

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Ibn Khaldoun de Tiaret

Faculté des Sciences Appliquées

Département de Génie Mécanique



**PROJET DE FIN DE CYCLE**

**MASTER**

**Domaine** : Sciences et Technologie

**Filière** : Génie Mécanique

**Parcours** : Master

**Spécialité** : Construction Mécanique

**Thème**

Analyse numérique sur le  
comportement mécanique des  
structures réparées par patch

Préparé par :

Naoui houssam eddine

Boufadene abdelkrim

Soutenu publiquement le : .. / 06 / 2022, devant le jury composé de :

M.Saad Mohamed	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Président
M.Baltech Abdelghani	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. Benarbia D	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Examineur
M. Zagane Mohammed	Maître de Conférences "A" (Univ. Ibn Khaldoun)	Encadrant

Année universitaire : 2021 - 2022

## ❧ *Remerciements* ❧

*En premier lieu, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage et la volonté de réaliser ce modeste travail.*

*Nous remercions nos parents qui nous ont suivis pendant nos études.*

*Nous remercions **Mr, zagane mouhamed el sallah** , notre encadreur, pour son aide, son encouragement, son orientation, et pour ses précieux conseils durant la réalisation de ce travail.*

*Nos remerciements aux membres de jury qui ont accepté de juger et examiner notre travail*

*Nous adressons aussi nos remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseignés durant ce cursus universitaire.*

*Enfin Nous tenons à saisir cette occasion et adresser nos profonds remerciements et nos profondes reconnaissances à toutes personnes qui nous ont aidés de près ou de loin dans la réalisation de ce mémoire.*

## *Dédicaces*

Je dédie ce projet :

A mon cher père **tourki**

Qui m'a toujours poussé et motivé dans mes études. Merci énormément papa pour ton soutien plus que précieux, merci pour ton grand cœur toutes vos qualités qui seraient trop longues à énumérer. Ma vie ne serait pas aussi magique sans ton présence et ton amour mon papounet d'amour

A ma très chère mère **fatiha**

La lumière de mes jours. Tu représente pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement. Tu as toujours été présente à mes cotés pour me soutenir et m'encourager. Je dédie ce travail en témoignage de mon profond amour.

A mes chers, mon frère **Mouhamed, kadi**, et ma sœur **sara, loubna**, pour leurs encouragements permanents et leur appui et leur soutien moral, les mots ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et l'affection que je porte pour vous.

A mes chers amis

Pour leurs encouragements continus, leur soutien et leur soutien moral, les mots ne suffisent presque pas pour exprimer

Enfin, à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

**Naoui houssam**

# Résumé

Résumé:

L'objectif de ce travail porte sur une analyse numérique sur le comportement mécanique d'une structure fissurée et réparée par patch en matériaux composites par la méthode des éléments finis tridimensionnels. L'endommagement statique est considéré comme un processus de détérioration progressive de la matière suivant des phénomènes physiques intervenant à l'échelle microscopique ou mésoscopique susceptible de se développer dans les matériaux composites stratifiés. à l'aide d'un modèle prédictif de l'initiation du dommage pour des composites fibreux qui est basé sur la théorie de Hashin étant pré-intégrée dans le code Abaqus. Elle est utilisée pour évaluer la dégradation du stratifié.

**Mots clés:** Méthode des éléments finis, Endommagement, stratifié, critères de Hashin.

ملخص:

الهدف من هذا العمل يتعلق بالتحليل العددي للسلوك الميكانيكي لهيكل متصدع ومصلح بواسطة التصحيح في المواد المركبة بطريقة العناصر المحدودة ثلاثية الأبعاد. يعتبر التلف الساكن بمثابة عملية تدهور تدريجي للمادة بعد الظواهر الفيزيائية التي تحدث على المقياس المجهرى أو الميزوسكوبي الذي يحتمل أن يتطور في المواد المركبة المصنفة. باستخدام نموذج تنبؤي لبدء الضرر للمركبات الليفية والذي يعتمد على نظرية هاشين التي تم دمجها مسبقاً في كود ABAQUS. يتم استخدامه لتقييم تدهور الصفح.

الكلمات المفتاحية: طريقة العناصر المنتهية ، الضرر ، التصفيح ، معايير HASHIN.

Abstract :

The objective of this work relates to a numerical analysis on the mechanical behavior of a structure cracked and repaired by patch in composite materials by the method of the three-dimensional finite elements. Static damage is considered as a process of progressive deterioration of the material following physical phenomena occurring at the microscopic or mesoscopic scale likely to develop in laminated composite materials. using a predictive model of damage initiation for fibrous composites which is based on Hashin theory being pre-integrated in the Abaqus code. It is used to assess the degradation of the laminate.

Keyword: Finite element method, damage, stratified, Hashin criteria.

# Table Des Matières

---

## Sommaire

Introduction .....	1
Chapitre I Généralité sur les matériaux composites	
I. Introduction : .....	3
I.1. Définition .....	3
I-2. Constituants des matériaux composites : .....	5
I.3. caractéristiques générales des matériaux composites .....	5
I.3.1 Classement suivant la nature des constituants .....	6
I.3.2 Classement suivant morphologie .....	6
I.4 Domaine d'application des composites .....	7
I.5 Constituant des composites .....	8
I.5 .1. Les matrice .....	8
I.5 .2 Les matrices organiques : .....	10
I.5 .2.1 : Matrices thermoplastiques : .....	10
I.5 .2.2 Elastomères : .....	11
I.5 .2.3 Matrices thermodurcissables: .....	11
I.5 .2.4 Les matrices métalliques .....	12
I.5 .2.5 Les matrices carbonées .....	12
I.5 .2.6 Les matrices céramiques .....	13
I.5. 3. Préparation des matrices .....	13
I.5 .4 Le renfort .....	13
I. 5 .4.1 Types de renfort: .....	14
I. 5 .4.2. Fibres de verre: .....	14
I. 5 .4.3 Fibres de carbone: .....	15
I. 5 .4.4 Fibres d'aramides: .....	16
I. 5 .4.5 Fibres naturelles: .....	16
I. 5 .4.6 Fibre d'alfa : .....	17
I.5.5. L'interface .....	18
I.6 Différents types de matériaux composites .....	18
I.6 .1. Matériaux composites de grande diffusion .....	18
I .6.1.2. Matériaux composites de hautes performances .....	18
I .6.2 Domaines d'application .....	19
I .7 Avantages et inconvénients des matériaux composites .....	19
I .7.1. Avantage des matériaux composites .....	19

# Table Des Matières

---

I.7.2 Inconvénients des matériaux composites .....	20
I.8. Homogénéisation des matériaux composites .....	20
I.8.1. Généralités sur les techniques d'homogénéisation.....	20
I.9. ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES.....	22
I.9.1.Les Stratifiés.....	22
I.9.2.définition d'un matériau sandwich :.....	23
I.10. Contenu du matériau sandwich: .....	24
I.10.1. Autres architectures :.....	24
Chapitre II L'endommagement des matériaux composites	
II. Introduction : .....	26
1.2 Définition d'endommagement .....	26
II.1. ENDOMMAGEMENT DES MATERIAUX COMPOSITES :.....	26
II.2. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement .....	28
II.3. Mécanismes d'endommagement : .....	28
II.3.1. Fissuration de la matrice : .....	29
II.3.1.1. Fissuration transverse .....	29
II.3.1.2. Fissuration longitudinale .....	30
II.3.2. Décohésion fibre-matrice.....	31
II.4. Fissuration matricielle : .....	32
II.5. Délaminage :.....	33
II.5.1. Micro délaminage et délaminage diffus :.....	34
II.5.2. Macro délaminage :.....	35
II.6 Rupture de fibres : .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
II.6.1. Rupture multiple : .....	37
II.6.1.1. Rupture multiple de la fibre :.....	37
II.6.1.2 Rupture multiple de la matrice : .....	39
II.7. Fissurations des composites stratifiés .....	40
II.8. Critères d'endommagements des matériaux composites.....	41
II.8.1 Définition des critères de résistances :.....	41
II.8.2 Critère de Hoffman .....	41
II.8.3 Critère de la contrainte maximale .....	42
II.8. 4 Critère de Hashin .....	42
II.9. Conclusion .....	42

# Table Des Matières

---

Chapitre III Les résultats et discussions	
III. 1 Introduction .....	45
III.2 Présentation du code de calcul Abaqus/CAE .....	46
III.2.1 Code de calcul Abaqus/CAE .....	46
III.3. Modélisation tridimensionnelle: .....	48
III.3.1 Description géométrique et les conditions aux limites .....	48
III.3.3 Les propriétés mécanique .....	49
III.3.4. Maillage .....	50
III.3.6. Critère d'initiation de l'endommagement (Hashin).....	51
III.4. Résultats et discussions .....	52
III.4.1. Distribution de l'endommagement de la plaque non-réparée: .....	52
III.4.1. Distribution de l'endommagement de la plaque réparée:.....	58
III.6. Conclusion.....	63
Conclusion générale .....	65

# Liste Des Figures

---

Figure I-1 Schématisation des renforts noyés dans une matrice .....	4
Figure I.2. Constituants d'un matériau composite .....	4
Figure I. 3: Stratifié à mat de verre .....	7
Figure I.4: Domaine d'application des composites.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure I.5 : Différentes Familles de Matrices.....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure.I.6 : Boucle de vie d'un thermoplastique .....	11
Figure. I.7: Boucle de vie d'un thermodurcissable.....	12
Figure I.8 : Principaux matériaux de renforts.....	14
Figure I.9 : Fibre de verre.....	15
Figure I.10 : Fibre de carbone. ....	15
Figure I.11 : Fibre d'aramides (Kevlar). ....	16
Figure I.12 : Classification des fibres naturelles .....	17
Figure I.13 : Illustrations de la plante d'Alfa à l'état brute.....	17
Figure I.14 : Principe de l'approche d'homogénéisation des matériaux hétérogènes. ....	21
Figure I.15 Approche et principe de l'homogénéisation numérique .....	21
Figure I.16 : Stratifié constitué de couches parfaitement liées.....	22
Figure I.17 : Désignations du stratifié .....	22
Figure I.18 : Schématisation d'une plaque sandwich.....	23
Figure II.1 : Les différentes échelles d'observation de l'endommagement : illustration sur un .....	28
Figure II.2: Principaux endommagements rencontrés dans un stratifié. ....	29
Figure II.3: fissuration transversale de la matrice. ....	30
Figure II.4: fissuration longitudinale de la matrice. ....	30
FigureII.5.Fissurematricielleforméeàpartirdelacoalescencedesdécohésionsetmicrofissures matricielles. ....	31
Figure II.6 : Phénomène de décohésion fibre- matrice.....	32
Figure II.7: Détail des fissures matricielles sur un bord libre. ....	32
Figure II.8. Influence de l'épaisseur dans l'apparition des fissures matricielles.....	33
Figure II.9 : Mécanisme de délaminage. ....	34
Figure II.10 : Micro délaminage en extrémité de fissure matricielle. ....	34
Figure II.12 : Schéma du délaminage diffus. ....	35
Figure II.13 : Délaminage observe dans une cornière a) sans fissuration matricielle et b) avec fissuration. ....	36
Figure II.14 : Mécanisme rupture de fibre.....	37
Figure II.15. Rupture multiple de la fibre .....	38



# Liste Des Figures

---

Figure II.16 : Profil de contrainte de rupture multiple de la fibre .....	39
Figure II.17. Fissuration multiple de la matrice [33].....	40
Figure II.18 : Différentes types de fissuration au sein d'un composite stratifié. ....	41
Figure.III.1 Interface ABAQUS 2017 .....	46
Figure.III.2 Étapes à suivre pour la programmation [36] .....	47
Figure III.3: Représentation schématique du modèle en 3D(a) Modèle géométrique, (b) Configuration du stratifié (c) condition aux limites.....	49
Figure.III.4 Maillage de la plaque réparée.....	51
Figure III.5 Distribution de l'endommagement dans une plaque non-réparée .....	53
Figure III.6 Distribution de l'endommagement en compression des fibres " DAMAGEFC .....	54
Figure III.7 Distribution de l'endommagement en tension des fibres " DAMAGEFT .....	55
Figure III.8 Distribution de l'endommagement de la matrice en compression " DAMAGEMC.....	56
Figure III.9 Distribution de l'endommagement de la matrice en tension " DAMAGEMT. ....	57
Figure III.10 Distribution de l'endommagement par cisaillement " DAMAGESHR ". ....	58
Figure III.9 Distribution de l'endommagement en compression des fibres " DAMAGEFC" pour une plaque réparée .....	60
Figure III.10 Distribution de l'endommagement en compression de la matrice " DAMAGEFC" pour une plaque réparée.....	61
Figure III.11 Distribution de l'endommagement de la matrice en tension " DAMAGEMT" pour une plaque réparée .....	62
Figure III.12 Distribution de l'endommagement par cisaillement " DAMAGESHR ":.....	63

# Liste Des Tableaux

---

Tableau I.1 : Principales différences entre matrices .....	9
Tableau .II.1. Types d'endommagement dans les composites stratifiés [30] .....	27
Tableau .III.1 : Système d'unités pour le code de calcul Abaqus[36].....	
Tableau III.2 : Les démentions de modèle étudié.....	
Tableau III. 3 : Propriétés mécaniques [34] .....	

# Liste Des Symboles

---

$\rho$  : Masse volumique des barres.  
 $Ab$  : Section de barres.  
 $As$  : Section du spécimen.  
 $Ls$  : Longueur du spécimen.  
 $\sigma$  : Contrainte dans le spécimen.  
 $EB$  : Module de Young des barres.  
 $\epsilon_i$  : Onde de déformation incidente.  
 $\epsilon_t$  : Onde de déformation transmise.  
 $\epsilon_r$  : Onde de déformation réfléchie.  
 $\epsilon$  : Déformation du spécimen.  
 $cb$  : Vitesse de propagation de l'onde élastique dans les barres.  
 $\dot{\epsilon}$  : Taux de déformation.  
 $Re$  : Limite élastique.  
 $Vs$  : Vitesse d'impact.  
 $Lb$  : Longueur de la barre.  
 $db$  : Diamètre de la barre.  
 $Z$  : Impédance acoustique.  
 $\rho_s$  : Masse volumique du spécimen.  
 $ds$  : Diamètre de spécimen.  
 $J$  : Moment d'inertie.  
 $\sigma$  : Contrainte nominale.  
 $C$  : *Matrice de rigidité*.  
 $E$  : Module de Young.  
 $\nu$  : Coefficient de Poisson.  
 $G$  : Module de cisaillement.  
 $df$  : Endommagement des fibres.  
 $dm$  : Endommagement de la matrice.  
 $dft$  : Rupture des fibres en traction.  
 $dfc$  : Rupture des fibres en compression.  
 $dmt$  : Rupture de la matrice en traction.  
 $dmc$  : Rupture de la matrice en compression.  
 $Xt$  : Résistance en traction longitudinale.  
 $Xc$  : Résistance en compression longitudinale.  
 $Yt$  : Résistance en traction transversale.  
 $Yc$  : Résistance en compression transversale.  
 $S$  : Résistance au cisaillement.  
 $\hat{\sigma}$  : Contrainte effective.  
 $d$  : L'opérateur de dommages.  
 $dC$  : La matrice de rigidité avec prise en compte de l'endommageant.  
 $Lc$  : Longueur caractéristique.  
 $\delta eq$  : Déplacement équivalent.  
 $\sigma eq$  : La contrainte équivalente.  
 $\delta eqft$  : Déplacement équivalent sous tension de la fibre.  
 $\sigma eqft$  : La contrainte équivalente sous tension de la fibre.  
 $\delta eqfc$  : Déplacement équivalent sous compression de la fibre.  
 $\sigma eqfc$  : La contrainte équivalente sous compression de la fibre.  
 $\delta eqmt$  : Déplacement équivalent sous tension de la matrice.  
 $\sigma eqmt$  : La contrainte équivalente sous tension de la matrice.  
 $\delta eqmc$  : Déplacement équivalent sous compression de la matrice.  
 $\sigma eqmc$  : La contrainte équivalente sous compression de la matrice.  
 $\delta eqf$  : La valeur maximale de déplacement équivalent.  
 $\delta eq0$  : Déplacement équivalent initial.  
 $\sigma eq0$  : La contrainte équivalente initiale.  
 $Gi$  : L'énergie de rupture.

