

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE

**UNIVERSITE SAAED DAHLEB -BLIDA 01-**

**Faculté de technologie**

**Département de Génie Mécanique**

**Option : GENIE DES MATERIAUX**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

**AFIN D'OBTENIR LE DIPLOME DE MASTER II**

## **THÈME**

**EFFET DES CONTRAINTES RÉSIDUELLES SUR LA  
FISSURATION DANS UN MATÉRIAU COMPOSITE À FIBRE**

**Présenté par :**

**M. LASSEL YUCEF**

**M. SOUILAMAS MED-NADJIB**

**Encadrer par :**

**Mme. S. RAMDOUM**

Année universitaire 2020/2021



# Remerciement

Avant tout je voudrais remercier « **Allah** » pour la volonté, la santé et la patience qu'il nous a donnée durant toutes ces longues années. Et de nous accorder la force pour réaliser ce travail qu'on a fait de tout cœur.

Nos remerciements et gratitudes vont à **nos chers parents** pour leur soutien, et leur sacrifice pour nous qui nous a encourager pour donner à fond et avancé vers le succès. Et leur orientation permanente dont nous bénéficie de notre mine personnelle.

Ainsi, nous tenons également à exprimer nos vifs remerciements à notre promotrice **Mme. RAMDOUM Sara** de nous avoir suivi, encadrer, et elle nous a rien épargné tout le long de la réalisation de cette thèse. Et je le dis sincèrement sans son soutien en arrivera jamais à réaliser ce travail. Merci beaucoup madame on vous n'oubliera jamais.

Nos remerciements aux messieurs les membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en participant au jugement de ce travail.

Nous tenons à remercier vivement toute personnes qui nous ont aidé à élaborer et réaliser ce mémoire, ainsi à tous ceux qui nous aidés de présent ou de loin à accomplir ce travail.

## Le sommaire

<b>Remerciment .....</b>	<b>I</b>
<b>Le sommaire .....</b>	<b>II</b>
<b>Liste des figures.....</b>	<b>IV</b>
<b>Liste des tableaux.....</b>	<b>V</b>
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>

## PARTIE I PARTIE BIBLIOGRAPHIQUE

### Chapitre I Elaboration des matériaux composites

Définition .....	3
I.1. Constituants des matériaux composites.....	3
I.1.1 Matrices .....	3
I.1.2 matrices organiques .....	3
I.2 Renforts .....	4
I.2.1 fibre de verre : .....	6
I.2.2 Autres types de fibres et renforts.....	6
I.3 Interface fibre/matrice .....	7
I.3.1 Les caractéristiques générales .....	7
I.4. Matériaux utilisés pour notre étude.....	8
I.4.1 Fibres de Verre.....	8
I.4.1.1 Présentation de la fibre de Verre .....	8
I.4.1.2 Application de fibres de Verres.....	9
I.4.2. Matrice d'Epoxy .....	10

### Chapitre II Les contraintes internes dans les matériaux composites

Introduction .....	12
II.1. Définition .....	12
II.2. Origine des contraintes résiduelles .....	13
II.3. Différents ordres de contraintes.....	13
II.4. Définition des trois ordres de contraintes.....	14
II.4.1. Premier ordre .....	14

II.4.2. Deuxième ordre .....	15
II.4.3. Troisième ordre.....	16
II.5. Principe des traitements de mise en précontrainte superficielle .....	17
II.5.1. Lors de la polymérisation .....	18
II.5.2. Lors du refroidissement.....	18
II.5.2.1. À l'échelle microscopique .....	18
II.5.2.2.à l'échelle macroscopique.....	18
II.6. Effets des contraintes internes .....	19

## **Chapitre III Fissuration dans les matériaux composites**

Introduction .....	21
III.1. L'endommagement des matériaux composites .....	21
III.2. Caractéristiques des mécanismes d'endommagement .....	23
III.2.1. Fissuration matricielle.....	23
III.2.4. Analyse de fracture conventionnelle .....	26
Conclusion.....	29
Références de partie I.....	30

## **PARTI II RESULTATS ET SIMULATION NUMERIQUE**

### **Chapitre IV Simulation numérique par éléments finis**

Introduction .....	32
IV.1 Modélisation par éléments finis .....	32
IV.1.1 La méthode des éléments finis .....	32
IV.2 Présentation du problème .....	33
IV.3 Présentation du logiciel ABAQUS.....	33
IV.5. Le choix de l'élément fini.....	37
IV.6 Modèle utilisé .....	37

### **Chapitre V Analyse et résultats**

Introduction .....	41
V.1. Effet de la distribution des contraintes dans le composite verre / époxy .....	42
V.3. Cas d'une fissure matricielle.....	47
V.3.1. Effet du chargement thermique .....	47
V.3.Cas d'une fissure inter-faciale.....	50

V.3.1. Effet du chargement thermique .....	50
V.3.2. Effet du chargement mécanique .....	53
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>58</b>
<b>Références partie II .....</b>	<b>60</b>

## Liste des figure

<b>Figure I.1</b> : Quelques applications des CMO "haute performance" : (a) un catamaran, (b) des skis de compétition .....	4
<b>Figure I.2</b> : type de renforts .....	5
<b>Figure I.3</b> : Exemples de tissus de renforts utilisés pour les CMO haute performance : (a) verre, (b) carbone, (c) aramide (Kevlar).....	5
<b>Figure I.4</b> : Fibre de verres .....	8
<b>Figure I.5</b> : exemple de application de la fibres de verres (application dans le domaine maritime et domaine de l automobiles) .....	9
<b>Figure I.6</b> : Matériau époxy .....	11
<b>Figure II. 1</b> Origine des contraintes résiduelles. Interdépendance entre les différents états de matériaux [6].....	13
<b>Figure II. 2</b> Effets des contraintes résiduelles sur les performances des matériaux .....	14
<b>Figure II. 3</b> Domaine d'existence des contraintes d'ordre $\sigma$ I.....	15
<b>Figure II. 4</b> Domaine d'existence des contraintes d'ordre $\sigma$ II .....	15
<b>Figure II. 5</b> Domaine d'existence des contraintes d'ordre $\sigma$ III .....	16
<b>Figure II. 6</b> Schéma de la mise en compression des couches superficielles. ....	18
<b>Figure II. 7</b> Développement de contraintes résiduelles thermiques dans un stratifié .....	19
<b>Figure II. 8</b> Vue schématique de la formation de contraintes résiduelles dans un stratifié croisé non équilibré (a), (b) contraintes thermiques résiduelles lorsque le stratifié est contraint, (c) vue de face de la déformation hors du plan lorsqu'il n'est pas contraint .....	20
<b>Figure III. 1</b> les étapes d'endommagement .....	21
<b>Figure III. 2</b> Principaux endommagements rencontrés dans un matériau composite .....	23
<b>Figure III. 3</b> Fissuration de la matrice .....	24
<b>Figure III. 4</b> Rupture de la fibre .....	24
<b>Figure III. 5</b> Microstructure d'un échantillon de polypropylène cristallisé de manière isotherme autour d'une fibre de carbone suivie d'une trempé .....	26
<b>Figure III. 6</b> Tracés de contour pour la longueur de fissure maximale simulé par MathCAD (longueur critique), (a) Distribution des contraintes de Von Misses soumise à une charge critique,(b) Répartition des contraintes de Von Misses soumise à des conditions de charge et thermiques critiques, (c) Approximation de la propagation de fissure soumise à un chargement critique. ....	27

<b>Figure III. 7</b> Tracés de contour agrandis pour la longueur de fissure maximale (longueur critique), simulés par ANSYS, .....	28
<b>Figure IV. 1</b> Organigramme ABAQUS CAE .....	34
<b>Figure IV. 2</b> Les types des éléments de discrétisation .....	35
<b>Figure IV. 3</b> Maillage de la structure étudiée. ....	36
<b>Figure IV. 4</b> les élément hexaédriques pour problème thermomécanique. ....	37
<b>Figure IV. 5</b> répartition carrée des fibres au sein d'un matériau composite .....	38
<b>Figure IV. 6</b> Représentation schématique de la structure élémentaire du matériau composite. ....	39
<b>Figure IV. 7</b> condition aux limites du problème.....	40
<b>Figure V. 1</b> Distribution de contraintes VM, Radiales, Circonférentielles et Longitudinales. ....	43
<b>Figure V. 2</b> a) les taux de contrainte contraintes de MV, b) contraintes radiales, c) contrainte circonférentielle, d) contraintes longitudinales en fonction de la température. ....	46
<b>Figure V. 3</b> Distribution de contraintes $\sigma_{ZZ}$ des deux modèles de composites.....	47
<b>Figure V. 4</b> a) Représentation du modèle géométrique, b) Modèle avec les conditions aux limites. c) Variation du KI en fonction de la température. ....	48
<b>Figure V. 5</b> Distribution des contraintes de Von mises en fonction de la charge mécanique ( $\sigma=200\text{Mpa}$ ).....	49
<b>Figure V. 6</b> Variations du KI en fonction de la charge mécanique. ....	50
<b>Figure V. 7</b> interaction de la zone de fissure inter-faciale et matricielle. ....	51
<b>Figure V. 8</b> Variation du FIC en fonction de la température. ....	53
<b>Figure V. 9</b> Variation du FIC en fonction de la charge de compression appliquée. ....	54
<b>Figure V. 10</b> Variation du FIC en fonction de la température au niveau de la fibre. ....	57

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b> : caractéristique de la fibre de verre [9].....	10
<b>Tableau I.2</b> : caractéristiques de la matrice époxy [3] .....	10

## Liste des équations

<b>Équation 1</b> la contrainte de Von Misses .....	26
---	----

Introduction

**Générale**

## **Introduction générale**

Avec tout le développement de la technologie et les moyens de transport, l'industrie de fabrication ne cesse d'évoluer. Avec cette révolution, beaucoup de nouveaux matériaux ont vu le jour. L'une des grandes familles de matériaux qui ont vu le jour et qui ont un grand impact sur le développement de plusieurs domaines, on trouve les matériaux composites. Les matériaux composites (à matrices métalliques, polymères ou céramiques) offrent aux industriels de grands avantages et se démarquent des matériaux conventionnels par leur facilité de mise en œuvre, leur légèreté, leur résistance, mais aussi ils sont moins sensibles à la corrosion et donne une bonne longévité aux structures. C'est pourquoi ils conviennent à un grand nombre d'applications.

Les contraintes résiduelles sont des contraintes internes qui existent pour un système isolé non soumis à des forces extérieures et en équilibre mécanique et thermique, elles sont présentées dans tous les matériaux, les composants et dans toute structure d'importance technologique.

Les contraintes résiduelles se développent dans la plupart des processus de fabrication comportant la déformation du matériau, le traitement thermique, l'usinage ou les transformations qui changent la forme ainsi que les propriétés du matériau, elles résultent d'un certain nombre de sources et peuvent être présentes dans la matière première non-traitée présentée pendant l'élaboration ou peuvent résulter du chargement en service. L'intensité et la distribution de ces contraintes peuvent être critiques pour la performance des matériaux composites et devraient être considérées dans sa conception.

La mesure des contraintes résiduelles est une question importante dans les systèmes composites et surtout quand les coefficients de dilatation thermique des phases constructives sont très différents, car ceci peut mener au développement des grandes contraintes résiduelles qui peuvent avoir un effet significatif sur les propriétés mécaniques et la performance

Devant l'utilisation croissante des matériaux composites, le développement de moyens de caractérisation structurale et mécanique fiables est devenu un enjeu important sur le plan scientifique, technologique ... En effet, la connaissance précise des propriétés mécaniques des constituants, de leur morphologie et leur arrangement ainsi que la mesure précise des propriétés effectives des matériaux composites sont des conditions nécessaires à la résolution d'un grand nombre de problèmes reliant le comportement global à la microstructure.

## Introduction générale

Par ailleurs, l'évolution des propriétés effectives en fonction de contraintes peut permettre la caractérisation de l'endommagement de ces matériaux, afin d'optimiser leur durée de vie résiduelle.

Notre travail consiste à l'étude de la distribution de contraintes résiduelles dans les composites à matrice organique (verre/ époxy) et une étude de comportement de fissures dans plusieurs cas d'interaction de fissure et de leurs chargements mécaniques et thermiques

**Partie I**

**Partie  
Bibliographique**

**Chapitre I**

**Elaboration**

**Des**

**Matériaux composites**

**Définition**

Un matériau composite est par définition, tout alliage ou matière première comportant un renfort, dispersé sous forme de particules, fibres courtes ou fibres longue, au sein d'une matrice qui les enrobe. Le choix des renforts et de la matrice, de leur disposition, de leur fraction respective, permet à l'élaborateur du matériau de le concevoir pratiquement (sur mesure), optimiser pour la pièce ou il sera utilisé, et même parfois optimisé localement en fonction de la distribution locale des contraintes dans la pièce [1].

**I.1. Constituants des matériaux composites****I.1.1 Matrices**

La matrice d'un composite a pour rôles :

- D'enrober les renforts, les protégeant ainsi du milieu extérieur ;
- D'assurer une répartition spatiale homogène des renforts ;
- De transmettre aux renforts les efforts extérieurs et de les répartir ;
- De conférer la forme à la pièce de matériau composite : ce sont elles qui conditionnent l'aptitude à la mise en forme du composite.

**I.1.2 matrices organiques**

Les matrices en polymère de synthèse sont les plus courantes dans les composites de grande diffusion, associées à des fibres de verre, d'aramide ou de carbone. Elles ont un faible module et une faible résistance à la traction, mais se prêtent facilement à l'imprégnation des renforts. Les plus utilisées sont :

- Les résines polyester insaturées, thermodurcissables, imprégnées à l'état liquide, avant réticulation
- Les résines époxydes, également thermodurcissables, mises en œuvre dans des conditions similaires [1]



(a)

(b)

**Figure I.1** : Quelques applications des CMO "haute performance" : (a) un catamaran, (b) des skis de compétition [2].

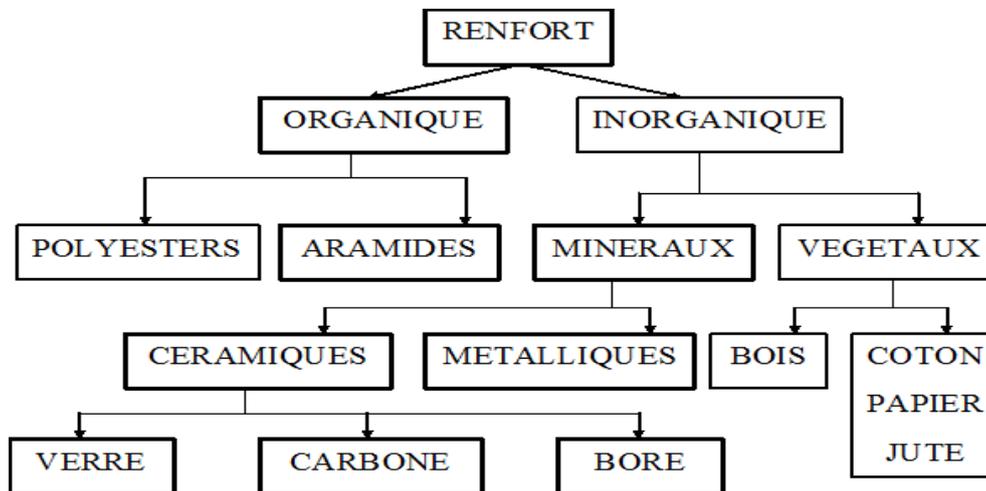
Le choix de la matière dépend donc des caractéristiques recherchées sur pièce. Un polymère thermoplastique est un matériau macromoléculaire dont la caractéristique principale est sa capacité à passer d'un état solide à liquide de manière réversible par apport de chaleur. A l'inverse, un polymère thermodurcissable, une fois polymérisé par la chaleur, devient solide de manière irréversible. Les matières thermoplastiques se mettent en forme principalement par injection alors que celles thermodurcissables sont transformées par un procédé dit « de compression » ou de « compression transfert » [3]. De manière générale, les matrices thermodurcissables sont plus fréquemment employées, en raison de leur plus grande facilité de mise en forme. Parmi les plus courantes, les résines époxy (ou époxydes), très employées dans les applications "hautes performances" [1]. Les polymères sont caractérisés par une faible densité, une résistance mécanique relativement faible, et une grande déformation à la rupture. Les avantages principaux sont le procédé de fabrication relativement mature et le poids faible. Ce type de matériaux composites a été développé surtout pour les applications aéronautiques ou la réduction de poids est essentielle. Ils ont aussi malgré leur bonne déformabilité, une bonne résistance à l'usure. Ils sont faciles à assembler et ont une bonne tenue à la corrosion. Enfin, ce sont des matériaux légers et ils peuvent être très bon marché [1].

## I.2 Renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique et la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme filamentaire, allant de la particule de forme

allongée à la fibre continue qui donne au matériau un effet directif. Ils sont caractérisés par :

- La nature de la fibre, minérale ou organique,
- L'architecture du renfort.



**Figure I.2 :** type de renforts [ 1 ].

Ils doivent également être compatibles avec la matrice du composite sur le plan chimique, c'est-à-dire assurer une adhérence inter-faciale renfort-matrice suffisante et stable dans le temps [1]. Les principaux types de renforts se distinguent par leur géométrie (particules, billes, fibres longues), par leur disposition notamment pour les fibres (aléatoire 3D, feutres, nappes de mat 2D, nappes unidirectionnelles, tissages 2D, tissages 3D) ou par leur nature.



**Figure I.3 :** Exemples de tissus de renforts utilisés pour les CMO haute performance : (a) verre, (b) carbone, (c) aramide (Kevlar).

### I.2.1 fibre de verre :

Les fibres de Verre de diverses qualités sont de loin les renforts les plus courants. Leur procédé d'élaboration par filage du verre dont la résistance à la rupture en traction ou flexion est d'autant plus élevée que leur diamètre est faible [1]. Les fibres de verre sont obtenues à partir de silice et d'additifs. Le verre est coulé en fusion à 1250°C à travers une filière en platine-rhodium ; après refroidissement, les filaments sont étirés pour obtenir des fibres continues. Suivant les applications auxquelles elles sont destinées, les fibres de verre sont réparties en trois qualités :

- Fibres E pour les composites grandes diffusions (GD).
- Fibres D pour les applications dans la construction électrique (circuits imprimés).
- Fibres R pour les composites hautes performances (HP).

Les fibres de verre (500 kT/an en Europe) constituent le principal renfort, utilisé dans plus de 95% des matériaux composites, et plus particulièrement pour les produits de grande diffusion (GD). Elles offrent, pour un prix raisonnable de 10 à 50 F/kg :

- Une bonne adhérence entre fibres et résines (matrices) ;
- De bonnes propriétés mécaniques, mais inférieures à celles de la fibre de carbone ;
- Des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications.

