. L'élongation à rupture de la matrice a pu être augmentée en portant les microcomposites à une température proche de la température de transition vitreuse du réseau. Cette méthode permet de disposer de matériaux aux propriétés modulables et peut être appliquée pour l'étude de systèmes à hautes performances pour lesquels la déformation à rupture de la matrice interdit généralement l'emploi du test de fragmentation [Zin99].

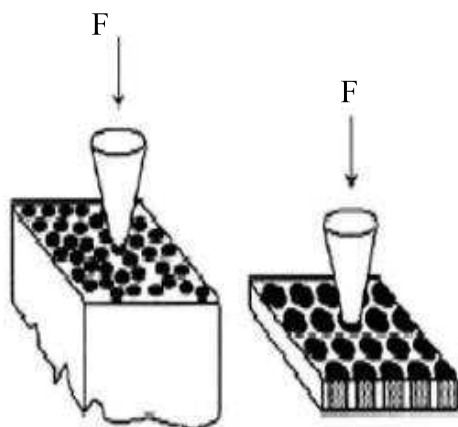
### 3.4.3. Essai de micro-indentation

#### - Principe et appareillage

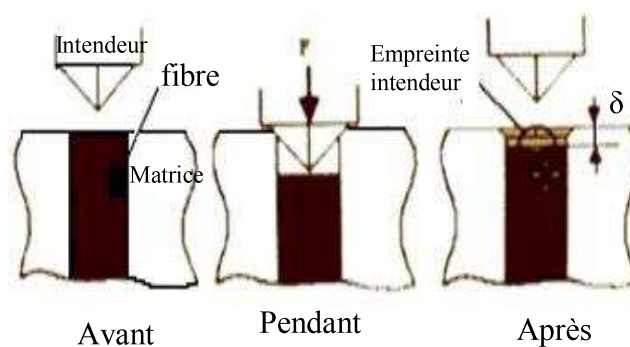
Cette essai est largement utilisé pour déterminer les deux propriétés mécanique de l'interface fibre-matrice, le coefficient de frottement et la contrainte radial résiduel d'après J. Ye , A. k. KAW [Ye99]. Comme il permet une mesure de la force de décohésion in situ sur composites réels (principalement unidirectionnels).

Cette méthode est actuellement dotée d'un processus de prise de mesure et d'acquisition de données totalement automatisé [Car89]. Elle nécessite le polissage d'échantillons de composites présentant des fibres perpendiculaires à la surface, et consiste à enfoncer, à l'aide d'un indenteur sur l'extrémité d'une fibre jusqu'à décohésion de la fibre de sa gaine de matrice (détection possible par émission acoustique), pour pouvoir accéder à une caractéristique de l'interface fibre/matrice. L'accostage final de l'indenteur dans la matrice environnante constituant un critère d'arrêt de l'essai.

La mesure de la contrainte de décohésion  $\sigma_d$  permet alors de déduire la résistance interfaciale au cisaillement  $\tau_i$  qui est une fonction assez complexe de  $\sigma_d$ , des caractéristiques élastiques  $G_m$  de la matrice et  $E_f$  de la fibre, du diamètre  $d$  de la fibre et de la distance inter fibres  $T_m$  (Figure 3.13 et 3.14) [Ibr06].



**Figure 3.15. Essai de micro indentation.**



**Figure 3.16. Schéma de l'essai d'indentation d'après MARSHALL, [1984].**

Le test micro-indentation est le plus proche de la réalité par ce que nous utilisons un produit fini qui intègre les paramètres de fabrication du matériau.

Le système de visée (microscope) est associé à une caméra, elle-même reliée à un écran de télévision, un magnétoscope et un vidéoprinter (obtention de photos par copie d'écran). Le grossissement s'avère nécessaire dès lors que l'on désire tester des fibres de faible diamètre. Ce système de visée permet de choisir précisément la fibre à indenter. Une fois ce choix établi, l'échantillon est déplacé sous l'indenteur grâce à un moteur pas à pas (Figure 3.17).

L'essai est réalisé à vitesse de déplacement de l'indenteur constante. Pendant le test d'indentation, l'effort et le déplacement de l'indenteur sont enregistrés au cours du temps, ce qui permet de tracer la courbe charge décharge associée à chaque essai (dit essai de microindentation instrumenté). Les vitesses d'indentation choisies lors des essais d'indentation sont 0,1 ou 0,2  $\mu\text{m/s}$  ; l'utilisation de faibles vitesses s'est révélée nécessaires pour limiter les effets d'impact susceptibles de provoquer une fracturation de la fibre. Après l'essai, un contrôle optique permet de s'assurer de la précision de la visée ainsi que d'un éventuel défibrage ou d'une fracturation de la fibre testée. Le succès des essais est également étroitement lié à la qualité du polissage des échantillons testés, un polissage inadapté nuisant au bon repérage des fibres et provoquant leur fragilisation préliminaire.

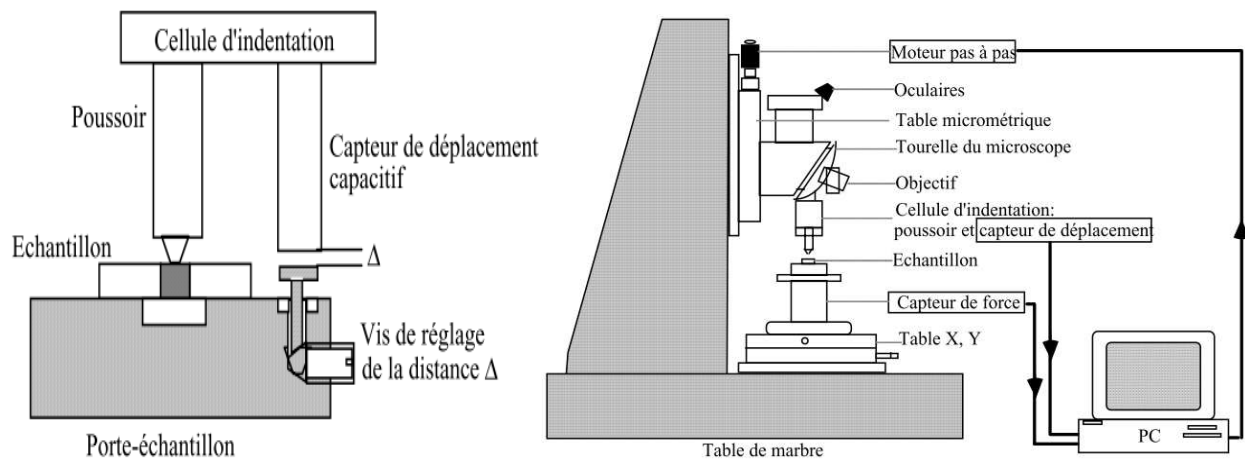


Figure 3. 17. dispositif de test de microindentation

### 3.4.4. Test de déchaussement

Le test de déchaussement (pull-out) est un essai de caractérisation micromécanique de l'adhésion interfaciale fibre/matrice. Il consiste à réaliser un essai de traction sur un monofilament partiellement enchâssé dans de la résine et à mesurer la force nécessaire pour extraire cette fibre de sa gaine de matrice. Différentes configurations de pull-out existent (Figure 3.18), la fibre pouvant être enchâssée soit dans une goutte de résine, soit dans un bouton de résine, soit encore, plus classiquement, dans un bloc de résine. Dans tous les cas, la résine est liée à la partie inférieure du dispositif de traction.

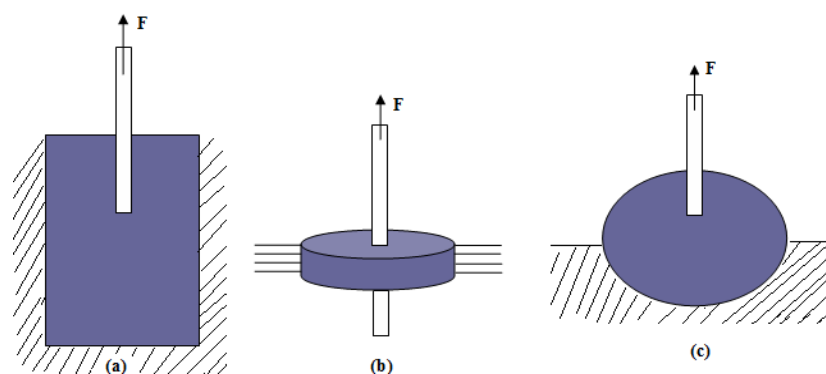


Figure 3.18. Différents configurations de pull-out : (a) Piggott 1986 (b) Favre 1981, (c) hampe 1990

La figure 3.19 présente une courbe typique obtenue lors d'un essai de déchaussement. Cette courbe montre la valeur de la force de défibrage ( $F_d$ ) avec une chute brutale de la force en fonction du déplacement. La force de défibrage est liée au phénomène de rupture à l'interface,

auquel succède une phase de frottement entre la fibre, décollée, et la matrice jusqu'à extraction totale de la fibre [You02].

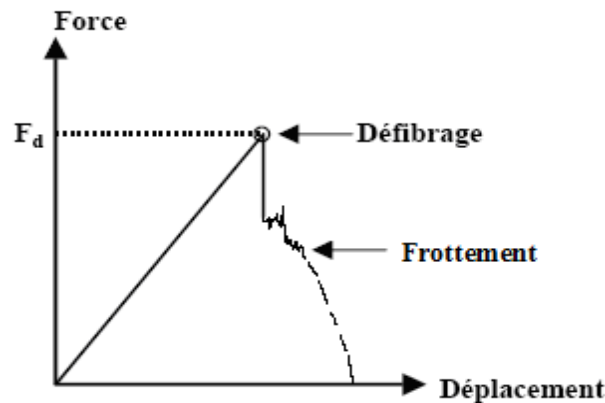


Figure 3.19. Essai de déchaussement en traction.

La force  $F_d$  est un paramètre important de l'essai, la longueur de la fibre enchâssée est notée  $L$ . Dans le cas de systèmes à forte adhésion interfaciale, cette longueur doit être suffisamment faible pour que la force nécessaire au défibrage reste inférieure à la force de rupture en traction de la fibre.

### 3.5. Les variables d'endommagement

Kachanov [Kac86] a été le premier à introduire la notion de variable interne d'endommagement pour traduire la perte de rigidité dans les matériaux isotropes.

Cette idée a été ensuite étendue aux cas des matériaux anisotropes par Cordebois et Sidoroff [Cor82].

Marigo [Mar81] définit l'endommagement local par un nombre infini de variables interne

$$d = (d_\alpha), \alpha = 1, \dots, n$$

Le maître Chaboche [Lem81] considère un solide endommagé dans lequel un élément de volume fini d'une entaille suffisamment grande par rapport aux hétérogénéités est défini comme suit :

- $S$  : aire de volume élémentaire représentatif repéré par sa norme  $n$ ,
- $S_e$  : aire résistance effective.

( $S_e < S$ ) et  $S_d$  : aire endommagée  $S_d = S - S_e$

La mesure mécanique de l'endommagement local relativement à  $n$  est alors caractérisé par  $d_n = S_d / S$

D'où

- si  $d_n = 0$  : le matériau se trouve dans un état vierge ou non endommagé ;
- si  $d_n = 1$  : l'élément de volume est rompu en deux parties selon le plan normal  $n$  ;
- si  $0 < d_n < 1$  :  $d_n$  caractérise l'état d'endommagement défini, le comportement élastique macroscopique du matériau endommagé peut être calculé en fonction de  $d_n$  par l'intermédiaire de la rigidité.

### 3.6. Conclusion

Pour parvenir à maîtriser l'interface, il faut également pouvoir disposer des moyens de contrôle et de mesure de ces caractéristiques. Certaines techniques existent déjà mais la connaissance précise de l'ensemble des paramètres interfaciaux est rarement obtenue, notamment en ce qui concerne les propriétés mécaniques. Outre l'amélioration de l'outil mathématique servant à modéliser le composite, la bonne prise en compte de l'interphase requiert sans nul doute l'amélioration des méthodes d'évaluation de ses propriétés.

Chacun de ces essais micromécaniques développés jusqu'à présent, a gardé une part de simplicité et des particularités spécifiques ; tels que le type de sollicitation, les dimensions, la nature des éprouvettes et les conditions aux limites des sollicitations. Ces tests permettent une étude qualitative de l'interface. En se basant sur ces tests, L'interface résistera pour des valeurs inférieures à la résistance interfaciale calculée mais la réalité montre que cette interface s'endommage à des valeurs très inférieure à ces valeurs, donc d'autres paramètres peuvent intervenir dans le cas des produits finis. Alors une étude expérimentale est nécessaire pour valider les résultats des modèles analytiques.

## Bibliographies

- [Bro74] BROUTMAN L.J ET KROCK R.h. *Composite Materials Vol6. Interfaces in polymer matrix composites*, Edité par E.P. PLUE DEMANN, Académie Press, New York, p 61 (1974).
- [Bat05] Claude Bathias et Coll . *Matériaux composites*. Dunod, Paris 2005
- [Bro69] BROUTMAN J.L. *Measurement of the fiber-polymer matrix interfacial strength (Mesure de la résistance interfaciale fibre matrice polymère), interface in composites*, ASTM.STP452, American society for Testing and Materials, (USA). 1969
- [Cha98] Hacène CHAROUALI . *Rôle des interphases et de rugosité dans le comportement interfacial de composite monofilamentaires a matrice fragile*. Thèse doctorat, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon (1998).
- [Cor82] J.-P. CORDEBOIS ET F. SIDOROFF. *Endommagement anisotrope en élasticité et plasticité*. J. de mécanique théorique et appliquée, Numéro spécial : p.45–60, 1982
- [Cox] Cox H.L. The elasticity and strength of paper and other fibrous materials. British journal of applied physics, 12 :72–79 (1952).
- [Car89] CALDWELL D.L., BABINGTON D.A. ET JOHNSON C.F.. *Interfacial bond strength determination in manufactured composites*, Congrès Interfacial Phenomena in Composite Materials (IPCM'89), Ed. J.Butterworths Publ, London 1989.
- [Fav89] FAVRE J.P. *Review of test methods and testing for assessment of fibre/matrix adhesion (Revue des méthodes d'essais et essais de qualification de l'adhésion fibre/matrice)*. Congrès Interfacial Phenomena in Composite Materials (IPCM'89), Publ, London sept 1989 .
- [Ibr06] IBRAHIM Mohamed Haisam. *Elaboration des matériaux composites modèles unifilaientaire à fibres longues et matrice silice sol-gel et caractérisation micromécaniques de l'interface*. Thèse de doctorat, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon (2006).
- [Kac86] Kachanov, L.M. (1986). *Introduction to Continuum Damage Mechanics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht.
- [Kel64] KELLY. A, Tyson W.R. *Fiber strengthened materials, in high strength material* , V.F, Zackay Ed, J. Wiley & Sons, London (1964).
- [Lem81] LEMMON E.C., “*Multidimensional integral phase change approximations for finite element conduction codes*”, in LEWIS R.W., MORGAN K., ZIENKIEWICZ O.C., Eds., Numerical Methods in Heat Transfer, John Wiley & Sons, p. 201–213, 1981.
- [Mar81] J.-J. Marigo “*Formulation d'une loi d'endommagement d'un matériau élastique* ”, Compte rendu Acad. Sc. 292 (1981), p. 1309-1312
- [Rey97] Pascal Reynaud ET Jean-François Gérard. *Interfaces dans les composites à fibres longues*, Edition HERMES, Paris 1997.
- [You02] Young Kuk Choi. *Réalisation et caractérisation de composites hydrides Verre/époxy/Ni-Ti adaptatifs*, Ecole centrale de Lyon, Juin 2002

- [Ye99] I. YE, A.K. Kaw. *Determination of mechanical properties of fiber-matrix interface from pushout test*. Mechanical Engineering, University of south Florida (1999).
- [Zin99] Philippe ZINCK. *De la caractérisation micromécanique du vieillissement hydrothermique des interphases polyépoxyde-fibre de verre au comportement du composite unidirectionnel. Relations entre les échelles micro et macro*. Thèse doctorat, Ecole Doctorale Matériaux de Lyon (1999).