# Introduction générale

# Introduction générale

---

Dans le domaine aéronautique, les composants mécaniques sont soumis à des sollicitations cycliques, au cours de leur fonctionnement, une rupture survient au bout d'un certain nombre de cycles. Lorsqu'une structure mécanique présente une fissure, un contrôle continu de suivi de sa propagation est souvent nécessaire afin d'intervenir avant que celle-ci n'atteigne une taille critique. Le remplacement de la structure fissurée est parfois coûteux ou tout simplement non réalisable, car elle n'est pas disponible dans un délai raisonnable. Pour ces raisons, les industriels sont amenés à rechercher une méthode de réparation fiable et économique permettant de maintenir la structure en service et en toute sécurité pour une durée de vie limitée. Plusieurs techniques de réparation ont été élaborées. Une consiste en un collage du patch en composite, ce qui tendait à renforcer la structure fissurée par le changement de leur comportement à la pointe de la fissure et par conséquent l'augmentation de la durée de vie totale. Plusieurs études expérimentales, de modélisation ou de simulations numériques ont été entreprises en vue de mieux cerner l'évaluation de la durée de vie résiduelle des composants mécaniques. Généralement, la prévision de cette durée de vie est basée sur la notion du facteur d'intensité des contraintes.

Dans ce travail, nous allons procéder à la simulation de comportement du front de fissure d'une plaque ayant une fissure latérale en composite, réparée asymétriquement avec un patch composite stratifié à huit plis, afin de valider la méthode des éléments finis étendus, en confrontant les résultats à celle trouvée par le critère de Hashin.

En effet, ce mémoire contient trois chapitres en plus d'une introduction, une conclusion et des références bibliographiques.

**Le premier chapitre :** présente une étude bibliographique sur les matériaux composites, on va donner une brève définition des matériaux composites et les caractéristiques générales des matériaux composites portant sur les différentes techniques d'assemblage.

**Le deuxième chapitre :** est consacré à l'endommagement des matériaux composites. on a donné quelques critères d'endommagement des matériaux composites qui s'avèrent bons pour la simulation d'endommagement des matériaux composites.

**Dans le troisième chapitre :** dans ce chapitre, nous avons simulé un problème d'une plaque en composite stratifié contenant une fissure latérale ayant subi une réparation utilisant la technique de collage d'un patch en composite soumise à une traction monotone dans la direction normale aux fibres, avec la méthode des éléments finis étendus, et le critère de Hashin.

# Chapitre I

## Généralité sur les matériaux composites

## I. Introduction :

A l'image des technologies qui ont caractérisé l'évolution rapide de la science durant la dernière moitié du XX siècle, les matériaux, voire même leur concept, ont été marqués par des évolutions fondamentales. Pendant longtemps, le tout métallique, caractérisé par le développement de l'industrie sidérurgique, a rempli le cahier des charges de toutes les applications industrielles. L'introduction de nouvelles familles de matériaux à partir des années 70 a non seulement occasionné d'autres matériaux dans un espace initialement réservé aux matériaux métalliques, mais surtout amené à penser différemment les concepts associés aux choix des matériaux. Part conséquent, les nouveaux matériaux nécessitent de la part des constructeurs une meilleure maîtrise des différentes étapes qui vont de la conception du matériau à son utilisation en passant par sa réalisation.

La caractérisation d'un matériau composite doit tenir compte de toutes les conditions et considérations afin de mieux définir désormais, son rôle et ses performances à pouvoir même remplacer certains matériaux métalliques d'égale résistance mais plus léger et encore mieux résistant dans des milieux les plus agressifs.

L'utilisation des matériaux composites implique des choix restreints conditionnés par les caractéristiques des différents éléments du matériau choisi (résines, fibres, additifs, ...) et par le procédé de mise en œuvre. La connaissance de toutes les caractéristiques de la matière première permettent, par la sommation de leurs performances (physiques, chimiques, mécaniques,...etc.), de définir celles du produit final.

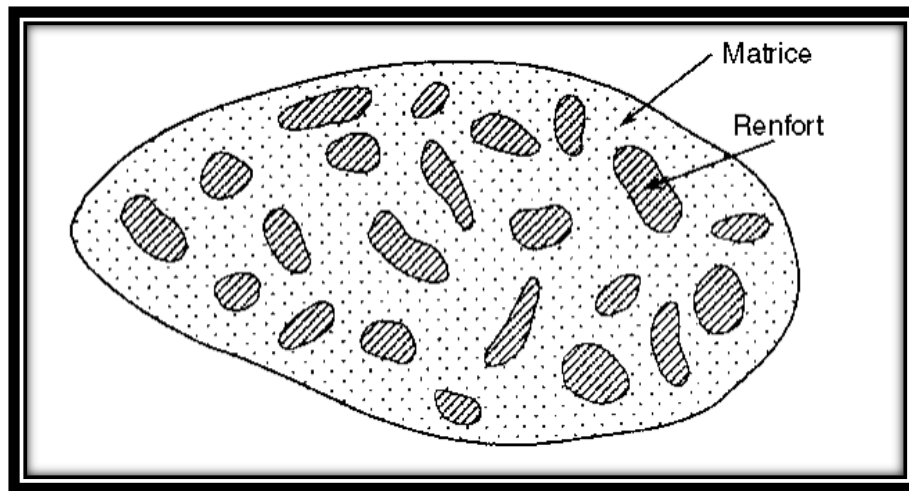
Pour l'étude du comportement d'un matériau composite et pouvoir ainsi établir ces propriétés, il est impératif de connaître son rôle, sa destination selon un cahier des charges pré établi, comment et par quoi le caractériser. [1]

### I.1. Définition

C'est l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles, de nature différente, et dont les propriétés sont la somme de celles des constituants, ou mieux encore, par effets de synergie et non plus d'addition. Ces matériaux ne sont pas alliés mais associés

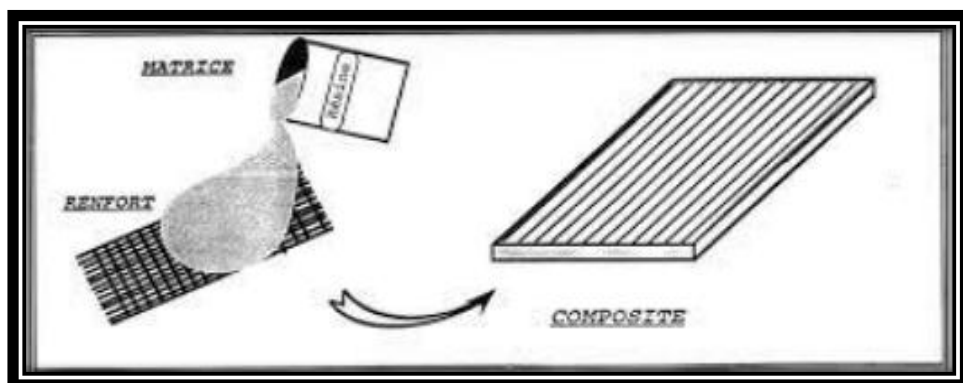
L'association intime d'au moins deux composants est nécessaire : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser (Figure I.1), ce qui introduit la notion d'un agent de liaison qui est l'interface. Ce dernier assure la compatibilité renfort matrice,

et transmet les contraintes d'un constituant à l'autre sans déplacement relatif. Un composite est hétérogène et anisotrope. [1]



**Figure I-1** Schématisation des renforts noyés dans une matrice

Les caractéristiques mécaniques des composites ne sont réellement connues qu'après fabrication, car on réalise, en même temps le matériau et le produit, et ce contrairement aux matières premières classiques dont on connaît à l'avance les caractéristiques mécaniques. Actuellement, les matériaux composites à matrice organique représentent plus de 99% des composites ; toutefois, il existe également des composites à matrice inorganique (métallique ou céramique) dont la diffusion reste encore marginale. Un matériau composite est un système formé d'un nombre relativement important de constituants. Le nombre de réalisations possibles à partir de cette gamme d'éléments fondamentaux est donc pratiquement infini. Mais bien entendu, seuls sont retenus ceux qui présentent un intérêt technique et/ou économique. Un matériau composite est constitué de deux phases principales : La matrice ; Le renfort ou la fibre. [2]



**Figure I.2.** Constituants d'un matériau composite



## I-2. Constituants des matériaux composites :

Un matériau composite est constitué de différentes phases nommées « matrice » et « renforts ». Chacun des deux constituants jouent un rôle particulier dans la tenue mécanique du matériau. La matrice assure la cohésion entre les renforts de manière à recevoir toutes les sollicitations et répartir les efforts dans tout le matériau. L'arrangement des fibres et leur orientation permettent de renforcer les propriétés mécaniques de la structure [3].

Le renfort se présente sous forme de fibres continues ou discontinues dont le rôle est d'assurer la tenue mécanique du matériau composite (rigidité et résistance). La matrice assure la protection chimique et la répartition de la charge mécanique appliquée à la structure [4]

Ces deux éléments, constituants principaux reçoivent des additifs ou charges qui sont des produits qui peuvent être incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût (catalyseur, durcisseur, ...etc.) [5].

## I.3. caractéristiques générales des matériaux composites

Dans le cas général, un matériau composite est constitué d'une ou plusieurs phases discontinues (renforts) réparties, dans une phase continue (matrice). Dans le cas de plusieurs phases discontinues de nature différentes, le matériau composite est dit hybride. La phase discontinue est habituellement plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue.

Les propriétés des matériaux composites résultent les propriétés de ses constituants, de leur distribution géométrique ainsi que de leur interaction. Pour la description d'un composite, il est donc nécessaire de spécifier :

- ✓ La nature des constituants et leurs propriétés ;
- ✓ La géométrie du renfort (sa forme, sa taille et son orientation) et sa distribution ;
- ✓ La nature de l'interface matrice/ renfort.

La concentration du renfort dans le composite est habituellement mesurée par la fraction volumique ou par la fraction massique. Le pourcentage du renfort est un paramètre détermine les propriétés mécaniques du matériau composite.

Pour une concentration donnée, la distribution du renfort dans le volume du composite est également un paramètre important. Une distribution uniforme assurera une « Homogénéité » du matériau c'est-à-dire que les propriétés du composite seront indépendantes du point de mesure.

Dans le cas d'une distribution non uniforme du renfort, la rupture du matériau sera initiée dans les zones pauvres en renfort, diminuant ainsi la résistance du composite. Dans le cas du composite dont le renfort est constitué de fibres, l'orientation des fibres détermine l'anisotropie de ce matériau, cet aspect constitue une des caractéristiques fondamentales des composites. La possibilité de contrôler l'anisotropie du produit fini par conception et une fabrication adaptée aux propriétés souhaitées (matériau à la carte). [6]

## I.3.1 Classement suivant la nature des constituants

La nature du matériau constituant la matrice permet de répertorier trois grandes classes de composites, considérées ici par ordre croissant de tenue en température: les composites à matrice polymère (C.M.P), les composites à matrice métallique (C.M.M) et les composites à matrice céramique (C.M.C). Il est alors possible d'associer à ces trois types de matrice des renforts discontinus, dont toutes les dimensions sont très inférieures aux dimensions de la pièce, soit des renforts continus, dont au moins une dimension est du même ordre grandeur qu'une dimension de la pièce.

## I.3.2 Classement suivant morphologie

Selon la morphologie des renforts constituants les matériaux composites on peut les diviser en quatre catégories.

### **a- Composites à renforts de particules :**

Le renfort est considéré comme une particule si toutes ses dimensions sont approximativement égales et petites devant les autres dimensions du matériau. Les particules dures sont dispersées aléatoirement dans la matrice moins rigide.

### **b- Composites à renforts de paillettes :**

Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux au Composites à renforts de paillettes tres dimensions. La dispersion de ces « particules minces » est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'un à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.

### **C- Composites à renforts de fibres :**

Une fibre a une longueur bien supérieure aux dimensions de la section transversale. Ce type de composites peut être divisé selon les renforts en fibres discontinues (courtes), ou en fibres continues (longues).

### d- Composites stratifiés :

Pour la réalisation de stratifié on utilise couramment des produits de renforcement en feuilles. Les couches (feuilles) sont orientées suivant un référentiel commun et désigné comme le référentiel du stratifié.

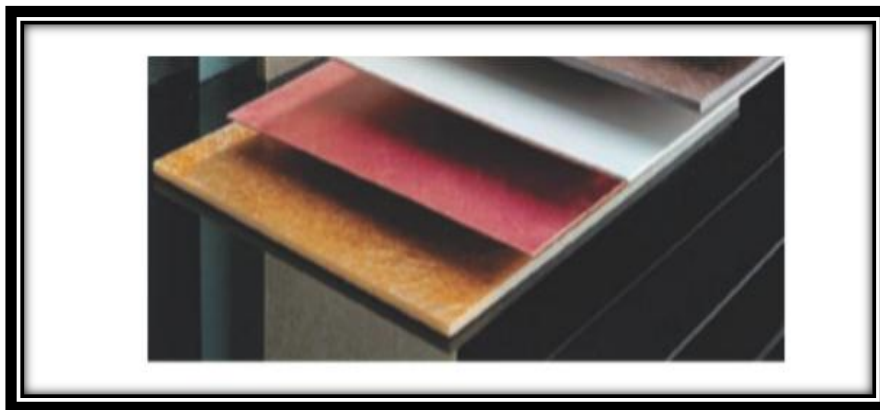


Figure I. 3: Stratifié à mat de verre

### I.4 Domaine d'application des composites

Les matériaux composites sont utilisés dans différents domaines (cosmétique, automobile, horticulture, électroménager, mobilier urbain, outillage...).

- ✓ En automobile: Les principales applications sont les suivantes: garnissage des coffres, revêtement pour passage de roue, habillage de sièges, panneaux de portes, composants de coffres arrière, des vide-poches, des couvercles de pneus de rechange, etc.
- ✓ Matériels de consommation et industriels: armoires, planches, palettes, revêtement de sols, etc.
- ✓ coques de bateaux, planches de ski et de snowboard, cadres de bicyclette, raquette de tennis, coques de piscines, toboggans, carrosserie voitures de sport, club de golf, canne à pêche, perche de saut.
- ✓ Autres applications: bancs, table de pique-nique, modules de jeux, ordures de jardin, ponts et pièces de bateaux. La figure I.3 montre l'utilisation potentielle des matériaux composites.