En Europe, les fibres de verre utilisées dans les composites, représentant 500 000 tonnes/an, sont utilisées dans :

- La plupart des composites (automobile, construction, construction électrique).
  - Certains composites « hautes performances » avec des fibres de verre « R ».
- L'utilisation des fibres de verre dans les composites est principalement limitée par :
- Une rigidité insuffisante pour certaines applications comme les pièces de structure primaire en aéronautique.
  - Un vieillissement accéléré au contact prolongé de l'eau, des rayonnements UV ou de températures élevées. [2]

### I.2.2 Autres types de fibres et renforts

Il existe d'autres types de fibres métalliques continues (tungstène, acier...) ou de renforts minéraux (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, B<sub>4</sub>C, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>, BeO, TiO<sub>2</sub>, TiC...) sous forme de filaments ou de

particules. Ils sont compatibles avec des matrices métalliques imprégnées par fusion. Malgré leur résistance et leur rigidité, le diamètre élevé des fibres (la centaine de microns) les rend sensibles à la flexion et surtout, leur coût élevé restreint leur utilisation à quelques applications de haute technologie [1]

### **I.3 Interface fibre/matrice**

Il est naturel de penser que les performances des matériaux composites sont en fonction des propriétés des constituants de base rentrant dans leur composition. Cependant, ceux-ci n'existeraient pas si les fibres et la matrice ne pouvaient s'associer. L'interface est le siège de cette association et constitue une véritable région stratégique capable d'assurer notamment le transfert des charges de la matrice aux renforts. Les caractéristiques de l'interface dépendent quant à elles de la qualité de la liaison fibre/matrice ce qui fait appel à la notion d'adhésion. Par définition, l'adhésion est le phénomène qui crée l'adhérence. L'adhérence est l'état d'une chose qui colle, qui tient à une autre. Pratiquement, l'adhésion peut s'expliquer par la physico-chimie tandis que l'adhérence se mesure par des tests [1] L'utilisation d'une couche d'interface permet d'assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice. Les fibres destinées à la fabrication des composites reçoivent un apprêt spécifique comportant un agent collant qui permet de coller les filaments pour en faire des fils et assure, en outre, une fonction de lubrification (pour le protéger contre l'abrasion due au frottement entre fibres) [2].

#### **I.3.1 Les caractéristiques générales**

Un matériau composite consiste dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. Dans le cas de plusieurs phases discontinues de natures différentes, le composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celle de la phase continue. La phase continue est appelée la matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant. Une exception importante à la description précédente est le cas de polymères modifiés par des élastomères, pour lesquels une matrice polymère rigide est chargée avec des particules élastomères. Pour ce type de matériau, les caractéristiques statiques du polymère (module d'Young, contrainte à la rupture, etc.) ne sont pratiquement pas modifiées par l'adjonction de particules élastomères.

Les propriétés des matériaux composites résultent :

- Des propriétés des matériaux constituants,
- De leur distribution géométrique,
- De leurs interactions, etc.

#### **I.4. Matériaux utilisés pour notre étude**

##### **I.4.1 Fibres de Verre**

###### **I.4.1.1 Présentation de la fibre de Verre**

La fibre de verre, qui sert à fabriquer de nombreux matériaux composites renforcés, est présente partout autour de nous. Des équipements de sport aux pare-chocs des automobiles, ce matériau très résistant trouve de multiples applications industrielles. L'expression fibre de verre peut désigner d'une part un filament de verre extrêmement fin et d'autre part un matériau composite renforcé à l'aide de cette fibre. Dans les matériaux composites, les fibres de verre sont généralement associées à des polymères. Les fibres de verre permettent de réduire le poids des matériaux, tout en améliorant leurs performances. Elles sont notamment appréciées pour leurs propriétés d'inertie chimique, de résistance aux chocs et d'isolation.

Dans le domaine de la construction, ce procédé de renforcement permet un allègement des structures d'environ 30% par rapport à l'acier.[6]



**Figure I.4 :** Fibre de verres [9].

### I.4.1.2 Application de fibres de Verres

La fibre de verre est utilisée pour le renforcement, l'isolation et l'optique. Le renforcement est de loin l'application la plus importante. Dans 9 cas sur 10, les fibres de verre servent à renforcer les bétons ou les polymères (matériaux plastiques thermodurcissables comme le polyester ou l'époxy) en vue de fabriquer des matériaux composites capables de se substituer à l'acier. Les principales utilisations de ces matériaux composites sont, par ordre d'importance :

- les bâtiments et les infrastructures (29%)
- les transports (25%) : avions, TGV
- l'électricité et l'électronique (16%)
- les sports et loisirs (14%) : perches d'athlétisme, skis et planches de surf
- les équipements industriels (11%).

Pour l'isolation, le verre est utilisé sous la forme d'un enchevêtrement de fibres assez courtes constituant une sorte de matelas, souvent désigné sous le nom de laine de verre. Ce matériau est utilisé pour l'isolation thermique des combles et des toitures. Par ailleurs, les fibres de verres, grâce à leur souplesse, leur transparence et leur excellente capacité de transmission de la lumière, sont employées comme fibres optiques dans le domaine médical (endoscopie) et dans le domaine des télécommunications où la fibre optique est une technologie d'avenir.[6]



**Figure I.5 :** exemple de application de la fibres de verres (application dans le domaine maritime et domaine de l'automobiles) [8].

Type de fibre	Diamètre (µm)	E (GPa)	$\sigma_{max}$ (MPa)	$\epsilon$ (%)	Tmax (°C)	Densité	Prix (S/Kg)
Verre E	15	73	3400	4		2.5	2
Verre S	15	86	4500	5.3		2.49	20-37

**Tableau I.1** : caractéristique de la fibre de verre [9].

#### I.4.2. Matrice d'Epoxy

Les poly époxydes, encore appelés polymères époxyde ou communément « époxy », sont des résines fabriquées par polymérisation de monomères époxyde avec un durcisseur (agent de réticulation) qui peut être à base d'anhydride d'acide, de phénol ou le plus souvent d'amine (polyamine, aminoamide) : ce sont des polymères tridimensionnels.

Les résines époxyde (ou époxydiques) durcissent (réaction irréversible) en présence d'un durcisseur, sous l'effet de la chaleur (matériaux thermodurcissables) :



En formulation, on leur incorpore divers durcisseurs, diluants réactifs ou non, plastifiants, charges, solvants, additifs (colorants, stabilisants...).

Dotées d'un fort pouvoir sensibilisant, elles sont l'une des causes les plus fréquentes d'eczéma allergique d'origine professionnelle [6]. Les résines époxy (ou époxydes) constituent la résine type des composites HP.

Epoxyde	Propriétés
Masse spécifique ( KG/DM <sup>3</sup> )	1,1 -1,4
Résistance a la traction (Gpa)	50-90
Module de flexion (Gpa)	3
Tenue a la chaleur continue (°C)	120-200

**Tableau I.2** : caractéristiques de la matrice époxy [3]



Figure I.6 : Matériau époxy [9]

# Chapitre II

## **Les contraintes internes** **Dans** **Les matériaux composites**

## **Introduction**

Les contraintes résiduelles peuvent être définies comme des contraintes existant à l'intérieur d'un corps en l'absence de charges externes ou de gradients thermiques. Par conséquent, les contraintes résiduelles dans un matériau ou un composant de structure sont les contraintes qui restent après la cause originelle des contraintes (forces extérieures, gradient thermique) a été retiré. Ces contraintes peuvent être présentes dans toute structure mécanique pour une diverse raison, y compris les déformations inélastiques et le traitement thermique. Généralement, dans les processus de fabrication et de fabrication de composants métalliques tels que le moulage, soudage, usinage, moulage, traitement thermique et déformation plastique pendant le pliage, le laminage ou le forgeage induisent des contraintes résiduelles dans l'objet fabriqué.

Dans ce chapitre, nous aborderons également le problème des contraintes internes thermique avec notamment leurs modes de formation (contraintes internes et résiduelles) seront décrites dans le détail : l'origine, l'influence...

### **II.1. Définition**

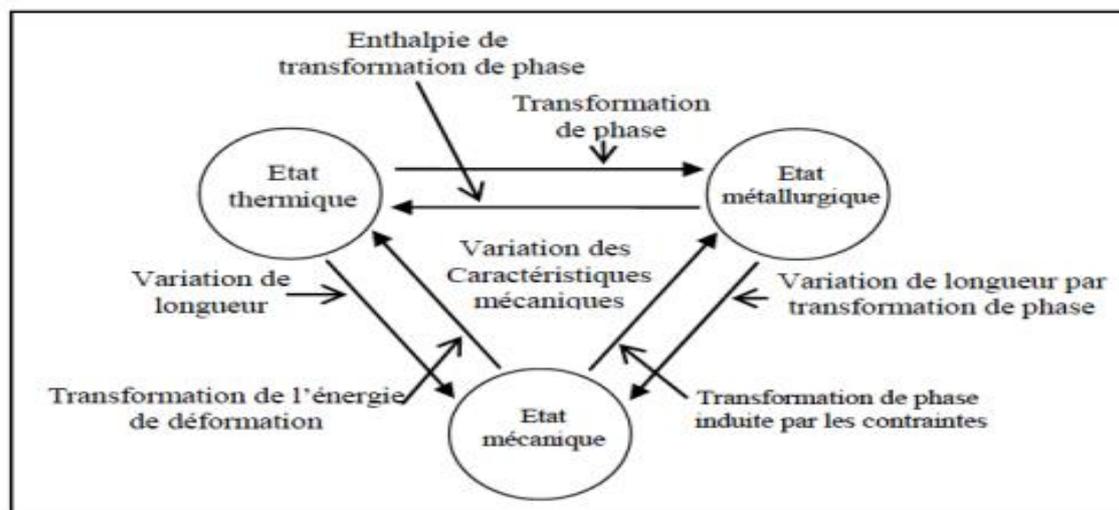
La fabrication des composites nécessite une montée en température relativement élevée puis un refroidissement à la température ambiante. Or la disparité des coefficients thermo élastiques (entre fibre et matrice) fait de l'interface le siège de contraintes résiduelles thermiques si l'on admet qu'il y a continuité des déformations (interface intacte, parfaitement liée, sans décollement ou fissure).

L'optimisation du cycle d'élaboration des composites est très importante. En effet, il faut choisir une température d'élaboration suffisante pour obtenir une bonne cohésion entre la matrice et la fibre. Cependant, la température ne doit pas être trop élevée car on risque d'avoir une apparition de contraintes internes lors de la réaction. Dans ce chapitre, nous aborderons également le problème des contraintes internes thermique avec notamment leurs modes de formation de ces contraintes (internes et résiduelles) seront décrites dans le détail : l'origine, l'influence, etc... [6]

## II.2. Origine des contraintes résiduelles

Toute hétérogénéité de déformation introduite à toute échelle de la structure entraîne l'existence de contraintes résiduelles. De manière générale, les macro-contraintes résiduelles ou d'ordre 1 sont le résultat de l'activité des sources fondamentales suivantes agissant seules ou en combinaison :

- Déformation plastique hétérogène entre différentes zones d'une pièce soumise à des sollicitations mécaniques externes à charge imposée ou à déformation imposée.
- Déformation plastique hétérogène entre différentes zones d'une pièce soumise à des sollicitations thermiques.
- Variation de volume hétérogène et/ou phénomènes de pseudo-plasticité dus à des transformations de phase à l'état solide. [7]



**Figure II. 1** Origine des contraintes résiduelles. Interdépendance entre les différents états de matériaux [6]

## II.3. Différents ordres de contraintes

Suivant l'échelle à laquelle on considère le matériau, on parle de contraintes résiduelles macroscopiques ou du 1er ordre (homogènes sur plusieurs grains), mésoscopiques ou du 2ème ordre (homogènes sur un grain ou sur une phase) et microscopiques ou du 3ème ordre (homogènes sur quelques distances interatomiques). Dans le cas de matériaux réels, l'état des contraintes résiduelles résulte de la superposition de ces trois ordres de contraintes. Celles-ci s'ajoutent aux contraintes appliquées en service et elles peuvent ainsi avoir des conséquences

importantes, néfastes ou bénéfiques, sur les performances, la sûreté et la fiabilité du matériau ou du composant (Figure 2).



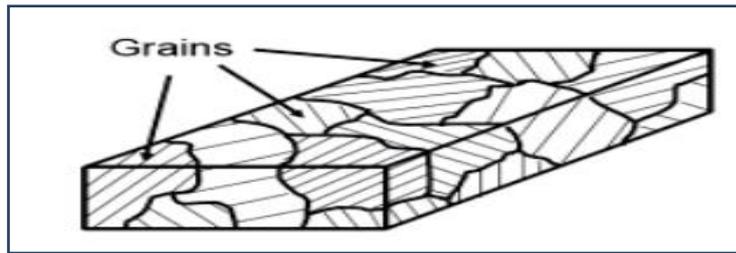
**Figure II. 2** Effets des contraintes résiduelles sur les performances des matériaux [2]

#### II.4. Définition des trois ordres de contraintes

A cause du caractère poly-cristallin et hétérogène des matériaux, les sources de contraintes peuvent provenir de déformations aux échelles macro et micro. En effet, un matériau cristallin est constitué de phases, elles-mêmes formées de grains. Chaque grain est un monocristal qui peut être considéré dans un modèle simple comme divisé en petits domaines séparés par un réseau de dislocations. Chaque domaine est constitué par un empilement régulier d'atomes qui peut être défini par un ensemble de mailles cristallines identiques.

##### II.4.1. Premier ordre

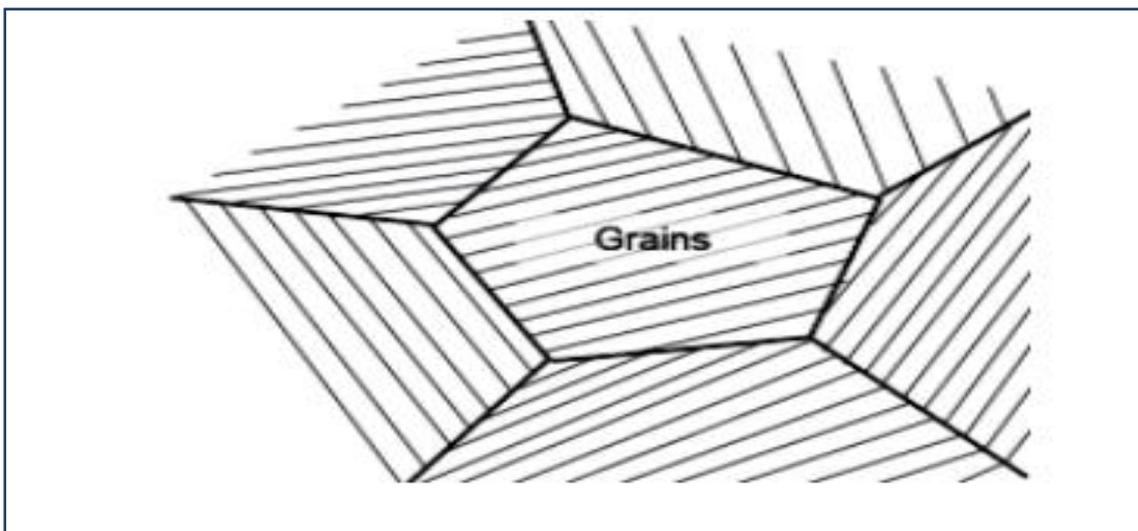
Les contraintes résiduelles du premier ordre ou d'ordre 1 ( $\sigma I$ ) sont homogènes, c'est à-dire sont constantes en intensité et en direction, dans des domaines relativement importants s'étendant sur plusieurs grains dans le cas des matériaux monophasés (donc échelle de quelques dixièmes de millimètres). Les forces résultant des contraintes du premier ordre sont en équilibre dans chaque section de la pièce et les moments liés à ces forces sont nuls par rapport à tout axe. Les contraintes résiduelles du premier ordre, également appelées contraintes résiduelles macroscopiques sont celles dont traite la mécanique des milieux continus.



**Figure II. 3** Domaine d'existence des contraintes d'ordre  $\sigma$  I [6]

#### II.4.2. Deuxième ordre

Les contraintes résiduelles du deuxième ordre ou d'ordre 2 ( $\sigma$  II) sont homogènes dans des domaines correspondant à un grain ou à une portion de grain pour des matériaux monophasés (donc échelle de quelques dizaines de micromètres) (figure II.4). Elles proviennent dans ce cas de la différence d'orientation cristalline entre grains voisins. Les forces résultant des contraintes du second ordre et les moments associés s'équilibrent sur un nombre suffisant de grains. Les contraintes résiduelles du deuxième ordre sont appelées contraintes résiduelles microscopiques homogènes. Une modification de l'équilibre des forces et des moments associés aux contraintes résiduelles du second ordre peut se traduire par des variations dimensionnelles macroscopiques à l'échelle de la pièce. [7]



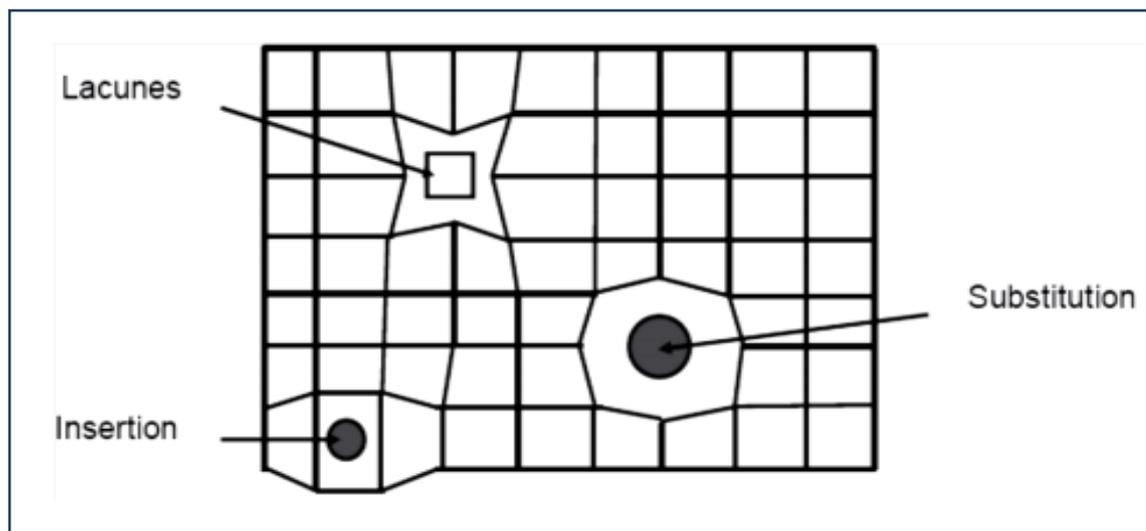
**Figure II. 4** Domaine d'existence des contraintes d'ordre  $\sigma$  II [6]

### II.4.3. Troisième ordre

Les contraintes résiduelles du troisième ordre ou d'ordre 3 ( $\sigma_{III}$ ) sont hétérogènes même dans des zones s'étendant sur quelques distances interatomiques dans le matériau. Elles sont associées en majorité aux déformations existant au voisinage des défauts cristallins. Les forces résultant des contraintes du troisième ordre et les moments associés s'équilibrent dans des zones représentant des portions très réduites d'un grain.

Les contraintes résiduelles du troisième ordre sont appelées contraintes résiduelles microscopiques hétérogènes. Une modification de l'équilibre des forces et des moments associés aux contraintes résiduelles du troisième ordre ne se traduit par aucune variation dimensionnelle macroscopique.

La figure II.5 est une représentation schématique du domaine d'existence des contraintes résiduelles d'ordre 3. [8]



**Figure II. 5** Domaine d'existence des contraintes d'ordre  $\sigma_{III}$  [6]

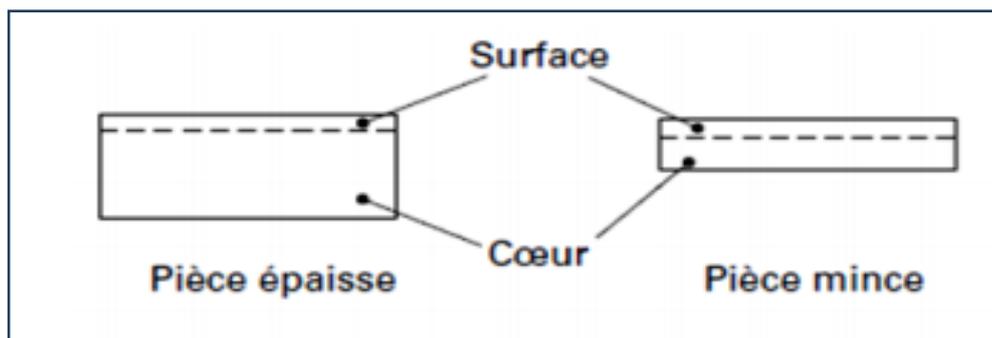
La mécanique des milieux continus ne permet de rendre compte que du niveau I de contraintes résiduelles. Les techniques de mesures permettent d'accéder aux contraintes de niveaux I et III, le niveau II est le plus difficile à atteindre. Cependant, cette décomposition a pour intérêt de montrer que toute hétérogénéité de déformation introduite à toute échelle de la structure entraîne l'existence de contraintes résiduelles.