# Chapitre 4

## Les algorithmes Meta Heuristiques

---

*Malgré les progrès considérables de l'outil informatique, les méthodes d'énumération, exhaustive ou partielle, sont encore peu satisfaisantes en temps d'exécution ou en efficacité. Comme les problèmes d'optimisation combinatoire suscitent beaucoup d'intérêts pratiques acceptables, les spécialistes de l'optimisation combinatoire ont orienté leur recherche vers le développement des méthodes Meta-heuristiques.*

---

## 4.1. Introduction

Les 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.

D'autant plus que pour des problèmes réels, il n'est pas toujours impératif de trouver la solution optimale, mais des solutions dont la qualité et le temps pour l'obtenir restent dans l'acceptable.

En général, les méta-heuristiques à base de solution unique sont plutôt axées sur l'exploitation de l'espace de recherche, dont on n'est jamais sûr d'obtenir l'optimum, par contre les méta-heuristiques à base de population sont plutôt exploratoires et permettent une meilleure diversification de l'espace de recherche. Les exemples les plus connus de ces méthodes sont :

- Les méta-heuristiques à solution unique ;
- Les méta-heuristiques à population de solutions.

## 4.2. Les méta-heuristiques à solution unique

Les méthodes méta-heuristiques à solution unique commencent avec une seule solution initiale et s'en éloignent progressivement, en construisant une trajectoire dans l'espace de recherche. Ces Meta-heuristiques sont aussi appelées méthodes de trajectoire tel que la méthode de descente, la méthode du recuit simulé, la recherche tabou,...etc.

### 4.2.1. Méthode de descente

La méthode de descente est l'une des méthodes les plus simples de la littérature. Elle est également appelée « hill climbing » dans les problèmes de maximisation. Son principe consiste, à partir d'une solution initiale, à choisir à chaque itération un point dans le voisinage de la solution courante qui améliore strictement la fonction objective. Il existe plusieurs moyens de choisir ce voisin, soit par le choix aléatoire d'un voisin parmi ceux qui améliorent la solution courante (first improvement); soit en choisissant le meilleur voisin qui améliore la solution courante (best improvement). Dans tous les cas, le critère d'arrêt est atteint lorsque plus aucune solution voisine n'améliore la solution courante [Pap82]. Le principal inconvénient de cette méthode est qu'elle reste piégée dans le premier optimum local rencontré. Les méthodes de ce type ne présentent aucune forme de diversification. Une amélioration de cet algorithme consiste

à redémarrer plusieurs fois, lorsqu'un optimum local est trouvé, à partir d'une nouvelle solution générée aléatoirement. On parle alors d'algorithme de descente avec relance (multiple start random hill climbing).

#### 4.2.2. Le recuit simulé

La méthode du recuit simulé (Simulated annealing) trouve ses origines dans le formalisme de mécanique statistique (Algorithme métropolis)[Met53]. La mise au point de cette méthode a été réalisée par trois chercheurs en Méta-heuristiques d'optimisation de la société IBM, S. Kirkpatrick, C.D. Gelatt et M.P. Vecchi [Kik83], et indépendamment par Cerny en 1985 [Cer85]. La méta-heuristique du recuit simulé, est inspirée du processus de recuit physique utilisé en métallurgie, lui-même reposant sur les lois de thermodynamique énoncées par Boltzmann. Le recuit en métallurgie est un processus visant à réorganiser la structure cristallographique des métaux en alternant des cycles de refroidissement lent et de réchauffage (recuit), qui ont pour objectif de minimiser l'énergie du matériau. Chaque température est maintenue jusqu'à ce que le matériau atteigne l'équilibre thermodynamique.

Le principe du recuit simulé est de parcourir de manière itérative l'espace des solutions. On part avec une solution notée  $S_0$  initialement générée de manière aléatoire dont correspond une énergie initiale  $E_0$ , et une température initiale  $T_0$  généralement élevée. A chaque itération de l'algorithme, un changement élémentaire est effectué sur la solution, cette modification fait varier l'énergie du système  $\Delta E$ . Si cette variation est négative (la nouvelle solution améliore la fonction objective, et permet de diminuer l'énergie du système), elle est acceptée. Si la solution trouvée est moins bonne que la précédente alors elle sera acceptée avec une probabilité  $P$  calculée suivant la distribution de Boltzmann suivante :

$$P(E, T) = \exp^{-\frac{\Delta E}{T}}$$

En fonction du critère de Metropolis, un nombre  $e \in [0, 1]$  est comparé à la probabilité

$P = \exp^{-\frac{\Delta E}{T}}$ . Si  $P \leq e$  la nouvelle solution est acceptée.

Le fonctionnement du critère de Metropolis est interprété par :

- Si  $\Delta E = f(s') - f(s) < 0$ , alors  $e^{-\frac{\Delta E}{T}} > 1$ , donc  $e$  est toujours inférieur à cette valeur, et on accepte la solution  $s'$ .
- Si  $\Delta E > 0$ 
  - et  $T$  est très grande, alors  $e^{-\frac{\Delta E}{T}} \cong 1$ , tout voisin est systématiquement accepté.

- et  $T$  est très petite, alors  $e^{-\frac{\Delta E}{T}} \cong 0$ , une dégradation a peu de chances d'être acceptée.

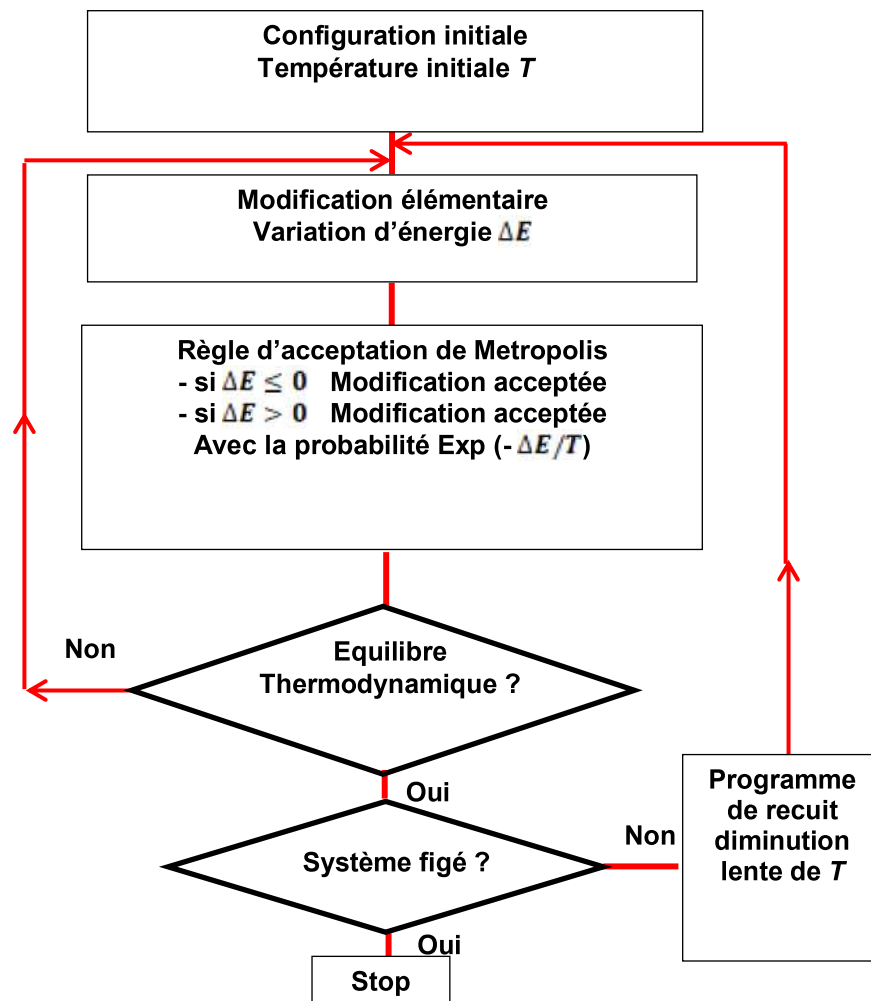


Figure 4.1. Fonctionnement de l'algorithme de recuit simulé.

Le choix de la température est primordial pour garantir l'équilibre entre l'intensification et la diversification des solutions dans l'espace de recherche. Premièrement, le choix de la température initiale dépend de la qualité de la solution de départ. Si cette solution est choisie aléatoirement, il faut prendre une température relativement élevée. On utilise souvent la règle suivante :  $T_{k+1} \leftarrow T_{k-\alpha}$  ;

Où  $\alpha \in [0,1]$ , un paramètre qui exprime la diminution de la température de l'itération  $k$  à  $k+1$ . La décroissance de la température peut également être réalisée par paliers.

### 4.2.3. La méthode de recherche avec tabous

La méthode de recherche avec tabous (Tabu Search) a été formalisée par Fred Glover en 1986 [Glo89], dont sa caractéristique principale est basée sur l'utilisation de mécanismes

développés de la mémoire humaine, et ce contrairement à la méthode du recuit simulé qui est totalement dépourvu de mémoire. Cette méthode utilise une mémoire appelée liste tabou, qui enregistre les dernières solutions rencontrées vers lesquelles il est interdit de se déplacer. Ce procédé simple de mémoire permet de choisir le meilleur voisin non tabou, même si celui-ci dégrade la fonction-objectif.

En effet, à partir d'une solution initiale  $s$  dans un ensemble de solutions local  $S$ , des sous-ensembles de solution  $N(s)$  appartenant au voisinage  $S$  sont générés. Par l'intermédiaire de la fonction d'évaluation, nous retenons la solution qui améliore la valeur de  $f$ , choisie parmi l'ensemble de solutions voisines  $N(s)$ .

L'algorithme accepte parfois des solutions qui n'améliorent pas toujours la solution courante. Nous mettons en place une liste tabou  $T$  de longueur  $k$ , contenant les  $k$  dernières solutions examinées, ce qui ne donne pas la possibilité à une solution déjà trouvée d'être acceptée et stockée dans la liste tabou. Alors le choix de la prochaine solution est procédé sur un ensemble des solutions voisines en dehors des éléments de cette liste taboue. Quand le nombre  $k$  est atteint, chaque nouvelle solution sélectionnée remplace la plus ancienne dans la liste. La construction de la liste tabou est basée sur le principe FIFO, c'est-à-dire le premier entré est le premier sorti. Comme critère d'arrêt on peut par exemple fixer le nombre d'itérations sans amélioration de  $s^*$ , ou bien limiter un temps dont lequel la recherche doit se stopper[Bou13].

#### 4.2.4. Colonie de fourmis

Ces algorithmes sont développés sur la base du comportement des fourmis proposées par Marco Dorigo et al dans les années 90[Dor99].

Une colonie de fourmis ayant le choix entre deux chemins de distance inégale, menant à une source de nourriture avait tendance à utiliser le chemin le plus court. Le modèle expliquant ce comportement est le suivant [Zeg15]:

1. Une fourmi appelée « éclaireuse » parcourt plus ou moins au hasard l'environnement autour de la colonie ;
2. Si celle-ci découvre une source de nourriture, elle rentre plus ou moins directement au nid, en laissant sur son chemin une piste de phéromones ;
3. Ces phéromones sont attractives, les fourmis passent à proximité (suivre de façon plus ou moins juste la piste ;
4. Au retour au nid, ces fourmis vont conforter la piste ;

5. Ces deux pistes sont possibles, pour atteindre la même source de nourriture, celle étant la plus courte sera convoitée par plus de fourmis que la piste longue dans un temps  $t$  ;
6. La piste courte sera de plus en plus renforcée et donc la plus attractive ;
7. La piste longue disparaîtra avec le temps (les phéromones sont volatiles) ;
8. Avec le temps, l'ensemble de fourmis choisira la piste la plus courte.

### 4.3. Les méta-heuristiques à population de solutions

Les méta-heuristiques à population de solutions améliorent, au fur et à mesure des itérations, une population de solutions. On distingue dans cette catégorie, les algorithmes évolutionnaires, qui sont une famille d'algorithmes issus de la théorie de l'évolution par la sélection naturelle, énoncée par Charles Darwin [Darwin, 1859] et les algorithmes d'intelligence en essaim qui, de la même manière que les algorithmes évolutionnaires, proviennent d'analogies avec des phénomènes biologiques naturels.

#### 4.3.1 Algorithmes génétiques

##### 4.3.1.1 Principes

Les algorithmes génétiques (AG), sont généralement regroupés sous le nom d'algorithmes évolutionnaires. Ces méthodes adaptatives sont généralement utilisées dans les problèmes d'optimisation, basés sur le processus d'évolution génétique des organismes biologiques à travers des générations selon la théorie de l'évolution de Darwin.

Ces organismes (individus) vivent ensemble dans le même environnement et se reproduisent en partageant les mêmes moyens tels que nourriture et abris contre tous prédateurs.

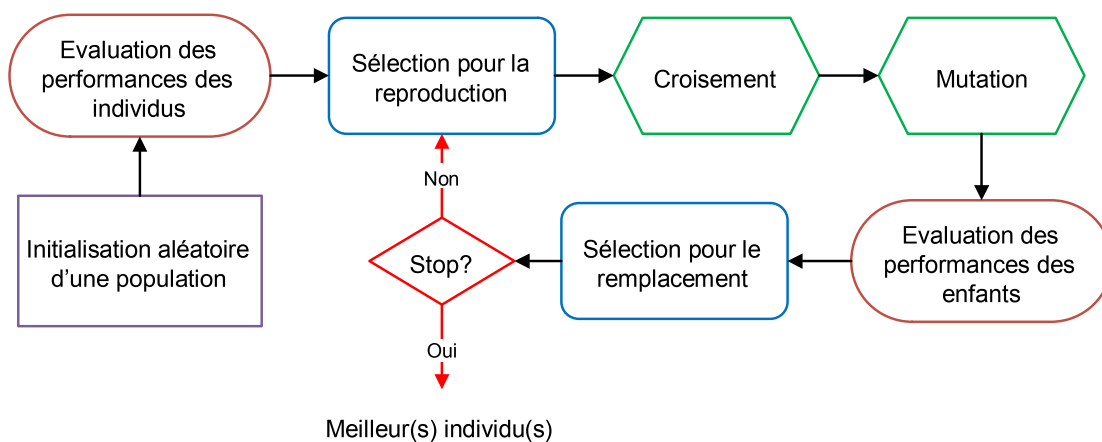
Les individus les plus forts ont plus de chance de survivre et à trouver de la nourriture et un abri ou bien apercevoir un partenaire pour se reproduire en un nombre proportionnellement plus important de progénitures. Les plus faibles vont avoir peu ou pas de descendants. De ce fait, les gènes des individus les plus adaptés vont se transmettre dans plusieurs individus des générations ultérieures. La combinaison des meilleurs gènes des différents ancêtres peut parfois produire des "super-individus" qui s'adaptent encore mieux que leurs parents. Ainsi, les espèces évoluent et deviennent de plus en plus adaptés à leur environnement.

En appliquant ce principe, les algorithmes génétiques appliqués à des problèmes d'optimisation font ressortir un ensemble de solutions candidates, appelé population d'individus. Un individu représente une solution possible du problème bien défini.

A chaque individu est attribué un "fitness" qui mesure la qualité de la solution et qui représente souvent la valeur de la fonction à optimiser. Ensuite, une nouvelle population des solutions possibles est produite en sélectionnant les parents parmi les meilleurs de la "génération" actuelle pour effectuer des croisements et des mutations. La nouvelle population contient une plus grande proportion de caractéristiques des meilleurs individus de la génération précédente.

De cette manière, les meilleurs gènes se propagent dans la population de génération en génération, en se combinant ou échangeant les meilleurs traits, et ce, en favorisant les meilleurs individus. La population convergera vers un état stationnaire minimal, en utilisant un algorithme bien conçu (codage, fonction d'évaluation des individus et d'autres paramètres judicieusement choisis).

Le terme Evolutionary Computation englobe une classe assez large de métaheuristiques telles que les algorithmes génétiques [Hol75], les stratégies d'évolution [Rec73], la 4.2 décrit le squelette d'un algorithme évolutionnaire type, commun à la plupart des instances classiques d'EAs.