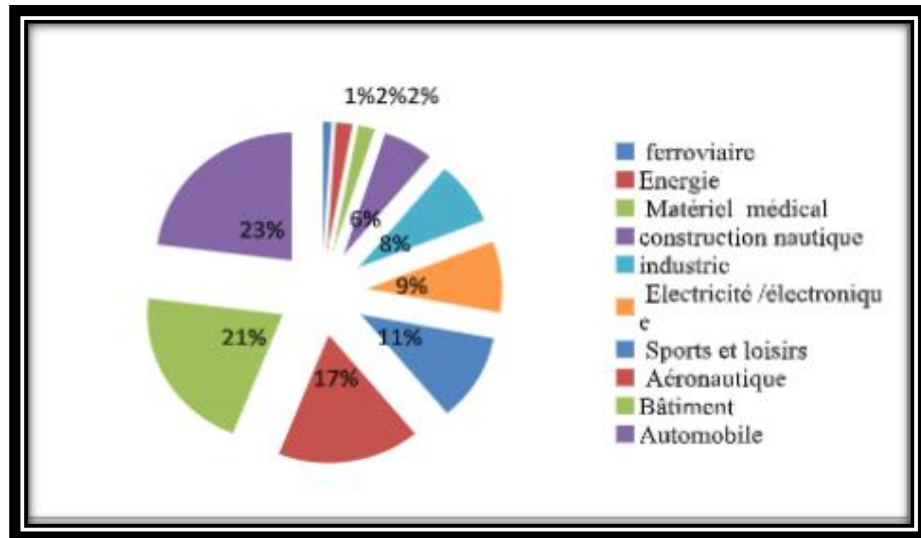


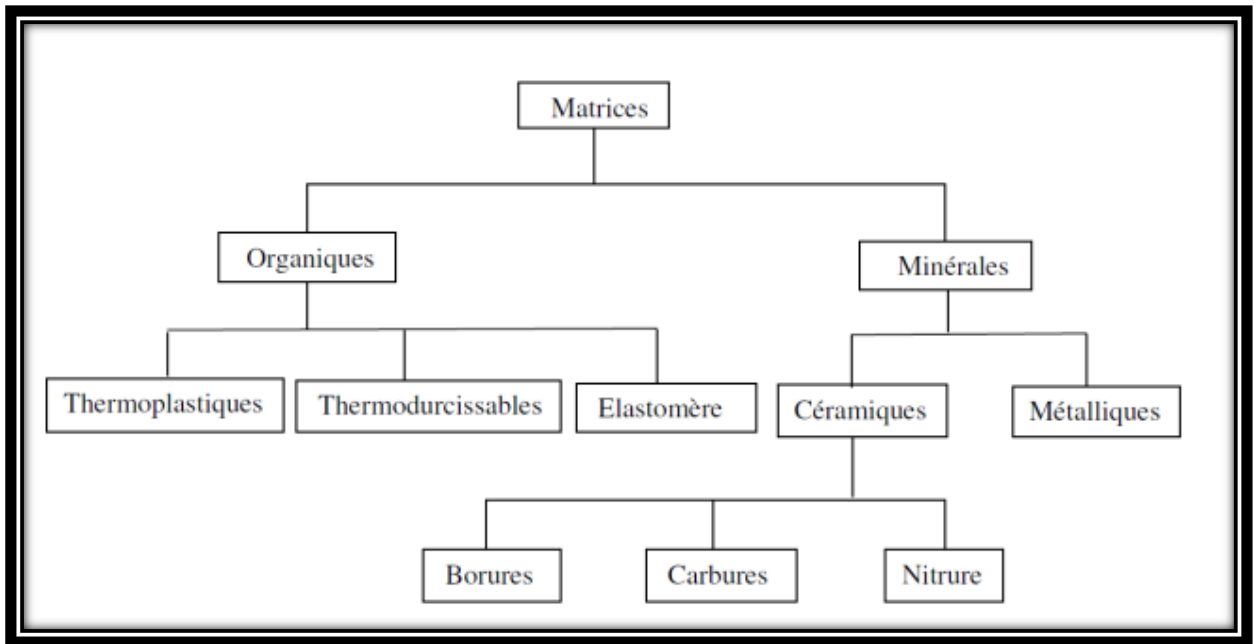
Figure I.4: Domaine d'application des composites

## I.5 Constituant des composites

### I.5 .1. Les matrice

La matrice a pour rôle de lier les fibres du renfort fibreux entre elles, ainsi que de répartir les efforts (résistance à la compression ou à la flexion), répartir les contraintes subies, apporter la tenue chimique de la structure et donner la forme désirée au produit. La matrice est facilement déformable et assure la protection chimique des fibres. Généralement, c'est un polymère ou une résine organique. Il existe différents types de résines (Figure I.5.1) on utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques renforcés de fibres courtes se développe fortement.

On peut retrouver dans l'organigramme ci-dessous, les différentes familles de matrices :



**Figure I.5 :** Différentes Familles de Matrices

Il est important de bien situer les différences fondamentales de ces deux types de matrices. La structure des se présente sous forme de chaînes linéaires, il faut les chauffer pour les mettre en forme (les chaînes se plient alors), et les refroidir pour les fixer (les chaînes se bloquent). Cette opération est réversible. La structure des a la forme d'un réseau tridimensionnel qui se ponte (double liaison de polymérisation) pour durcir en forme de façon définitive, lors d'un échauffement. La transformation est donc irréversible.

**Tableau I.1 :** Principales différences entre matrices

Matrices	ThermoplastiquesTP	ThermodurcissablesTD
<b>Etat de base</b> liquide	solide prêt à l'emploi	visqueux à polymériser
<b>Stockage</b>	Illimité	Réduit
<b>Mouillabilité</b> renforts	Difficile	Aisée
<b>Moulage</b>	chauffage + refroidissement	Chauffage continu
<b>Cycle</b>	Court	Long
<b>Tenue au choc</b>	Assez bonne	Limitée
<b>Tenue thermique</b>	Réduite	Bonne
<b>Chutes et déchets</b>	Recyclables	perdus ou recyclés en charges
<b>Conditions de travail</b>	Propreté	émanation pour "méthode humide"

**I.5 .2 Les matrices organiques :**

Ces matrices sont faites de matières plastiques et désignées sous le vocable beaucoup plus large de résines. Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Elles doivent donc être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. Les résines doivent avoir, par contre, une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées (la matrice d'un composite organique peut appartenir à différents types de polymères. [7])

Compte tenu de ces contraintes, les résines utilisées sont des polymères modifiés par différents adjuvants et additifs : agents de démoulage, stabilisants, pigments ... etc., qu'on peut subdiviser en deux familles principales : résines thermoplastiques et thermodurcissables [8]

**I.5 .2.1 : Matrices thermoplastiques :**

Les résines thermoplastiques sont des solides souvent solubles, formés de chaînes distinctes bien pressées, qui sont liées entre elles par des liaisons secondaires (force de van der Waals, liaisons d'hydrogène) et ensuite mis en forme par chauffage et refroidissement [9].

Elles présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux (Figure I.6)... La mise en œuvre rapide est possible par thermoformage. Elles présentent la possibilité de soudage et de recyclage du fait de la réversibilité [10].

On cite les exemples suivants :

- ✓ Polypropylène (PP).
- ✓ Polysulfure de phénylène (PPS).
- ✓ Polycarbonate polyamide (PA).
- ✓ Polyéther-sulfone (PES).
- ✓ Polyéther-imide (PEI).
- ✓ Polyéther-éther-cétone (PEEK)

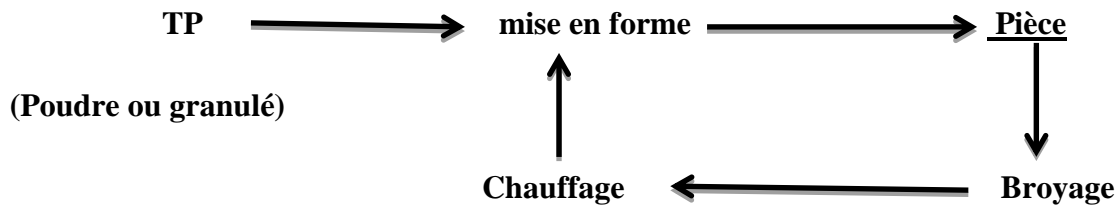


Figure.I.6 : Boucle de vie d'un thermoplastique

Ceux dont on observe une modification spectaculaire des propriétés lorsqu'on les additionne d'un renfort, sont appelés les techno-polymères. En général, leur mise en œuvre se fait par injection à haute pression.

### I.5 .2.2 Elastomères :

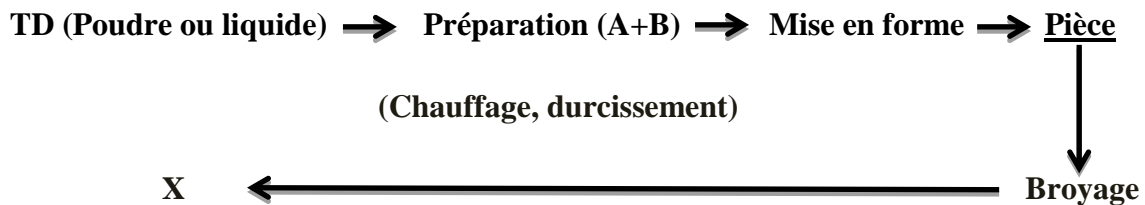
Un élastomère est un polymère présentant des propriétés «élastiques», obtenues après réticulation. Il supporte de très grandes déformations avant rupture. Le terme de caoutchouc est un synonyme usuel d'élastomère. Les matériaux élastomères tels que les pneumatiques sont souvent à base de caoutchouc naturel (sigle NR) et de caoutchouc synthétique (coupage). Le caoutchouc naturel est resté longtemps le seul élastomère connu. Un élastomère est un polymère amorphe et présentant une température de transition vitreuse ( $T_v$ ) faible (souvent inférieure à  $-40\text{ °C}$ ) [11].

### I.5 .2.3 Matrices thermodurcissables:

Les thermodurcissables se solidifient ou « durcissent » de manière irréversible lorsqu'ils sont chauffés. Ils ne peuvent pas être remodelés plus tard par un nouveau chauffage.

Les thermodurcissables sont habituellement des polymères tridimensionnels dans lesquels le taux de réticulation entre les chaînes est très important une fois qu'ils sont durcis par la chaleur. Les réticulations restreignent les mouvements des chaînes et mènent à un matériau rigide, solide et résistant. Ils sont principalement utilisés dans l'industrie automobile et les constructions. Ils servent également à créer des jouets, des vernis, des coques de bateau et des colles [12].

Elles ont des caractéristiques mécaniques élevées et une masse volumique faible.



**Figure. I.7:** Boucle de vie d'un thermodurcissable

Ces résines sont actuellement les plus employées dans les matériaux composites, telles que les polymères dont la fabrication a atteint le plus gros tonnage des matériaux plastiques et qui devient de plus en plus importante.

### I.5 .2.4 Les matrices métalliques

La température maximale d'utilisation des polymères étant peu élevée, et le carbone risquant de s'oxyder à plus de 500°C, il faut parfois envisager d'utiliser des matrices dont l'inertie chimique est meilleure à plus haute température. Puisque certains métaux ou alliages métalliques peuvent éventuellement satisfaire à cette exigence, on a donc recours à ces matrices dans des conditions pareilles [13].

#### I.5. 2.4.1 Présentent les avantages suivants :

- ✓ Propriétés mécaniques supérieures
- ✓ Tenue en température élevée.
- ✓ Résistance à l'attaque de certains solvants

#### I.5. 2.4.2 Mais, possèdent les inconvénients tels que :

- ✓ Masse volumique est supérieure à celle d'un polymère classique ;
- ✓ Plus coûteuses

### I.5 .2.5 Les matrices carbonées

La production d'une matrice de carbone repose sur le même principe que celui utilisé pour fabriquer les fibres de carbone c.-à-d. carbonisation d'une matière organique à haute température. Les matrices de carbone sont constituées de grains de carbone pyrolytique qui se déposent à chaud sur les fibres, ce qui assure une liaison mécanique entre celles-ci et colmate les vides laissés entre elles. On obtient ainsi un matériau composite dont la masse volumique se rapproche de celle du carbone massif [13]



**I.5. 2.6 Les matrices céramiques**

Grâce à leurs propriétés intrinsèques (rigidité, réfractaire, résistance et bonne stabilité chimique), les céramiques sont potentiellement des matériaux capables de bien jouer le rôle de matrice dans des matériaux composites. Dans ce cas, les fibres de renfort ont principalement pour but d'améliorer la ténacité de telles matrices, ainsi que leur résistance aux chocs thermiques

Les techniques d'incorporation des fibres de renfort aux céramiques doivent tenir compte des procédés de fabrication spécifiques à celles-ci (en particulier, le frittage). On extrude la matrice (sous forme de poudres), qui contient un liant, et les fibres alignées dans une filière. Le liant durcit, ce qui permet d'assurer une cohésion suffisante de la matrice, ainsi que sa manipulation. On fritte ensuite cette matrice à haute température. [13]

**I.5. 3. Préparation des matrices**

Les résines TD sont très souvent chargées (10% à 20%) pour leur conférer des propriétés spécifiques (stabilité dimensionnelle, diminution et équilibrage des retraits, dureté, etc. ou pour réduire leur prix de revient, parmi les charges minérales utilisées il y a :

- ✓ Carbonates de calcium (calcite, craie, dolomie) ;
- ✓ Silicate (talc, kaolin).

Et également on trouve des additifs de type : Anti- retrait ; Anti-UV ; Pigment de colorant ; Agent de démoulage ; Catalyseur, initiateur de réaction ; Accélérateur de réaction.

**I.5 .4 Le renfort**

Est une armature, ou squelette de la structure qui il assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité).

Souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou non organiques) Ils peuvent se présenter sous de nombreuses formes : fibres courtes ou fibres continues (tissus ou textures multidirectionnelles) en fonction de l'application envisagée.

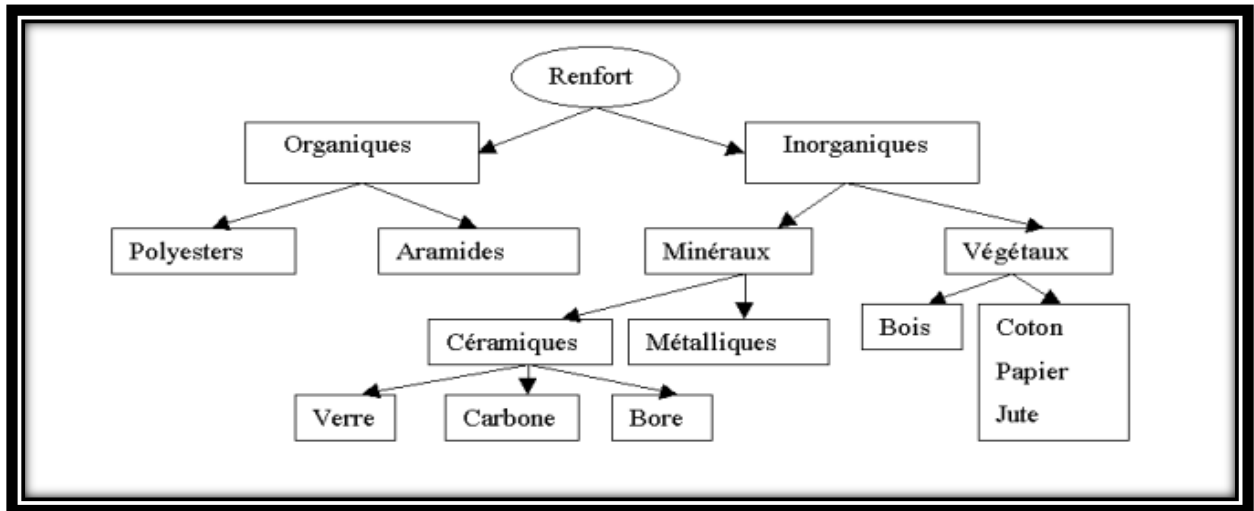
Les fibres possèdent généralement une bonne résistance à la traction mais une résistance à la compression faible.