## II.5. Principe des traitements de mise en précontrainte superficielle

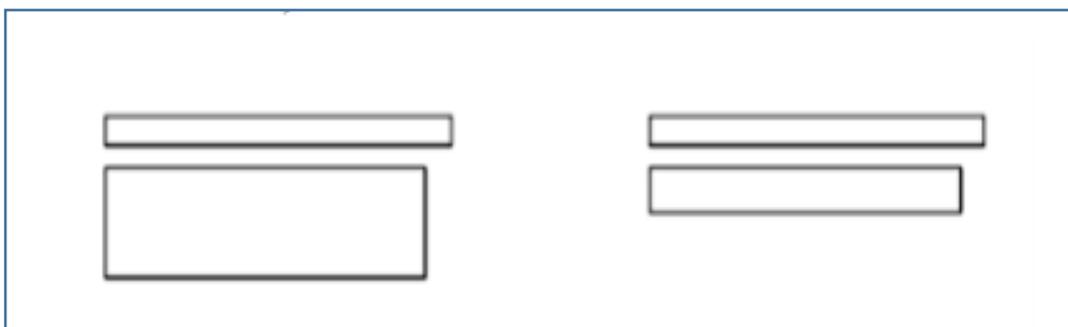
Les traitements de mise en précontrainte superficielle d'une pièce ont pour but d'introduire des contraintes de compression dans une couche superficielle d'épaisseur plus ou moins importante allant de quelques centièmes de millimètre à quelques millimètres selon le traitement mis en œuvre [8].

Les traitements par voie thermique utilisent comme source de contraintes résiduelles de compression les augmentations de volume locales associées à des phénomènes métallurgiques induits par le cycle thermique imposé. Ces variations de volume sont liées à :

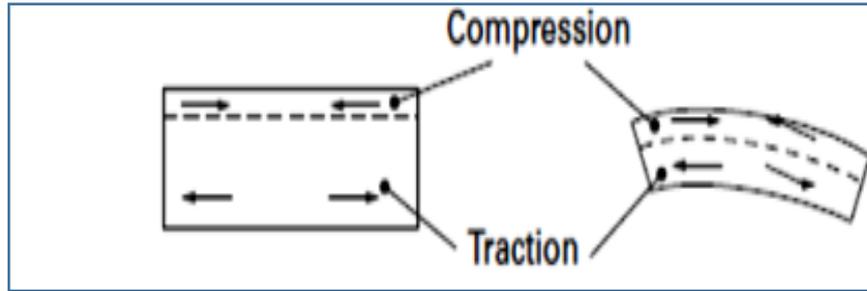
- La transformation d'une phase en une autre phase de compacité cristalline moins élevée.
- La précipitation de phases de volume massique plus élevé que celui de la matrice origine.
- La mise en solution d'éléments introduits par diffusion dans la matrice.



a) Matériau sans contraintes résiduelles.



b) Allongement plastique de la surface non liée au cœur.



c) Allongement plastique de la surface liée au cœur

**Figure II. 6** Schéma de la mise en compression des couches superficielles.[7]

### II.5.1. Lors de la polymérisation

La réticulation du réseau thermodurcissable se traduit par une contraction de la matrice. Celle-ci se produit toutefois à une température proche de la transition vitreuse de la matrice, où la viscosité du réseau permet la relaxation d'une fraction importante des contraintes internes induites par ce retrait de polymérisation. Au premier ordre, on peut donc considérer qu'il n'y a pas de contraintes résiduelles à la température de polymérisation. [5]

### II.5.2. Lors du refroidissement

A la température ambiante de la pièce en composite, les différentiels de contraction thermique de la fibre et de la matrice génèrent des contraintes internes à deux échelles :

#### II.5.2.1. À l'échelle microscopique

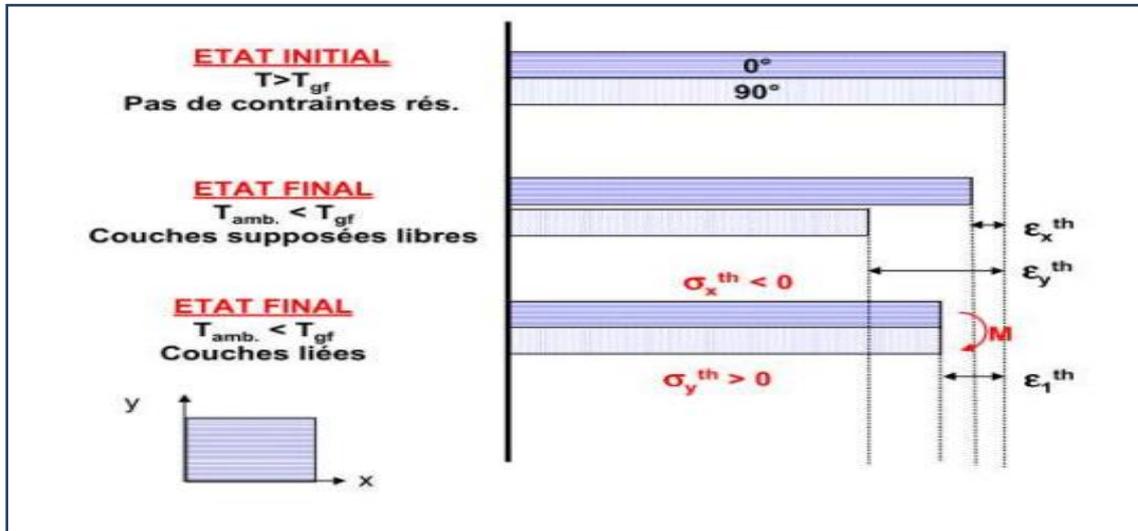
Au sein de chaque pli du stratifié la matrice possédant un coefficient de dilatation thermique largement supérieur à celui de la fibre, on observe, dans le sens longitudinal, une mise en compression de la fibre qui est équilibrée par la mise en traction de celle-ci.

La contraction thermique de la matrice se traduit également par le développement de contraintes radiales de compression à l'intérieur de la fibre [5].

#### II.5.2.2. à l'échelle macroscopique

L'anisotropie du coefficient de dilatation thermique de chaque pli unidirectionnel induit le développement de contraintes d'un pli à l'autre chaque couche subit les variations de température et à des déformations contrariées par les couches adjacentes.

Dans le cas d'un stratifié déséquilibré, ces contraintes se traduisent par l'apparition d'une courbure à l'issue du cycle de réticulation. [5]



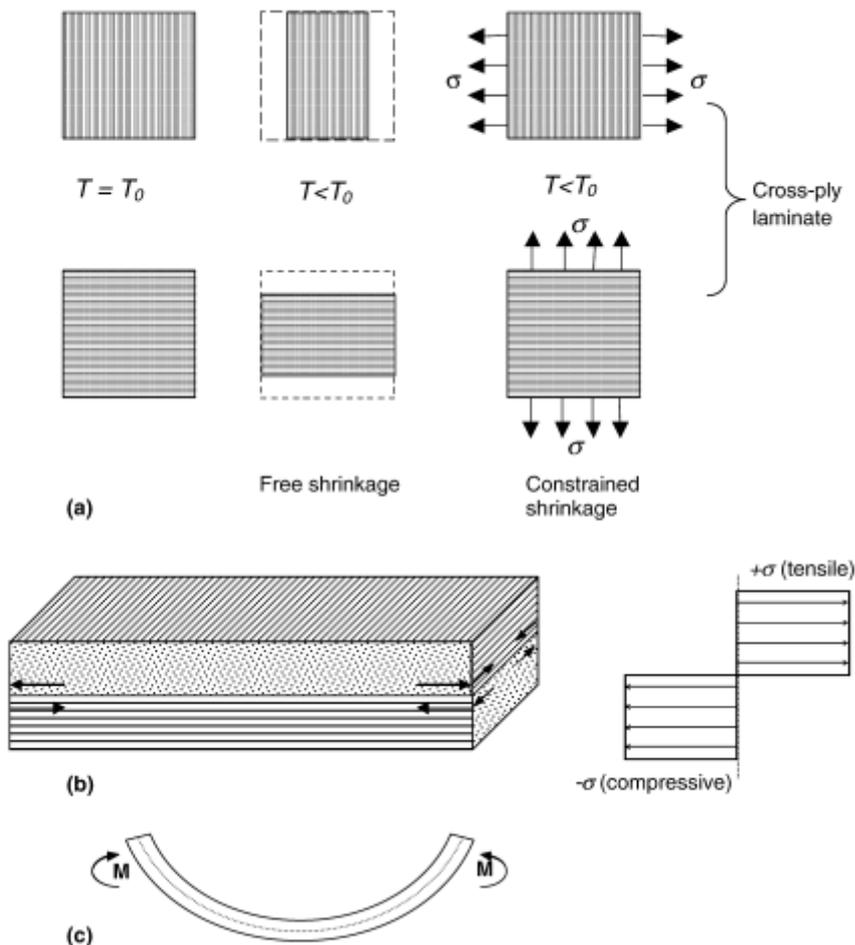
**Figure II. 7** Développement de contraintes résiduelles thermiques dans un stratifié [4]

## II.6. Effets des contraintes internes

Des contraintes résiduelles dans les thermoplastiques renforcés de fibres continues sont présentes dans la structure stratifiée ou composite immédiatement après le traitement et le refroidissement ultérieur à la température de service. Ils peuvent être considérés à trois niveaux différents en fonction de leurs origines [18].

Au niveau micromécanique ou au niveau constitutif, le décalage du coefficient de dilatation thermique entre les fibres et la matrice est le paramètre déterminant. Contrairement à une matrice thermodurcissable, la matrice thermoplastique est chauffée à une température de traitement supérieure à son verre ou température de fusion et solidifiée par la suite lors refroidissement à la température de service (souvent des conditions ambiantes), où aucune réaction chimique ne doit avoir lieu.

Le refroidissement implique un retrait volumétrique de la matrice thermoplastique, qui est nettement supérieur au rétrécissement des fibres. Cela représente une conduite importante force de développement de contraintes résiduelles dans les fibres.



**Figure II. 8** Vue schématique de la formation de contraintes résiduelles dans un stratifié croisé non équilibré (a), (b) contraintes thermiques résiduelles lorsque le stratifié est contraint, (c) vue de face de la déformation hors du plan lorsqu'il n'est pas contraint [18].

Pour les contraintes de durcissement dans la direction transversale sont supérieures aux résistances transversales dans tous les cas. Même une estimation prudente basée sur le fait qu'il représente environ 60 % de la température de durcissement indique que les contraintes de durcissement peuvent être supérieures à 50 % des résistances transversales. Cependant, la rupture des plis à  $45^\circ$  a une influence négligeable sur le module initial et le coefficient de poisson dans la direction  $0^\circ$  pour les stratifiés  $[0_2 / \pm 45]$  [19]. La raison en est que même une approximation basée sur  $EL/2$  donne un module assez précis.

Cependant, dans les stratifiés tels que  $[(\pm 45)_2 / 90_4]_S$ , une défaillance prématurée des plis à  $90^\circ$  peut être clairement détectée par un changement substantiel de la relation contrainte-déformation axiale [19].

# Chapitre III

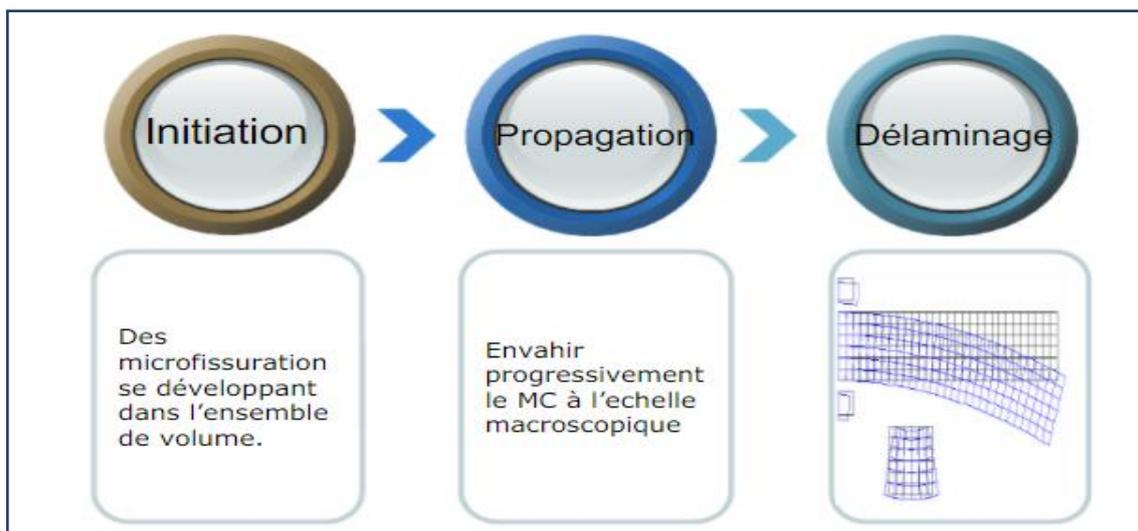
## **Fissuration dans les Matériaux composites**

## Introduction

L'initiation de la rupture pour les matériaux composites se produit généralement bien avant l'observation d'un changement du comportement macroscopique. Le comportement mécanique des matériaux composites à fibres en céramique et à matrices polymériques est particulièrement difficile à modéliser. Ainsi, la forte anisotropie des matériaux à fibres longues implique dans le cadre simple de l'élasticité un nombre de coefficients très élevé à déterminer.

### III.1. L'endommagement des matériaux composites

Lors d'une sollicitation quelconque sur un matériau composite, l'évolution de l'endommagement au sein du matériau commence assez tôt. Dans un composite les premiers endommagements détectés commencent à se développer à l'échelle microscopique lorsque l'effort localisé atteint la limite de rupture d'un des constituants ou celle de l'interface les reliant. Les microfissures qui se développent sont habituellement trop petites pour causer la rupture finale du composite. Ainsi, un nombre important de ces microfissures s'accumulent dans le composite avant la rupture finale. Les paramètres, tels que la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur des plis et l'espacement entre fibres, jouent un rôle très important dans la progression de l'endommagement. En conséquence, le procédé global de la rupture dans les composites est souvent considéré comme un processus d'accumulation de différents types d'endommagements [3]



**Figure III. 1** les étapes d'endommagement [5]

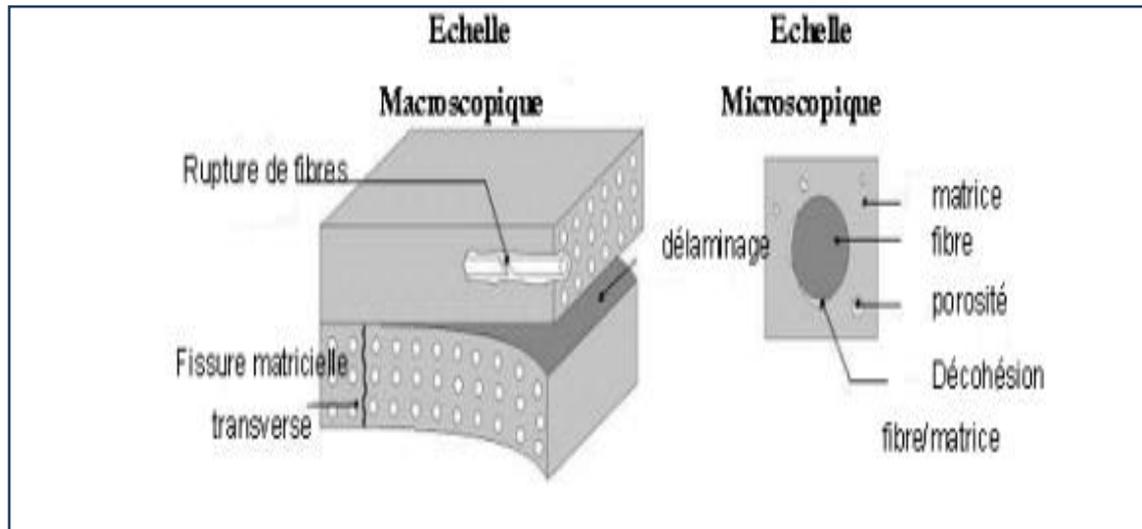
L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui conduit à l'apparition de défauts locaux. Contrairement aux matériaux métalliques, pour lesquels l'endommagement dépend du chargement imposé, les composites présentent toujours les mêmes endommagements.

Du fait de l'hétérogénéité de leur structure, il n'existe pas de mécanisme unique mais plusieurs types de dégradations différentes par leur nature et leur mode de développement.

Ces dégradations apparaissent à différentes échelles. Ainsi, on distingue :

- A l'échelle microscopique apparaissent des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice (décohésion fibres/matrice) ou de porosité,
- A l'échelle mésoscopique, ou échelle du pli, on observe des fissures intra-laminaires transverses (perpendiculaires à la direction de sollicitation) ou longitudinales (dans la direction de l'application de l'effort) et des ruptures de fibres au stade ultime de la ruine du matériau,
- A l'échelle macroscopique, on observe le phénomène de délaminage qui correspond à une séparation locale entre deux couches liée à une concentration importante des contraintes en cisaillement s'amorçant généralement aux bords libres de la structure.

Ces endommagements ne sont pas présents uniformément dans la structure. Ils dépendent du type de sollicitation, mais aussi de l'orientation et de la proportion des renforts. S'est d'ailleurs intéressé à la détermination de la part de chacune des sollicitations uni-axiales élémentaires (longitudinale, transversale, cisaillement) dans l'endommagement d'un stratifié. Pour les orientations fortes (entre 0 et 10°), ce sont les contraintes longitudinales qui contribuent fortement à la dégradation alors que pour les orientations faibles (70/90°), ce sont les contraintes transversales qui participent davantage. Il a également remarqué que dans les structures  $\pm 45^\circ$  ce sont les contraintes en cisaillement qui contribuent fortement à la dégradation.