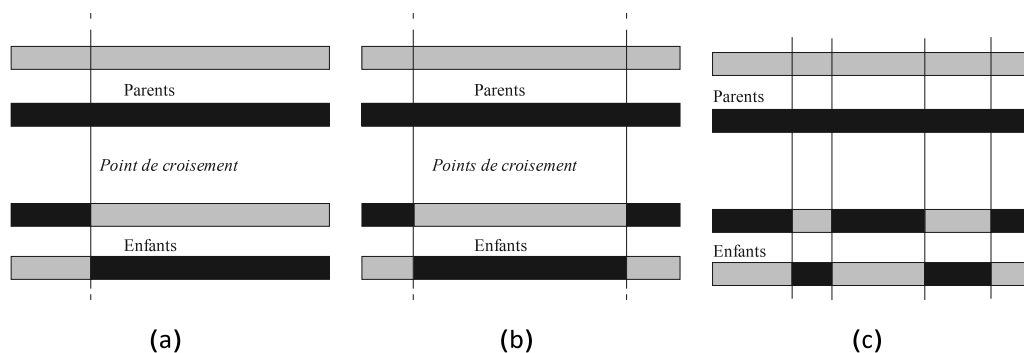


**Figure 4.2. Principe d'un algorithme évolutionnaire (EA) [Dre03]**

Chaque étape de cette méthode est associée à un opérateur décrivant la façon de manipuler les individus :

- Sélection : Pour déterminer quels individus sont plus favorables à se reproduire, une sélection est opérée. Il existe plusieurs techniques de sélection, les principales utilisées sont la sélection par tirage à la roulette (roulette-wheel sélection), la sélection par tournoi (tournament sélection), la sélection par rang (ranking sélection), [Gol91],[Bli95].

- Croisement : L'opérateur de croisement combine les caractéristiques d'un ensemble d'individus parents (généralement deux) préalablement sélectionnés, et génère de nouveaux individus enfants. Là encore, il existe de nombreux opérateurs de croisement, par exemple le croisement en un point, le croisement en n-points ( $n \geq 2$ ) et le croisement uniforme (voir figure 4.3) ;
- Mutation : Les descendants sont mutés, c'est-à-dire que l'on modifie aléatoirement une partie de leur génotype, selon l'opérateur de mutation ;
- Remplacement : Le remplacement (ou sélection des survivants), comme son nom l'indique, remplace certains des parents par certains des descendants. Le plus simple est de prendre les meilleurs individus de la population, en fonction de leurs performances respectives, afin de former une nouvelle population (typiquement de la même taille qu'au début de l'itération) [Bou13].



- (a) croisement simple en un point,  
 (b) croisement en deux points,  
 (c) croisement uniforme.

**Figure 4.3. Exemples de croisement**

### 4.3.1.2 Etapes d'algorithme génétique

#### - Codage et population initiale

Au début, il y a lieu de représenter les différents états possibles de la variable dont on cherche à procéder au codage de la valeur optimale sous une forme exploitable dans un AG. Ce qui permet d'établir une connexion entre la valeur de la variable et les individus de la population, de manière à imiter la transcription génotype-phénotype qui existe dans le monde vivant. Il existe principalement trois types de codage : le codage binaire, le codage réel et le codage en base  $n$ .

#### - Codage binaire

Ce type de codage été le premier à être utilisé dans le domaine des AG. Il présente plusieurs avantages soit un alphabet minimum  $\{0,1\}$ , facilité de mise en point d'opérateurs génétiques et existence de fondements théoriques (théorie sur les schémas).

Néanmoins ce type de codage présente quelques inconvénients :

- Les performances de l'algorithme sont dégradées devant les problèmes d'optimisation de grande dimension à haute précision numérique ;
- La distance de Hamming entre deux nombres voisins (nombre de bits différents) peut être assez grande dans le codage binaire : l'entier 7 correspond à la chaîne 0111 et la chaîne 1000 correspond à l'entier 8. Or la distance de Hamming entre ces deux chaînes est de 4, ce qui crée bien souvent une convergence, et non pas l'obtention de la valeur optimale.

#### - Codage réel

Chaque chromosome est en fait un vecteur dont les composantes sont les paramètres du processus d'optimisation. Par exemple, si on recherche l'optimum d'une fonction de  $n$  variables  $f(x_1, x_2, \dots, x_{n-1}, x_n)$ , on peut utiliser tout simplement un chromosome  $ch$  contenant les  $n$  variables. La procédure d'évaluation des chromosomes est plus rapide vu l'absence de l'étape de transcodage (du binaire vers le réel). Les résultats donnés par Michalewicz[Mic99], montrent que la représentation réelle aboutit souvent à une meilleure précision avec une réduction en termes de temps d'exécution.

|       |       |         |           |       |
|-------|-------|---------|-----------|-------|
| $x_1$ | $x_2$ | $\dots$ | $x_{n-1}$ | $x_n$ |
|-------|-------|---------|-----------|-------|

$ch$ :

### - Codage en base n

Dans ce cas de codage, les gènes constituant un chromosome sont des chiffres exprimés dans une base de numération  $n$ , ce qui permet de représenter  $n$  valeurs discrètes. L'AG démarre avec une population composée de  $N$  individus dans le codage retenu. Le choix des individus conditionne fortement la rapidité de l'algorithme. Si la position de l'optimum dans l'espace de recherche est totalement inconnue, il est intéressant que la population soit répartie sur tout l'espace de recherche. Si par contre des informations à priori sur le problème sont disponibles, il paraît évident de générer les individus dans un espace particulier afin d'accélérer la convergence. Disposant d'une population initiale souvent non homogène, la diversité de la population doit être entretenue aux cours des générations afin d'explorer le plus largement possible l'espace de recherche. C'est le rôle des opérateurs de croisement et de mutation[Gue09].

### - Opérateur de sélection

La sélection crée une population intermédiaire constituée de copies des individus de la population courante. En règle générale, le nombre de copies d'un individu est lié directement au fitness relatif de l'individu au sein de la population. Il existe plusieurs méthodes heuristiques qui représentent la reproduction, à savoir :

#### Méthode de la roulette

Cette méthode est la plus connue et la plus utilisée (roulette wheel selection) de Goldberg [Gol94]. Chaque chromosome est copié dans la nouvelle population proportionnellement à sa fitness. On effectue en quelque sorte, autant de tirages avec remise que d'éléments existant dans la population. Ainsi pour un chromosome particulier  $ch_i$  de fitness  $f(ch_i)$ , la probabilité de sa sélection dans la nouvelle population de taille  $N$  est :

$$P(ch_i) = \frac{f(ch_i)}{\sum_{j=1}^N f(ch_j)} \quad (4.1)$$

Plus la performance d'un individu est élevée par rapport à celle des autres, plus il a une chance d'être reproduit dans la population. Les individus ayant un grand fitness relatif ont donc plus de chance d'être sélectionnés. On parle alors de sélection proportionnelle. Le nombre de copies espérées pour chaque individu  $ch_i$  qui va résulter de la sélection est alors égal à :

$$n_i = N \times P(ch_i) = \frac{f(ch_i)}{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N f(ch_j)} = \frac{f(ch_i)}{f} \quad (4.2)$$

L'inconvénient majeur de ce type de reproduction vient du fait qu'il peut favoriser la dominance d'un individu qui n'est pas forcément le meilleur. Cette méthode peut aussi engendrer une perte de diversité par la dominance d'un super-individu. Pour pallier à cet inconvénient, on préfère souvent des méthodes qui n'autorisent en aucun cas l'apparition de super-individu. Par exemple, la sélection par tournoi (tournament selection) ou d'autres méthodes faisant intervenir un changement d'échelle (Scaling) et/ou des notions de voisinage entre chromosomes (Sharing).

### Sélection par tournoi

On tire deux individus aléatoirement dans la population et on reproduit le meilleur des deux dans la nouvelle population. On répète la procédure jusqu'à ce que la nouvelle population soit complète.

### Sharing

Le sharing consiste à ajuster la fitness des individus pour éviter qu'ils se concentrent dans une niche principale (optimum globale). La technique de partage de la fitness (fitness sharing), introduite par Goldberg et Richardson [Gol87], réduit le fitness de chaque individu d'un facteur correspondant environ au taux d'agrégation de la population autour de son voisinage :

$$f'(ch_i) = \frac{f(ch_i)}{m_i} \quad (4.3)$$

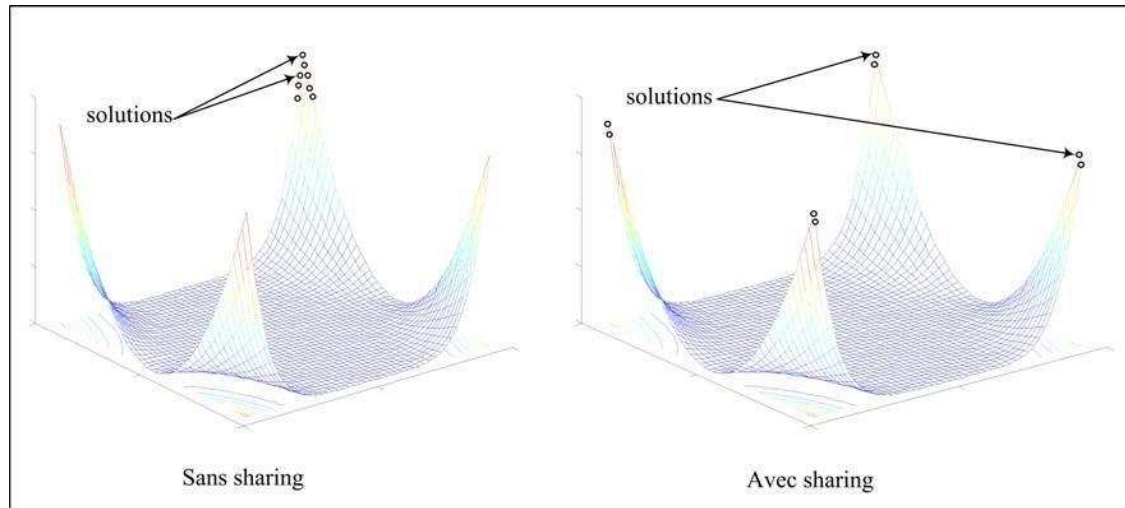
où le compteur de niche  $m_i$  se calcule de la manière suivante:

$$m_i = \sum_{j=1}^N sh(d_{ij}) \quad (4.4)$$

Où  $N$  désigne la taille de la population et  $sh$  mesure la similarité entre deux individus  $i$  et  $j$  en fonction de la distance  $d_{ij}$  et le rayon de niche  $\sigma_{shar}$  :

$$sh(d_{ij}) = \begin{cases} 1 - \left( \frac{d_{ij}}{\sigma_{shar}} \right) & si \quad d_{ij} \prec \sigma_{shar} \\ 0 & si \quad non \end{cases} \quad (4.5)$$

La figure 1.4 montre deux exemples de répartition de populations dans le cas d'une fonction multimodale: le premier sans sharing et le deuxième avec sharing.



*Figure4.4. Effet de sharing sur la répartition des solutions*

Si le principe de sharing a été utilisé initialement dans l'espace de paramètres (le critère de distance étant fonction des paramètres), il est tout à fait possible de l'adapter dans l'espace des objectifs. C'est d'ailleurs cette idée qui est exploitée dans les algorithmes génétiques multi-objectifs.

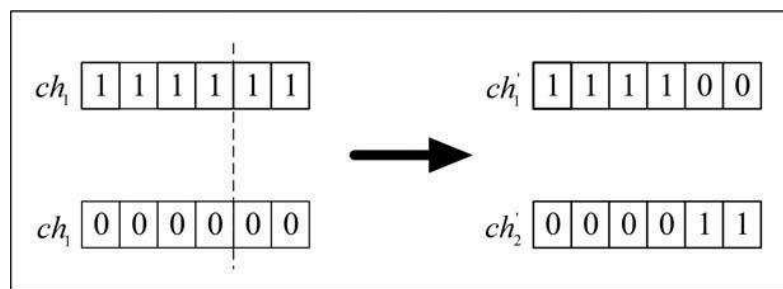
## Elitisme

La stratégie élitiste consiste à conserver le meilleur individu à chaque génération. Ainsi l'élitisme empêche l'individu le plus performant de disparaître au cours de la sélection ou que ses bonnes combinaisons soient affectées par les opérateurs de croisement et de mutation. Après chaque évaluation de la performance des individus à une génération  $t$  donnée, le meilleur individu de la génération précédente ( $t-1$ ) est réintroduit dans la population si aucun des individus de la génération  $t$  n'est meilleur que lui. Par cette approche, la performance du meilleur individu de la population courante est monotone de génération en génération. Il apparaît que l'élitisme améliore considérablement les performances de l'algorithme génétique pour certaines

classes de problèmes, mais peut les dégrader pour d'autres classes, en augmentant le taux de convergences prématurées.

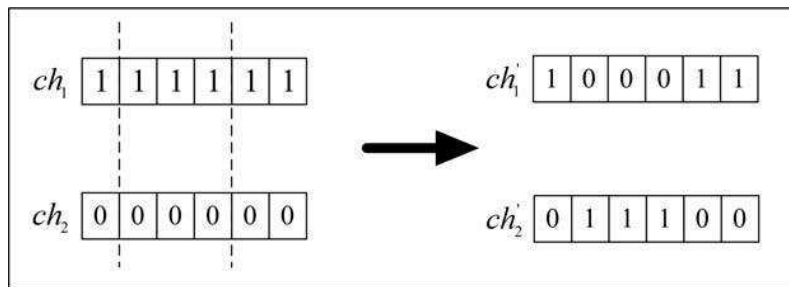
### - Opérateur de croisement

Le croisement est le principal opérateur agissant sur la population des parents. Il permet de créer de nouveaux individus par l'échange d'information entre les chromosomes par leur biais de leur combinaison. La population courante est divisée en deux sous populations de même taille ( $N/2$ ) et chaque couple formé par un membre provenant de chaque sous population participe à un croisement avec une probabilité ( $p_c$ ) souvent supérieure à 0,5. Si le croisement a eu lieu entre deux chromosomes parents ( $ch_1$  et  $ch_2$ ), constitués de  $l$  gènes, on tire aléatoirement une position de chacun des parents. On échange ensuite les deux sous chaînes terminales de chacun des chromosomes, ce qui produit deux enfants ( $ch_1'$  et  $ch_2'$ ) comme indiqué sur la figure 4.5.



**Figure4.5. Croisement standard en un seul point**

Dans notre exemple, Figure 1.1, un croisement localisé à la quatrième position a eu lieu entre les chromosomes  $ch_1$  et  $ch_2$ : il s'agit bien d'un croisement en un seul point. Ainsi on peut étendre ce principe de combinaison en choisissant non pas un seul point, mais 2, 3, etc...(croisement en multipoints) [Man96]. Sur la figure 4.6 nous représentons un croisement en deux points.

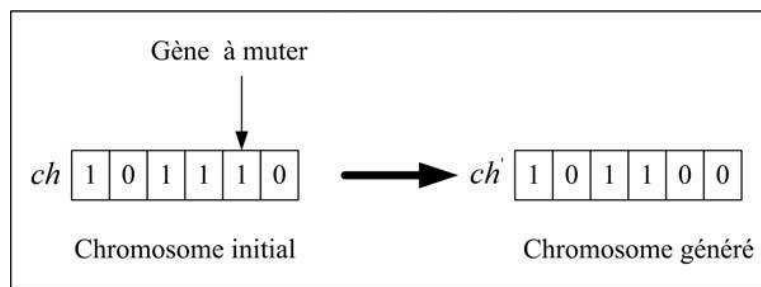


**Figure4.6. Croisement standard en deux points**

Ce type de croisement est très efficace et peut s'étendre à n'importe quel type de chaînes (réelles, en base  $n$ , etc...).

### - Opérateur de mutation

Le rôle de cet opérateur est de modifier aléatoirement la valeur d'un gène dans un chromosome. Dans le cas du codage binaire, chaque bit  $a_i \in \{0,1\}$  est remplacé par son complémentaire  $\bar{a}_i = 1 - a_i$ . Dans la figure 4.7, une mutation a eu lieu sur le troisième gène du chromosome  $ch$  et elle a transformé ce gène de 1 en 0.



**Figure4.7. Principe de l'opérateur de mutation**

Pour les chaînes codées en base  $n$ , la mutation consiste à remplacer le gène initial par un chiffre en base  $n$  tiré au sort.

Dans le cas d'un codage réel, on utilise principalement deux opérateurs de mutation, soit la mutation *uniforme* et la mutation *non uniforme*[Mic92].

En supposant fixée la probabilité de mutation  $p_m$ , un tirage au sort pour chaque gène  $x_k$  d'un chromosome  $ch$  permet de décider si ce gène doit être ou non modifié. Nous supposons que le gène prend ses valeurs dans un intervalle  $[x_k^{min}, x_k^{max}]$ .