Les composites artificiels sont souvent renforcés soit par des fibres, soit par des composants fabriqués à base de fibres (torons, assemblage de fibres tordues ensemble ; tissus ; mats, ou nappes).

Chacune d'entre elles s'impose dans une application particulière en raison de ses propriétés spécifiques et de son prix. Les principaux matériaux de renforts, sont résumés dans l'organigramme suivant :

### I. 5 .4.1 Types de renfort:

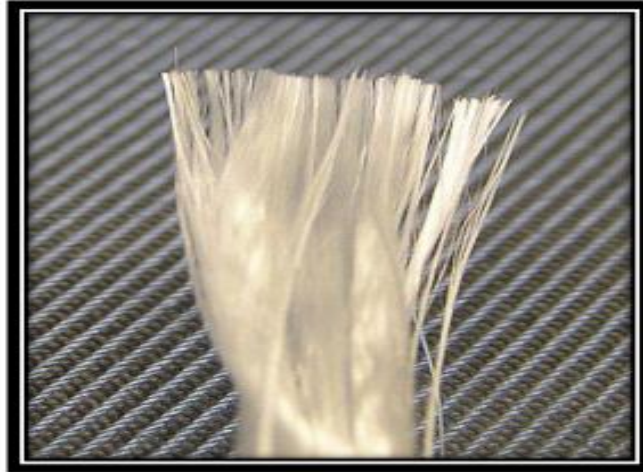
La classification des types de renforts couramment rencontrés est indiquée sur la figure suivante :



**Figure I.8** : Principaux matériaux de renforts

### I. 5 .4.2. Fibres de verre:

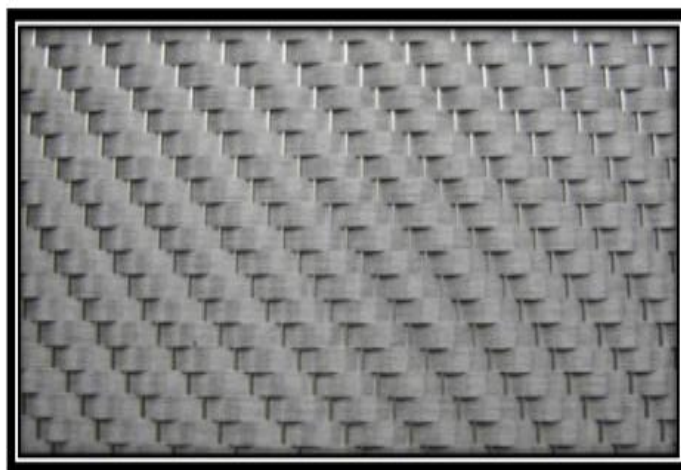
Elles constituent le principal renfort, utilisé dans plus de 95% des matériaux composites, et plus particulièrement pour les produits de grande diffusion, elles ont une bonne adhérence entre fibres et résines (matrices), bonnes propriétés mécaniques, mais inférieures à celles de la fibre de carbone, et aussi possèdent des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications [14].



**Figure I.9 : Fibre de verre**

### **I. 5 .4.3 Fibres de carbone:**

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseur, se présentant lui-même sous forme de fibres orientées et réticulées. Actuellement, les fibres utilisées sont les fibres acryliques élaborées à partir du polyacrylonitrile (PAN), elles sont obtenues par décomposition thermique de fibres (PAN) sans fusion, aboutissant à une graphitassions [15]. Les fibres de carbone possèdent de très bonnes caractéristiques mécaniques d'autant plus que leur masse volumique est faible, elles ont un excellent tenu en température, en atmosphère non oxydantes. En effet leurs caractéristiques mécaniques sont maintenues jusqu' à 1500°C environ. Elles sont utilisées dans les tuyères de fusée, les plaquettes de freins (camion, avion) [16].

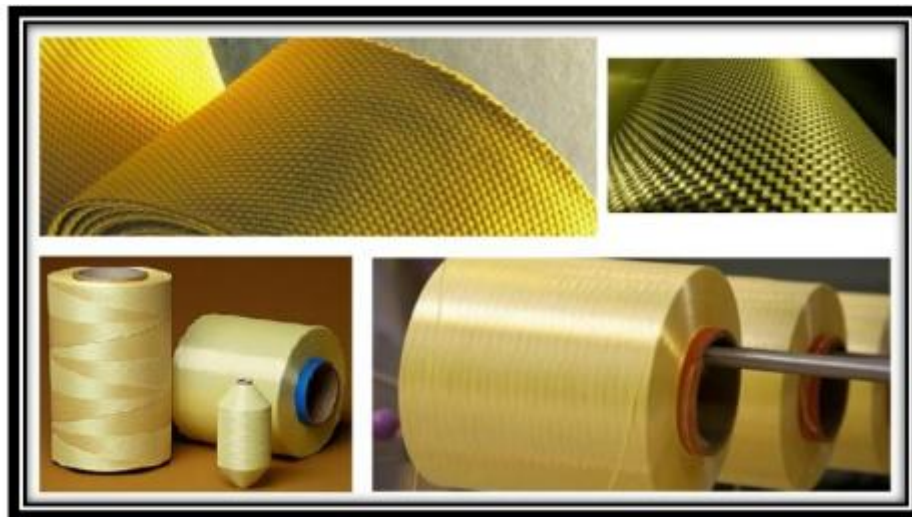


**Figure I.10 : Fibre de carbone.**

### I. 5 .4.4 Fibres d'aramides:

Les fibres d'aramides sont généralement connues par le nom commercial « Kevlar ». Ce sont des polyamides aromatiques obtenus par synthèse à basse température

(Environ de  $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ). Ils sont ensuite filés et étirés pour obtenir un module d'élasticité élevé. Les fibres d'aramides possèdent des propriétés mécaniques élevées en traction comme les fibres de carbones mais leurs résistances à la compression sont faibles, elles sont essentiellement utilisées avec des matrices métalliques ou céramiques, pour la fabrication des aubes de compresseur, les turbines, etc. [16].



**Figure I.11 :** Fibre d'aramides (Kevlar).

### I. 5 .4.5 Fibres naturelles:

Les fibres naturelles sont utilisées dans les composites depuis 3000 ans, par exemple dans l'ancienne Égypte, où la paille et d'argile étaient mélangés pour construire des murs [17]. Elles sont des structures biologiques principalement composées de cellulose, hémicelluloses et de lignine [18] et présentent en général de bonnes propriétés mécaniques. Cependant, leur utilisation dans les composites est limitée par leur caractère hydrophile et leur faible stabilité thermique. De même, la comptabilisation fibres-matrice va dépendre non seulement de la nature des fibres mais également de la nature de la matrice de polymère [19]. La structure, les dimensions des cellules et la composition chimique des fibres naturelles sont les principales variables qui conditionnent

l'ensemble des propriétés des fibres. En règle générale, la résistance à la traction et le module d'Young des fibres croît avec l'augmentation de la teneur en cellulose [16].

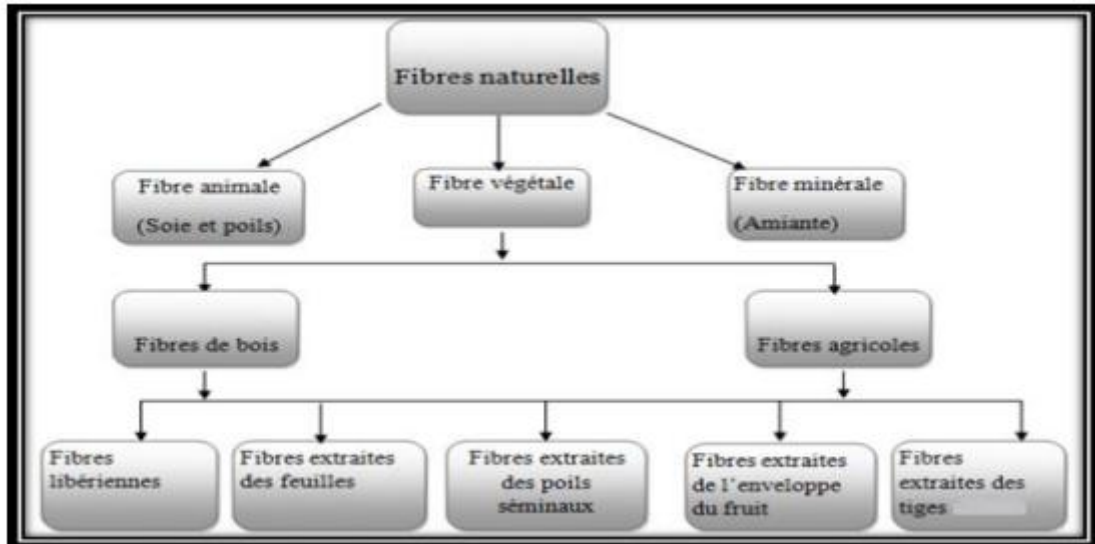


Figure I.12 : Classification des fibres naturelles

#### I. 5 .4.6 Fibre d'alfa :

L'Alfa est une herbe vivace typiquement méditerranéenne, elle pousse en touffes d'environ 1m à 1m20 de haut formant ainsi de vastes nappes. Elle pousse spontanément notamment dans les milieux arides et semi arides, elle délimite le désert, là où l'Alfa s'arrête, le désert commence (Figure I.13) [20].



Figure I.13 : Illustrations de la plante d'Alfa à l'état brute.

Cette plante appartient à la famille des Graminées, tribu des Stipées, genre *Stipa*. Ce genre comprend, outre l'Alfa (*Stipa Tenacissima*, seule espèce exploitée), environ 250 espèces dont 7 seraient rencontrées en Algérie [21]. L'Alfa occupe une aire géographique bien délimitée.

Originaire des régions arides et semi arides méditerranéennes à l'exclusion des secteurs désertiques : Afrique du Nord (le Maroc, l'Algérie la Tunisie, et la Libye) et Europe du Sud (l'Espagne, le Portugal et l'Italie) [22] [23]. La localisation étroite de cette Graminée assure aux pays cités un monopole en ce qui concerne son exploitation et sa vente sous forme de produit brut. La répartition territoriale connue à ce jour est représentée.

### I.5.5. L'interface

L'utilisation d'une couche interface permet d'assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice. Qui se forme spontanément lorsque deux phase sont mises en présence l'un de l'autre au moment de l'élaboration du matériau et qui se maintient entre ces deux phases pendant toute la vie du matériau, l'interface n'est pas simplement une simple discontinuité entre les deux phases du matériau hétérogène ou leur juxtaposition [24].

### I.6 Différents types de matériaux composites



On distingue deux types de composites : les composites de grandes diffusions et les Composites hautes performances.

#### I.6 .1. Matériaux composites de grande diffusion

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : Optimisation des coûts par diminution des prix de revient, leur composition de polyester avec des fibres de verre longues ou courtes (sous forme de mat ou tissu) et la simplicité du principe d'élaboration du matériau (moulage par contact, SMC et injection).

##### I .6.1.2. Matériaux composites de hautes performances

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%. Ces composites sont élaborés par les procédures suivantes :

-  Drapage autoclave, enroulement filamentaire.
-  Beaucoup de procédés encore manuels.

## I.6.2 Domaines d'application

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour une résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer. Leurs domaines d'application sont :

- ✓ Électricité et électronique,
- ✓ Bâtiment et travaux publics,
- ✓ Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- ✓ Santé (instrumentation médicale),
- ✓ Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf, aviron,....) .

Ainsi on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour des applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas le facteur primordial.

## I.7 Avantages et inconvénients des matériaux composites

### I.7.1. Avantage des matériaux composites

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

- ✓ Leur légèreté.
- ✓ Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue.
- ✓ Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants.
- ✓ Leur possibilité de prendre plusieurs formes, d'intégrer des accessoires et permettre la réduction de bruit [25].



## I.7.2 Inconvénients des matériaux composites

Certains Cependant inconvénients freinent leur diffusion :

- ✓ les coûts des matières premières et des procédés de fabrication.
- ✓ la gestion des déchets engendrés et la réglementation de plus en plus stricte.

## I.8. Homogénéisation des matériaux composites

Le but de ce chapitre est de décrire la méthodologie de l'homogénéisation des matériaux hétérogènes, les techniques de génération et de maillage des microstructures 2D/3D.

### I.8.1. Généralités sur les techniques d'homogénéisation

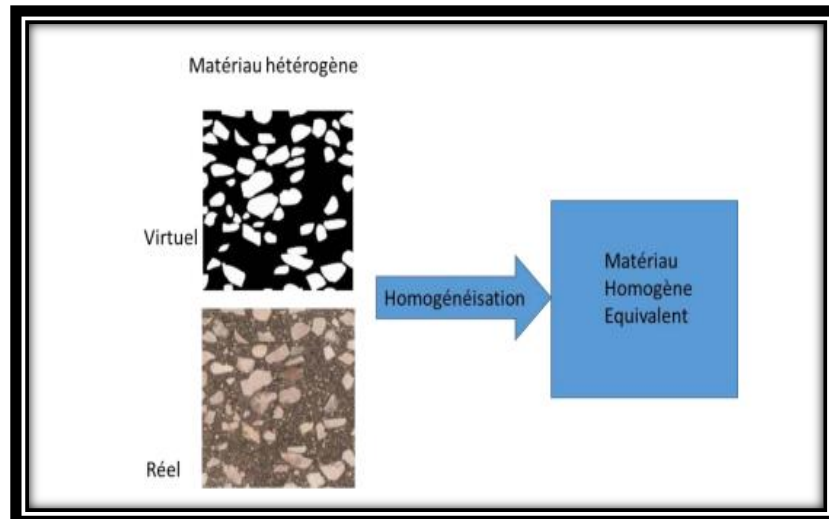
L'approche d'homogénéisation consiste à définir le comportement d'un matériau hétérogène à partir de la connaissance des comportements (thermique, mécanique, électrique et autres) de ses différents composants élémentaires.

Le matériau hétérogène peut être remplacé par un milieu homogène équivalent qui a les mêmes propriétés effectives calculées. Le calcul des contraintes moyennes ou effectives ainsi que les déformations moyennes ou effectives du milieu homogène équivalent est l'analyse de niveau globale. Le terme « homogénéisation » est le processus dont lequel sont calculées les propriétés effectives, Caboche [26].

Un autre terme utilisé est la « localisation » pour déterminer la déformation et la contrainte locale ; ils peuvent être calculés en employant le rapport entre la contrainte moyenne et locale obtenue de l'analyse locale, Gitman [27].