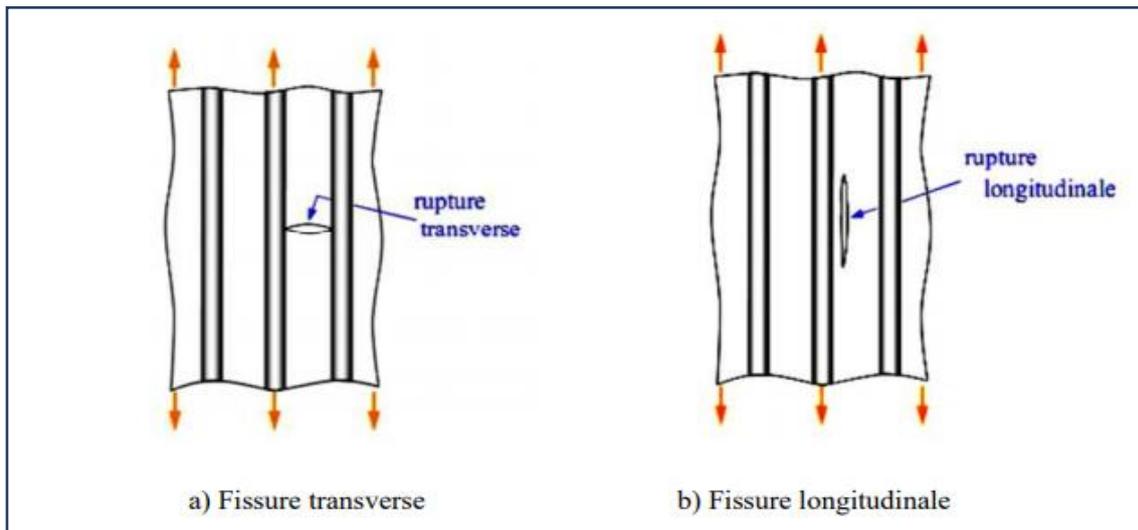
**Figure III. 2** Principaux endommagements rencontrés dans un matériau composite [4]

La ruine du matériau est le résultat de la combinaison potentielle de l'ensemble des mécanismes élémentaires du pli unidirectionnel (décohésion fibre/matrice, fissures intralaminaires, ruptures de fibres) et à l'interface entre les plis (délaminage). Ces mécanismes peuvent être initiés par la présence de fissures intralaminaires présentes dans les plis. Ces fissures peuvent être générées par des concentrations de contraintes, des discontinuités des champs de contraintes entre les plis ou peuvent être présentes initialement dans le matériau (défauts apparus lors de la fabrication ou liés à des effets de bords). Leur propagation et coalescence est induite par différentes sollicitations, de diverses origines (mécanique, thermique, thermomécanique, hydrique...).

## III.2. Caractéristiques des mécanismes d'endommagement

### III.2.1. Fissuration matricielle

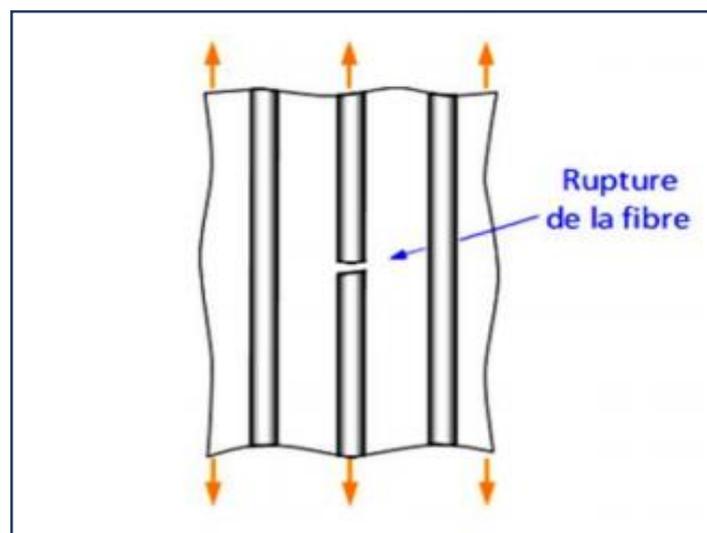
La complexité des matériaux composites introduit plusieurs types d'endommagements à l'échelle microscopique. Les microfissures se produisant au sein de la matrice apparaissent aux niveaux des porosités et des inclusions soit par fissuration transverse soit par fissuration longitudinale. Ce dernier mode de rupture se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à celle de cisaillement. Cette fissuration se propage selon la direction perpendiculaire à la sollicitation et elle peut provoquer une décohésion fibre-matrice.



**Figure III. 3** Fissuration de la matrice [2]

### III.2.3. La fissure au niveau de la fibre

La rupture de fibre intervient lorsque la contrainte de traction dans une fibre atteint la contrainte à la rupture de la fibre. Elle se produit souvent dans les plis les moins désorientés par rapport à la direction de sollicitation. L'excès d'effort provoquera la rupture des constituants voisins, et ce de proche en proche jusqu'à la ruine du volume sollicité.



**Figure III. 4** Rupture de la fibre [2]

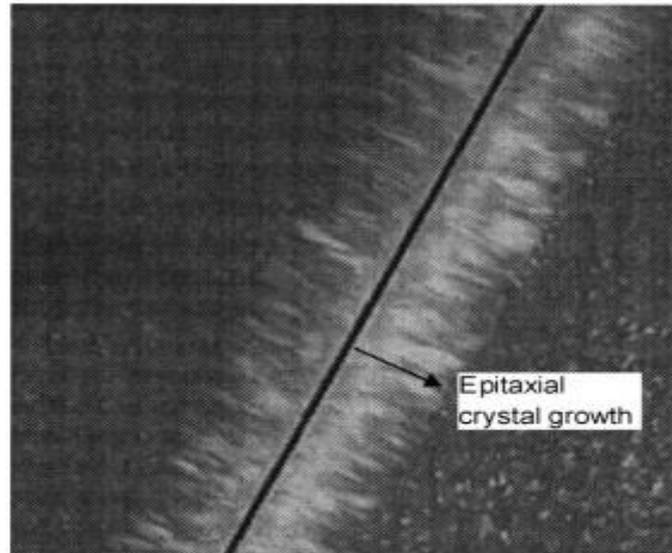
### III.2.3. Décohésion fibre-matrice

C'est dans la zone de l'interface où s'effectue le transfert de charge de la matrice vers le renfort ou vice versa. Après initiation, la propagation de la rupture change suivant la nature de l'adhésion fibre-matrice. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres, on peut distinguer les cas suivants :

- Cas d'une interface très forte : Si l'adhérence entre fibres et matrice est très forte, on aura une propagation de la fissure initiée soit par rupture de fibres, soit par rupture de la matrice comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle, la rupture observée sera de type fragile [3].
- Cas d'une interface très faible : la fissuration matricielle est déviée à l'interface, la décohésion fibre-matrice s'étend sur une très grande distance.

Un autre effet concernant l'interface fibre-matrice est que dans les composites semi-cristallins, la surface des fibres peut agir comme des points de nucléation qui peut entraîner une croissance à partir de la surface de la fibre, ce qui entraîne une région Trans cristalline autour de la fibre ; voir Fig.III.5. Il a été démontré que cette région provoque des contraintes radiales résiduelles [10]. Il semble que davantage de recherches soient nécessaires afin de comprendre les mécanismes exacts derrière le Trans cristallin et ses effets sur la formation de contraintes résiduelles.

Conformément aux effets de traitement, l'interface la contrainte de cisaillement était plus élevée pour les semi-cristallins à refroidissement lent composites matriciels grâce à une cristallisation supplémentaire retrait de la matrice et un Trans cristallin plus épais région autour de la fibre. Pour les thermoplastiques amorphes, la contrainte de cisaillement inter faciale a augmenté pour augmenter le refroidissement ou des températures finales inférieures [10].



**Figure III. 5** Microstructure d'un échantillon de polypropylène cristallisé de manière isotherme autour d'une fibre de carbone suivie d'une trempe [10].

#### III.2.4. Analyse de fracture conventionnelle

Pour prédire numériquement la formation et la croissance des fissures de ce modèle sous chargement accidentel, il est nécessaire de caractériser les propriétés de fracture au niveau microscopique. Pour aborder cet objectif un code de programme complet utilisant la méthode des éléments finis a été écrit par les auteurs dans le logiciel ABAQUS.CAE. Les caractéristiques géométriques, les propriétés des matériaux et les conditions aux limites sont attribuées au modèle. L'analyse par éléments finis correspondante a été pour déterminer l'évolution des états de contrainte et de déformation. Pour des résultats plus compréhensibles et une meilleure facilité à des fins de comparaison, la contrainte de Von Misses avait été calculée dans le modèle en utilisant l'équation. (1).

$$\sigma_{eq} = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_x - \sigma_y)^2 + (\sigma_y - \sigma_z)^2 + (\sigma_z - \sigma_x)^2 + 6(\tau_{xy}^2 + \tau_{yz}^2 + \tau_{zx}^2)} \dots (1)$$

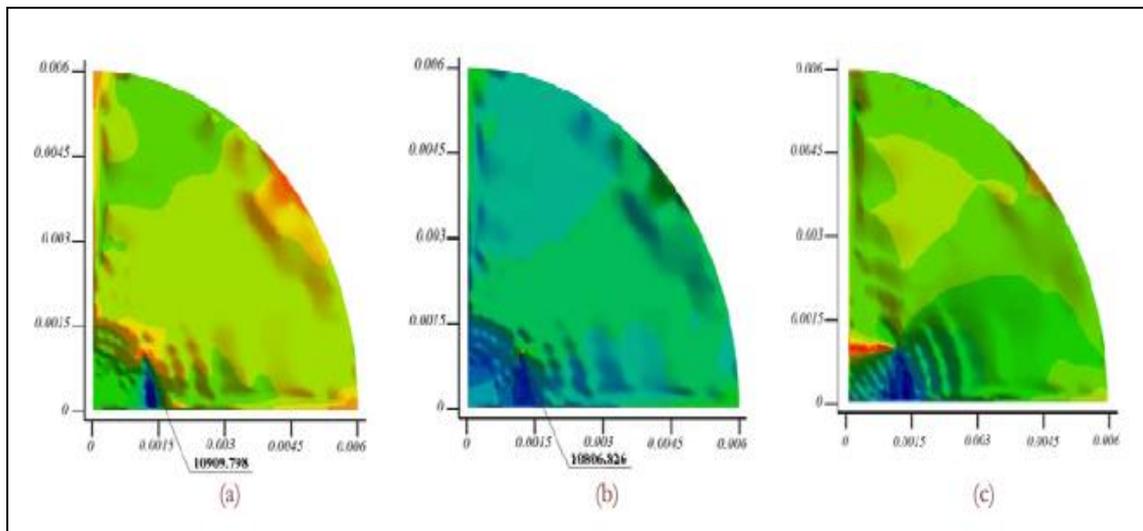
#### Équation 1 la contrainte de Von Misses

Selon le critère énergétique, le taux de libération d'énergie critique a été déterminé et Suivant les théories de la mécanique des fractures, le facteur d'intensité de contrainte a été calculé dans tout le modèle et a été appliqué pour obtenir l'intégrale J.

Selon le critère énergétique, le taux de libération d'énergie critique a été déterminée et l'extension de la fissure a été prédite et est présentée. Les valeurs de force de rupture qui conduisent la fissure à se propager ont été obtenues en utilisant la méthode d'essai et

d'erreur pour chaque cas. Le modèle commencera à se propager à de faibles contraintes et tendra à s'étendre à la pointe de la fissure [14 ,15]. Si la région était en plastique à la pointe de la fissure, la masse métallique autour de la fissure supporterait la contrainte et la structure n'est pas menacée [15].

Des travaux récents sur les fibres à microstructure ont indiqué qu'elles se sont rompues de manière fragile et se fissurent initié à partir des surfaces des fibres [16]. Selon les résultats, la fissure se propagera sur la zone fragile qui est le verre. L'amorçage et la propagation de la fissure à travers les matériaux fragiles se font à de grandes vitesses proches de la vitesse du son [17]. Ensuite, des conditions thermiques ont été imposées et la procédure complète a été recommencée. Sur la base des résultats, il est étudié que la fissure ne sera pas plus de croissance lorsque le modèle est soumis à une force de rupture et à des conditions thermiques.

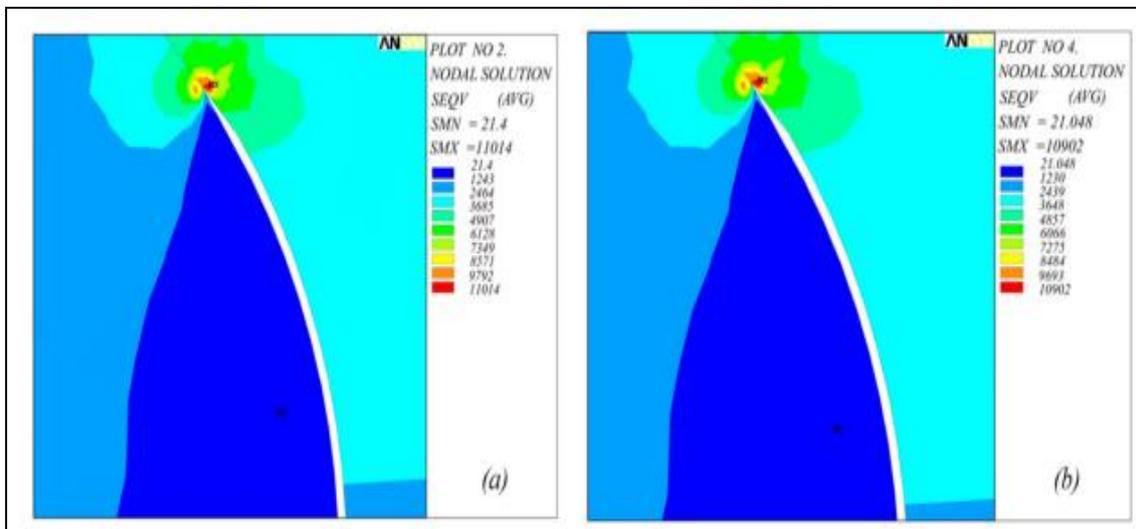


**Figure III. 6** Tracés de contour pour la longueur de fissure maximale simulée par Math CAD (longueur critique), (a) Distribution des contraintes de Von Misses soumise à une charge critique,(b) Répartition des contraintes de Von Misses soumise à des conditions de charge et thermiques critiques, (c) Approximation de la propagation de fissure soumise à un chargement critique.[10].

De plus, la plus grande fissure a besoin moins de force à briser. Les tracés de contour pour la longueur de fissure maximale sont présentés dans la figure III.6. À qui montre la distribution des contraintes de Von Misses soumise à une charge critique. Sur la base des données, la plus grande quantité de contrainte équivalente est placé près du fond de fissure. La figure III. 6.b présente la distribution des contraintes de Von Misses soumises à des charges critiques et thermiques. Il est montré que la quantité maximale de contrainte

équivalente est diminuée après application des conditions thermiques qui empêche la propagation des fissures et la rupture du matériau. L'approximation de la propagation de fissure soumise à un chargement critique est illustrée à la fissure figure III.6.c.

La région rouge de la figure III.6.a présente la plus grande quantité de contrainte équivalente. Elle est placée en fond de fissure du fait que les contraintes se concentrent en fond de fissure. Dans la figure III.6.b, la réduction de la quantité maximale de contrainte équivalente est le résultat de température. La prédiction de la propagation des fissures est présentée par région rouge sur la figure III.6.c. Cela montre que le crack va se propager en verre qui est un matériau cassant, ce qui signifie qu'il se fracture plutôt que de se déformer plastiquement. Il répond à une charge mécanique croissante jusqu'à ce que la fissure microscopique à croissance lente dépasse un certain seuil à partir duquel la fissure se développe rapidement et le matériau se fracture [28]. Par conséquent six cas différents sont discutés et chaque cas est simulé par ANSYS pour justifier l'exactitude de code écrit dans Math CAD. Certains résultats sont présentés par la suite. Les courbes de niveau zoomées partielles d'ANSYS l'analyse de la distribution des contraintes de Von Mises pour la plus grande taille de fissure soumise à un chargement critique est présentée dans la Fig.III.6.a. Le résultat après imposition de la condition thermique à la situation précédente est présenté sur la figure III.6.b.



**Figure III. 7** Tracés de contour agrandis pour la longueur de fissure maximale (longueur critique), simulés par ANSYS,  
 (a) Distribution des contraintes de Von Mises soumise à une charge critique,  
 (b) Répartition des contraintes de Von Mises soumise à une charge critique et à des conditions thermiques. [10]

Les résultats de calcul présentés dans cette recherche démontrent les capacités du critère d'énergie vis-à-vis modélisation de la rupture dans les composites à microstructures telles que la fibre de verre.

### **Conclusion**

Devant l'utilisation croissante des matériaux composites, le développement de moyens de caractérisation structurale et mécanique fiables est devenu un enjeu important sur le plan scientifique, technologique ....

En effet, la connaissance précise des propriétés mécanique des constituants, de leur morphologie et leur arrangement ainsi que la mesure précise des propriétés effectives des matériaux composites sont des conditions nécessaires à la résolution d'un grand nombre de problèmes reliant le comportement global à la microstructure. Par ailleurs, l'évolution des propriétés effectives en fonction de contraintes peut permettre la caractérisation de l'endommagement de ces matériaux, afin d'optimiser leur durée de vie résiduelle [12].

Références

Parti bibliographique

(Partie I)

### Références de partie I

[1] Randoum S / Comportement de fissures dans les matériaux composites./ THESE Pour l'obtention du diplôme de Doctorat 3 eme cycle LMD/UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES/2017-2018

[2] [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com) / cour de matériaux composites / Domaines d'application / composite a matrice organique

[3] rapport final/l industrie francaise des materiaux composite/etude strategique realisee par nodal consultants pour le compte de la digitip sim / 13 mai 2002 / louis berreur , bretrand de maillard , stanislas nosperger

[4] [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com) / cour de matériaux composites / Domaines d'application / definition matrices métalliques

[5] [www.futura-sciences.com](http://www.futura-sciences.com) / cour de matériaux composites / Domaines d'application / definition matrice ceramique

[6] JB Martin , Twaron , Heracron / propriete des fibres / article sure texonic.net/ 2014

[7] *Dermatoses professionnelles aux résines époxy* [archive] Allergologie, dermatologie professionnelle, INRS, revue *Documents pour le médecin du travail*, 2002, 12 p. (consulté le 26 novembre 2012).

[8] Fabrication de l automobile (tuning blog.eu / astuce carrosserie en fibre de verre pour voiture )

[9] fabrication navale ( photo prise a l usine de fabrication navale SRCNV SARL EL RABIE à Cherchell-Tipaza)

[10] Randoum Sara / Les effets des Contraintes Internes sur les Matériaux Composites à Fibres/ LMPM, Département de Génie Mécanique, Université de Sidi Bel Abbas

[11] Contraintes résiduelles dans les composites thermoplastiques—Une étude de la littérature—Partie I : Formation de contraintes résiduelles Patricia P. Parlevliet, Harald E.N. Bersee \*, Adriaan Beukers *Composites : Partie A* 37 (2006) 1847-1857

[12] Cédric THOMAS/ T H È S E pour obtenir le grade de docteur délivré par l'École nationale supérieure des mines de Paris Spécialité “ Science et Génie des Matériaux ” le 11 octobre 2011

[13] boualem feriel/ MEMOIRE DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER / /Analyse des contraintes internes dans les matériaux composites. / UNIVERSITE DJILLALI LIABES DE SIDI BEL ABBES /2012-2013

[14] <http://www.pdhcenter.com/courses/m155/m155.pdf>, 'Brittle Fracture Mechanism', DOE-HDBK-1017/2-93 Brittle Fracture

[15] C. Yan, X. D. Wang, L. Ye, K. Lyytikainen, J. Canning, The 18th Annual Meeting of the IEEE, Lasers and ElectroOptics Society LEOS 2005, 529.

[16] G. P. Cherepanov, Mechanics of Brittle Fracture, McGraw-Hill, New York (1979).

[17] R. Paschota, Journal of Optik & Photonik, 2 (2008).

[18] H. Thomas Hahn « Residual Stresses in Polymer Matrix Composite Laminates » Journal of Composite Materials 1976 10: 266.