- Pour la mutation uniforme, qui est une simple extension de la mutation binaire, on remplace le gène  $x_k$  sélectionné par une valeur quelconque  $x'_k$  tirée aléatoirement dans l'intervalle  $[x_{min}, x_{max}]$ ;
- Pour la mutation non uniforme, le calcul de la nouvelle valeur d'un gène est un peu plus complexe. Le gène  $x_k$  subit des modifications importantes durant les premières générations, puis graduellement décroissantes au fur et à mesure que l'on progresse dans le processus d'optimisation. Pour une génération  $t$ , on tire au sort une valeur binaire qui décidera si le changement doit être positif ou négatif. La nouvelle valeur  $x'_k$  du gène  $x_k$  est donnée par :

$$x'_k = \begin{cases} x_k + \Delta(t, x_k^{max} - x_k) & \text{si } rand = 0 \\ x_k - \Delta(t, x_k - x_k^{min}) & \text{si } rand = 1 \end{cases} \quad (4.6)$$

où  $\Delta(t, y)$  est une fonction qui définit l'écart entre la nouvelle valeur et la valeur initiale à la génération  $t$  et  $rand$  est nombre aléatoire qui prend les valeurs 0 ou 1.

Dans [Cor01], les auteurs proposent d'utiliser une fonction  $\Delta(t, y)$  correspondante à une décroissance exponentielle de l'écart à travers les générations. Cette fonction est définie par :

$$\Delta(t, y) = y \times (1 - r^{(1-t/T)\beta}) \quad (4.7)$$

Où :  $T$  est l'indice de génération pour laquelle l'amplitude de la mutation s'annule ;

$\beta$  est un paramètre de l'opérateur de mutation (souvent  $\beta = 5$ ) ;

$r$  est un nombre produit aléatoirement dans l'intervalle  $[0, 1]$  et  $t$  le numéro de la génération.

En cas, l'intervalle de variations du gène  $x_k$  n'est pas connu, une mutation gaussienne est souvent utilisée. Le principe de base de ce type de mutation est d'ajouter un bruit gaussien centré  $N(0, \sigma)$  au gène que l'on désire faire muter:

$$x'_k = x_k + N(0, \sigma) \quad (4.8)$$

Où  $\sigma$  représente la variance.

La mutation est traditionnellement considérée comme un opérateur intervenant à la marge, dans la mesure où sa probabilité est en général assez faible (de l'ordre de 1%). Mais elle confère aux algorithmes génétiques une propriété très importante : l'ergodicité (tous les points de l'espace de recherche peuvent être atteints). Cet opérateur est donc d'une grande importance et il est loin d'être marginal, d'ailleurs un algorithme génétique peut converger sans l'opérateur de croisement et certaines applications fonctionnent de cette manière [Hwa99].

### - Fonction d'évaluation

Un algorithme génétique nécessite généralement la définition d'une fonction rendant compte de la pertinence des solutions potentielles, à partir des grandeurs à optimiser. Nous la nommerons fonction d'adaptation  $f$  (ou fitness fonction en terminologie anglo-saxonne). Elle est souvent exprimée par la composition de deux fonctions  $g$  et  $h$ :

$$f = g \circ h \quad (4.9)$$

avec :

$\circ$ : loi de composition de fonctions ;

$g$ : fonction de transformation, pouvant être linéaire, exponentielle, logarithmique, etc ....

$h$ : fonction objectif ou de coût, elle dépend de l'objectif recherché.

## 4.4. Algorithmes génétiques appliqués aux composites

### 4.4.1. Introduction

Un algorithme génétique est fondé sur le codage des paramètres d'une problématique et non pas uniquement sur les paramètres. Un individu peut être symbolisé par un ou plusieurs chromosomes (figure 4.8a et 4.8b) et chaque chromosome comporte une chaîne de gènes de même type, représentant les variables codées du problème [Mok13]. Le nombre de chromosomes ( $n_c$ ), ainsi que le nombre de gènes ( $n_g$ ) de chaque chromosome  $i$ , représente un individu dépendant spécifiquement à la problématique étudiée et la méthode utilisée.

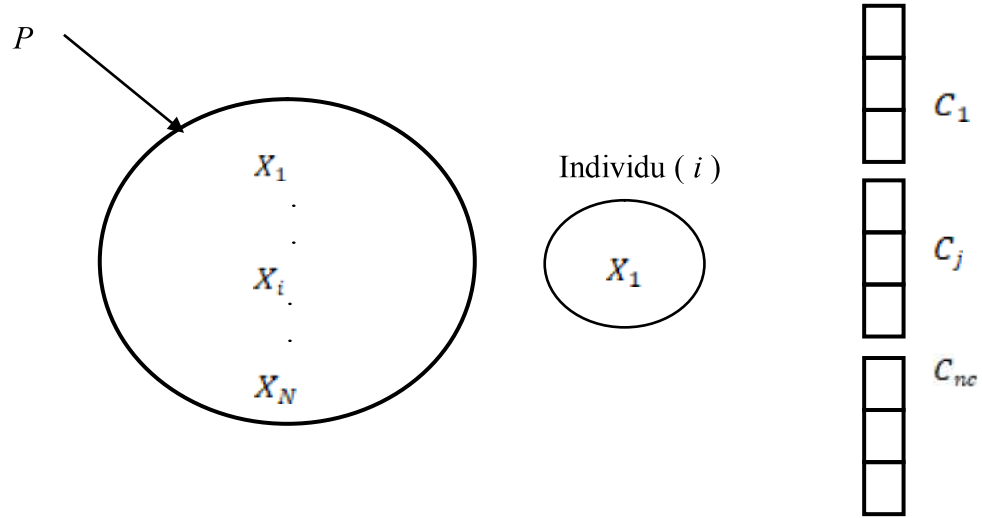


Figure 4.8a. Représentation génétique [Mok13]

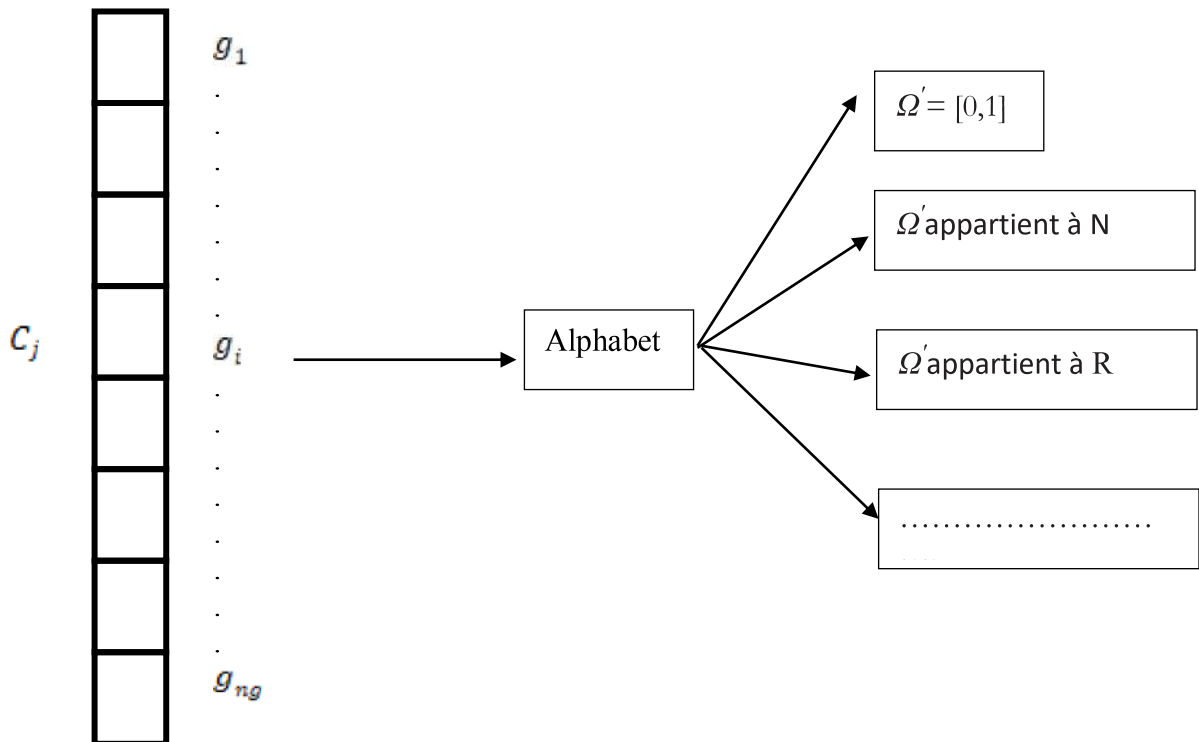


Figure 4.8b. Représentation génétique [Mok13]

On peut décider de représenter des solutions par deux chromosomes (voir Tableau 4.1), pour les structures stratifiées par exemple la problématique d'optimisation. Dans ce contexte, le premier chromosome contient les gènes qui déterminent l'orientation de chaque pli  $k$  tandis que le second contient les gènes déterminent le matériau de ces plis. Par conséquent, le stratifié

représenté par ce codage est un des trois plis aux orientations et matériaux définis par les gènes des chromosomes respectifs (voir Tableau4.1). Dans le cas où l'individu est composé d'un seul chromosome [Mok13], on prend en considération que l'individu soit la composition de gènes  $n_g$ .

| Chromosome | Type        | Gène             |                  |                  |
|------------|-------------|------------------|------------------|------------------|
| 1          | Orientation | $8_1$            | $8_2$            | $8_3$            |
| 2          | Matériau    | Mat <sub>1</sub> | Mat <sub>2</sub> | Mat <sub>3</sub> |

**Tableau4.1. Codage d'un individu en utilisant deux chromosomes**

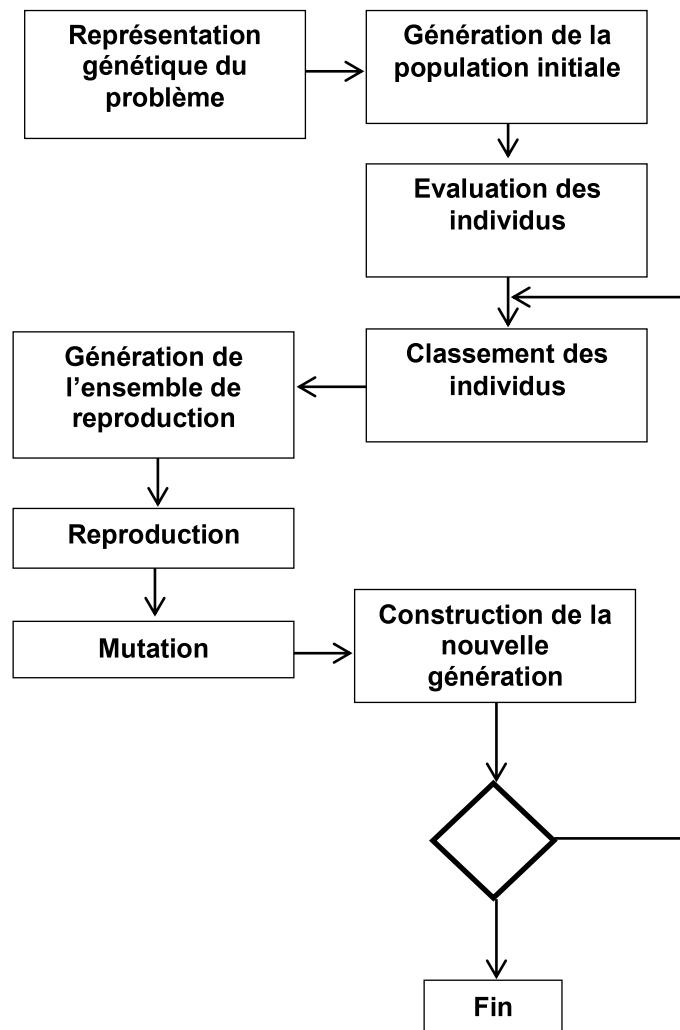
| Pli | Chromosome 1 | Chromosome 2     |
|-----|--------------|------------------|
|     | Orientation  | Matériau         |
| 1   | $8_1$        | Mat <sub>1</sub> |
| 2   | $8_2$        | Mat <sub>2</sub> |
| 3   | $8_3$        | Mat <sub>3</sub> |

**Tableau4.2. Décodage d'un individu composé de deux chromosomes**

Il est important d'introduire le concept des schèmes, avant de procéder à la description des étapes de l'algorithme génétique, évoquée sur la figure 4.9. Sachant, qu'un schème est un groupe de gènes à l'intérieur d'une série de gènes qui représente un individu [Gol94, Hol92, Dav91]. L'exemple du Tableau4.3, nous avons présentés quatre individus. En observant les gènes de ces individus, on constate que les deux premiers possèdent certaines similitudes. En effet, les gènes à la position 1,2 et S, équivalent respectivement S,2 et 3, sont communs à ces deux individus. On déduit que ces deux individus partagent les schèmesS2##3. Dans le tableau sous cité, on peut identifier un second schème qui est commun aux deux derniers individus, soit les chème1###4. Le caractère <#> signifie que le gène à cette position peut prendre n'importe quelle valeur.

| Individu | Gènes |   |   |   |   | F(x) |
|----------|-------|---|---|---|---|------|
| 1        | S     | 2 | 1 | S | 3 | 1S0  |
| 2        | S     | 2 | 2 | 1 | 3 | 14S  |
| 3        | 1     | 3 | 2 | 3 | 4 | 60   |
| 4        | 1     | 1 | 4 | S | 4 | SS   |

**Tableau4.3. Quatre individus et leur mesure de performance**



**Figure 4.9. Structure de l'algorithme génétique [Mok13]**

***L'algorithme génétique :***

- La recherche s'effectue suite à la création de nouveaux individus sur la base des anciens individus évalués comme performants, et ce, par rapport à une fonction d'évaluation  $F(x)$  bien précise.
- Tri des schèmes performants des individus déjà évalués et construit de nouveaux individus en combinant ces schèmes entre eux. Un schème performant est défini comme un groupe de gènes d'un individu, et qui permet d'obtenir un degré de performance élevé, ou un  $F(x)$  élevé, et ce, par rapport aux autres individus (population). Dans l'exemple précédent, le premier schème identifié est plus performant que le second car il permet aux deux premiers individus d'obtenir une plus grande performance par rapport à la fonction d'évaluation  $F(x)$ .

- Permet à trouver et à combiner entre eux les schèmes performants par des processus pseudo-aléatoires. Et ce, en favorisant la reproduction des individus les plus performants, suite à la transmission des bons schèmes à leur progéniture. Lors de la reproduction, il est aussi possible que la progéniture combine des schèmes performants et distincts de chacun des parents afin de former un nouveau schème encore plus performant. Ce nouveau schème pourra être de plus en plus présent dans la population, suite à sa performance, et sa qualité élevée, dont il contribuera à augmenter la qualité des individus.

#### 4.4.2. Les caractéristiques des gènes

Les caractéristiques des gènes sont définies par l'alphabet des gènes. En fait, l'alphabet des gènes est l'ensemble des valeurs ( $\Omega_i$ ) que peuvent prendre les allèles des gènes pour coder le domaine ( $\Omega_i$ ) des variables que représentent ces gènes.

Au début, les gènes étaient représentés par un alphabet binaire ( $\Omega' = \{0,1\}$ ) et d'autres alphabets peuvent être utilisés pour représenter un domaine  $\Omega$  quelconque. A titre d'exemple, si  $\Omega$  est un domaine de  $n$  valeurs discrètes ( $\Omega \in \mathcal{N}$ ), on peut utiliser un alphabet de  $n$  entiers ( $\Omega' = \{1,2,\dots,n\}$ ) et si  $\Omega$  est un domaine continu, on peut utiliser directement un alphabet de valeurs continues ( $\Omega' \in \mathcal{R}$ ). De plus, [Mic92] démontre que la représentation de variables, appartenant à un domaine continu, est plus efficacement faite en utilisant un alphabet continu comparativement à un alphabet binaire. Une des raisons est que la représentation binaire discrétise le domaine continu en intervalles égaux. Ce sont alors ces intervalles qui définissent la précision des variables. La taille des chaînes qui définissent les individus devient rapidement élevée. Ce qui favorise l'alourdissement de l'algorithme, comparativement à la représentation par un alphabet de valeurs continues qui ne nécessite qu'un seul gène par variable. Pour cette raison, on représente généralement les variables du domaine continu par un alphabet continu.