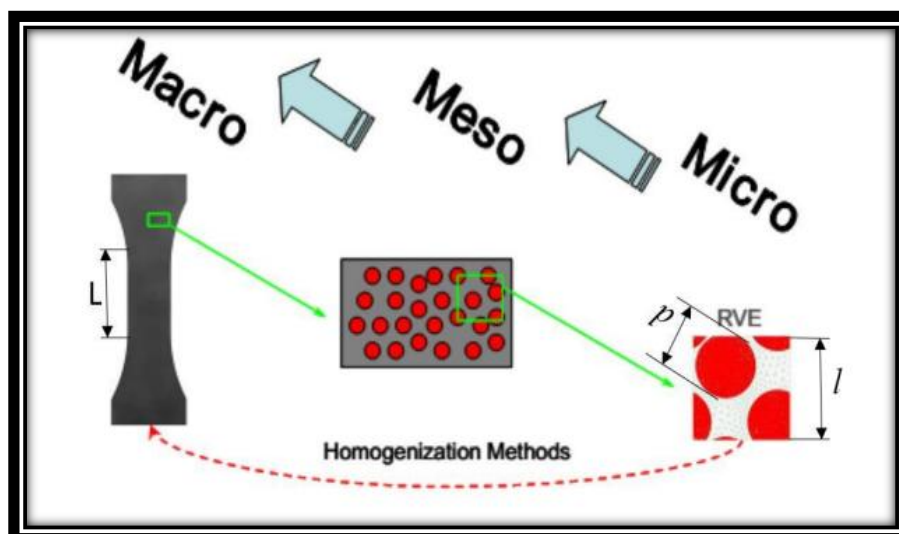
Les figures (I.14) et (I.15), montrent la description de l'approche d'homogénéisation et les éléments nécessaires pour le passage Micro-Macro et pour l'analyse multi-échelle. On note bien que la méthode d'homogénéisation consiste à substituer un matériau hétérogène par un matériau homogène, dit matériau homogène équivalent (MHE), qui répond globalement à un chargement quelconque de la même façon. Bien sûr, ces méthodes s'appliquent à de nombreux problèmes de la physique et de mécanique tels que la conduction thermique, l'élasticité linéaire, la plasticité, la viscoplasticité, l'électromagnétisme, etc.





**Figure I.14** : Principe de l'approche d'homogénéisation des matériaux hétérogènes.

L'application de la procédure d'homogénéisation est basée sur le choix d'un plus petit volume élémentaire qui doit être représentatif du comportement macroscopique au niveau microscopique.



**Figure I.15** Approche et principe de l'homogénéisation numérique

Ce volume est appelé volume élémentaire représentatif (VER), qui est décrit dans selon les conditions d'échelles suivantes, **figure 15** :

Si  $d$  est la taille caractéristique des hétérogénéités, et  $L$  la taille caractéristique de la structure macroscopique considérée, alors la taille caractéristique  $l$  du volume élémentaire représentatif (VER) est soumise à deux conditions :  $l \ll L$  : c'est la condition pour qu'on puisse

traiter le matériau comme un milieu continu et y déterminer des champs continus de contraintes et de déformations.  $l \gg d$  : c'est la condition nécessaire pour pouvoir affecter au volume élémentaire représentatif un comportement macroscopique homogène malgré son hétérogénéité méso/microscopique.

## I.9. ARCHITECTURE DES MATERIAUX COMPOSITES

### I.9.1. Les Stratifiés

On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux. Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. Le type de stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement, information qui fournit de manière synthétique l'orientation des diverses couches d'un stratifié. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière de la structure.

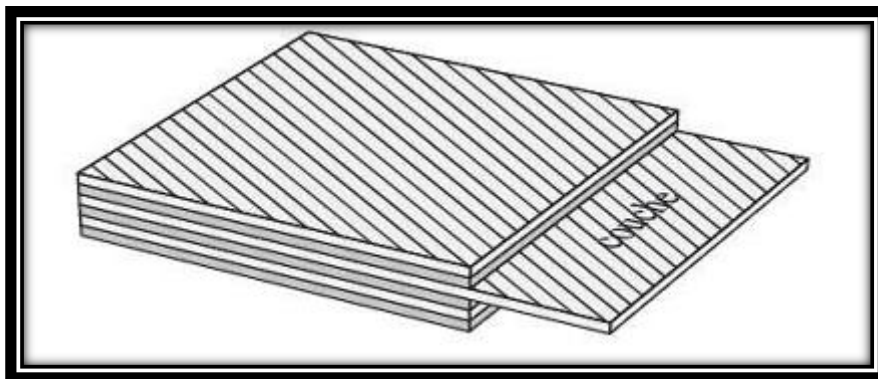


Figure I.16 : Stratifié constitué de couches parfaitement liées.

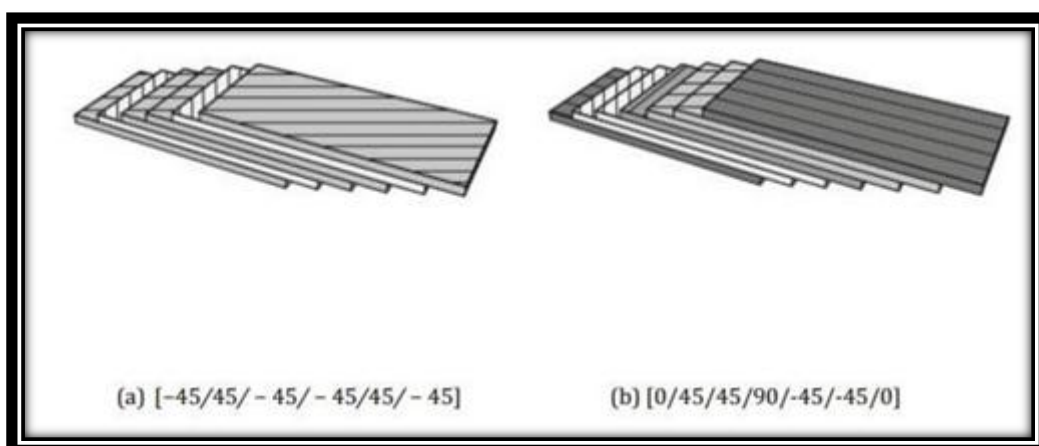


Figure I.17 : Désignations du stratifié

La désignation des structures stratifiées est délicate car il faut préciser les axes de référence. Un stratifié est codifié de la façon suivante :

– chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degré de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe de référence x. Sur les figures **I.17 (a)** et **I.17 (b)**, les couches sont représentées décalées les unes par rapport aux autres. La structure stratifiée est décrite de bas en haut ;

– les couches sont nommées successivement entre crochet en allant de la face inférieure à la face supérieure. Les couches successives sont séparées par le symbole « / » comme l'exemple de la figure **I.17 (a)** ;

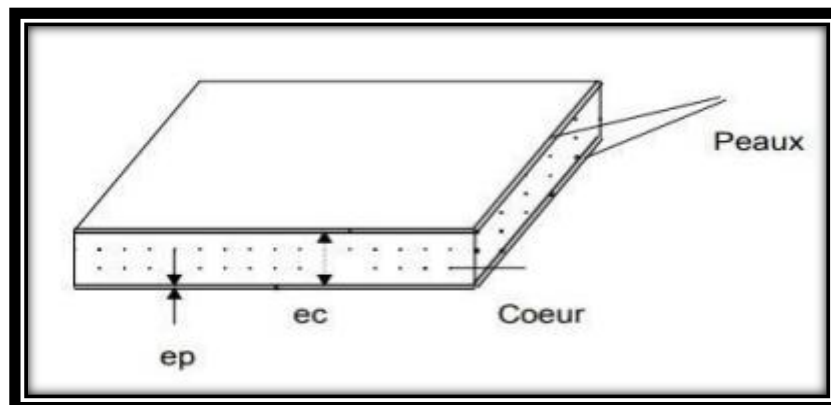
– les couches successives d'un même matériau et de même orientation sont désignées par un indice numérique, comme sur la figure **I.17 (b)**;

– en cas de stratification hybride (différents matériaux dans un même stratifié), il faut préciser par un indice la nature de la couche ;

– en cas de structures symétriques, la moitié est codifiée et le symbole s indique la symétrie :  
 $[-45/45/ -45/ -45/45/ -45]$  devient  $[-45/45/ -45] s$  et  $[0/45/45/90/ -45/ -45/0]$  devient  $[0/45_2/90/ -45_2/0]$ .

### I.9.2.définition d'un matériau sandwich :

Une structure sandwich est obtenue à partir de deux peaux ou revêtements, réalisées dans un matériau ayant de très bonnes caractéristiques, collées sur une âme réalisée avec un matériau très léger et ayant des faibles caractéristiques mécaniques. L'objet d'un tel procédé est de constituer une structure permettant de concilier le géré et rigidité pour de telles structures le rapport des épaisseurs du cœur  $e_c$  et des peaux  $e_p$  doit être limité entre 10 et 100 ( $10 \leq e_c / e_p \leq 100$ ) .



**Figure I.18** : Schématisation d'une plaque sandwich

**I.10. Contenu du matériau sandwich:****1) Ame**

Elle peut être réalisée avec les matériaux suivants :

**Mousses**

Ces matériaux légers peu onéreux, facilement usinables et ont cependant de très faibles caractéristiques mécaniques.

**• Balsa**

Est un bois bien connu pour ces différentes utilisations et de leurs principales qualités que la légèreté, le haut pouvoir d'isolation thermique et acoustique et la non déformation aux variations thermiques. · Nid d'abeille : Cette structure est réalisée généralement à partir de matériau en plaques minces (alliage d'aluminium, papier polyamide). Des raies de colle sont disposées en bande régulières sur les plaques qui sont collées entre elles pour former un bloc, ce dernier est coupé en tranches qui seront, transformées à leur tour en planche de nida ' nid d'abeille ' par expansion.

**• les peaux**

les peaux sont le plus souvent des stratifiés à renfort fibreux ( verre , carbone , kevlar ..... ) dans le cas de panneaux sandwichs , les peaux peuvent être du carbone/ epoxyde , kevlar / epoxyde ou encore bore /epoxyde , ou métallique ' Al, Acier , Inox , ou des feuilles d'alliages légers, par leur rapport rigidité / poids meilleur, un certain nombre de structures sandwiches métalliques sont remplacées par des sandwichs composites.

**I.10.1. Autres architectures :**

Les autres architectures des matériaux composites peuvent être schématiquement classées en : plastiques renforcés et composites volumiques. Ces matériaux sont constitués de résines ou matrices dans lesquelles sont introduits des renforts de type : Fibres courtes,

✓ Billes pleines ou billes creuses,

✓ Poudres : métalliques de graphite

# Chapitre II

L'endommagement des matériaux composites

**II. Introduction :**

L'étude de la résistance à la rupture des matériaux composites est d'une complexité bien plus grande que l'analyse des propriétés ou de viscoélasticité. En effet, lors de chargement mécanique ou thermique, des microfissures apparaissent dans la matrice, des fibres qui se rompent (rupture fragile, rupture ductile), des décohésions se créent aux interfaces, des plastifications apparaissent sans entraîner la ruine de la pièce. Les processus d'endommagement ainsi que les critères de rupture des composites sont traités dans le chapitre ci-après. est consacré à l'endommagement des matériaux composites. dans ce chapitre on a donné quelques critères d'endommagement des matériaux composites qui s'avèrent bon pour la simulation d'endommagement des ces matériaux.

**1.2 Définition d'endommagement**

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

Un niveau d'endommagement peut être relié directement à des propriétés physiques parce que l'endommagement est caractérisé par des modifications en principe observables. Les phénomènes d'endommagement tels que les microdéformations, la dégradation des surfaces, les microfissures, les microcavités, la corrosion, et le vieillissement. Sont tous observables, mais parfois ils sont difficiles à mettre en évidence. [28]

**II.1. ENDOMMAGEMENT DES MATERIAUX COMPOSITES :**

L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui conduit à l'apparition de défauts locaux. Il désigne les phénomènes de création de nouvelles surfaces au sein d'un matériau sous l'effet d'une sollicitation. Le définit comme étant une augmentation de la taille ou du nombre de fissures ce qui engendre une diminution des caractéristiques mécanique de tout le système provoquant sa ruine qui est un phénomène très complexe où plusieurs mécanismes d'endommagement différents apparaissent et interagissent. Chaque constituante fibre, matrice ou interface peut être affecté par un mécanisme d'endommagement. [29]

Tableau.1. Types d'endommagement dans les composites stratifiés [30]

Constituant	Matrice	Fibre	Interface	
Mécanismes d'endommagement	Micro	Rupture des fibres	Inter-ply	Fibre-matrice
	fissuration		Déamination	Décohésion
	Micro vides			fibre matrice
	Macro fissuration			

- ✓ A l'échelle microscopique; apparaissent des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice ce sont des décohésions fibres/matrice ou alors dues aux porosités,
- ✓ A l'échelle méoscopique, ou l'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.[29]

Ces endommagements ne sont pas présents uniformément dans la structure. Ils dépendent du type de sollicitation, mais aussi de l'orientation et de la proportion des renforts. Sandhu s'est d'ailleurs intéressé à la détermination de la part de chacune des sollicitations uniaxiales 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 ± 45° ce sont les contraintes en cisaillement qui contribuent fortement à la dégradation.

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

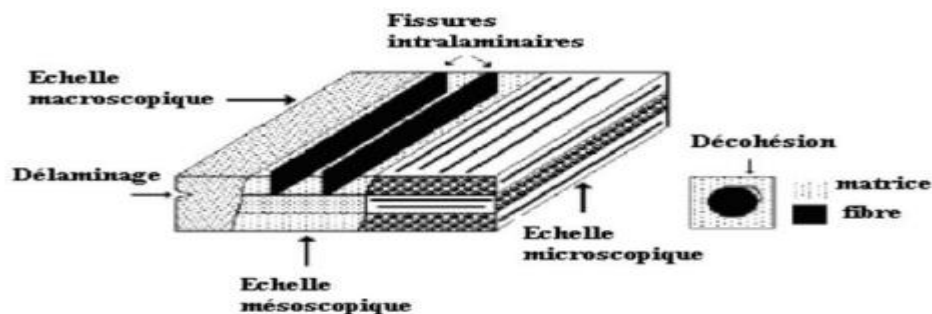
le matériau (défauts apparus lors de la fabrication ou liés à des effets de bords). Leur propagation et coalescence est induite par différentes sollicitations, de diverses origines (mécanique, thermique, thermomécanique, hydrique...) [30]

### II.2. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement

Plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée, unidirectionnelle ou tissés qui se révèlent à différentes échelles d'observation (Figure 1.1).

Les plus significatifs sont les suivants [31] :

- ✓ A l'échelle microscopique apparaissent les ruptures d'interfaces : c'est le phénomène de décohésion fibre / matrice et d'autre part, la rupture de fibre, de matrice ;
- ✓ A l'échelle macroscopique on observe le phénomène de décollement inter pli : c'est le délaminage ;
- ✓ A l'échelle mésoscopique on observe l'apparition de nombreuses fissures intralaminaires mais également la rupture de fibres qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau, qui sont parallèles à la direction des fibres.