[19] Residual stresses in thermoplastic composites—A study of the literature—Part I: Formation of residual stresses Patricia P. Parlevliet, Harald E.N. Bersee \*, Adriaan Beukers Composites: Part A 37 (2006) 1847–1857

**Parti II**

**RESULTATS  
ET  
SIMULATION NUMERIQUE**

# Chapitre Iv

## **Simulation numérique par éléments finis**

## **Introduction**

La simulation et l'analyse numérique ont un impact direct sur la qualité et le temps de mise sur le marché des produits ; de plus, elles accroissent les performances des solutions de gestion du cycle de vie du produit. Elles sont apparues, dans le désir de minimiser le coût d'une étude avec un nombre d'essais optimisés. La difficulté est de créer un modèle C.A.O. se rapprochant au maximum de la réalité (matériaux, conditions aux limites...). L'étude ne sera validée qu'à partir d'essais physiques entraînant des mesures pour la comparaison entre la réalité et la simulation.

D'un point de vue technique, les résultats obtenus grâce à ABAQUS sont le bilan des énergies, des forces nodales, des déformations, des déplacements, des contraintes, des vitesses, des accélérations et de toutes les grandeurs physiques nécessaires à la conception d'un modèle. Les logiciels de calcul de structures comme NASTRAN, RADIOS, ANSYS sont utilisés pour la modélisation de l'endommagement d'une structure métallique. Nous utiliserons le logiciel ABAQUS (analyse dynamique linéaire et non linéaire).

### **IV.1 Modélisation par éléments finis**

Est une approche de prédiction de comportement mécanique, beaucoup plus récente, est la simulation numérique. Son utilisation s'est fortement développée au cours de ces dernières années grâce à l'amélioration des performances des moyens informatiques et des logiciels de simulation tel que ABAQUS. Sa souplesse d'utilisation et la prise en compte d'un nombre important de phénomènes physiques offrent des perspectives intéressantes par rapport aux modèles analytiques.

Il est noté néanmoins, que cet outil de prédication nécessite d'accéder aux propriétés mécaniques et thermiques de chaque constituant du matériau composite étudié.

#### **IV.1.1 La méthode des éléments finis**

En analyse numérique, la méthode des éléments finis est utilisée pour résoudre numériquement les comportements des matériaux composites. Celles-ci peuvent calculer numériquement le comportement d'objets même très complexes,

- le développement des fissures en différentes position dans les matériaux composites
- l'effets thermique sure les composite fibre-époxy
- déformation d'une structure composite.
- etc...

## IV.2 Présentation du problème

L'assemblage du modèle est analysé par la méthode des éléments finis en utilisant le code de calcul Abaqus version 6.13 l'analyse a été faite sur la propagation de la fissure au niveau de la matrice, la fibre, et l'interface. Dans notre étude le matériau composite à matrice polymère (époxy) est élaboré à une température de l'ordre de 180°C, et compte tenu de la nature du chargement et de la géométrie de la structure.

Les contraintes résiduelles qui se produits aux niveau de la fissure provoque la propagation de la fissure sur les trois axe dimensionnels (x,y,z).

Généralement l'intensité de ces contraintes dépend des propriétés physiques, mécaniques de la matrice et de la fibre et du gradient de température [1]. Ces contraintes peuvent atteindre un niveau critique et conduisent à la ruine du matériau [2]. La qualité de l'adhérence fibre-matrice dépend de l'état de ces contraintes et de leur niveau.

La détermination de ces contraintes dans les matériaux composites d'une manière générale et tout particulièrement dans les matériaux composites sollicités mécaniquement est déterminante pour leur durabilité [3].

Le calcul du facteur d'intensité des contrainte nous a permis de connaitre l'état, le développement, et la propagation de la fissure sur les trois modes (kI, kII, kIII).

Ceci constitue l'objectif de notre travail. Pour ce faire nous avons utilisé le code de calcul (Abaqus version 6.13)

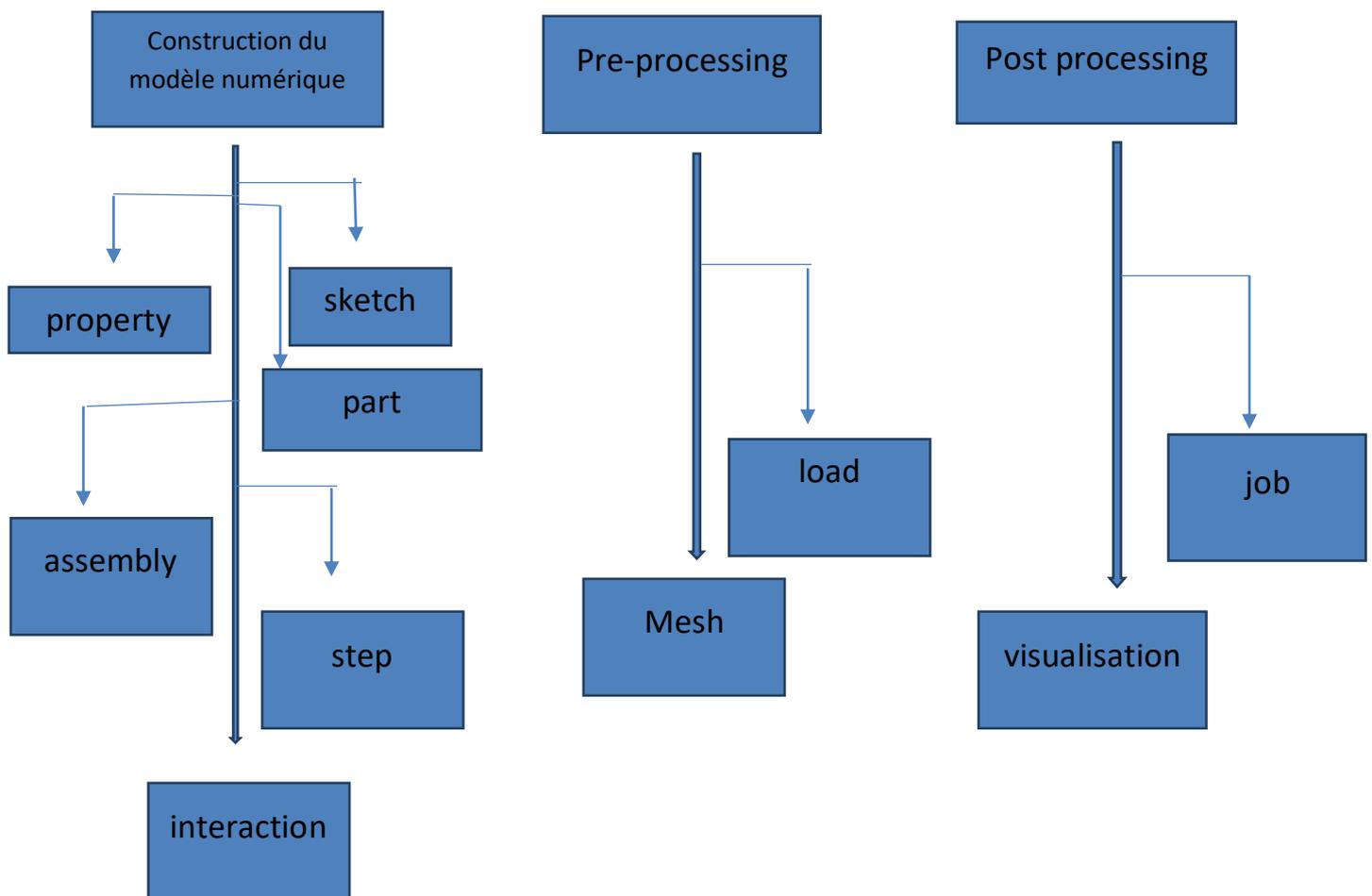
## IV.3 Présentation du logiciel ABAQUS

ABAQUS est un logiciel de simulation numérique basé sur la méthode des éléments finis [5]. Il est utilisé pour les problèmes :

- De structure : calcul du champ de déformation et de contrainte,
- De transfert thermique,
- De diffusion de masse,
- De mécanique des sols [6].

Ce logiciel permet de coupler plusieurs modèles de comportements mécaniques pour donner un comportement proche de la réalité. Il est capable de simuler le comportement de la plupart des matériaux comme les métaux, le béton, les composites, les polymères...etc.

Le logiciel de calcul Abaqus version 6.13 offre l'avantage de présenter une très grande capacité de calcul et permet l'analyse de structures assez complexes [7]. Le logiciel commercial Abaqus intègre déjà la méthode des éléments finis et un certain nombre de lois physiques. Le logiciel analyse les données, effectue les simulations demandées et fournit les résultats dans un fichier désigné par le suffixe ODB. Il ne restera plus qu'à exploiter les résultats contenus dans le fichier (odb). Ce fichier de données permet le stockage de toutes les caractéristiques géométriques, propriétés des matériaux, le type de chargement et la nature du maillage. Abaqus propose le module Abaqus.CAE, qui nous permette de générer l'ensemble des opérations liées à la modalisation il se présente comme une interface graphique et propose les dix sous modules figure IV 01



**Figure IV. 1** Organigramme ABAQUS CAE [8]

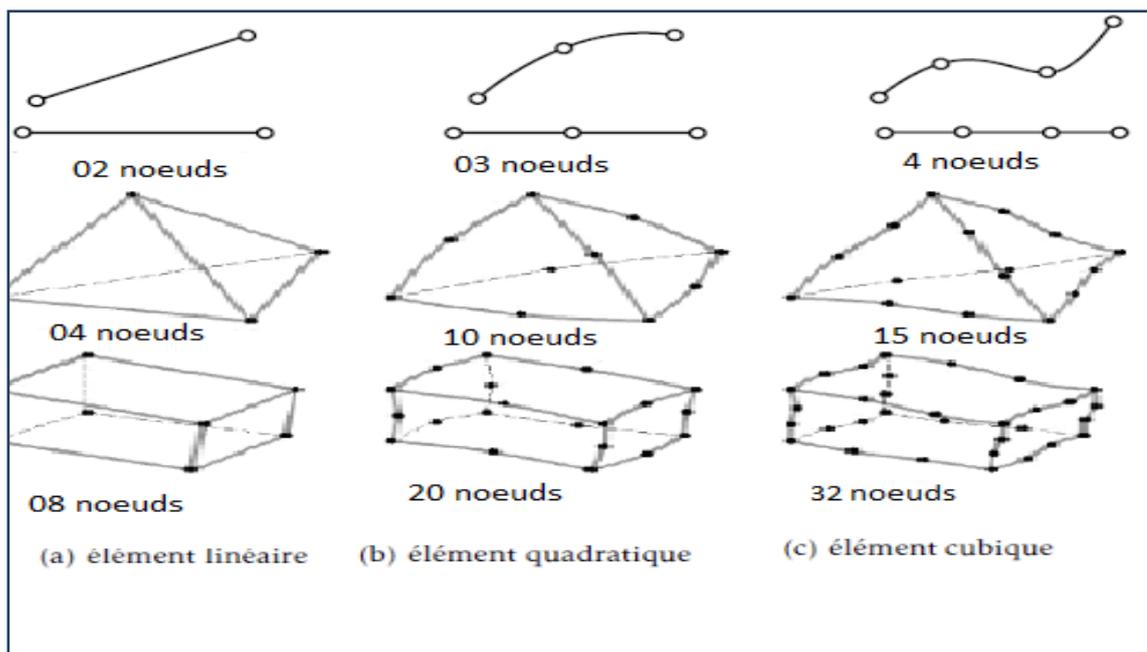
Le post-processeur du logiciel ABAQUS est assez puissant puisqu'il permet de donner plusieurs types de résultats.

#### IV.4. Maillage du modèle

La phase la plus délicate d'un processus de calcul par éléments finis est le maillage de la pièce. Un bon maillage est nécessaire pour faire un bon calcul. Cela consiste en le choix des éléments des discrétisations et leur dimension on distingue trois familles d'éléments :

- Les éléments unidimensionnels
- Les éléments bidimensionnels
- Les éléments tridimensionnels

Chaque élément se caractérise par le nombre des nœuds et leur degré de liberté.



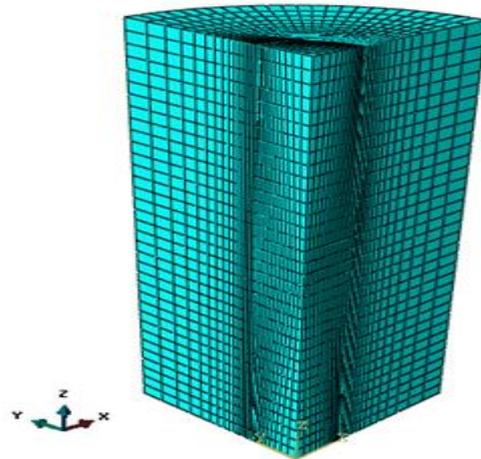
**Figure IV. 2** Les types des éléments de discrétisation [10]

Le choix du maillage doit être avéré puisqu'un maillage mal adapté peut mener à des résultats erronés [10].

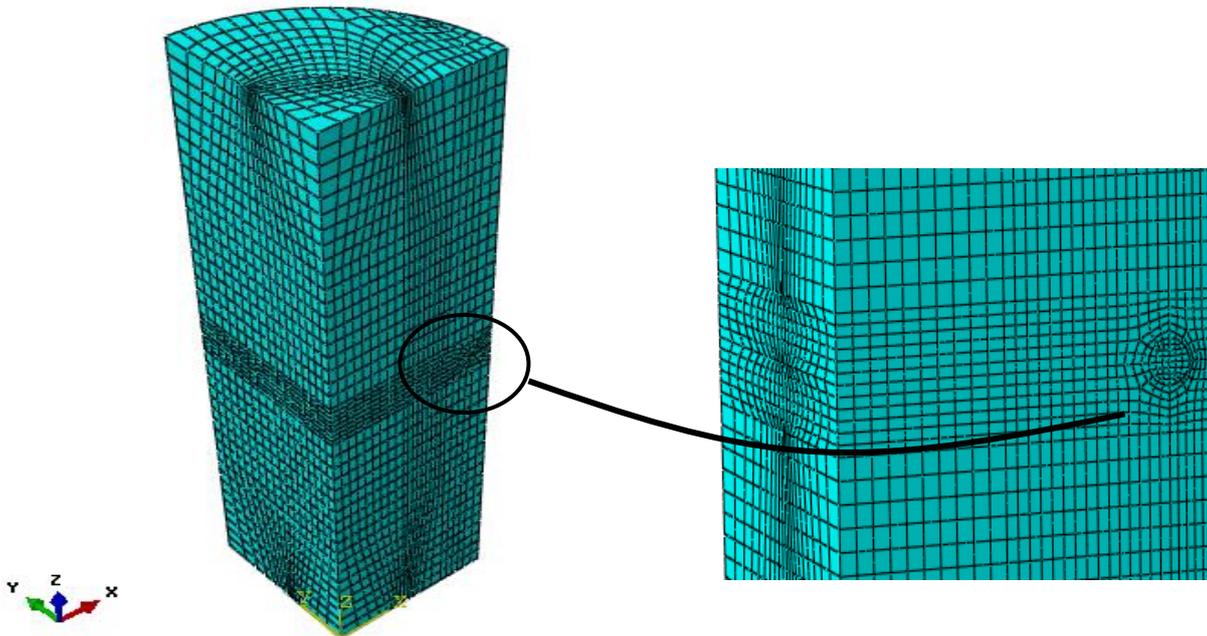
On devait donc savoir comment mailler le modèle pour avoir des résultats satisfaisants.

Un maillage grossier fait faiblir la précision du résultat mais minimise le temps de calcul, par contre un maillage trop fin donne une bonne précision de résultats mais avec un temps de calcul plus long [9].

La comparaison des résultats obtenue pour les différents maillages, permis de sélectionner le nombre d'élément constituant un maillage optimum, c'est-à-dire celui capable de fournir des résultats précis avec un temps de calcul raisonnable. La figure IV.4 montre le maillage final retenu.



a) Modèle du maillage sans fissure



b) modèle du maillage avec fissure

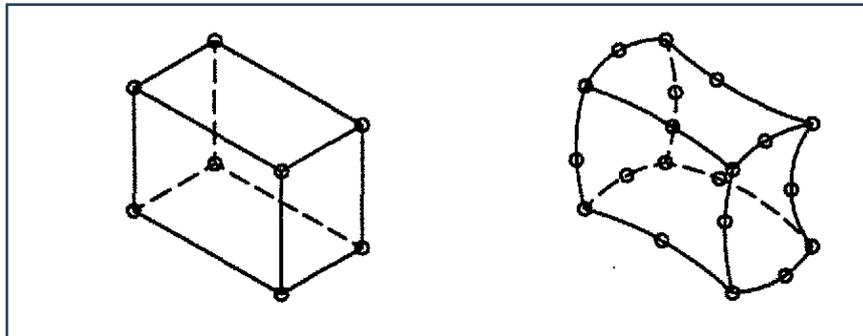
**Figure IV. 3** Maillage de la structure étudiée.

#### IV.5. Le choix de l'élément fini

Le choix de l'élément fini est primordial puisqu'il va conditionner tout le calcul numérique réalisé par la machine.

Dans le cadre d'une étude thermomécanique, ABAQUS propose plusieurs éléments pour mailler un modèle en trois dimensions. Parmi ces éléments on a choisi l'élément hexaédrique qui offre la meilleure adaptation à notre géométrie. Sont retenues :

- C3D8R, élément à 8 nœuds.
- C3D20R, élément à 20 nœuds.



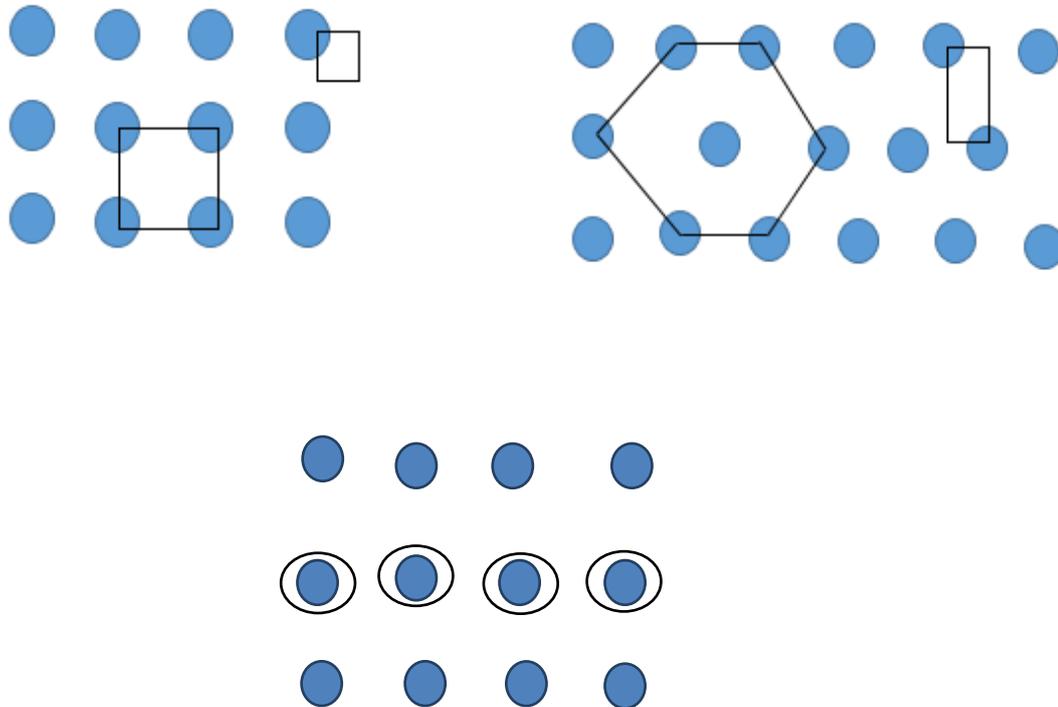
**Figure IV. 4** les éléments hexaédriques pour problème thermomécanique.