#### 4.4.3. Génération de la population initiale

La génération de la population initiale  $P_0$  est réalisée de façon aléatoire selon le nombre de chromosome  $nc$  de chaque individu, le nombre de gènes de chaque chromosome  $ng(i)$ , le domaine des gènes de chaque chromosome ( $\Omega_i$ ) et le nombre d'individus dans la population  $N$ . On attribue aléatoirement un allèle appartenant à ( $\Omega_i$ ) à chaque gène de chaque chromosome  $i$ , pour tous les individus de la population,

#### 4.4.4. Evaluation des individus

Le calcul se base sur la valeur de performance  $F(x)$  des individus et sur les dérivées des contraintes  $g_i(x)$  et de la fonction objective  $f(x)$ . Cette spécificité rend cette méthode plus pratique et efficace pour la résolution de problèmes avec des variables discrètes. En plus, l'algorithme génétique n'a pas besoin de connaître la nature de la problématique pour qu'il devienne fonctionnel. Tout ce qu'il voit et tout ce qu'il a besoin de voir est un ensemble de solutions dont on associe une valeur numérique  $F(x)$ . Cette valeur numérique est l'outil qui permet de distinguer les solutions entre elles. Celles ayant un plus grand  $F(x)$  étant meilleures que celles ayant un plus faible  $F(x)$ . D'une manière générale, les algorithmes génétiques maximisent la valeur de performance  $F(x)$  des individus de la population.

Pour attribuer cette valeur de performance, il faut procéder à l'évaluation des individus générés par l'algorithme génétique. La façon dont l'évaluation des individus est faite doit être définie avant de lancer l'algorithme. Lors de cette étape, l'algorithme génétique communique avec un programme de calcul des structures composites, afin de calculer les propriétés de cet individu. Sur la base de ces propriétés que la valeur de performance peut être déterminée selon l'objectif et les contraintes de la problématique. L'équation (4.10) définit la fonction de pénalisation linéaire  $F(x)$  associée à ce problème, alors que en générale l'équation pose le problème d'optimisation.

Maximiser:  $f(x)$

Sous les contraintes :

$$g_i(x) \geq 0, \quad i = 1, \dots, s \quad (4.10)$$

$$F(x) = f(x) + \sum_{i=1}^s \lambda_i \min(0; g_i(x)) \quad (4.11)$$

#### 4.4.5. Classement des individus

Cette étape consiste à classer les individus en ordre décroissant par rapport à la valeur de leur fonction d'évaluation  $F(x)$ . Cette dernière nous permet d'identifier l'individu le plus performant ayant la plus grande valeur de  $F(x)$  et qui est repéré à la première position, alors que le moins performant est situé à la position  $N$  de la population. Lorsque le programme s'achève, la solution de l'optimisation est localisée à la première position.

Toutefois, en ingénierie il est souvent utile d'avoir des choix alternatifs au problème d'optimisation. En ce sens, les autres individus de la population finale peuvent servir à fournir des solutions alternatives au problème.

#### 4.4.6. Génération de l'ensemble de reproduction :

Le processus d'adaptation s'étale en général sur de longues périodes et qui est régi par la sélection naturelle. Sachant que dans la nature, les organismes d'une population tendent à s'adapter aux changements de leur environnement. La mécanique sous-jacente à la sélection naturelle est relativement simple et robuste. En effet, face à certains changements plus ou moins brusques de leur environnement, les individus de la population tentent de survivre. D'une manière générale, il y a des individus qui meurent et d'autres qui survivent. Parmi les survivants, il y a de fortes chances qu'une quantité de ceux-ci possèdent des attributs génétiques qui ont joué en leur faveur, contrairement à ceux qui sont morts. Ainsi, comme ils ont survécu, ils peuvent alors se reproduire entre eux et, par le fait même, transmettre leur bagage génétique à leur progéniture. A ce stade, la probabilité que cette progéniture ait reçu les gènes performants des parents est bonne. C'est en répétant ce processus de génération que la population tend à s'améliorer globalement. Pour orienter la recherche de solutions avantageuses, l'algorithme génétique se base sur les principes de la sélection naturelle

Pour simuler ce mécanisme, l'algorithme génétique favorise la reproduction des individus les mieux adaptés à leur environnement par rapport à d'autres moins adaptés. Pour y arriver, un certain nombre  $r$  de parents seulement est choisi parmi la population, pour former l'ensemble de reproduction (figure 4.4). Ces parents sont sélectionnés aléatoirement parmi la population avec l'imposition d'un biais afin de rendre plus probable le tirage des meilleurs individus, c'est-à-dire ceux ayant la plus grande valeur de la fonction d'évaluation  $F(x)$ . Différentes façons peuvent être utilisées afin de déterminer la probabilité de sélection de chacun des individus. A titre d'exemple, on peut répartir les probabilités proportionnellement au poids des qualités de chaque solution par rapport à la somme totale des qualités de la population (roulette) ou en répartissant linéairement les probabilités selon le rang des individus dans la population.

La répartition des probabilités de sélection des individus selon la méthode de la roulette est donnée par l'équation (1.12). Cette méthode utilise directement la proportion que fait la valeur de la fonction objective  $F(x)$ , d'un individu  $x_i$ , par rapport à la somme de tous les objectifs des  $N$  individus de la population pour déterminer la probabilité  $P_i$  de sélection de cet individu. De cette façon, plus un individu a une forte qualité  $F$  par rapport au reste de la population, plus celui-ci a

de chances de se reproduire. Toutefois, comme la sélection se fait aléatoirement, les moins bons individus sont tout de même une chance de faire partie de l'ensemble de reproduction.

$$P_s(x_i) = \frac{F(x_i)}{\sum_{k=1}^N F(x_k)} \quad (4.12)$$

Une variante de cette méthode est de déterminer la probabilité  $P_s$  de l'individu  $x_i$  selon son rang  $k$  parmi la population. En tenant compte que, suite au classement des individus, les individus de la population sont positionnés pour que le meilleur soit inséré à un premier rang et que le moins bon soit au rang  $k=N$ . D'où la probabilité de sélection d'un individu  $x_i$  est définie selon son rang  $k$  par l'équation (1.13).

$$P_s(x_i) = \frac{2(N - k + 1)}{N(N + 1)} \quad (4.13)$$

#### 4.4.7. La reproduction

La reproduction est le moteur de recherche de l'algorithme génétique, dont les caractéristiques dominantes des parents sont transmises aux enfants et la naissance de nouveaux individus plus performants est possible à créer. Conformément au principe général lié aux algorithmes génétiques, la reproduction se fait en se basant sur une méthode aléatoire. En effet, afin de construire un algorithme génétique efficace, il faut souvent concevoir ou utiliser des opérateurs spécialisés pour répondre aux besoins d'une application particulière, sachant qu'une grande quantité d'opérateurs de reproduction existe. D'autant plus, les opérateurs de croisement sont différents en fonction du type de gène constituant les chromosomes d'un individu. Plus précisément, il existe des opérateurs de croisements applicables à des chromosomes constitués de gènes représentés par des variables continues et d'autres pour des chromosomes constitués de gènes représentés par des variables discrètes.

Comme il a été mentionné précédemment, c'est à partir de chaque couple de parents ( $P_1, P_2$ ) de l'ensemble de reproduction  $R$  que les opérateurs de reproduction travaillent.

Pour créer les  $r$  enfants de l'ensemble  $E$ , il faut utiliser  $r$  couples de parents, sachant qu'un enfant  $e$  est créé par chaque couple de parents. Les individus représentés par plusieurs chromosomes  $c_i$ , les opérateurs de reproduction sont appliqués indépendamment entre chaque paire de chromosomes respectifs des parents. A titre d'exemple, les individus composés de deux

chromosomes, le chromosome  $c_1$  de l'enfant  $e(c_1, c_2)$  est généré par le croisement des chromosomes  $c_1$  des parents  $P_1$  et  $P_2$ . Quant au chromosome  $c_2$  de l'enfant  $e(c_1, c_2)$  est construit par le croisement des chromosomes  $c_2$  des parents  $P_1$  et  $P_2$ .

#### 4.4.8. La mutation

La mutation est nécessaire afin de diversifier la recherche et de permettre d'introduire dans la population des schèmes nouveaux qui n'auraient pas pu être générés par la simple reproduction. Ce processus de mutation est simulé par l'algorithme génétique. Cette étape modifie certains gènes des individus d'une population de manière aléatoire, afin de les remplacer par d'autres valeurs qui sont aussi déterminées aléatoirement. Les opérateurs de mutation interviennent après l'étape de croisement et s'appliquent à l'ensemble d'enfants  $E$  généré par la reproduction, simulé dans l'algorithme génétique.

#### 4.4.9. Evaluation des enfants

L'évaluation de la performance des enfants est une étape qui suit la création et la modification de l'ensemble d'enfants  $E$ . Le calcul de la performance des enfants s'effectue de la même manière que ce qui a été définie précédemment. Par conséquent, à chaque génération le coût de calcul  $N_f$  est défini par le nombre d'appel de la fonction d'évaluation ou par le nombre d'individus évalués, et ce, en fonction du nombre d'enfants  $r$  compris dans l'ensemble  $E$ . Le coût de calcul du programme, en fonction du nombre de génération effectué  $t$ , est donné par l'équation 4.14, sachant que  $r$  est constant.

$$N_f = N + t_r \quad (4.14)$$

#### 4.4.10. Construction de la nouvelle génération

La construction de la nouvelle génération  $P_{t+1}$  est possible, en utilisant les valeurs de performances des enfants de l'ensemble  $E$ . Pour ce faire, le principe de sélection sélectif est souvent utilisé. Cette technique consiste de transmettre à la nouvelle génération le meilleur individu de la génération précédente et de compléter la population par les  $r$  enfants générés ( $r = N - 1$ ). Cette méthode consiste à construire la nouvelle génération en conservant les meilleurs individus de la population  $N_k$  et en complétant la population avec les  $r$  enfants générés ( $r = N - N_k$ ). De plus, un enfant est inclus dans la nouvelle génération à condition qu'il n'existe pas déjà. De telle façon permet d'avoir une diversification de solutions et la recherche de plusieurs solutions performantes, et ce, suite à l'absence de doubleur d'individus dans la population. Si l'ensemble  $E$

ne permet pas de compléter la nouvelle génération, c'est-à-dire que  $|P_{t+1}| < N$ , les  $N - |P_{t+1}|$  individus manquant sont sélectionnés parmi les individus de la génération précédente ( $P_t$ ) tout en respectant le critère de diversité.

Le contrôle de la diversité de la population s'effectue en fonction du domaine des gènes des chromosomes. Si deux individus sont représentés par des gènes appartenant à un domaine discret  $\Omega^d$ , il suffit qu'un seul gène soit différent pour considérer ces deux individus comme distincts. On utilise aussi un autre critère pour différencier deux individus lorsqu'ils sont représentés par des gènes appartenant à un domaine continu  $\Omega^c$ . Donc, comme les gènes peuvent prendre n'importe quelle valeur continue appartenant à  $\Omega^c$ , alors cela suppose que les deux gènes peuvent être identiques d'un point de vue pratique et différents d'un point de vue mathématique.

#### 4.4.11. Convergence

L'achèvement de l'algorithme génétique peut s'effectuer par l'utilisation de différents critères d'arrêt. Exemple simple, fixer un nombre de générations maximal  $T$  dont lequel la recherche se termine (*Gen.max*). Lorsqu'une solution optimale  $F_\beta$  est connue pour un problème donné, on peut aussi arrêter l'algorithme après l'atteinte d'un optimum pratique à cette solution (*Opt.prat.*). Un optimum pratique est une solution dont l'objectif  $F(x)$  est à l'intérieur d'une certaine distance  $\psi$  de l'objectif de l'optimum connu  $F_\beta$ . Lors de l'utilisation cette méthode, il est souvent prudent de définir une limite maximale de générations afin de mettre fin à l'algorithme, si ce dernier n'arrive pas à trouver cet optimum pratique.

On peut aussi utiliser un autre critère d'arrêt qui vérifie la création de nouvelles solutions plus performantes parmi la population. Si le meilleur individu de la population reste inchangé pendant un nombre donné  $t_n$  de générations, on considère que l'algorithme a convergé et que cette solution en question est l'optimum de cette recherche (Paschang.). Le tableau 4.5 récapitule les différents critères d'arrêt.

| Nom               | Définition                                                     |
|-------------------|----------------------------------------------------------------|
| <b>Gen. max</b>   | $At = T$                                                       |
| <b>Opt. prat.</b> | Atteinte d'un optimum pratique ou après $t = T$                |
| <b>Paschang.</b>  | Après $t_n$ générations sans amélioration du meilleur individu |

**Tableau 4.5. Critères d'arrêt**

## 4.5. Conclusion

En absence des théories mathématiques déterministes et exactes décrivant le comportement de l'interface fibre-matrice, nous avons choisi les modèles probabilistes numériques pour nous permettre de modéliser cet endommagement. Dans ce chapitre, nous avons étudié les méthodes Meta-heuristiques à base de solution unique tel que la méthode de descente, la méthode du recuit simulé, la recherche tabou, Colonie de fourmis et à base de population tel que les algorithmes évolutionnaires, qui sont une famille d'algorithmes issus de la théorie de l'évolution par la sélection naturelle, énoncée par Charles Darwin [Darwin, 1859] et les algorithmes d'intelligence en essaim. Dans notre modélisation et simulation numérique, nous allons utiliser une approche génétique que nous avons trouvé la plus approprié des méta-heuristiques à notre étude.

## Bibliographies

- [Bli95] T. Blicke & L. Thiele. *A comparison of selection schemes used in genetic algorithms*. Evolutionary Computation, 4(11): 311–347, 1995.
- [Bou13] I. Boussaïd, J. Lepagnot, & P. Siarry. *A survey on optimization metaheuristics*. Information Sciences, 237: 8–117, 2013. ISSN 0020-0255. doi : 10.1016/j.ins.2013.02.041.
- [Cer85] V. Cerny. *Thermodynamical approach to the traveling salesman problem : an efficient simulation algorithm*. Journal of Optimization Theory and Applications, 45(1): 41–51, 1985.
- [Cor01] Cordon, O., F. Herrera et P. Villar (2001). *Generating the knowledge base of a fuzzy rule based system by the genetic learning of the data base*. IEEE Transactions on Fuzzy Systems 9(4), 667–674.
- [Dor99] Dorigo M. and . Di Caro, 1999. *The Ant Colony Optimization Meta-Heuristic*, In: D. Corne, M. Dorigo and F. Glover Editors, New Ideas in Optimization, McGraw-Hill.
- [Dre03] J. Dréo, A. Pétrawski, P. Siarry, E. Taillard *Métaheuristique pour l’optimisation difficile*. Edition Eyrolles pages 69-112, 2003.
- [Glo89] F. Glover. *Future paths for integer programming and links to artificial intelligence*. Computers and Operations Research, 13(5): 533–549, 1986.
- [Gol91] D. E. Goldberg & K. Deb. *A comparative analysis of selection schemes used in genetic algorithms*. In Foundations of Genetic Algorithms, pp. 69–93. Morgan Kaufmann, 1991.

- [Gol87] Goldberg, D.E. et J. Richardson (1987). *Genetic algorithms with sharing for multimodal function optimization*. In: Second International Conference on Genetic Algorithms and their application. Cambridge, Massachusetts, United States. pp. 41–49.
- [Gol94] Goldberg, D.E. (1994). *Algorithmes génétiques*. Exploration, optimisation et apprentissage automatique. Addison-Wesley. France.
- [Hwa99] Hwang, H.S. (1999). *Automatic design of fuzzy rule base for modelling and control using evolutionary programming*. IEE Proceedings on Control Theory and Applications pp. 9–16.
- [Hol75] J.H. Holland (1975). *Adaptation in Natural and Artificial Systems*, University of Michigan Press, Ann Arbor, Michigan; re-issued by MIT Press (1992).
- [Kik83] S. Kirkpatrick, C. Gelatt, & M. Vecchi. *Optimization by simulated annealing*. Science, 220(4598): 671–680, 1983.
- [Man96] Man, K.F., K.S. Tang et S. Kwong (1996). *Genetic algorithms: Concepts and applications*. IEEE Transaction on industrial electronics 43, 519–534.
- [Mic92] Thomas Baeck, D.B Fogel, Z Michalewicz, *Evolutionary Computation 1: Basic Algorithms and Operators*. Tylor and Francis group, New work 1992
- [Met53] N. Metropolis, A. Rosenbluth, M. Rosenbluth, A. Teller, & E. Teller. *Equation of state calculations by fast computing machines*. Journal of Chemical Physics, 21(6): 1087–1090, 1953.
- [Mok13] A. Mokaddem. “Effet de l’arrangement des fibres sur l’optimisation de l’endommagement de l’interface fibre matrice d’un matériau composite par un algorithme génétique”. Thèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d’Oran Mohamed Boudiaf, 2003.