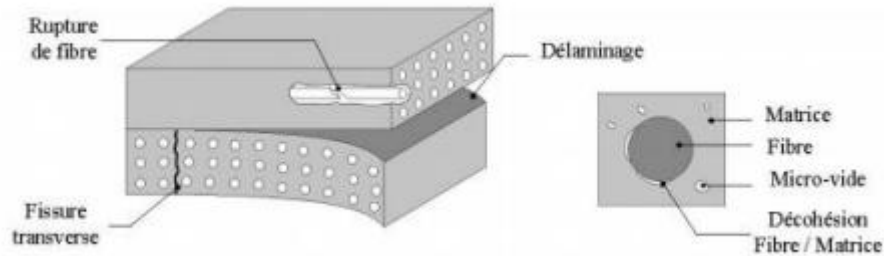
**Figure II.1 :** Les différentes échelles d'observation de l'endommagement : illustration sur un

### II.3. Mécanismes d'endommagement :

L'identification des dommages par la microscopie a permis de développer l'analyse d'endommagement. La perte de rigidité du matériau endommagé permet de définir et de déterminer un seuil critique de déformation ou de contraintes qui amorce les mécanismes d'endommagement. Il a été montré que la température, la vitesse de sollicitation, les chocs, la nature chimique d'un environnement agressif, le chargement monotone ou cyclique influencent l'évolution de l'endommagement. La ténacité de la matrice et la qualité de l'interface influencent la résistance aux dommages. Les mécanismes d'endommagement d'un matériau hétérogène ne sont pas uniformément présents au sein du matériau. Ils dépendent notamment de la sollicitation, de



l'architecture des constituants et de l'orientation des plis. Un composite à matrice polymère soumis à une sollicitation mécanique, peuvent se regrouper en quatre principaux modes différents selon le site où ils opèrent matériau stratifié [28]



**Figure II.2:** Principaux endommagements rencontrés dans un stratifié.

- ✓ Fissuration matricielle.
- ✓ Rupture de l'interface fibre- matrice et déchaussement de fibre, délaminage (décohésion étendue intra plis).
- ✓ Rupture des fibres
- ✓ Délaminage inter plis.

### II.3.1. Fissuration de la matrice :

La complexité des matériaux composites introduit plusieurs types d'endommagements à l'échelle microscopique. La matrice étant le constituant qui s'endommage le premier, son seuil de déformation à l'endommagement est plus faible par rapport à celle des fibres. Les microfissures se produisant au sein de la matrice apparaissent aux niveaux des porosités et des inclusions constituent le principal mécanisme de dégradation des composites par le phénomène de fissuration transversal ou par fissuration longitudinale. Ce dernier mode de rupture se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à celle de cisaillement. Cette fissuration se propage selon la direction perpendiculaire à la sollicitation et elle peut provoquer une décohésion fibre- matrice.

#### II.3.1.1. Fissuration transverse

Il s'agit de fissures qui traversent toute l'épaisseur des couches les plus désorientées par rapport à l'axe de sollicitation. Des micro-défauts au sein du matériau (comme des vides, des fibres cassées, le décollement fibre/matrice ou des microfissures de la matrice) peuvent être à

l'origine de ces fissures amorcées par une forte concentration de contrainte locale. Ces fissures sont assez rectilignes et généralement perpendiculaires aux interfaces entre les couches adjacentes. En conséquence, la qualité de l'interface fibre matrice joue un rôle très important dans le développement de la fissuration transverse. Les contraintes de cuisson dues au processus de fabrication du stratifié, peuvent également être à l'origine de la création de nouvelles fissures transverses.[28]

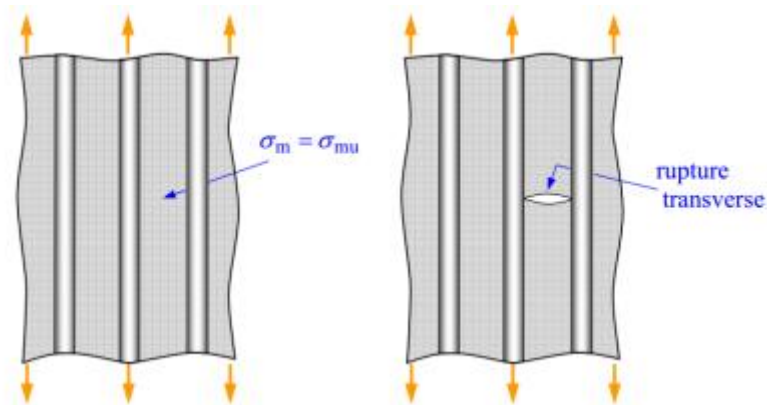


Figure II.3: fissuration transverse de la matrice.

### II.3.1.2. Fissuration longitudinale

Il s'agit de fissures qui sont analogues aux précédentes, apparaissent toujours dans la matrice et sont perpendiculaires aux interfaces des couches, mais qui traversent toute l'épaisseur des couches orientées à  $0^\circ$  par rapport à l'axe de sollicitation.[28]

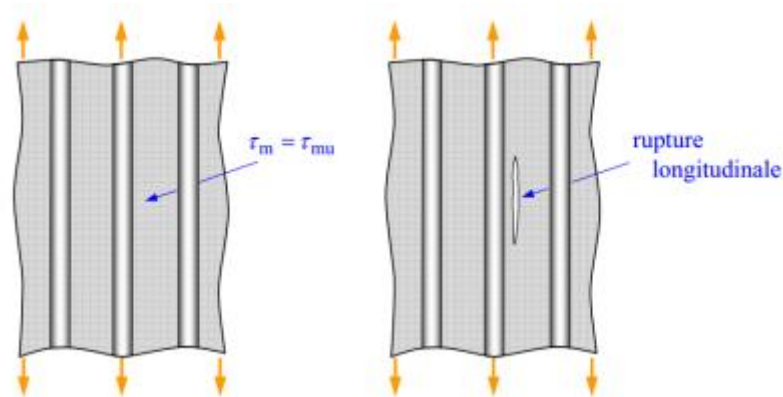
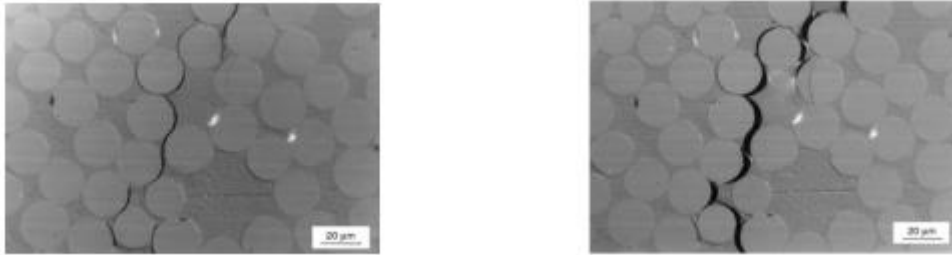


Figure II.4: fissuration longitudinale de la matrice.

### II.3.2. Décohésion fibre-matrice

La micro – fissuration et la décohésion fibre / matrice sont les premiers endommagements qui apparaissent si la matrice subit un chargement important. Ces défauts à l'échelle microscopique sont le lieu privilégié pour l'amorçage des endommagements à l'échelle supérieure, notamment des macros fissures, par coalescence, Figure II.5.



**Figure II.4.** Fissure matricielle formée à partir de la coalescence des décohésions et microfissures matricielles.

Les causes de ces décohésions sont variées. On peut citer, par exemple, la présence de micro défauts au niveau de l'interface fibre matrice (comme des micros vides) qui entraîne l'amorçage des décohésions, mais aussi les contraintes d'origine thermique (pendant la cuisson) ou l'état de contrainte local induit par la répartition aléatoire des fibres. [30]

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

Intervient lorsque la contrainte de cisaillement  $\tau$  dans la matrice atteint la contrainte de décohésion  $\tau_d$ , et cela arrive quand cette dernière est inférieure à la contrainte en cisaillement à la rupture de la matrice  $\tau_m$  (Figure II.5). [28]

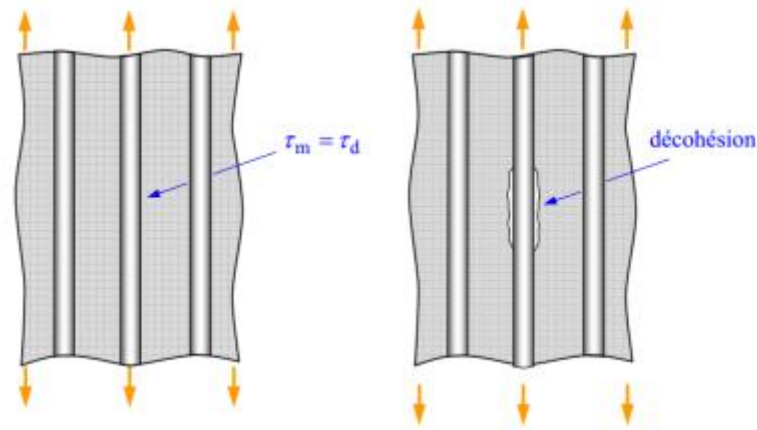


Figure II.5 : Phénomène de décohésion fibre- matrice

#### II.4. Fissuration matricielle :

La fissuration matricielle est la principale cause de ruine de la matrice, dans la mesure où, sans être le mécanisme directement le plus nocif, il peut être à l'origine d'autres phénomènes plus endommageant. Ce mode de dégradation consiste en l'apparition progressive de fissures. L'orientation de la fissuration est fortement liée à l'architecture du matériau et à sa forte anisotropie. De nombreux travaux ont étudié ce mécanisme, en chargement soit quasi statique soit cyclique. La Figure II.6 montre un état de fissuration matricielle induit par traction.

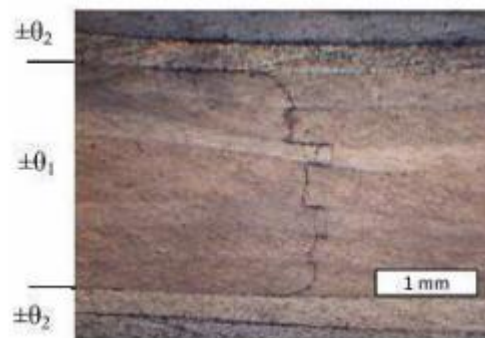
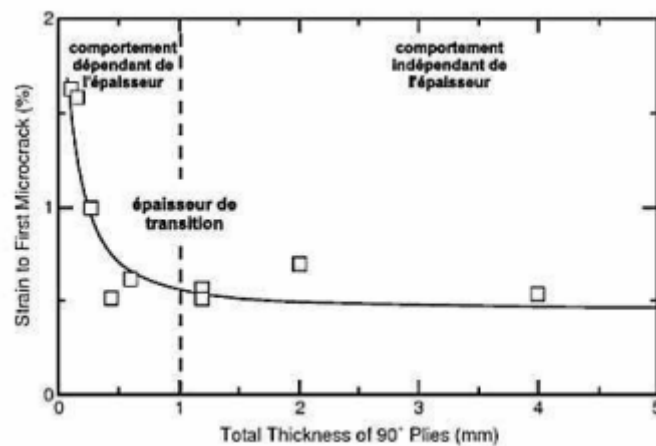


Figure II.6 : Détail des fissures matricielles sur un bord libre.

Si la Figure 15 présente un état de fissuration provoqué par un chargement mécanique monotone, il est important de noter que d'autres types de sollicitation peuvent conduire à l'apparition de ce type d'endommagement. A titre d'exemple, le cyclage thermique peut causer lui-même des fissures dans le matériau, comme l'ont montré. La température favorise également le phénomène d'oxydation, qui dégrade la matrice en favorisant l'amorçage des macro fissures. La fissuration matricielle est un mécanisme complexe dont l'apparition et l'évolution ne dépendent pas seulement du chargement, mais également de la géométrie et de

l'architecture du composite. De nombreux travaux (concernant les stratifiés) ont démontré l'influence de l'épaisseur du pli dans l'apparition, l'évolution et la densité des fissures. Par exemple, pour de faibles épaisseurs de pli dans des stratifiés ( $0^\circ/90^\circ$ ), aucune fissure n'apparaît avant la rupture. En augmentant l'épaisseur, la déformation à l'apparition des fissures est indépendante de l'épaisseur, comme le montre la Figure II.6.



**Figure II.7.** Influence de l'épaisseur dans l'apparition des fissures matricielles.

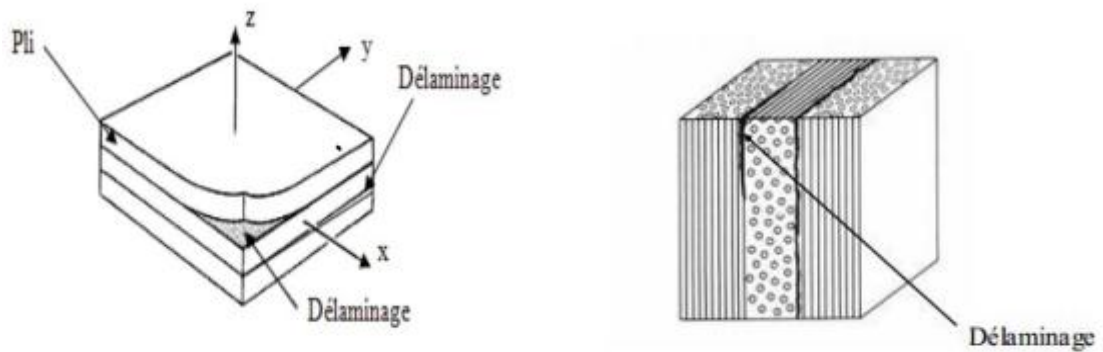
En ce qui concerne l'évolution du nombre de fissures, on note une augmentation de la densité en fonction du chargement appliqué jusqu'à un état dit « saturé » : une fois que la fissuration a atteint ce niveau, l'augmentation de charge ne provoquera pas la création de nouvelles fissures. Cette évolution sera également affectée par l'épaisseur du pli.

En plus de l'épaisseur du pli, le type d'empilement aura également des conséquences très claires sur la fissuration matricielle. Il a été montré que les empilements « distribués » du type  $[(\alpha, \beta, \theta)_n]_s$  montrent un niveau d'endommagement moins élevé que les empilements « compacts »  $[(\alpha_n, \beta_n, \theta_n)]_s$ . [30]

## II.5. Délaminage :

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

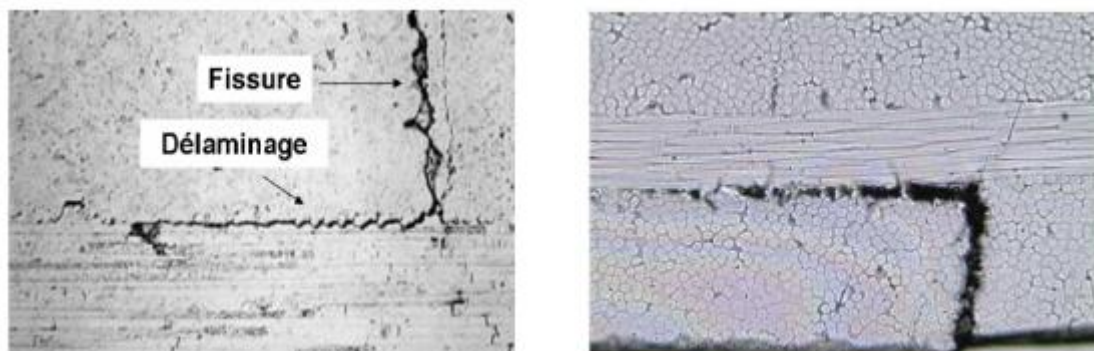
d'endommagement contribue largement à la dégradation des propriétés mécaniques de la structure. [28]



**Figure II.8 :** Mécanisme de délaminage.

### II.5.1. Micro délaminage et délaminage diffus :

Le micro délaminage naît à partir des fissures matricielles qui sont stoppées à l'interface entre deux plis. Provoquent une analyse de l'interaction entre ces deux modes d'endommagement. En pointe de fissure, les concentrations de contraintes induites sont telles que du délaminage peut apparaître entre les deux plis adjacents (Figure II.9)



**Figure II.9 :** Micro délaminage en extrémité de fissure matricielle.

Ce micro délaminage est le responsable de l'état saturé de la fissuration matricielle et son apparition annonce la rupture finale par localisation des endommagements.