Chacun des huit sommets de l'élément C3D8R correspond à un nœud sur lequel un chargement thermique peut être appliqué. L'élément C3D20R est une version améliorée dans la mesure où il connaît un nœud supplémentaire au milieu de chacun de ses arêtes. Ce dernier élément est donc plus précis que le premier mais nécessite un temps de calcul beaucoup plus long.

#### IV.6 Modèle utilisé

La complication du modèle géométrique peut être illustrée clairement en considérant le problème de la détermination de l'arrangement des fibres dans le matériau composite. Réellement, il existe une infinité de possibilités d'arrangement des fibres. Par exemple, si les fibres sont réparties régulièrement, elles pourront être représentées suivant une configuration hexagonale, carré ou carré décalé.... Etc.

Lors de l'élaboration d'un matériau composite les fibres sont souvent réparties d'une manière aléatoire, plutôt suivant un arrangement régulier [1]. Pour simplifier le modèle géométrique on le réduit à sa plus simple représentation ce qui conduit à l'obtention d'une structure élémentaire représentative.

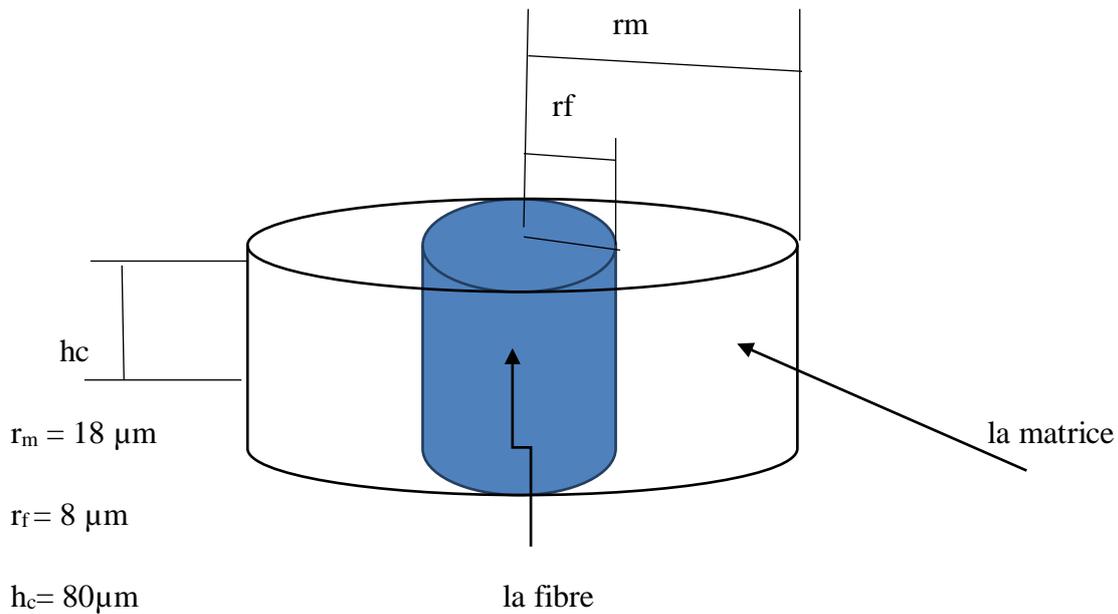


**Figure IV. 5** répartition carrée des fibres au sein d'un matériau composite [09]

Dans notre cas la structure élémentaire analysée est une structure tridimensionnelle.

Ce modèle est composé d'une matrice cylindrique (époxy) avec un creux capillaire dans son centre ou une fibre cylindrique (fibre de verre) continue sera logée.

Le diamètre de la fibre choisi varie selon sa nature ainsi pour une fibre de verre le diamètre est de  $16 \mu\text{m}$ , et le diamètre de la matrice est de  $36 \mu\text{m}$  (figure IV.6.)  $r_m$ ,  $r_f$  et  $h_c$  sont respectivement le rayon de la matrice, le rayon de la fibre et la taille de cellule élémentaire étudiée.



**Figure IV. 6** Représentation schématique de la structure élémentaire du matériau composite.

Compte tenu de la structure représentatif suivant les plans  $(o,x,y)$  et  $(o,x,z)$ , et pour diminuer le temps de calcul, seul un quart de la structure a été modélisé. Ainsi, les structures représentatives seront diminuées à la forme illustrée.

➤ Propriétés des matériaux :

Les propriétés mécaniques des différents matériaux ont été toutes introduites. Les matériaux définis seront ensuite assignés aux sections (fibre/ matrice), selon le couple.

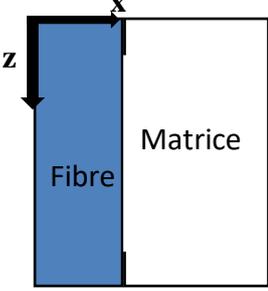
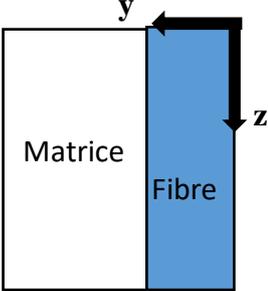
➤ Assemblage :

La direction géométrique des constituants (fibre/ matrice) permet un assemblage parfait. D'un autre point de vue, l'interface entre les constituants est considérée comme parfait et continue (elle assure la continuité des efforts et des déplacements) [6], c'est-à-dire une jonction forte.

➤ Les conditions aux limites :

On résoudre les équations élémentaires de la structure pour trouver les déformations ou les déplacements par l'utilisation des conditions aux limite et les changements appliqués sur la

pièce. Ces chargements peuvent être la pression, les moments, les forces ponctuelles...etc. [09].

Conditions de frontières	Surface d'application
$U_y = U_{R_x} = U_{R_z} = 0$	
$U_x = U_{R_y} = U_{R_z} = 0$	

**Figure IV. 7** condition aux limites du problème

# Chapitre V

## **Analyse et résultats**

## Introduction

L'objectif de cette étude est l'analyse numérique par la méthode des éléments finis des contraintes résiduelles d'origine thermique développées dans un matériau composite à matrice polymère. La source principale de la production de ces contraintes est la différence des propriétés mécanique et physique entre matrice et fibre.

L'interface fibre-matrice présente non seulement une discontinuité des propriétés mais également est le résidu de ces contraintes. En fonction de leurs amplitudes, ces contraintes peuvent être le responsable de la décohésion de l'assemblage fibre-matrice. Leur analyse est déterminante pour leur mise en service. La fabrication des composites nécessite une montée en température relativement élevée puis un refroidissement à la température ambiante. Or la disparité des coefficients thermoélastiques (entre fibre et matrice) fait de l'interface le siège de contraintes résiduelles thermiques si l'on admet qu'il y a continuité des déformations (interface intacte, parfaitement liée, sans décollement ou fissure).

L'effet des contraintes résiduelles internes sur le comportement mécanique des composites a fait l'objet de plusieurs travaux. Parmi ces travaux, nous pouvons citer les plus récents. Ainsi, Konstantinos G. Dassios, Dimitris G [1]. Ont étudié les effets des contraintes axiales thermiques résiduelles, des chargements cycliques et de la présence d'entailles sur la performance à la traction d'un magnésium-baryum-alumine-silicate-SiC renforcé par des fibres (BMAS) céramique.

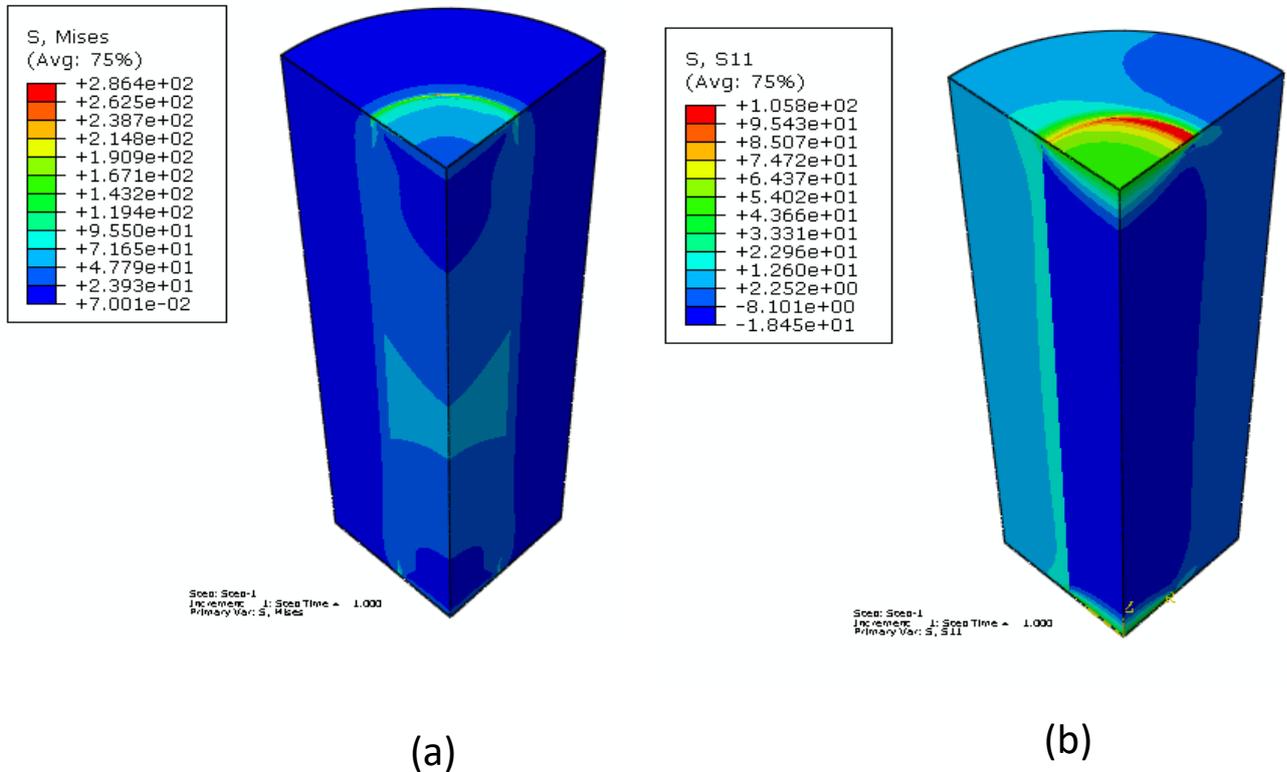
Chi-Seung Lee et al. [2] ont utilisé le critère d'endommagement de Puck pour analyser l'amorçage de fissures dans la fibre et ou la matrice et leur propagation. Ces dernières déterminent le mode de rupture prédominant du composite. Ils montrent également que la présence de défauts dans la direction de propagation de la fissure accélère son instabilité. S. Itou [3] a analysé le comportement de deux fissures amorcées dans l'époxy, l'une centrale et l'autre latérale dans un matériau composite époxy-aluminium soumis à des efforts de tension. Ce comportement est étudié en termes de variation du facteur d'intensité de contraintes.

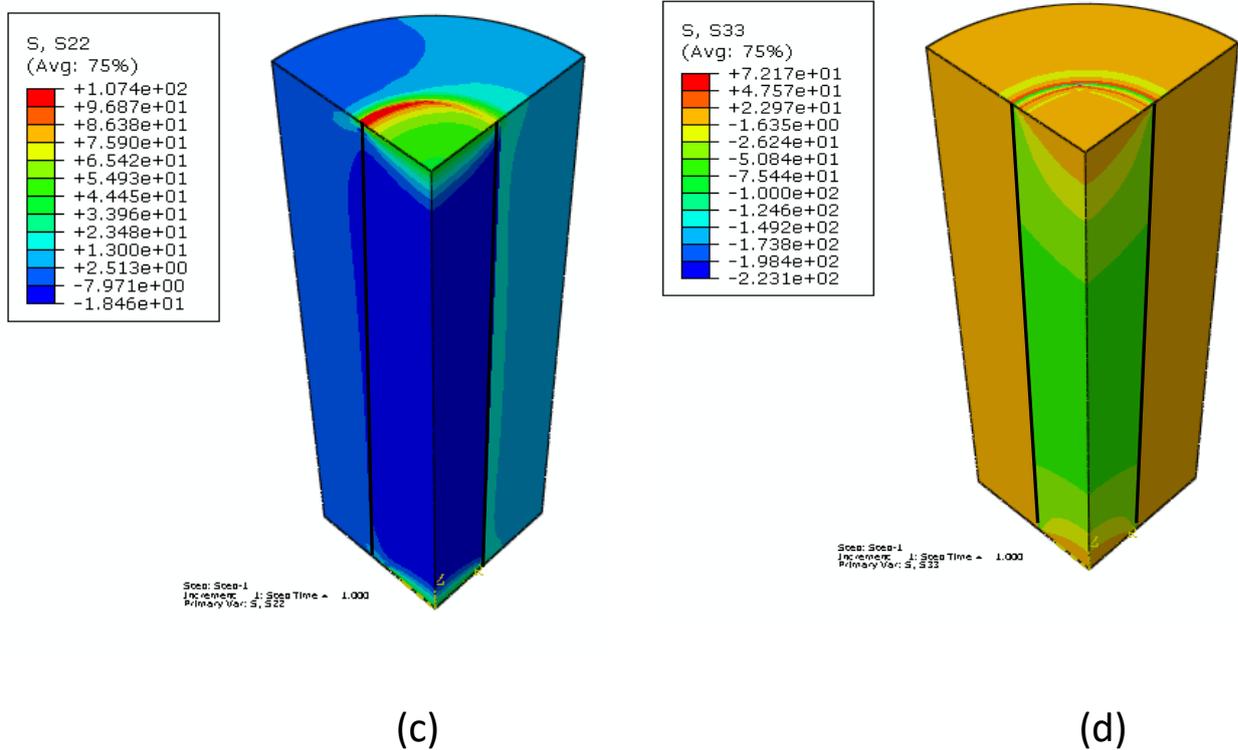
Surendra Kumar [4] a étudié l'effet d'impact, en termes d'endommagement, d'un corps étranger sur une coque cylindrique en composite stratifié (époxy/graphite). On utilisant la méthode incrémentale itérative de Newton-Raphson. L'effet des paramètres du projectile, du stratifié et celui du comportement non linéaire du composite ont été mis en évidence.

Fatih C. et Mete O.K. [5] ont analysé numériquement le comportement, en termes de variation du facteur d'intensité de contraintes, de fissures inter-faciales initiées entre deux plaques composites assemblés par patch. Ils montrent que l'orientation des fibres est un paramètre déterminant du facteur d'intensité de contraintes des fissures inter-faciales. Shuqi Guo et al. [6]. Ont montré que le décollement de l'interface est plus probable lorsque le coefficient de dilatation thermique de la fibre est différent à celui de la matrice.

**V.1. Effet de la distribution des contraintes dans le composite verre / époxy**

Les matériaux composites sont soumis à des chargements de différentes intensités. Le but de cette étude est d'analyser numériquement par la méthode des éléments fini le niveau et la répartition des contraintes induites thermiquement dans un matériau composite soumis à un gradient de température de 180°C.





**Figure V. 1** Distribution de contraintes VM, Radiales, Circonférentielles et Longitudinales.

Sur la figure V.1.a présente la distribution des contraintes de Von Mises en fonction de la température et la distance par rapport à l'interface : époxy – fibre de verre dans le matériau composite. Puisque les valeurs de la courbe sont totalement positives (au-dessus de l'axe horizontal) la matrice en polymère (époxy), et le renforcement en céramique (fibre de verre) sont en tension. On remarque que le taux de contraintes de VM augmente dans la matrice jusqu'à qu'il se stabilise au niveau de la fibre.

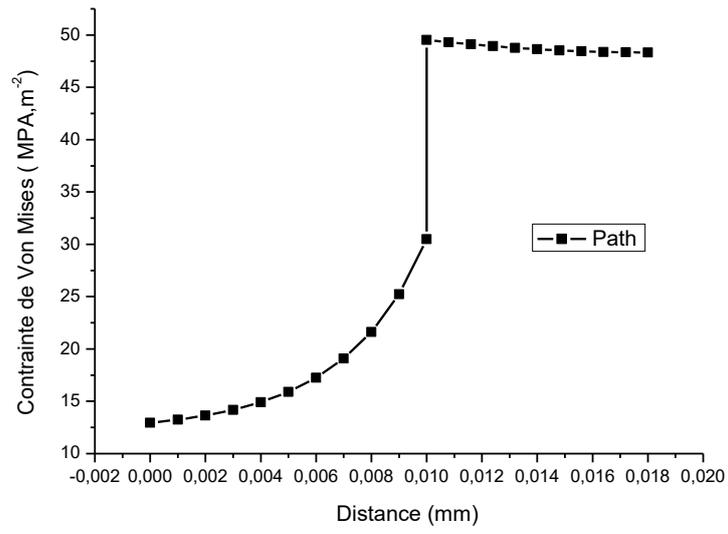
La figure V.1.b présente la distribution des contraintes radiales en fonction de la température et la distance par rapport à l'interface dans le matériau composite. Les contraintes radiales serrent les deux constituants du matériau composite. Les contraintes favorisent le contact interne entre la fibre et la matrice. Elle assure une bonne adhérence entre ces deux éléments. Tandis que les valeurs de la courbe est totalement négative (au-dessous de l'axe horizontal) la matrice en polymère (époxy), et le renforcement en

céramique (fibre de verre) sont en compression. On remarque que le taux des contraintes radiales diminue dans la matrice jusqu'à qu'il se stabilise au niveau de la fibre.

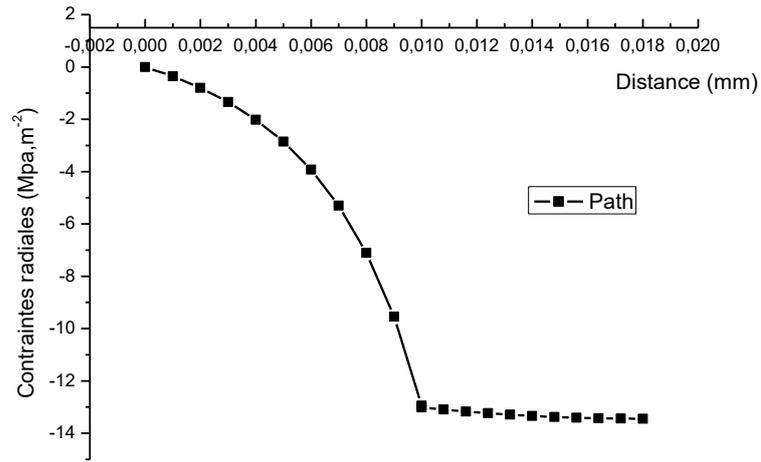
La figure V.1.c montre qu'un accroissement de la température entraîne une intensification des contraintes normales circonférentielles [9]. Cette figure révèle le niveau des contraintes circonférentielles en fonction de la température par rapport à la distance dans le matériau composite. Tandis que la courbe de contraintes circonférentielles au niveau de la matrice est totalement positive (au-dessus de l'axe horizontal), et celles au niveau de renforcement est totalement négative. On observe que le taux de contraintes circonférentielles augmente dans la matrice puis il commence à se diminuer jusqu'à qu'il se stabilise au niveau de la fibre. Alor a conclu que ces contraintes circonférentielles mettent la matrice en tension et la fibre en compression.

Les contraintes normales les plus importantes sont induites suivant la direction longitudinale de la structure. Leur niveau dans ces matériaux de renforcement est plus important que celui des contraintes radiales et circonférentielle. Le graphe dans la figure V.1.d dévoile la distribution des contraintes longitudinales en fonction de la température et la distance dans le matériau composite. Ces contraintes longitudinales compriment très fortement la fibre et très faiblement la matrice.