- [Pap82] C. H. Papadimitriou & K. Steiglitz. *Combinatorial optimization: algorithms and complexity*. Prentice-Hall, Inc., Upper Saddle River, NJ, USA, 1982. ISBN 0-13-152462-3.
- [Rec73] I. Rechenberg. *Evolutions strategie : optimierung technischer systeme nach prinzipien der biologischen evolution*. Frommann-Holzboog, Stuttgart, 1973.
- [Zeg15] R. Zaghdoud, K. Mesghouni, S-C. Dutilleul, K. Zidi, K. Ghedira, *A Hybrid Method for Assigning Containers to AGVs in the Dynamic Environment of Container Terminals*, Studies in Informatics and Control search, 36 (2009), pp.2348–2 , ISSN 1220-1766, vol. 24 (1), pp. 43-50,2015.

# Chapitre 5

## Résultats et Discussions

---

*Ce chapitre regroupe l'ensemble des résultats de simulation associés au développement d'un modèle génétique pour étude comparative sur les propriétés mécaniques de PLA et de matériaux bio-composites Epoxyde renforcés de fibres naturelles Alfa.*

---

## 1. Introduction

L'utilisation de matériaux bio-composites dans les secteurs industriels et médicaux continue d'augmenter. Ces matériaux donnent aux concepteurs la possibilité de combiner des formes et des fonctions au sein des systèmes et des structures innovantes. L'innovation a largement substituée les composés pétrochimiques ou d'origine organique par des composés de sources biologiques renouvelables [Arb08], [Ant09].

Peu d'études décrivent les propriétés de l'interface fibre-matrice d'un bio-composite, tandis que l'amélioration de la performance mécanique nécessite une meilleure compréhension de cette zone. [Arb08], [Hol97].

Il est bien connu que pour des raisons environnementales, la recherche sur les matériaux écologiques a connu au cours des deux dernières décennies un développement très important. C'est dans ce contexte que s'inscrit le travail que nous présentons, dont on décrit le développement d'un certain nombre de matériaux composites entièrement biodégradables. [Bal02a], [Eic01].

Les fibres végétales (lin, chanvre, bois, alfa) sont de plus en plus utilisées comme matière de renforcement dans les matières plastiques et l'optimisation des propriétés de ces matériaux constitue un défi considérable, car elle répond à deux objectifs : l'utilisation de matériaux biodégradables (le recyclage des composites est un enjeu majeur pour cette classe de matériaux) et la valorisation de certaines ressources agricoles pour les pays émergents [Elo11], [Bra07]. Ces fibres sont en effet une ressource renouvelable, naturellement biodégradable et possèdent des qualités techniques élevées. Les composites ainsi constitués sont des applications de l'industrie automobile (pare-chocs, panneaux de portes, tableau de bord ...) et de construction (isolation, plinthes, cadres de portes, meubles de jardin ...). [Mar97], [Bou11].

Les propriétés de ces matériaux composites sont intimement liées aux propriétés de ses composants, mais aussi à l'interface. [Arb08], [Ant09]. La cohésion entre les fibres végétales et la matrice polymère reste un obstacle technologique au développement de ces matériaux. En effet, la cellulose, composant principal des fibres végétales, est généralement difficilement compatible ou pas avec la matrice thermoplastique. De nombreuses études ont donc porté sur l'amélioration de ces propriétés, notamment par le traitement physique ou chimique des fibres. [Bal02a], [Nad09].

Il a été montré, par exemple, que le traitement en autoclave ou par plasma froid, augmentait la résistance à l'eau des fibres [Bes09], [Sam15]. Si ces études ont clairement démontré une augmentation des propriétés souhaitées, la nature exacte de ces améliorations à l'échelle nanoscopique et microscopique, reste encore un sujet à débat.

Ce travail vise à comparer la résistance de l'interface fibre-matrice entre trois matériaux composites et bio-composites verre / époxy, alfa / époxy et alfa / PLA, en mesurant les différentes propriétés mécaniques.

## 2. Examen des modèles analytiques

### 2.1. Modèle basé sur l'approche statistique

Lorsque la contrainte est uniforme, l'endommagement à la matrice, est donné [Wei10] par la formule (5.1)

$$D_m = 1 - \exp \left\{ -V_m \left[ \frac{\sigma + \sigma_m^T}{\sigma_{0m}} \right]^{m_m} \right\} \quad (5.1)$$

Avec:

- $(\sigma)$ : Contrainte appliquée ;
- $(\sigma_m^T)$ : Contrainte thermique ;
- $(V_m)$ : Rapport volume de la matrice ;
- $(m_m \text{ et } \sigma_{0m})$ : Paramètres de Weibull.

Une fibre cassée est déchargée sur toute sa longueur. C'est-à-dire qu'il ne peut pas se casser une fois. La rupture suit une loi similaire à celle décrite pour la matrice.

$$D_f = 1 - \exp \left\{ -A_f * L_{equi} * \left[ \frac{\sigma_{\max}^f}{\sigma_{0f}} \right]^{m_f} \right\} \quad (5.2)$$

Avec:

- $(\sigma_{\max}^f)$ : Contrainte maximale appliquée
- $(L_{equi})$ : Longueur des fibres aurait la même rupture de manière cohérente.

Ces variables relatives aux composants d'un matériau composite (fibre et matrice), sont prises en compte par la formule 5.3. Ces variables vont donc nous permettre d'apprécier les résultats de l'algorithme génétique.

## 2.2. Modèle basé sur l'approche micromécanique

Pour une seule fibre entourée de matrice, de nombreuses solutions analytiques ont été proposées par Cox. [Cox52], fournit la forme de la contrainte de cisaillement le long de la longueur de la fibre sous la forme suivante:

$$\tau = \frac{E_f a \varepsilon}{2} \beta \tanh(\beta l/2) \quad (5.3)$$

Pour simplifier les calculs, nous prenons:

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

Avec:

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

( $E_f$ ): Module d'Young de la fibre;

( $\varepsilon$ ): Déformation;

( $a$ ): Rayon de la fibre;

( $R$ ): Distance entre les fibres;

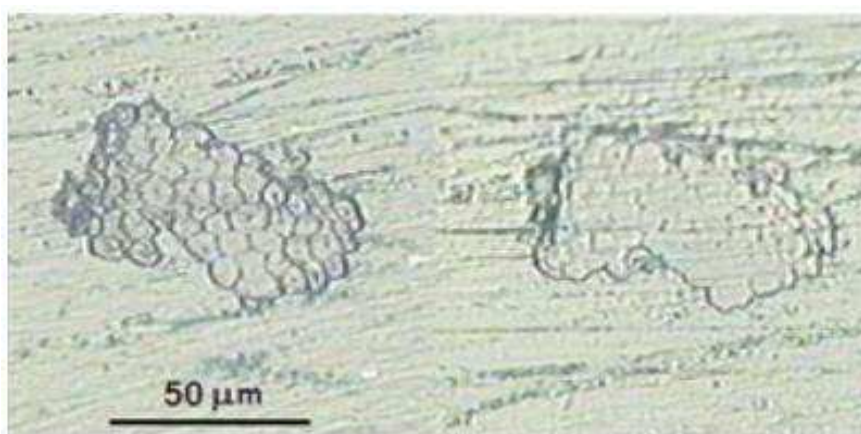
( $\tau$ ): Contrainte de cisaillement de l'interface.

## 3. Propriétés mécaniques des composites étudiés

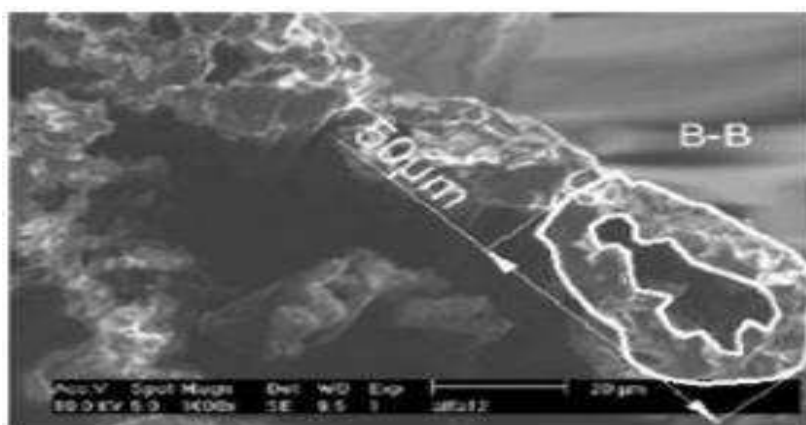
### 3.1. Structure et morphologie des fibres Alfa

En général, la structure fibreuse est hétérogène. Les plus petites parties des fibres sont des filaments cellulotiques ou des fibrilles ayant des longueurs de 2 à 5 mm et des diamètres de 5 à 10  $\mu\text{m}$ . Ces fibrilles sont liées de manière dense par l'hémicellulose dans la fibre.

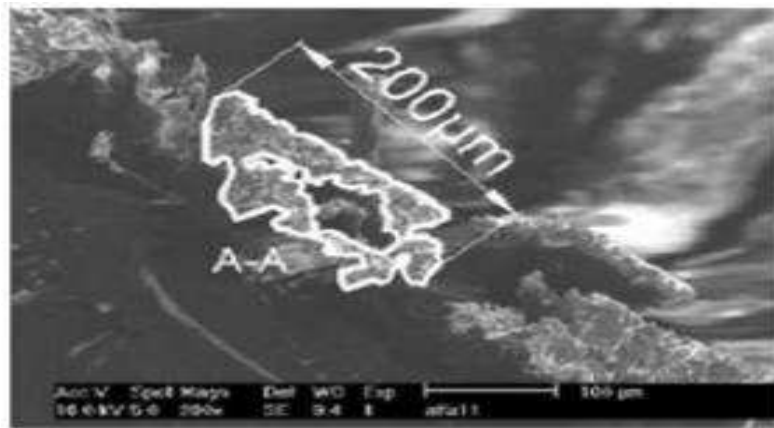
Leur section transversale a une forme irrégulière comme le montre la photo prise avec un microscope optique (figure 5.1). Les fibres ont un diamètre d'environ 50  $\mu\text{m}$  (figure 5.2). La liaison entre les fibres est assurée par la lignine et la pectine pour former les faisceaux de fibres, c'est-à-dire des fibres techniques. La section transversale des faisceaux de fibres montre que la section n'est pas circulaire et le diamètre est d'environ 200  $\mu\text{m}$  (figure 5.3). La liaison des faisceaux de fibres donne finalement la tige (figure 5.4) [Eva10], [Wer14].



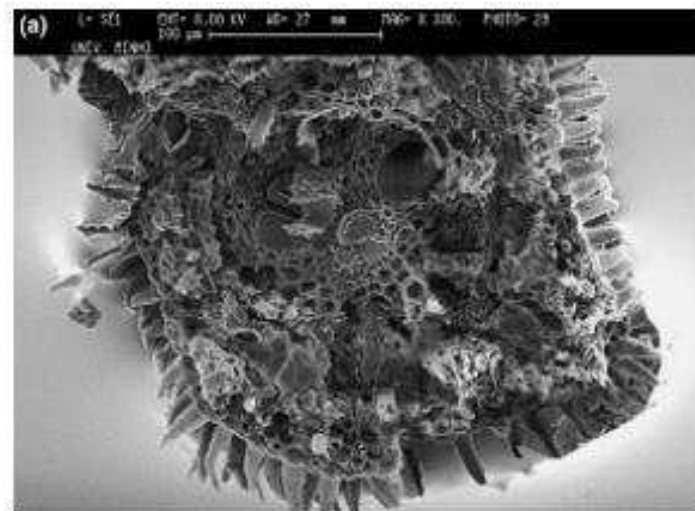
*Figure 5.1. Fibres composées de filaments de cellulose  
(Image prise par microscope optique)*



*Figure 5.2. Section transversale des fibres  
(Image prise par microscope électronique à balayage)*



*Figure 5.3. Section transversale d'un faisceau de fibres d'alfa  
(Image prise par microscope électronique à balayage)*



*Figure 5.4. Section transversale d'une tige d'alfa  
(Image prise par microscope électronique à balayage)*

### 3.2. Les propriétés mécaniques des fibres d'Alfa par rapport aux autres fibres naturelles

Le tableau 5.1 donne les propriétés de traction pour les principales fibres naturelles et synthétiques. En ce qui concerne alfa, ce sont les propriétés de l'alfa technique, c'est-à-dire des faisceaux de fibres. En ce qui concerne l'allongement à la rupture, sa valeur pour l'alfa technique (1,5-2,4%) est proche de celle du jute (1,5-1,8%), du chanvre (1,6%) et du sisal (2-2,5%). L'alfa technique a une tension de claquage comprise entre 134 et 220 MPa, comparable à celle du coton (191-398 MPa). Quant au module de Young, qui a une indication de la rigidité pour l'alfa technique (13-17,8 GPa) est proche de celui du lin (18 GPa) et du chanvre (17 GPa) et est supérieur à celui du coton (3.6-8.4) GPa) et agave (4,2 GPa).

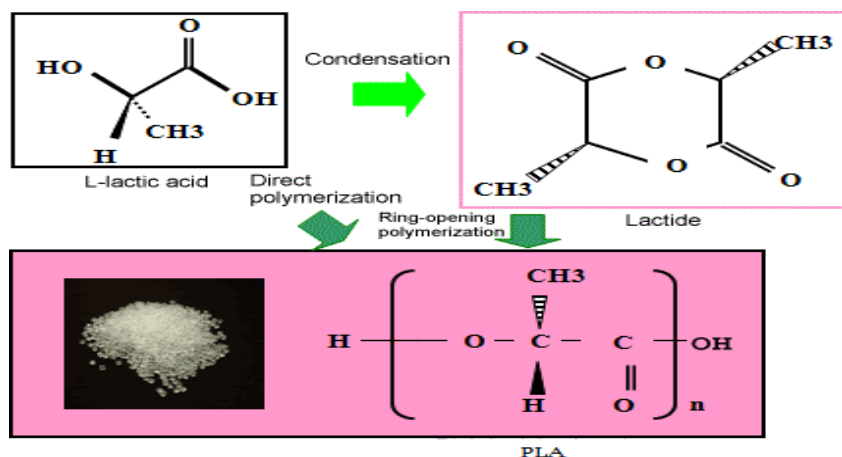
| Fibres  | Densité (g /cm <sup>3</sup> ) | Déformation à la rupture (%) | Contrainte à la rupture (Mpa) | Module de Young (Gpa) |
|---------|-------------------------------|------------------------------|-------------------------------|-----------------------|
| Alfa    | 1.4                           | 1.5-2.4                      | 134-220                       | 13-17.8               |
| agave   | 1.4                           | 20                           | 350                           | 4.2                   |
| coton   | 1.5                           | 7 - 8                        | 191 - 398                     | 3.6 - 8.4             |
| jute    | 1.3                           | 1.5 - 1.8                    | 300 - 600                     | 20                    |
| lin     | 1.5                           | 2.7 - 3.2                    | 230 - 690                     | 18                    |
| chanvre | 1.5                           | 1.6                          | 460                           | 17                    |
| ramie   | 1.5                           | 3.6 - 3.8                    | 266 - 630                     | 42 - 86               |
| sisal   | 1.5                           | 2 - 2.5                      | 340 - 423                     | 6 - 14                |
| bois    | 1.5                           | -                            | 666                           | 26                    |
| E verre | 2.6                           | 2.5                          | 770 - 1345                    | 27                    |
| Verre S | 2.6                           | 2.8                          | 1750                          | 33                    |
| Kevlar  | 1.4                           | 3.3 - 3.7                    | 2140 - 2250                   | 45 - 48               |
| carbone | 1.7                           | 1.4 - 1.8                    | 2350                          | 140                   |

**Tableau 5.1. Les propriétés mécaniques de traction des principales fibres naturelles et synthétiques.**

Les propriétés mécaniques de traction de l'alfa technique sont généralement similaires à celles du jute, du lin, du chanvre et du sisal. [Eva10], [Pra11].