Les contraintes inter laminaires peuvent également être à l'origine de l'apparition et de la propagation du délaminage, notamment à partir des bords libres qui induisent des singularités.

Le développement de cet endommagement entraîne la diminution de la rigidité du matériau. L'augmentation de la densité de fissuration matricielle provoque la coalescence des micro délaminages en formant des macro délaminages qui affecteront d'une façon très importante l'intégrité structurelle, notamment sous chargements hors plan. A une échelle inférieure, on trouve le délaminage diffus qui, avec la microfissuration matricielle et la décohésion fibre matrice, fait partie de l'endommagement diffus typique des états de cisaillement. Cet endommagement est provoqué par l'apparition de micro vide Et de décohésions dans les zones riches en matrice présentes dans l'interface inter – pli. On peut voir dans la Figure II.10. [30]

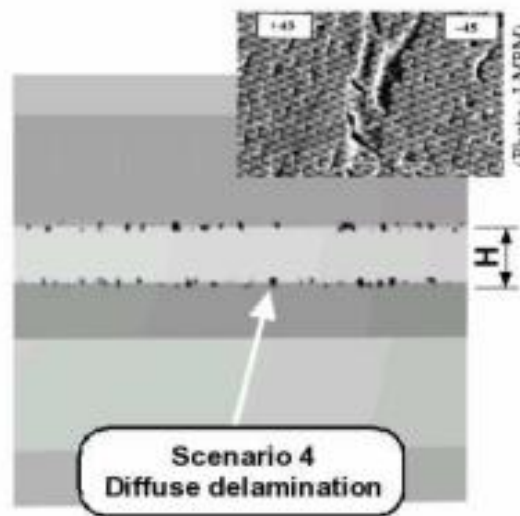
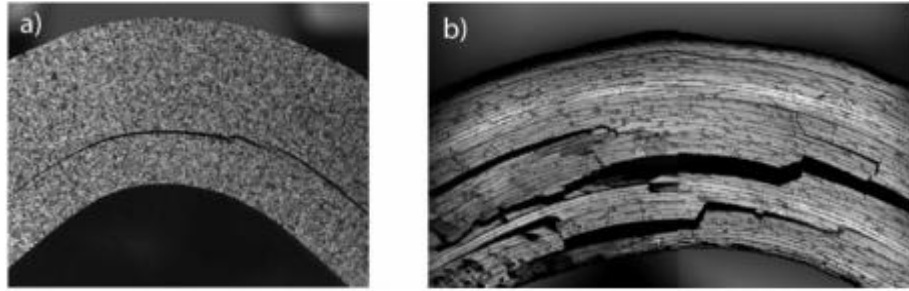


Figure II.11 : Schéma du délaminage diffus.

### II.5.2. Macro délaminage :

Le macro délaminage a une étendue beaucoup plus importante que le micro délaminage décrit préalablement. Il peut être provoqué par la coalescence des micros délaminages formés par les fissures matricielles stoppées à l'interface du pli, par un chargement de type hors – plan ou, sur un bord libre, par les différences de coefficients de Poisson dans les plis. Cet endommagement induit une perte de rigidité dans la structure qui sera plus ou moins importante selon le type de chargement. Par exemple, on constate des pertes raideur en traction après l'apparition du délaminage mais avec une propagation très stable (coalescence des micros délaminages). Par contre, cette propagation devient très instable dès que les chargements sont de nature hors – plan comme, par exemple, les sollicitations en flexion ou sur des cornières. Dans ce type d'essais, Laurin et al ont montré une influence non négligeable de la fissuration matricielle sur l'amorçage et la propagation du délaminage.





**Figure II.12 :** Délaminage observe dans une cornière a) sans fissuration matricielle et b) avec fissuration.

En ce qui concerne la modélisation, on peut distinguer les approches du type théorique ou analytique, comme par exemple le shear-lag développé par. Les modèles d'endommagement les plus avancés comme le méso modèle de Cachan ou celui de l'ONERA incorporent ce type d'endommagement dans leur formulation. D'autres approches modélisent le délaminage par éléments cohésifs [30].

Malgré tout, le délaminage est encore un des endommagements qui fait l'objet de nombreuses études et qui pose des questions tant au niveau expérimental que numérique.

## II.6 Rupture de fibres :

La rupture de fibres est l'endommagement ultime d'un stratifié. En effet, la contrainte à rupture des fibres est plus importante que celles de tous les autres constituants d'un composite stratifié. Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction  $\sigma_F$  dans une fibre atteint la contrainte à la rupture  $\sigma_{fr}$  (Figure II.13). Cette rupture provoquera une concentration de contraintes au voisinage et une rupture des constituants voisins, et ce de proche en proche jusqu'à la ruine du volume sollicité. Ce type d'endommagement est catastrophique pour la structure et entraîne souvent la rupture totale du stratifié,[28]



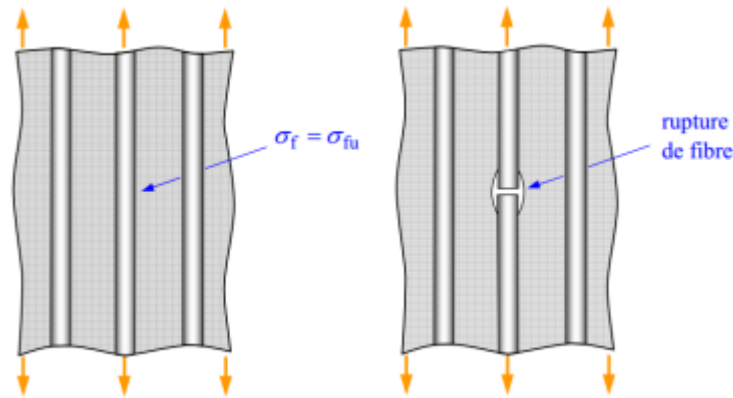


Figure II.13 : Mécanisme rupture de fibre

### II.6.1. Rupture multiple :

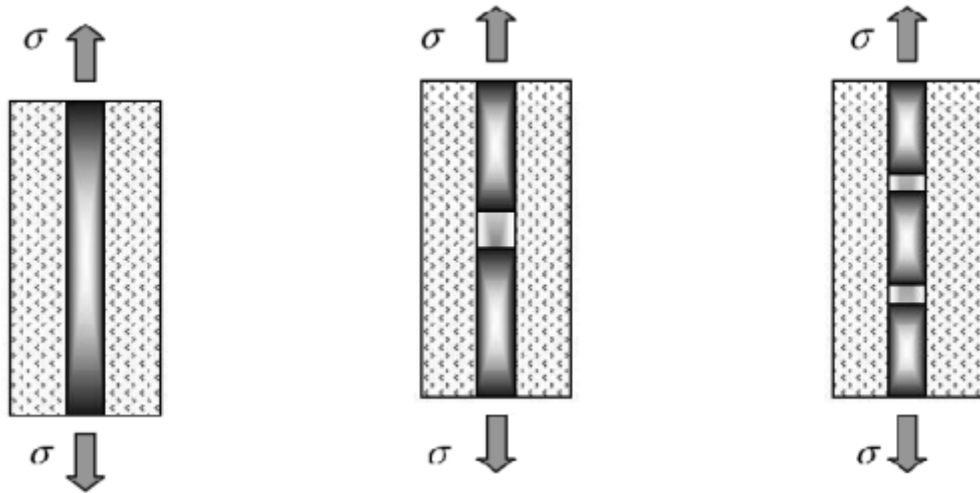
On traite les deux cas de rupture multiple de la fibre et celle de la matrice

#### II.6.1.1. Rupture multiple de la fibre :

Ce phénomène n'est généralement observé que dans des éprouvettes à fibre unique élaborées spécialement pour estimer les caractéristiques de l'interface fibre-matrice. La rupture multiple n'apparaît que si  $\varepsilon_F^R < \varepsilon_M^R$  et  $V_F < V_{fcrit}$ . Dans ce cas on assiste à une fragmentation de la fibre sous contrainte de traction (Figure II.14). La première fissuration aura lieu au point de déformation R.

$\varepsilon_c < \varepsilon_M^R$ ,  $\sigma_F$  est nulle au droit de la fissure et tend vers  $\sigma_M^R$  plus loin. Il existe de nouveau une zone où la fibre peut se rompre. Le processus se répète pour des déformations croissantes donnant lieu à des fragments de fibre de plus en plus courts. Le mécanisme continu à se produire jusqu'à ce que les morceaux de fibres ne peuvent plus être rechargés à leur contrainte de rupture  $\sigma_f^R$  (saturation  $\sigma_{fmax}$ , et la longueur moyenne de fragments de fibre est de l'ordre de  $l_c$  (Figure II.14). [32]

Plusieurs auteurs ont exploité ce mécanisme de fragmentation pour mesurer la contrainte de cisaillement à l'interface  $\tau^*$ .

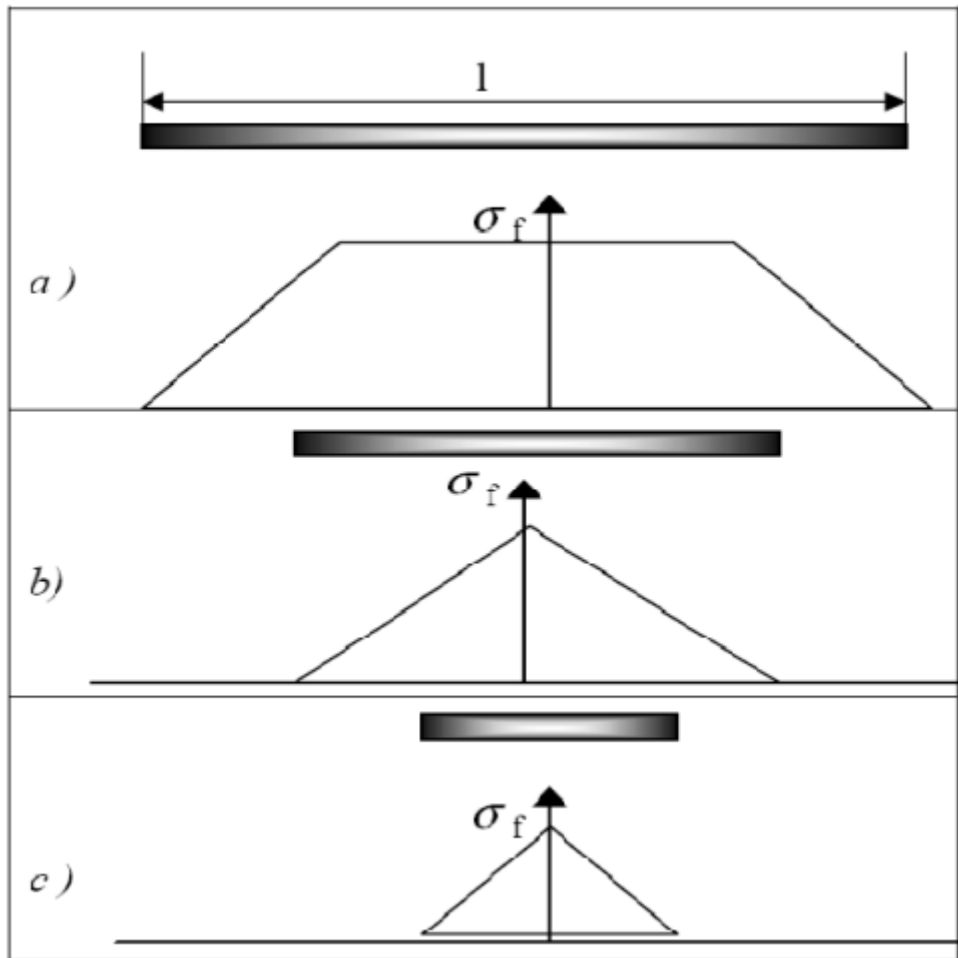


**Figure II.14.** Rupture multiple de la fibre

Connaissant le rayon de la fibre et sa contrainte à la rupture, l'expression suivante permet de déterminer la contrainte de cisaillement à l'interface  $\tau^*$  avec :

$$\tau^* = \frac{\sigma_f^R \cdot r_f}{l_c} \quad (\text{II.1})$$

Reste, à noter que cette technique n'est applicable que pour des composites où  $\varepsilon_f^R < \varepsilon_M^R$  par exemple dans le cas des matrices organiques ou métalliques renforcées par des fibres céramiques.[32]



**Figure II.15 :** Profil de contrainte de rupture multiple de la fibre

- a)  $l > l_c (\sigma_f^{max} = \sigma_f^R)$ ,
- b)  $l > l_c (\sigma_f^{max} = \sigma_f^R)$
- c)  $l > l_c (\sigma_f^{max} < \sigma_f^R)$

### II.6.1.2 Rupture multiple de la matrice :

On rencontre ce phénomène dans des composites où que si  $\varepsilon_f^R > \varepsilon_M^R$  et  $V_F < V_{fcrit}$ . Pour  $V_F < V_{fcrit}$  des therm durcissables renforcés par des fibres de verre, on constate la fissuration multiple de la matrice qui est souvent observée en service (Figure II.16).

L'analyse des ruptures multiples de la matrice se déroule de la même manière que dans le cas précédent [32].

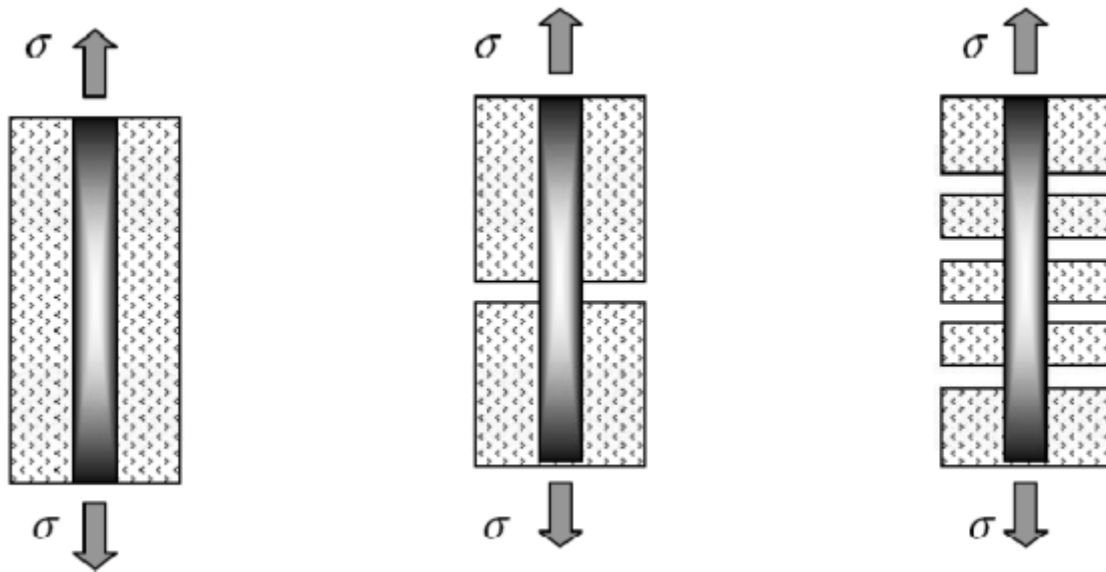


Figure II.16. Fissuration multiple de la matrice [33].