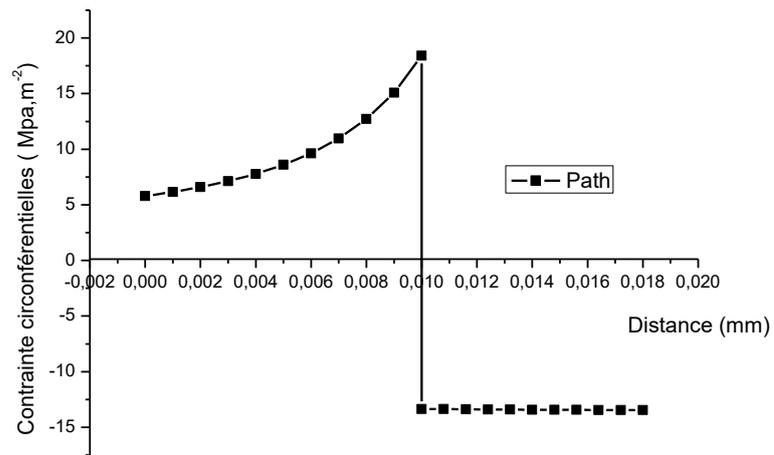
On aperçoit que le taux de contraintes longitudinales se stabilise dans la matrice puis il commence à se diminuer jusqu'à qu'il se stabilise au niveau de la fibre. Comme la courbe de contraintes longitudinales au niveau de la matrice est entièrement positive (au-dessus de l'axe horizontal), et celles au niveau du renforcement est totalement négative, la matrice est en tension et la fibre est en compression. L'interface fibre-matrice peut provoquer une forte concentration de ces contraintes pouvant entraîner une décohésion au niveau de l'interface.



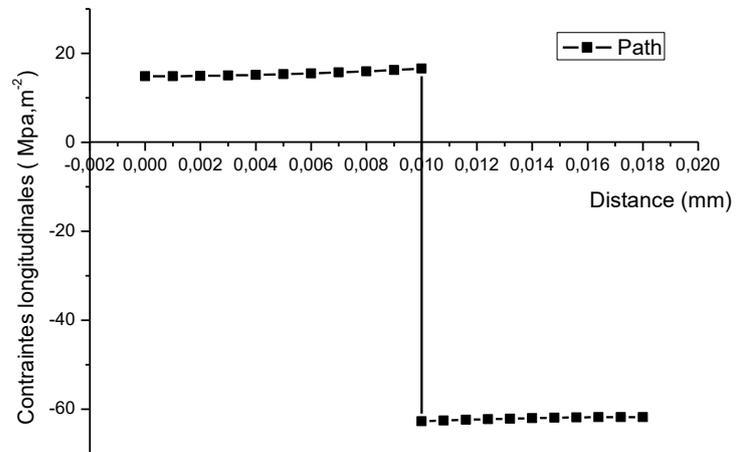
a)



b)



c)

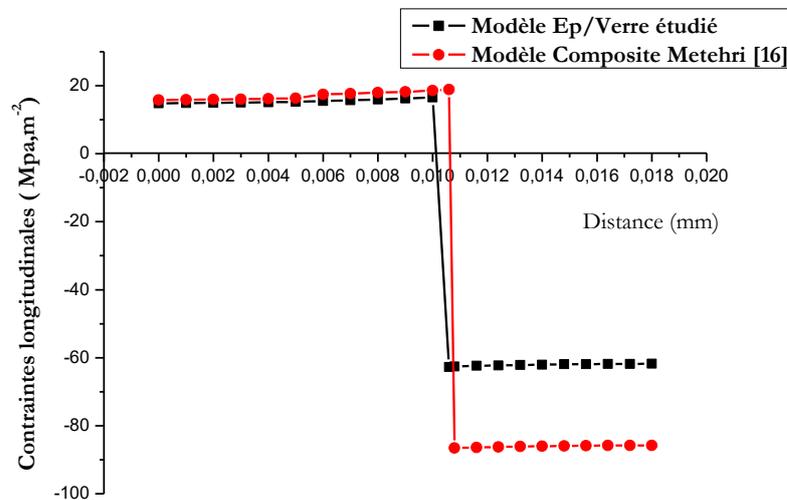


d)

**Figure V. 2** a) les taux des contrainte contraintes de MV, b) contraintes radiales, c) contrainte circonférentielle, d) contraintes longitudinales en fonction de la température.

## V.2. Validation du modèle

Le modèle étudié a été validé par un autre modèle par simulation numérique, afin de mieux analyser le niveau de contraintes internes dans la matrice et la fibre, il a été présenté sur la figure V.3, la variation de contrainte longitudinales en fonction de la distance matrice/fibre des deux modèles composites. On constate que les contraintes longitudinales compriment le matériau de renfort et prolongent le polymère. Loin de l'interface, ces contraintes diminuent. En effet, Selon [16] L'analyse de la distribution de ces contraintes et son intensité a une grande importance pour la détermination de la durabilité des matériaux composites.



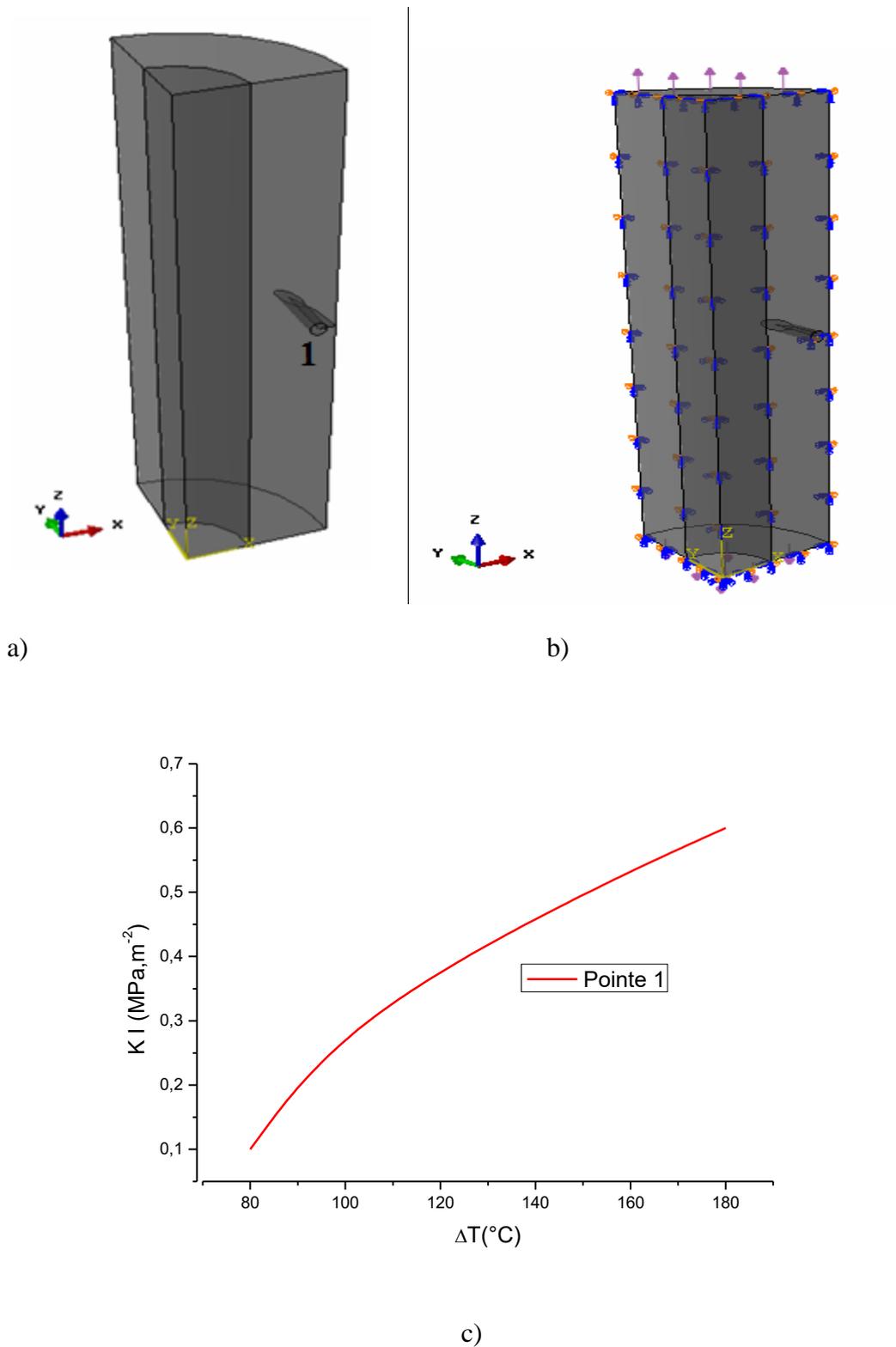
**Figure V. 3** Distribution de contraintes  $\sigma_{ZZ}$  des deux modèles de composites.

## V.3. Cas d'une fissure matricielle

### V.3.1. Effet du chargement thermique

Dans cette partie du travail, une étude de simulation numérique a été faite pour analyser le niveau de la distribution des contraintes induites par le chargement thermique d'une fissure matricielle initiée dans un matériau composite ( verre/époxy ) soumis à un gradient de température, sur la figure V.4.c est représentée la variation du facteur d'intensité de contraintes normales d'origine thermique sous l'effet de la température d'élaboration des matériaux composites à matrices organique sur le comportement d'une fissure induite dans la matrice (matériau époxy) dont on remarque que les valeurs sont

positives ce qui révèle l'ouverture de la fissure et sa propagation (mode I pure) avec des valeurs nulles du KII et KIII =0.



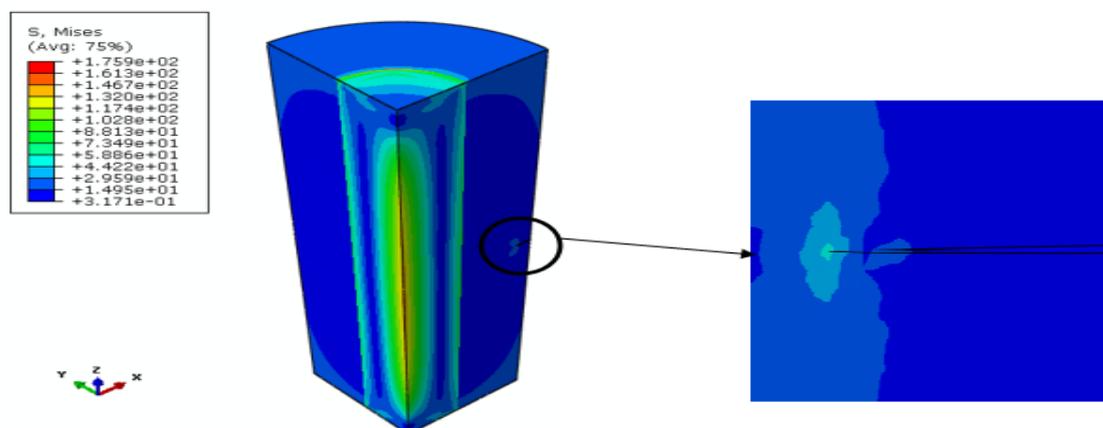
**Figure V. 4** a) Représentation du modèle géométrique, b) Modèle avec les conditions aux limites. c) Variation du KI en fonction de la température.

### V.2.2 Effet du chargement mécanique

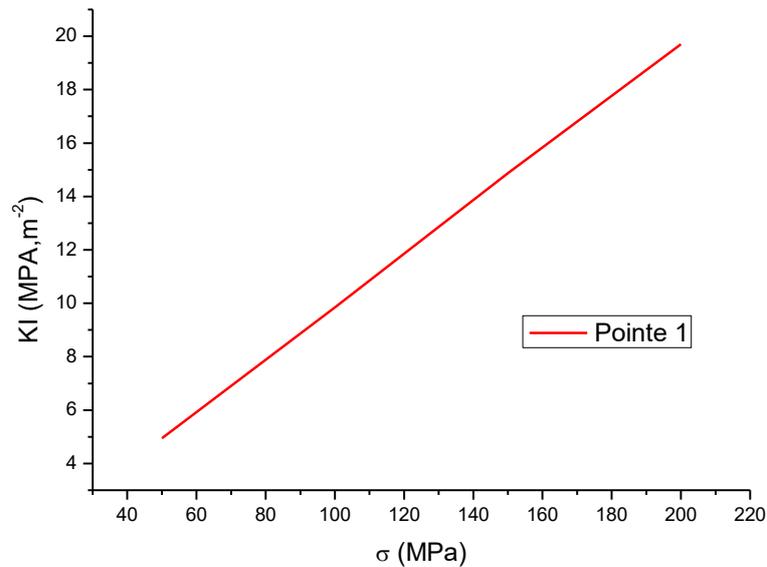
L'effet des contraintes de VM en service sur le comportement de fissure matricielle dans un composite à matrice organique ( $E_p$ / Verre) est étudié. L'analyse en termes de variation de facteur d'intensité de contraintes, d'une fissure de taille de  $6 \mu\text{m}$  amorcée dans la matrice comme le montre la figure V.4.a. Cette structure fissurée est soumise à des efforts de traction uni axiale appliqués perpendiculairement à l'axe des « x ».

Les contraintes normales induites dans la matrice du matériau composite sous l'effet d'une tension uni-axiale sont représentées sur la figure V.4. Les deux constituants du composite (matrice et fibre) sont soumis à des contraintes résiduelles d'origine mécaniques, un effort de traction sur la matrice qui engendre l'ouverture et la propagation de la fissure. La figure V.4, représente la distribution des contraintes circonférentielles par ces efforts, au voisinage proche du front de fissuration. On observe que ces contraintes mécaniques sont importantes à la pointe de la fissure. Les analyses montrent que l'augmentation de la charge appliquée a pour effet d'élever la croissance de ces contraintes.

Pour une meilleure représentation de ce développement, sur les figures V.5, est illustrée la variation des facteurs d'intensité de contraintes en mode d'ouverture KI en fonction de la charge mécanique. Ce comportement est d'autant plus accentué que la structure fissurée est soumise à un chargement mécanique plus important. Les résultats donnés par la figure VI.6 indiquent nettement qu'un tel défaut de fissuration se propage essentiellement en mode d'ouverture (modes I).  $K_{II}$  et  $K_{III} = 0$



**Figure V. 5** Distribution des contraintes de Von mises en fonction de la charge mécanique ( $\sigma=200\text{Mpa}$ ).



**Figure V. 6** Variations du KI en fonction de la charge mécanique.

### V.3.Cas d'une fissure inter-faciale

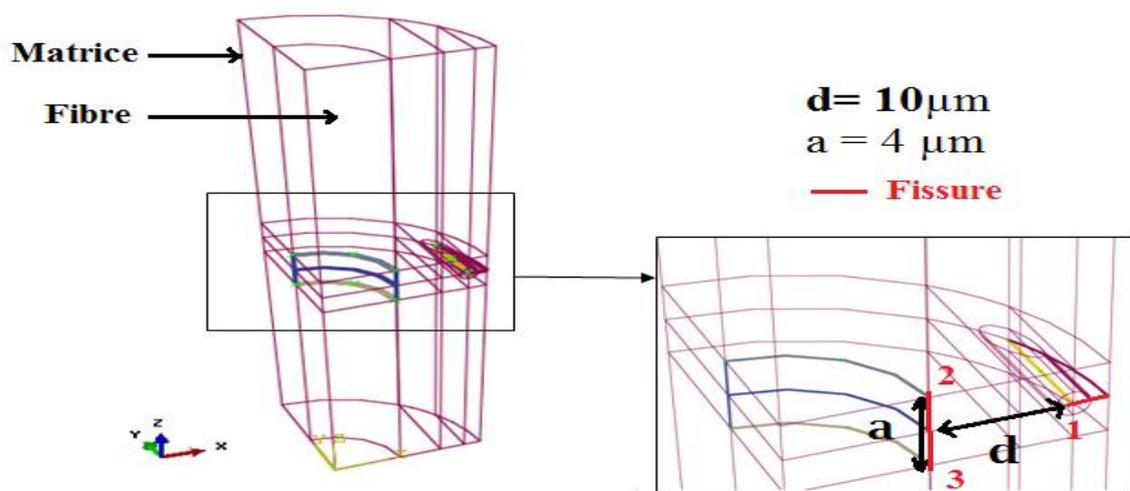
#### V.3.1. Effet du chargement thermique

Dans cette partie du travail, l'effet de la température d'élaboration des matériaux composites à matrices organique sur le comportement d'une fissure, amorcée à l'interface fibre-matrice, a été étudié comme le montre la figure V.7. Sur la figure V.8.a est représentée la variation du FIC au front de ce défaut de fissuration en mode d'ouverture. Cette figure montre que plus cette température est élevée, plus la fissure inter-faciale est plus instable en mode II et III et l'absence du mode d'ouverture  $K_I=0$ .

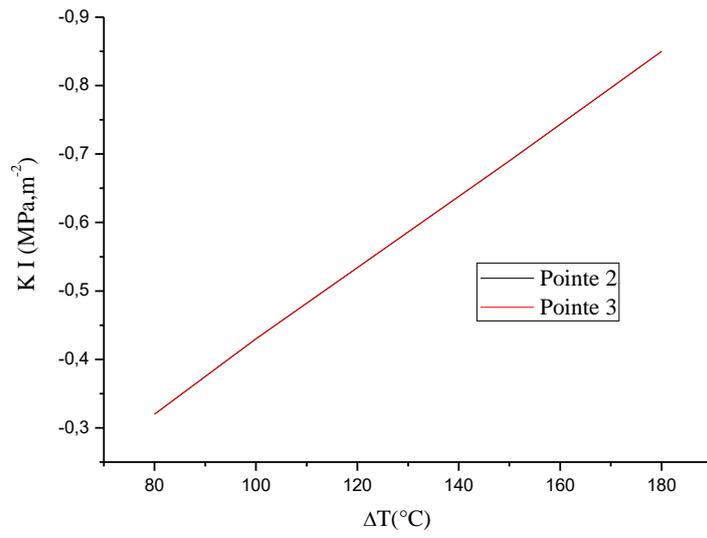
Le matériau composite à matrice d'Epoxy, est soumis à des contraintes internes fortement localisées au niveau de son interface. Les deux constituants du composite (matrice et fibre) sont soumis à des contraintes résiduelles d'origine thermique. Ces contraintes sont d'autant plus intenses que la température de mise en œuvre est élevée ; la température de mise en œuvre est un paramètre physique déterminant pour la durabilité des matériaux composites. En effet, le facteur d'intensité de contraintes en mode de cisaillement est d'autant plus important que la température d'élaboration est plus élevée. L'effet de cette température sur le comportement d'une fissure inter-faciale est illustré sur la figure V.8.b. Sur cette figure, est illustrée l'influence de la température de cet assemblage sur le facteur d'intensité de contraintes en mode II.

Comparativement au mode I les valeurs de ce critère de rupture sont plus importantes et ce quelle que soit la température. Ce sont les contraintes résiduelles à l'interface, de tension dans la matrice organique et de compression dans la fibre en céramique qui sont responsables d'un tel comportement. En effet, ces contraintes, étroitement liées à l'écart de température  $\Delta T$ , sollicitent plus fortement l'interface en cisaillement. Ce qui explique la propagation supérieure en mode II.