### 3.3. Acide polylactique (PLA)

Poly lactide ou poly (acide lactique) est généralement un polyester aliphatique qui est synthétisé par condensation à partir d'un  $\alpha$ -hydroxy acide (acide lactique) ou par polymérisation par ouverture de cycle à partir d'un monomère cyclique: le lactide (figure 5.5) [Cai02], [Wer14].



*Figure 5.5. Procédé de production de l'acide polylactique (PLA).*

Il s'agit d'un polymère biorésorbable aux propriétés thermoplastiques, de haute résistance. Cependant, ses propriétés mécaniques dépendent fortement de la méthode de synthèse et à la qualité du polymère synthétisé (composition, pureté, poids moléculaire). Peut être préparé à partir d'acide lactique en grande quantité (jusqu'à 105 tonnes par an) à partir de n'importe quel polysaccharide selon un procédé biotechnologique. Ainsi, la production de polylactide peut être basée sur des ressources renouvelables et être indépendante du prix ou de l'approvisionnement pétrolier. Les propriétés physiques (y compris mécaniques) du polylactide peuvent être facilement contrôlées en modifiant la composition du mélange d'isomères L ou D. La zone d'application du PLA s'étend de l'industrie de l'emballage aux applications biomédicales (sutures, implants, libération contrôlée ...) [Bes08], [Wer14].

Habituellement, le PLA commercial est un poly-L-lactique (PLLA) et poly-DL lactique (PDLA) acide copolymères [Bes09], [Mok14a].

Nous avons présenté dans le tableau 5.2 les propriétés mécaniques utilisées dans notre modèle génétique pour les différents constituants des matériaux bio-composites.

| Désignation |      | Coefficient de dilatation thermique [1/ °c] | Rayon [m]              | Module de Young [MPa] | Densité [g/cm <sup>3</sup> ] | Coefficient de Poisson |
|-------------|------|---------------------------------------------|------------------------|-----------------------|------------------------------|------------------------|
| Fibre       | ALFA | /                                           | 13-30*10 <sup>-6</sup> | 12.7*10 <sup>+3</sup> | 1.51                         | 0.30                   |
| Matrice     | PLA  | 7.85*10 <sup>-5</sup>                       | 40*10 <sup>-6</sup>    | 3.5*10 <sup>+3</sup>  | 1.25                         | 0.36                   |

*Tableau 5.2. Les propriétés mécaniques des différents constituants des matériaux biocomposites.*

## 4. Simulation numérique par un algorithme génétique (GA)

### 4.1. Développement

L'objectif recherché est de montrer l'effet de la fibre naturelle alfa sur la résistance de l'interface fibre-matrice des matériaux composites et bio-composite. Notre approche consiste à changer la structure de notre matériau en remplaçant la matrice époxyde et PLA, à chaque étape du calcul de l'endommagement à l'interface. Notre simulation génétique consiste à utiliser les valeurs de chaque propriété mécanique pour calculer chaque fois le niveau de l'endommagement à l'interface en utilisant les équations de Weibull [Bal02a], [Bal02b] et l'équation de Cox [Arb08]. L'endommagement à l'interface est déterminé par l'intersection des endommagements de la fibre alfa et des endommagements de chaque matrice sélectionnée (époxy et PLA). L'évaluation de chaque génération est faite par une fonction objective basée sur le modèle de Cox, qui inclut toutes les variables définies au début de l'algorithme (propriétés mécaniques de chaque composant du composite, module de Young de la fibre, ...). [Mok14a], [Mok14b]. Enfin, nous déterminons l'endommagement à la longueur de la fibre d'interface pour les trois matériaux utilisés. Les calculs numériques sont effectués à l'aide du logiciel Matlab version R2012a.

## 4.2. L'organigramme

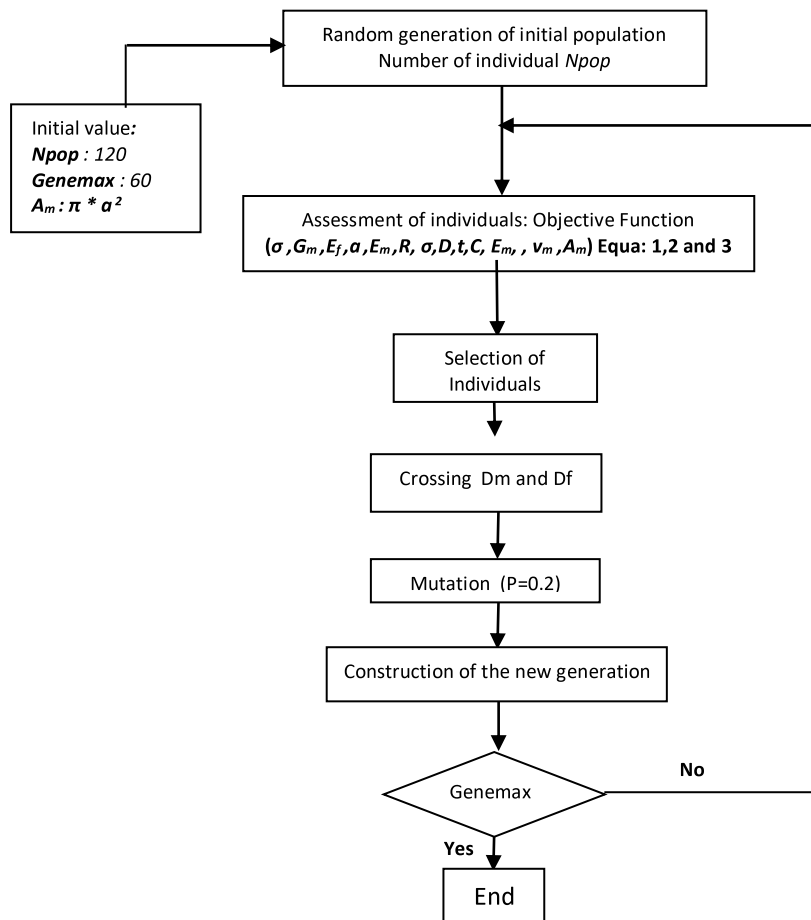


Figure 5.6. L'organigramme de l'algorithme génétique

## 5. Résultats de la simulation

Selon les résultats de la simulation par un algorithme génétique. La force des trois matériaux composites et biocomposites est examinée après l'application de différentes contraintes ( $\sigma = 80 \text{ N/m}^2$ ,  $\sigma = 100 \text{ N/m}^2$  et  $\sigma = 120 \text{ N/m}^2$ ) pour calculer les endommagements à l'interface de la matrice fibreuse. Les figures 5.7, 5.8, 5.9, 5.10, 5.11, 5.12, 5.13, 5.14 et 5.15 montrent respectivement le niveau de l'endommagement à l'interface de verre / époxyde, Alfa / époxyde et Alfa / PLA.

### 5.1. Verre / Epoxyde

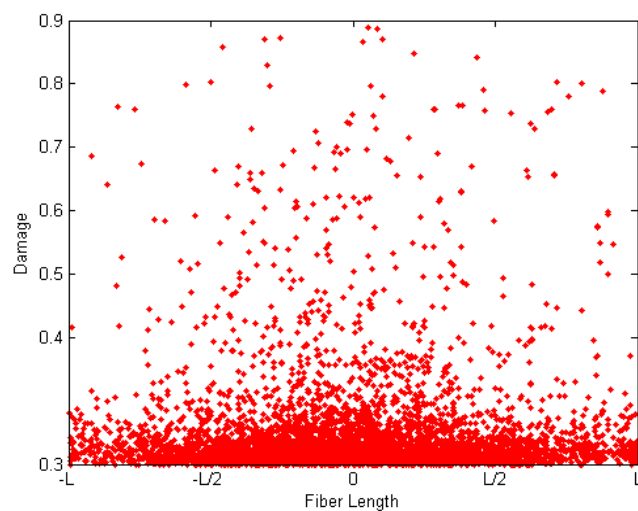
Les figures 5.7, 5.8 et 5.9 montrent que l'endommagement à l'interface commence à 0,3 pour  $\sigma = 80 \text{ N/m}^2$ , puis augmente jusqu'à une valeur maximale égale à 0,56 pour  $\sigma = 120 \text{ N/m}^2$ , on note la présence d'une symétrie des endommagements à l'interface, qui est dense au milieu et faible aux extrémités, cela signifie que la détérioration de l'interface du milieu est plus grande par rapport aux extrémités, en raison de la concentration des contraintes. La valeur des endommagements que nous avons trouvés dans ce matériau est plus élevée que celle trouvée pour Alfa / époxyde et Alfa / PLA.

### 5.2. Alfa / Epoxyde

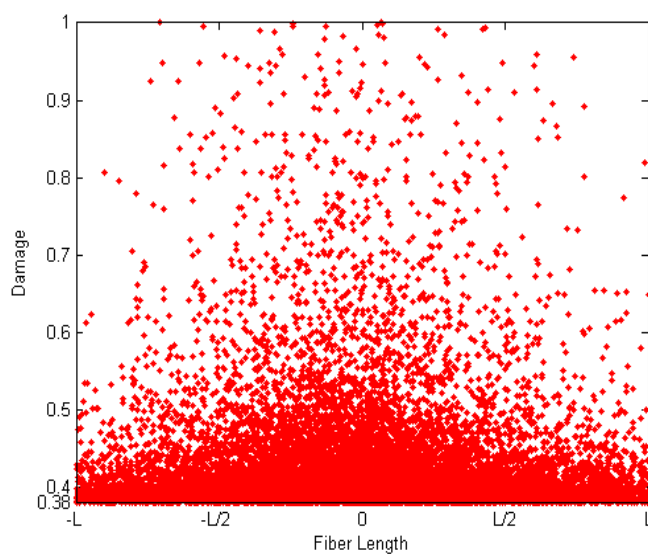
Les figures 5.10, 5.11 et 5.12 montrent que l'endommagement à l'interface commence à 0,28 pour  $\sigma = 80 \text{ N/m}^2$ , puis augmente jusqu'à une valeur maximale égale à 0,48 pour  $\sigma = 120 \text{ N/m}^2$ , on note la présence d'une symétrie de l'endommagement à l'interface, dense au milieu et faible aux extrémités, signifie que la détérioration de l'interface du milieu est plus grande par rapport aux extrémités, du fait de la concentration des contraintes. La valeur des endommagements que nous avons trouvés dans ce matériau est plus élevée que celle trouvée pour l'Alfa / PLA.

### 5.3. Alfa / PLA

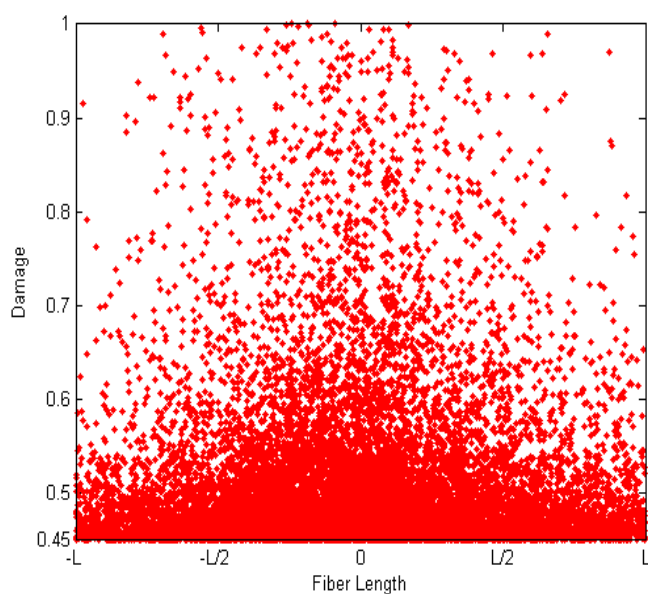
On observe sur les figures 5.13, 5.14 et 5.15 que l'endommagement de l'interface commence à 0,2 pour  $\sigma = 80 \text{ N/m}^2$ , puis augmente jusqu'à une valeur maximale égale à 0,35 pour  $\sigma = 120 \text{ N/m}^2$ , on observe également l'existence d'une symétrie de l'endommagement à l'interface, dense au milieu et faible aux extrémités, cela signifie que la détérioration de l'interface du milieu est plus grande par rapport aux extrémités du fait de la concentration des contraintes. Le niveau d'endommagement de ce matériau est inférieur à celui des autres matériaux composites (verre / époxyde) et des bio-composites (Alfa / Epoxyde).



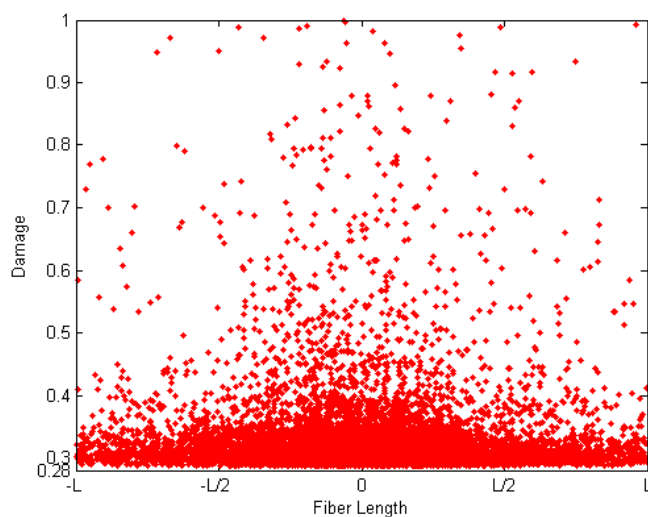
*Figure 5.7. Niveau d'endommagement de l'interface verre/Epoxyde avec  $\sigma = 80 \text{ N/m}^2$*



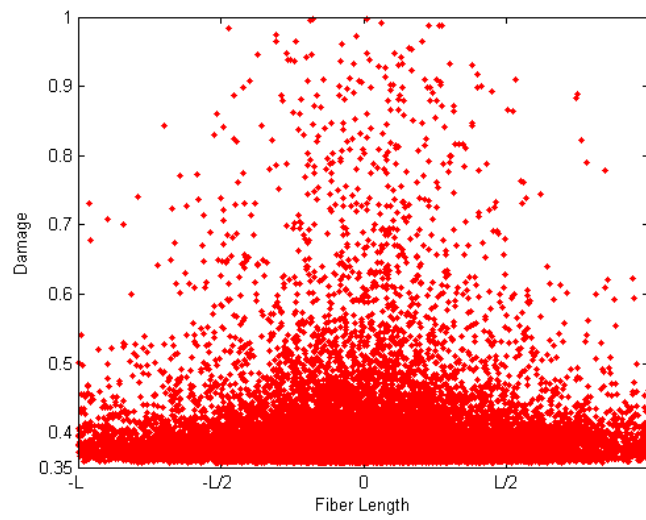
*Figure 5.8. Niveau d'endommagement de l'interface verre/Epoxyde avec  $\sigma = 100 \text{ N/m}^2$*



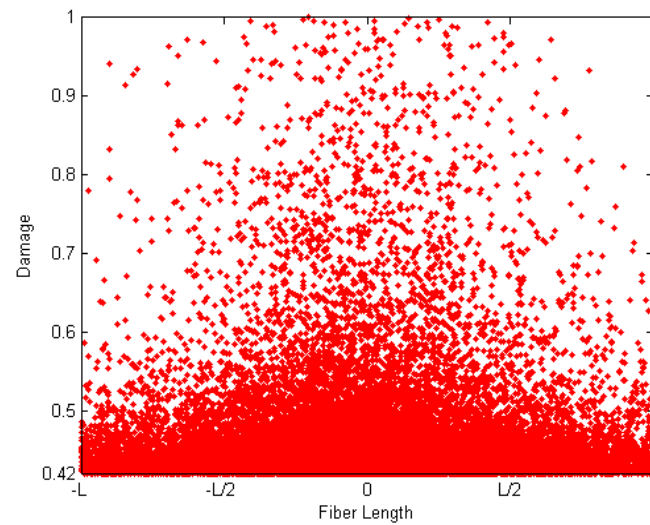
**Figure 5.9.** Niveau d'endommagement de l'interface verre/Epoxyde avec  $\sigma = 120 \text{ N/m}^2$