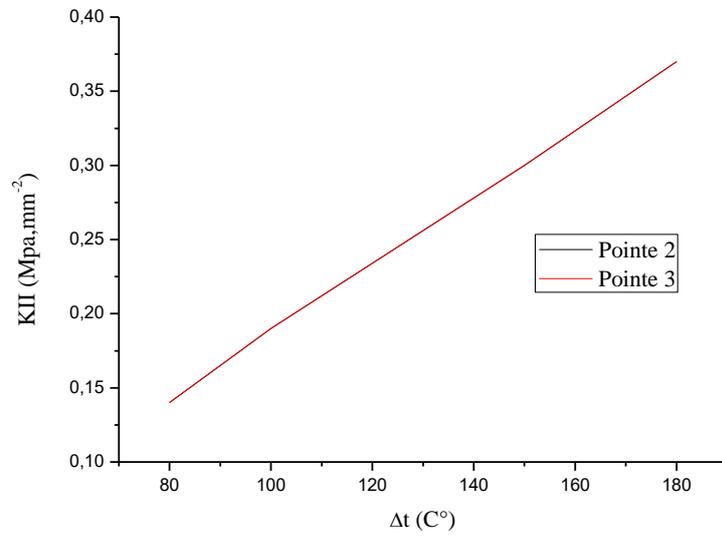
En mode III, les valeurs du facteur d'intensité de contraintes sont comparables à celles du mode II (fig. V.8.c). Nos résultats montrent clairement qu'une fissure initiée à l'interface fibre-matrice se propage, sous l'effet des contraintes internes induites dans la fibre et la matrice, en modes mixtes (modes II et III). Cette propagation est d'autant plus instable que ce composite est soumis à des températures élevées. De part et d'autre, les fissures inter-faciales d'un composite sollicité à un chargement thermique sont initiées au cours du processus d'élaboration en raison de l'écart de rigidité et du coefficient de dilatation thermique entre la fibre et la matrice. Cette différence fragilise l'adhésion entre ces deux constituants et par conséquent favorise l'amorçage de fissures inter-faciales. Les résultats obtenus dans cette étude montrent qu'une fissure initiée à l'interface se propage en modes mixte II et III. Ceci est dû à la nature des états de ces contraintes d'origine thermique. On peut déduire qu'il est nécessaire d'optimiser la température d'élaboration afin de réduire les contraintes résiduelles, responsables de l'instabilité du défaut de fissuration et d'assurer une bonne tenue mécanique de l'interface.



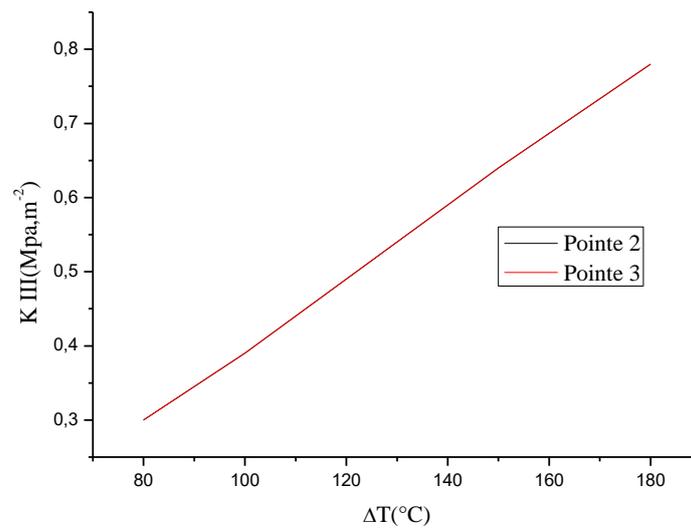
**Figure V. 7** interaction de la zone de fissure inter-faciale et matricielle.



a)



b)



c)

**Figure V. 8** Variation du FIC en fonction de la température.

### V.3.2. Effet du chargement mécanique

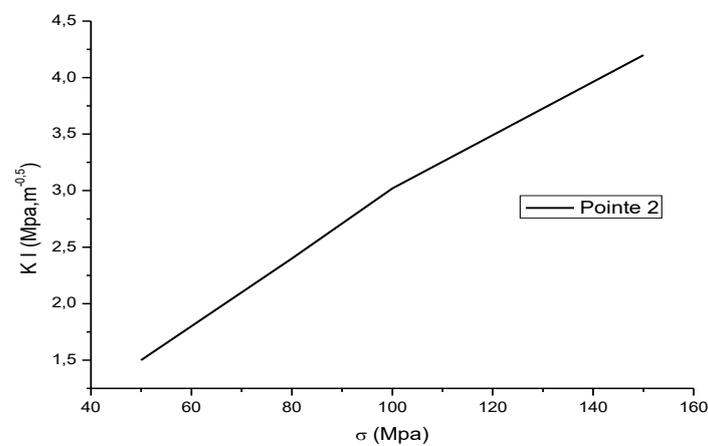
L'effet des contraintes de mise en service sur le comportement de fissures, initiées à l'interface d'un composite à matrice organique (Ep/ Verre) est étudié. L'analyse en termes de variation de facteur d'intensité de contraintes, comme le montre la figure V9. a. Cette structure fissurée est soumise à des efforts de compression uni axiale. Pour ce faire, des efforts opposés de compression uni axiale ont été appliqués perpendiculairement à l'axe des « x » et encastree du côté opposé.

Pour une meilleure représentation de ce développement, sur les figures V.9.a et V.9.b, est illustrée la variation des facteurs d'intensité de contraintes en mode d'ouverture KI et en mode mixte KII et KIII en fonction de la charge mécanique appliquée. Ces figures montrent clairement qu'il existe une charge mécanique supérieure à 150 Mpa, au-delà de laquelle ces facteurs semblent sensibles à l'avancée de la fissure. Ce comportement est d'autant plus accentué que la structure fissurée est sollicitée à un chargement plus important. Les résultats donnés par les figures V.8 et V.9 indiquent nettement qu'un tel défaut de fissuration se propage essentiellement en mode I, II et III.

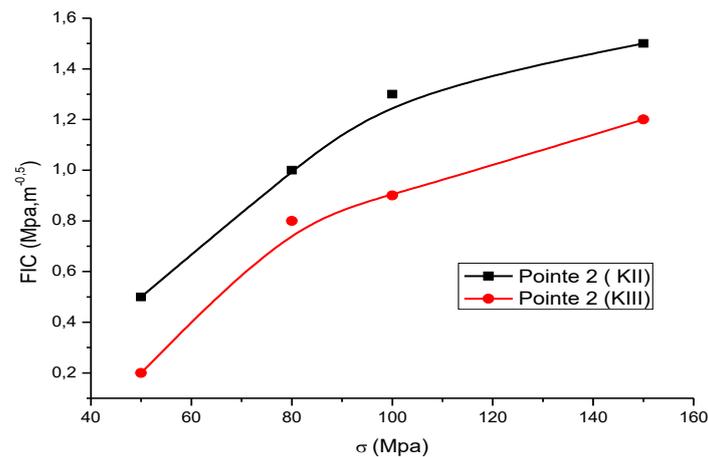
La fissure inter-faciale est d'autant plus instable que l'amplitude des efforts de compression appliqués est plus significative. Nos résultats montrent qu'une telle fissure se

propage en mode d'ouverture. En effet, les valeurs du facteur d'intensité de contraintes en modes de cisaillement (modes II et III) sont aussi marquées comme le montrent la figure V.9.

Etant donné que la contrainte appliquée sur la matrice et la fibre exerce à ouvrir les lèvres de fissure. La cinétique de propagation est proportionnelle à l'effort mécanique sollicité tout autant qu'à la taille de la fissure.



(a)



(b)

**Figure V. 9** Variation du FIC en fonction de la charge de compression appliquée.

## 1) Cas d'une fissure dans la fibre

### Chargement thermique

Dans cette partie d'étude, une fissure située dans la fibre (figure V.10) a été analysé,

Pour une meilleure illustration de ce comportement des fissures, sur la figure V.10 est représentée la variation du facteur d'intensité de contraintes de cette fissure qui se propage en mode I, II et III. Cette figure montre clairement que la fissure est initialement instable lors de sa propagation dans la fibre. Les contraintes résiduelles de compression induites dans la fibre agissent en tant que contraintes d'ouverture des fronts de fissuration.

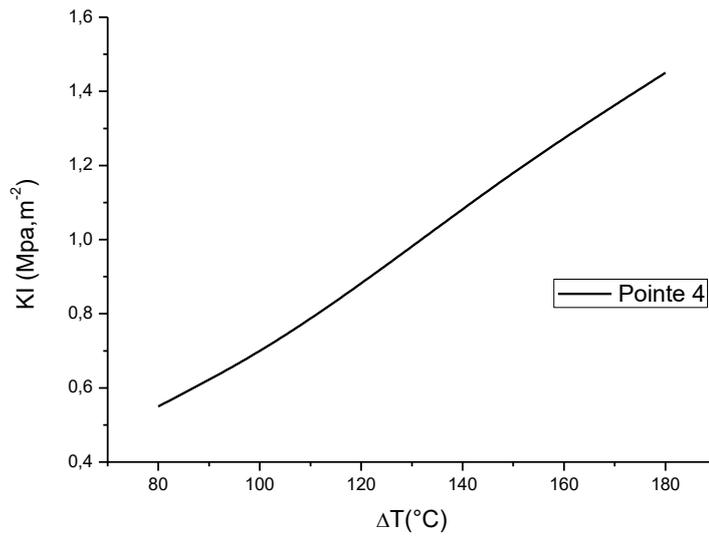
La température d'élaboration est un paramètre déterminant la résistance mécanique de l'interface. Son effet sur le comportement d'une fissure, amorcée dans la fibre parallèlement à l'interface, l'effet de cette température sur le comportement d'une fissure amorcée au niveau fibre de verre là (la fissure est située au milieu de la fibre parallèlement à l'interface). La figure V.10.a illustre la variation du facteur d'intensité de contraintes en mode I en fonction de l'accroissement de ce paramètre physique. Cette variation montre nettement qu'une telle fissure se propage essentiellement en mode I. Ceci s'explique par les valeurs importantes de ce critère de rupture. C'est le comportement mécanique du matériau composite sous l'effet des sollicitations thermiques qui est responsable de ce mode de développement de la fissure.

L'effet du chargement thermique sur la croissance d'une fissure localisée dans la fibre en céramique, en mode d'ouverture (mode I) et de cisaillement (modes II et III) est indiqué sur les figures V.10.b et V.10.c Ces figures montrent que l'accroissement de cette fissure entraîne une amplification du facteur d'intensité de contraintes en ces trois modes. Le mode prédominant de rupture est le mode d'ouverture pur (mode I). Le mode mixte (II et III), ce facteur présentent des valeurs relativement faibles.

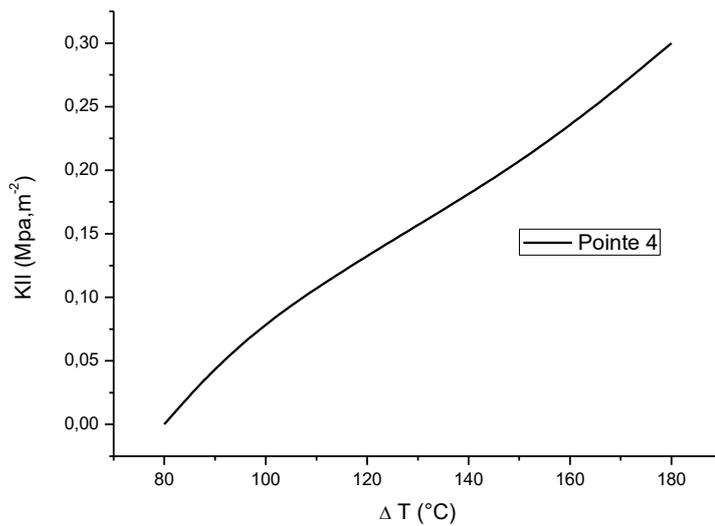
Nos résultats illustrent clairement qu'une fissure amorcée dans la fibre présente un risque de rupture par ouverture. Cette figure montre clairement qu'une telle fissure se propage préférentiellement en mode d'ouverture. En effet, les valeurs du FIC en mode I obtenus sont supérieures à la résistance de fissuration du verre. Pour les tailles de fissures au delà de 5 $\mu$ m. Les contraintes résiduelles favorisent l'instabilité des fissures amorcées dans la fibre et la probabilité de rupture par accroissement du FIC, pour les matériaux

élaborés à des températures élevées, le risque d'endommagement est étroitement liée à la température d'élaboration du composite.

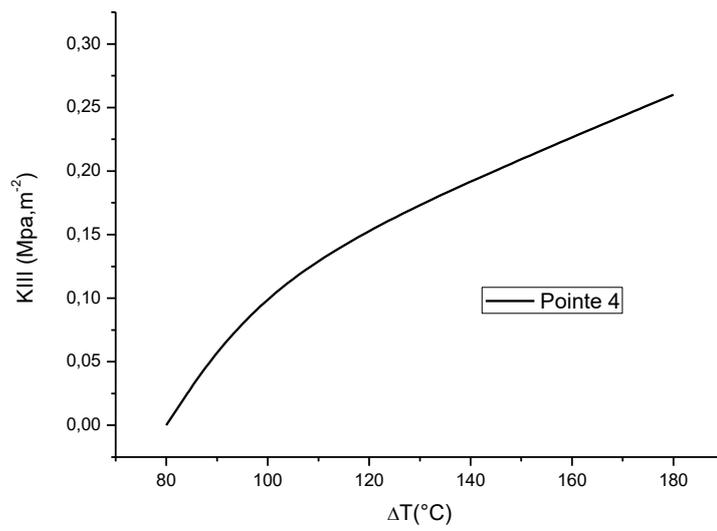
La cinétique de croissance en modes II et III d'une fissure, amorcée dans la fibre, est quasiment négligeable. Dans cette partie de la structure, le chargement thermique n'a pratiquement pas d'effet sur l'instabilité de ce défaut de fissuration.



(a)



(b)



(c)

**Figure V. 10** Variation du FIC en fonction de la température au niveau de la fibre.

Conclusion

**Générale**

## Conclusion générale

Les résultats obtenus à partir de cette analyse montre :

- \_ Que les contraintes internes de VON MISES en fonction de la température sont totalement positives donc on conclut que la matrice en polymère (époxy), et le renforcement en céramique (fibre de verre) sont en tension
- \_ Que les contraintes internes radiales en fonction de la température sont totalement négatives donc on conclut que la matrice en polymère (époxy), et le renforcement en céramique (fibre de verre) sont en compression
- \_ Que les contraintes internes circonférentielles en fonction de la température sont totalement positives au niveau de la matrice en polymère (époxy) est qui est en tension et le renforcement en céramique (fibre de verre) est en compression puisque les contraintes sont tortillements négative
- \_ Que les contraintes internes longitudinales en fonction de la température que s'est contraintes compriment très fortement le renforcement en céramique (fibre de verre) et très faiblement la matrice en polymère (époxy)
- \_ Que dans le cas d'une fissure matricielle par effet de chargement thermique on remarque que les valeurs sont positives ce qui révèle l'ouverture de la fissure et sa propagation (mode I pure) avec des valeurs nulles du KII et KIII =0.
- \_ Que dans le cas d'une fissure matricielle par effet de chargement mécanique en remarque que la matrice en polymère (époxy), et le renforcement en céramique (fibre de verre) sont soumis à des contraintes résiduelles d'origine mécanique, un effort de traction sur la matrice engendre l'ouverture et la propagation de la fissure
- \_ Que dans le cas d'une fissure inter-faciale par effet du chargement thermique on remarque que plus la température est élevée, plus la fissure est plus instable en mode II et III et l'absence du mode d'ouverture KI=0. Ces contraintes sont d'autant plus intenses que la température augmente. Et on constate que la fissure initiée a l'interface se propage en mode mixte II et III.
- \_ Que dans le cas d'une fissure inter-faciale par effet du chargement mécanique on remarque que la fissure est d'autant plus instable que l'amplitude des efforts de compression appliqués est plus significatives, et que la fissure se propage en mode d'ouverture. En effet, les valeurs du facteur d'intensité de contraintes en mode de cisaillement (mode II et III) sont aussi marquées, et que la contrainte appliquée sur

## Conclusion générale

la matrice en polymère (époxy) et le renforcement en céramique (fibre de verre) exerce à ouvrir les lèvres de fissure.

- \_ Que dans le cas d'une fissure au niveau de la fibre par effet de chargement thermique. On remarque qu'une telle fissure se propage essentiellement en mode d'ouverture  $K_I$  qui est totalement positive et négligeable dans le mode II et III

# Références

## **Partie II**

## Références partie II

- [1] kurita, M.sato, M. ihara I ( residuel stress distribution of ceramic-polymere joint )  
advances polymere in X-Ray analysis, vol. 33, p 354-369, (1990)
- [2] Miserez. A.G ( facture and toughening of high volume fraction ceramic particle  
reinforced polymer
- [3] singh .R.N &Reddy .S.K ( influence of residual stresses, interface roughness, and fiber  
coating on interfacial in céramique composites) .J Am. Cerami. Soc, vol.79, N°1p137-147,  
(1996) .
- [4] Hibbitt, karlsson & sorensen (abaqus/cea user's manuel) . inc ( 2000)
- [5] Site Internet SIMULIA . Dassault Systèmes. Archivé de l' original le 2 mai 2010 .  
Récupéré le 7 juillet 2010
- [6] Shelley, Toby (17 mai 2005). « Dassault Systèmes compte sur l'acquisition d'Abaqus »  
. Récupéré le 31 janvier 2021
- [7] Guo.F ( l'influence de la microstructure sur des propriétés mécanique et des contrainte  
interne d'un composite polymère renforcé pare les fibres de verre ) thèse de doctorat,  
l'école nationale supérieur d'art et de matière de paris, 2001
- [8] documentation abaqus. 2006
- [9] RAHMOUNI KENZA, ZIANE ATTAOULA / thèse pour l'obtention du grade  
d'ingénieur d'état /application de la m2thode des éléments finis tridimensionnelle pour  
l'analyse des contraintes résiduelles dans les matériaux composite / 2011
- [10] Konstantinos G. Dassios , Dimitris G. Aggelis, Evangelos Z. Kordatos Konstantinos  
G. Dassios , Dimitris G. Aggelis, Evangelos Z. Kordatos "Cyclic loading of a SiC-fiber  
reinforced ceramic matrix composite reveals damage mechanisms and thermal residual  
stress state" journal Composites August (2012).
- [11] Chi-Seung Lee, Jeong-Hyeon Kim, Seul-kee Kim, Dong-Man Ryu, Jae-Myung Lee  
"Initial and progressive failure analyses for composite laminates using Puck failure  
criterion and damage-coupled finite element method" j. Composite Structures, November ( 2014).

- [12] S. Itou “Stress intensity factors for an interface crack between an epoxy and aluminium composite plate.” An Int'l Journal [Structural Engineering and Mechanics, Vol. 26 No. 1, \(2007\)](#).
- [13] Surendra Kumar “Analysis of impact response and damage in laminated composite cylindrical shells undergoing large deformations.” [An Int'l Journal Structural Engineering and Mechanics Vol. 35 No. 3, \(2010\)](#).
- [14] Fatih Cetisli, Mete O. Kaman “Numerical analysis of interface crack problem in composite plates jointed with composite patch.” An Int'l Journal Steel and Composite Structures, [Vol. 16 No. 2, \(2014\)](#).
- [15] Shuqi Guo , Kouichi Honda, Yutaka Kagawa “Interface debonding from bottom face and frictional transition during pushout testing of a tungsten fiber-epoxy matrix composite” j. Composites Science and Technology 65 (2005) Pages 1808–1814.
- [16] A. Metehri, B. Serier \*, B. Bachir bouiadjra, M. Belhouari, M.A. Mecirdi “Numerical analysis of the residual stresses in polymer matrix composites” Materials and Design 30 (2009) 2332–2338