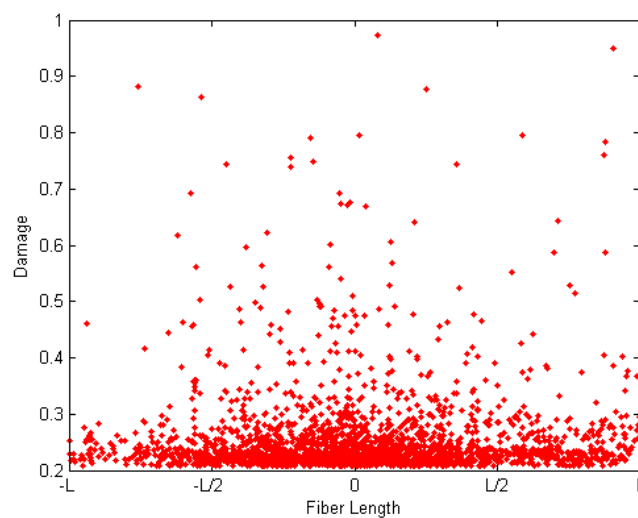
**Figure 5.10.** Niveau d'endommagement de l'interface Alfa/Epoxyde avec  $\sigma = 80 \text{ N/m}^2$



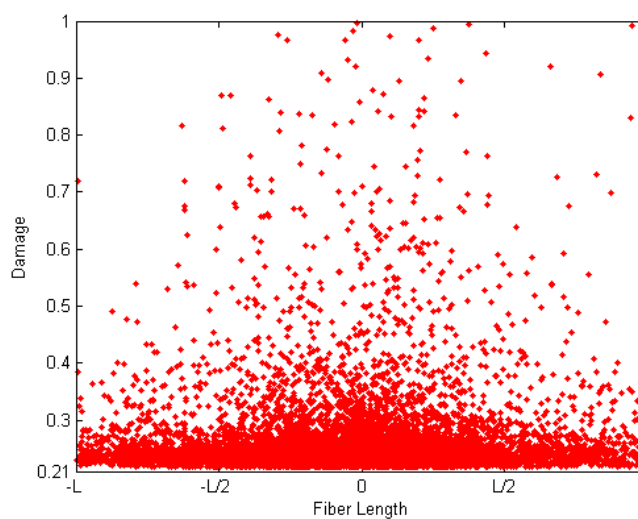
**Figure 5.11.** Niveau d'endommagement de l'interface Alfa/Epoxyde avec  $\sigma = 100 \text{ N/m}^2$



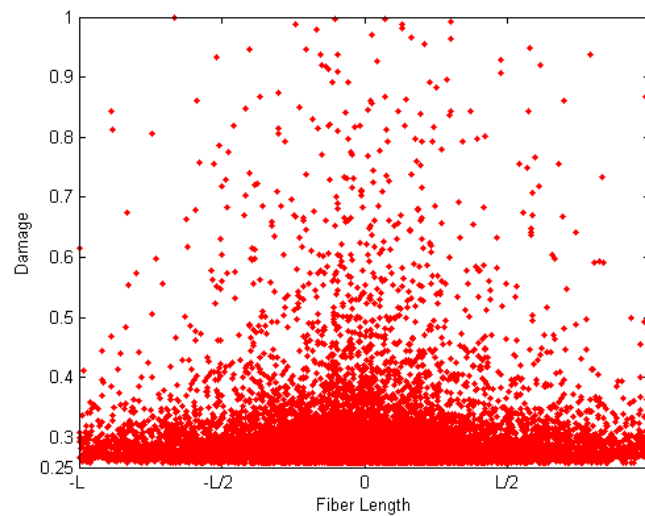
**Figure 5.12.** Niveau d'endommagement de l'interface Alfa/Epoxyde avec  $\sigma = 120 \text{ N/m}^2$



**Figure 5.13.** Niveau d'endommagement de l'interface alfa/PLA avec  $\sigma = 80 \text{ N/m}^2$



**Figure 5.14.** Niveau d'endommagement de l'interface alfa/PLA avec  $\sigma = 100 \text{ N/m}^2$



*Figure 5.15. Niveau d'endommagement de l'interface alfa/PLA avec  $\sigma = 120 \text{ N/m}^2$*

## 6. Conclusion

Les résultats trouvés après le calcul de l'algorithme génétique, montrent que le niveau de l'endommagement est lié à la contrainte mécanique appliquée, pour les matériaux qui ont été étudiés verre / époxyde, Alfa / époxyde et Alfa / PLA. Notre simulation montre que l'Alfa / PLA est plus résistant que l'Alfa / époxyde et l'Alfa / époxyde est plus résistant que le verre / époxyde. Ce résultat coïncide parfaitement avec l'étude expérimentale d'Anthony et al. [Ant09]. Ainsi, nous pouvons conclure que les fibres naturelles ont un rôle important dans l'amélioration de la résistance mécanique des matériaux bio-composites.

## Bibliographies

- [Abd08] El Abdi L.K., Etude des fibres extraites de la plante Alfa, Rapport de stage de fin d'études - ENSISA Mulhouse, 2008, p 32 -37.
- [Arb08] Arbelaiz A., Cantero G., Fernández B., Mondragon I., Gañán P., Kenny J.M., « Flax fiber surface modifications: Effects on fiber physico mechanical and flax/polypropylene interface properties », Polymer composite, vol. 26, 2005, p. 324-332.
- [Ant09] Antoine Le Digou, Peter Davies, Christophe Baley,C. Etude de la liaison interfaciale fibre de lin/acide poly(L-lactique) = Study of interfacial bonding of Flax fibre/Poly(L-lactide). Philippe OLIVIER et Jacques LAMON. JNC 16, Jun 2009, Toulouse, France. AMAC, p10., 2009.
- [Bra07] Brahim S.B., Cheikh R.B., Influence of fibre orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite, Composites Science and Technology, 67, 2007, p, 140-147.
- [Bou11] Sofien Bouzouita. Optimisation des interfaces fibre-matrice de composites à renfort naturel. Other. Ecole Centrale de Lyon; Ecole Nationale d'Ingénieurs de Monastir, 2011. French. <NNT : 2011ECDL0052>. <tel-00769959>
- [Bou09] Bouiri B., Amrani M., Production of dissolving grade pulp from Alfa, Bioresources,5(1), 2009,p, 291-302.
- [Bes08] Bessadok A., Marais S., Roudesli S., Lixon C., Métayer M., Influence of chemical modifications on water-sorption and mechanical properties of Agave fibres, Composites, Part A, 39, 2008, 29-45.
- [Bes09] [Bessadok A., Roudesli S., Marais S., Follain N., Lebrun L., Alfa fibres for unsaturated polyester composites reinforcement: Effects of chemical treatments on mechanical and permeation properties, Composites, Part A, 40, 2009, p,184-195.
- [Bel99] Beldzki A.K., Gassan J., « Composites reinforced with cellulose based fibers », Polymer science, vol. 24, 1999, p. 221-274.
- [Bal02a] Baley C., “Analysis of the flax fibres tensile behaviour and analysis of the tensile stiffness increase” Composites Part A : Applied Science and Manufacturing, Vol. 33, n°7, 2002, P. 939-948.

- [Bal02b] Baley C., Busnel F., Grohens Y., Sire O., "Influence of chemical treatments on surface properties and adhesion of Flax fibre -Polyester resin", *Composites Part A : Applied Science and Manufacturing* Vol. 37, 2002, P. 1626-1637.
- [Cai02] Sylvain CAILLOL. Synthèse et caractérisation de nouveaux copolymères potentiellement autoassociatifs. Material chemistry. Université Sciences et Technologies - Bordeaux I, 2002. French. <tel-00005354>
- [Cap05] Butt H.J., Cappella B., Kappl M., "Force measurements with atomic force microscope: Technique, interpretations and applications" *Surface Science reports*, Vol. 59, 2005, P.1-152
- [Cox52] Cox H.L The elasticity and strength of paper and other fibrous materials (Elasticité et résistance du papier et autres matériaux fibreux). *British Journal of applied Physics* (1952), P :72-79
- [Eic01] Eichhorn S. J., Baillie C. A., Zafeiropoulos N., Mwaikambo L. Y., Ansell M. P, Dufresne A., Entwistle K. M, Herrera-Franco P. J., Escamilla G. C., Groom L., Hugues M., Hill C., Rialsand T. G., Wild P. M., "Review: current international research into cellulosic fibres and composites", *Journal of Materials Science* Vol. 36, 2001 p. 2107–2131.
- [Eva10] Eva Rogge (2010)." Extraction and study of the physical and mechanical properties of Esparto grass fibres in order to find textile applications". Ecole Nationale Supérieure d'Ingénieurs Sud-Alsace (UHA). 2010.
- [Elo11] Abdelmonem ELOUAER. Contribution à la compréhension et à la modélisation du comportement mécanique de matériaux composites à renfort en fibres végétales ». Thèse de Doctorat de l'Université de Reims Champagne-Ardenne. Janvier 2011
- [Hol97] Holmberg M., Berg J., Stemme S., Odbesrg L., Rasmusson J. Surface Force studies of Langmuir-Blodgett Cellulose Films. *Journal of colloid and interface science*, Vol. 186, 1997, P. 369.
- [Mar97] Marais S., Gouanvé F., Bonnesoeur A., Grenet J., Poncin-Epaillard F., Morvan C., Métayer M., « Unsaturated polyester composites reinforced with flax fibers: effect of cold plasma and autoclave treatments on mechanical and permeation properties », *Composites Part A* 36, issue p : 975-986.
- [Mag13] A. Maghchiche " Characterisation of Esparto Grass Fibers Reinforced Biodegradable Polymer Composites" *Biosciences Biotechnology Research Asia*.2013, Vol. 10(2), 665-673.

- [Mok14a] A. Mokaddem, Alami Mohamed, B. Doumi and Boutaous Ahmed, Prediction by a genetic algorithm of the fiber matrix interface damage for composite material. Part1 : study of shear damage to two composites T300/914 and Peek/APC2.. *Strength of materials*, 2014, Vol. 46, No.4, p. 543-547.
- [Mok14b] A. Mokaddem, M. Alami, N. Ziani, N.Beldjoudi and A. Boutaous. Prediction by a genetic algorithm of the fiber matrix interface damage for composite material. Part2 : study of shear damage to Graphite/epoxy nanocomposite. *Strength of materials*, 2014, Vol. 46, No. 4, p.548-552.
- [Nad09] Nadji H., Diouf P.N., Benaboura A., Bedard Y., Riedl B., Stevanovic T., Comparative study of lignins isolated from Alfa grass (*Stipa tenacissima* L.), *Bioresource Technology*, 100,2009,p, 3585-3592.
- [Oli11] Olivier Pras. Utilisation de cellulose pour l'\_elaboration de materiaux photoluminescents ou conducteurs. Other. Université de Grenoble, 2011. French. <NNT : 2011GRENI071>. <tel00685846>
- [Pai07] Paiva M.C., Ammar I., Campos A.R., Cheikh R.B., Cunha A.M., Alfa fibres: Mechanical, morphological and interfacial characterization, *Composites Science and Technology*, 67, 2007, p, 1132-1138.
- [Sam15] Samson Rwawiire, Blanka Tomkova. « Morphological, Thermal, and Mechanical Characterization of Sansevieria trifasciata Fibers”, *Journal of Natural Fibers*, 12;p, 201–210, 2015, DOI: 10.1080/15440478.2014.914006.
- [Wei10] Weibull W. "A Statistical Distribution Function of Wide Applicability", *Journal of Applied Mechanics*, 1939, p. 293-297
- [Wer14] Jean-Luc Wertz (2014)." Les biocompositess et composites polymère-chanvre en particulier ". Unité de Chimie biologique industrielle, Université de Liège – Gembloux Agro-Bio Tech. Janvier 2014.

## Conclusion Générale

# Conclusion Générale

L'Algérie dispose toutes les capacités et les ressources d'énergies fossiles et renouvelables, ainsi que la matière première des fibres naturelles. Ces fibres sont en effet une ressource renouvelable, biodégradable et naturellement dotée de qualités techniques et de propriétés mécaniques très élevées. La fibre Alfa, qu'on peut trouver partout, depuis les pentes Sud de l'Atlas tellien jusqu'à la bordure Nord du Sahara, est considérée comme le renfort compétitif de la fibre de verre qui est la plus utilisée dans les matériaux composites. Le domaine des matériaux biocomposites pour les grandes applications industrielles est en croissance continue, cette croissance est due principalement à leur légèreté et à leur résistance, mais le problème de recyclage reste toujours posé.

L'objectif de cette étude est de localiser l'endommagement de l'interface fibre-matrice par une simulation génétique et d'analyser le comportement micromécanique des trois matériaux composites et biocomposites: Verre / époxyde, alfa / époxyde et alfa / PLA. Pour caractériser la liaison interfaciale et calculer l'endommagement de cette partie, nous avons utilisé une approche génétique basée sur le modèle de Cox et le formalisme de Weibull.

Peu d'études expérimentales décrivent le comportement de l'endommagement de l'interface fibre-matrice d'un matériau biocomposite. Notre contribution est de fournir un modèle analytique basé sur une approche génétique pour prédire l'endommagement de l'interface des biocomposites, et de proposer aux expérimentateurs de nouveaux matériaux biocomposites résistants, légers et qui se conformes aux réglementations environnementales.

Les propriétés mécaniques des biocomposites alfa / acide polylactique (PLA) sont largement conditionnées par la liaison interfaciale entre les deux constituants (fibre et matrice). Les résultats de cette simulation montrent que le niveau d'endommagement de l'interface est lié à la nature des matériaux utilisés et à la contrainte mécanique appliquée, et a montré que le biomatériau Alfa / PLA est plus résistant que le biomatériau alfa / époxyde. Les résultats de cette modélisation sont en bon accord avec ceux obtenus expérimentalement par Antoine Le Duigou et al. qui ont montré que les fibres naturelles participent à l'amélioration de la résistance mécanique des matériaux composites et que les matériaux biocomposites sont plus résistants que les matériaux composites traditionnels.

Nos perspectives s'ouvrent sur l'étude des nouveaux matériaux biocomposites basés principalement sur une matrice biopolymère sous l'effet de l'humidité pour voir la résistance de l'interface fibre-matrice et de la comparer avec nos résultats trouvés précédemment.

## ***Résumé***

Depuis le début du 21ème siècle, les industriels et les institutions mondiales exposent un besoin éminent et important pour l'utilisation des fibres végétales et les biopolymères; points de vue économique, environnemental et leurs propriétés spécifiques. Les fibres végétales d'Alfa qui sont en abondance dans le territoire algérien, et présentent de bonnes résistances dans son environnement naturel.

Ce travail consiste d'appliquer une approche génétique basée sur le modèle de Cox et le modèle probabiliste de Weibull, pour calculer l'endommagement à l'interface fibre-matrice des matériaux composites et bio-composites Verre/Epoxyde, Alfa/Epoxyde et Alfa /PLA, sous l'effet de différentes contraintes mécaniques de traction. Nos résultats dévoilent que le niveau de l'endommagement est lié à la contrainte mécanique appliquée et montrent aussi que le matériau bio-composite Alfa / PLA est le plus résistant. Nos résultats de calcul sont en bon accord avec les résultats expérimentaux et théoriques disponibles dans la littérature.

**Mots-clés:** fibre Alfa, contrainte mécanique, bio-composite, endommagement, interface.

## ***Abstract***

Since the beginning of the 21th century, industrialists and world institutions have been exhibiting an eminent and important need for the use of plant fibers and biopolymers for their economic, environmental aspect and their specific properties. Alfa's plant fibers, which are in abundance in Algerian territory, and have good resistance in its natural environment.

This work consists of applying a genetic approach based on the Cox model and the Weibull probabilistic model, to calculate the damage at the fiber-matrix interface of composite and bio-composite materials Glass / Epoxy, Alfa / Epoxy and Alfa / PLA, under the effect of various mechanical tensile stresses. Our results show that the level of damage is related to the applied mechanical stress and show that the Alfa / PLA bio-composite material is the most resistant. Our calculation results are in good agreement with the experimental and theoretical results available in the literature.

**Keywords:** Alfa fiber, mechanical stress, bio-composite, damage, interface.