## II.7. Fissurations des composites stratifiés

Les matériaux composites stratifiés constitués des couches superposées renforcées de fibres unidirectionnelles, de tissus ou de mats peuvent présenter différents types de fissuration (interlaminaire, intralaminaire, ou translaminaire). Ces termes définissent les plans dans lesquels peuvent se développer les fissures dans les matériaux composites. [28]

- ✓ Fissures interlaminaire la fissure se développe suivant un plan parallèle aux couches de renfort, entre deux couches. Ce type d'endommagement se rencontre lors d'essai en mode I ou II, lors d'essai de flexion entre appuis rapprochés ;
- ✓ Fissures Intralaminaire le plan de la fissure est perpendiculaire ou parallèle aux couches de renfort à l'intérieure des couches. Ce mode d'endommagement se rencontre lors d'essai de cisaillement ou de traction transverse sur matériau unidirectionnel par exemple ;
- ✓ Fissures translaminaire : le plan de la fissure est perpendiculaire aux couches et aux renforts. Ce mode d'endommagement est par exemple observé lors d'essai de traction ou compression uni axiale dans le sens des fibres,

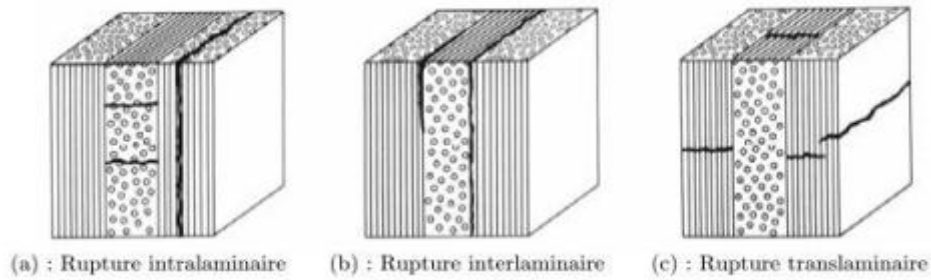


Figure II.17 : Différents types de fissuration au sein d'un composite stratifié.

Le comportement des stratifiés et leurs modes de ruine à l'échelle du pli dépendent de la sollicitation, et sont également grandement paramétrés l'échelle de la microstructure : [28]

- ✓ La nature des fibres et de la résine,
- ✓ le taux volumique de fibres,
- ✓ ou encore la cohésion de l'interface fibre / matrice. Fissures et son évolution

## II.8. Critères d'endommagements des matériaux composites

### II.8.1 Définition des critères de résistances :

Un critère de résistance s'écrit sous la forme de l'équation II.2 suivante :

$$F(\bar{\sigma}) \leq 1 \quad f(\bar{\epsilon}) \leq 1 \quad (II.2)$$

Tel que f est une fonction scalaire du tenseur des contraintes ou des déformations. La rupture est atteinte lorsque la valeur de la fonction est égale à 1.

### II.8.2 Critère de Hoffman

Le critère de Hill écrit sous la forme II.3 est un critère interactif de rupture. Il est parmi les premiers à être applicable sur des matériaux anisotropes. C'est un critère quadratique, ne tenant pas en compte la différence du comportement des matériaux en traction et en compression.

$$\left(\frac{\sigma_L}{X}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{Y}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_T}{Z}\right)^2 - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2}\right)\sigma_L\sigma_T - \left(\frac{1}{X^2} + \frac{1}{Z^2} - \frac{1}{Y^2}\right)\sigma_L\sigma_T - \left(\frac{1}{Y^2} + \frac{1}{Z^2} + \frac{1}{X^2}\right)\sigma_T\sigma_T + \left(\frac{\sigma_{LT}}{S}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{LT}}{R}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{TT}}{Q}\right)^2 = 1 \quad (II.3)$$

Le critère de Hoffman exprimé par l'équation II.17, vient généraliser le critère de Hill pour en tenir compte de la différence entre le comportement en traction et en compression.

$$C_1(\sigma_T - \sigma_{T'})^2 + C_2(\sigma_{T'} - \sigma_L)^2 + C_3(\sigma_L - \sigma_T)^2 + C_4\sigma_T + C_5\sigma_{T'} + C_6\sigma_{T'} + C_7\sigma_{TT'} + C_8\sigma_{LT'}^2 + C_9\sigma_{LT}^2 = 1$$

Avec :  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6, C_7, C_8$  et  $C_9$  des constantes caractéristiques du matériau, fonction des contraintes de rupture. Elles sont décrites par les relations sous l'équation II.4 : [34]

$$\begin{aligned}
 C_1 &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Y^+Y^-} + \frac{1}{Z^+Z^-} + \frac{1}{X^+X^-} \right], C_1 = \frac{1}{X^+} - \frac{1}{X^-}, C_7 = \frac{1}{Q^2} \\
 C_2 &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{Z^+Z^-} + \frac{1}{X^+X^-} + \frac{1}{Y^+Y^-} \right], C_5 = \frac{1}{Y^+} - \frac{1}{Y^-}, C_8 = \frac{1}{R^2} \\
 C_3 &= \frac{1}{2} \left[ \frac{1}{X^+X^-} + \frac{1}{Y^+Y^-} + \frac{1}{Z^+Z^-} \right], C_6 = \frac{1}{Z^+} - \frac{1}{Z^-}, C_9 = \frac{1}{S^2}
 \end{aligned}
 \tag{II.4}$$

**II.8.3 Critère de la contrainte maximale**

Il est appliqué dans le cas d'une contrainte plane  $\sigma_L \sigma_T \sigma_{LT}$  dans les axes principaux. Il s'écrit sous la forme de six inégalités, fonction des contraintes de rupture en traction, compression et en cisaillement données par l'équation II.19

$$\begin{aligned}
 -X^- &< \sigma_L < X^+ \\
 -Y^- &< \sigma_T < Y^+ \\
 -Z^- &< \sigma_{LT} < Z^+
 \end{aligned}
 \tag{II.5}$$

Il suffit qu'une seule inégalité ne soit pas vérifiée, pour que la rupture se produit.

**II.8. 4 Critère de Hashin**

Ce présenté, en 1980, par Hashin s'applique aux composites unidirectionnels et est basé sur quatre modes principaux de rupture du matériau induits par des critères tensoriels de Rang 2. Ces quatre modes sont les suivants :

- Rupture de la fibre en traction et en compression ;
  - Rupture de la matrice en traction et en compression sur des plans parallèles à l'axe des fibres.
- La direction 1 désignant l'axe d'isotropie du matériau ou l'axe des fibres, le critère s'écrit de la manière suivante :

$$\frac{\sigma_{f1}^2}{X^2} + \frac{\sigma_{f2}^2}{R^2} + \frac{\sigma_{f3}^2}{R^2} \leq 1, \quad \text{si } \sigma_{11} > 0
 \tag{II.6}$$

- Rupture en compression des Fibres :

$$\sigma_{11} = -X', \quad \text{si } \sigma_{11} < 0
 \tag{II.7}$$

- Rupture en traction de la matrice :

$$\frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})}{Y^2} + \frac{\sigma_{23} + \sigma_{22}\sigma_{33}}{Q^2} + \frac{\sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2}{R^2} \leq 1 \quad \text{si } \sigma_{22} + \sigma_{33} > 0 \quad (\text{II.8})$$

- Rupture en compression de la matrice :

$$(\sigma_{22} + \sigma_{33}) \frac{[(\frac{Y'}{2Q})^2 - 1]}{Y'} + \frac{(\sigma_{22} + \sigma_{33})^2}{4Q^2} + \frac{(\sigma_{22}^2 - \sigma_{22}\sigma_{33})}{Q^2} + \frac{(\sigma_{11}^2 + \sigma_{13}^2)}{R^2} \leq 0 \quad (\text{II.9})$$

IL y'a rupture du matériau si une des inégalités est violée. L'avantage de ce critère est de mettre en évidence les modes de ruptures du matériau. [34]

N.B :

$X^+$  ,  $Y^+$  ,  $Z^+$  ,  $X^-$  ,  $Y^-$  ,  $Z^-$  : sont les contraintes ultimes (ou résistances limites) en traction , respectivement en compression, dont les trois dimensions de symétrie matérielle du matériau orthotrope .

Q, R, S : Sont les résistances ultimes en cisaillement dans les plans (2 ,3), (1,3) et (1,2). [34]

### II.9. Conclusion

La connaissance des mécanismes d'endommagement des composites, nous aide à prédire leur rupture lorsque ils sont sollicités à des chargements extérieurs. Pour mieux modéliser le comportement des composites, on se base sur des méthodes numériques robustes, qui seront présenté dans le troisième chapitre.

# **Chapitre III**

## **Les résultats et discussions**



### III. 1 Introduction

L'avenir est à l'outil numérique et à la réalité virtuelle ; la simulation et l'analyse numérique se sont développées ces dernières années dans la recherche industrielle privée ou publique (constructeur automobile, aéronautique, spatial...) améliorant ainsi la productivité des industriels et la vie de tous les consommateurs.

Les matériaux composites utilisés dans les structures d'ingénierie avancées ont gagné une popularité au cours des dernières décennies en raison de leur rapport résistance/poids élevé et de leur capacité d'amortissement élevée.

Dans ce chapitre, nous avons simulé le comportement mécanique des structures fissurées en matériaux composites. Ce travail de recherche avait pour objectif la modélisation de l'endommagement des stratifiés composites (Carbone/Epoxy) par l'implémentation d'un critère d'endommagement 3D (Hashin 3D-Puck modifié) sous Abaqus standard.

L'étude d'initiation de l'endommagement a été prédite par critère de Hashin. La rupture des fibres en traction et en compression est prédite par le critère de Hashin 3D et la rupture de la matrice en traction et en compression.

Actuellement, les logiciels de calcul basés sur la méthode des éléments finis sont largement utilisés et les résultats numériques obtenus s'avèrent très satisfaisants si des modèles numériques sont correctement établis. A cet effet, les performances du logiciel Abaqus version sont utilisées dans ce travail pour analyser la réponse des plaques d'aéronefs endommagées par fissuration et réparées par patch composites.

Toutes les applications destinées aux calculs par élément fini nécessitent d'importantes connaissances dans le domaine des méthodes numériques, alors qu'Abaqus est conçu pour être utilisé partout sans qu'il y ait besoin de formation préalable sur les éléments finis. Grâce à son interface intuitive, il permet une prise en main très rapide du logiciel avec l'option d'automatisation de la reconnaissance des zones de contact et la génération du maillage.

Le programme Abaqus a de nombreuses capacités d'analyse par élément fini, allant d'une simple étude statique linéaire à une autre étude statique complexe non linéaire.

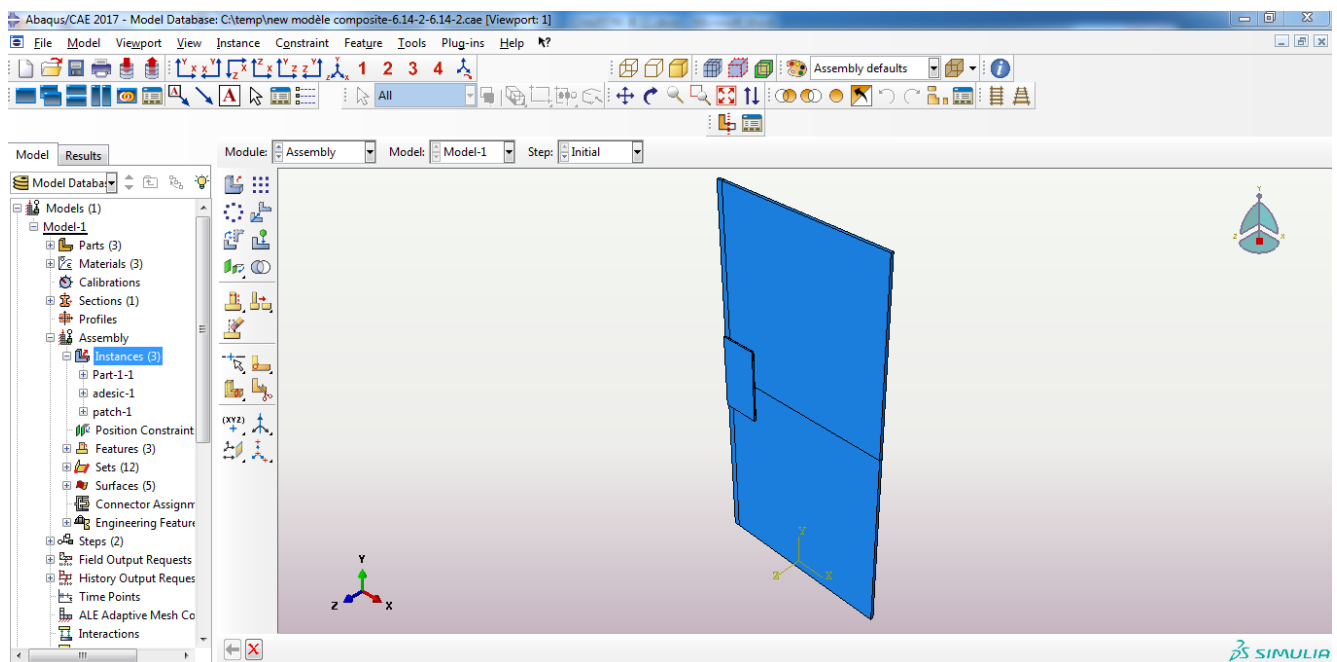
Les mécanismes d'endommagement sont donc aujourd'hui très bien connus, cependant la simulation des stratifiés jusqu'à rupture reste un objectif majeur et nécessite encore de nouvelles études. Le besoin de modèles complets et fiables pour la prédiction du comportement mécanique, devient une nécessité cruciale pour le concepteur de pièces de structures. Dans le cas des matériaux à fibres longues que l'on modélise, on peut considérer l'endommagement comme homogène à l'échelle macroscopique. Il s'agit alors essentiellement de fissuration de matrice. La

rupture de fibre est plus rarement modélisée en termes de dommage car elle apparaît en général au voisinage de la rupture finale.

## III.2 Présentation du code de calcul Abaqus/CAE

### III.2.1 Code de calcul Abaqus/CAE

Abaqus/CAE est un code de calcul qui résout les problèmes de divers champs par la technique des éléments finis (M.E.F). Dans ce cadre il présente un système complet intégrant non seulement les fonctions de calculs proprement dites mais également les fonctions de construction du modèle (pré-processeur) et les fonctions de traitement des résultats (post-traitement). La figure III.1. Représente l'interface de l'Abaqus utilisée.



*Figure.III.1 Interface ABAQUS 2017*

Abaqus/CAE est un programme qui traite des problèmes d'élasticité linéaire dans les domaines statiques et dynamiques, des problèmes non linéaire, des problèmes thermiques etc...

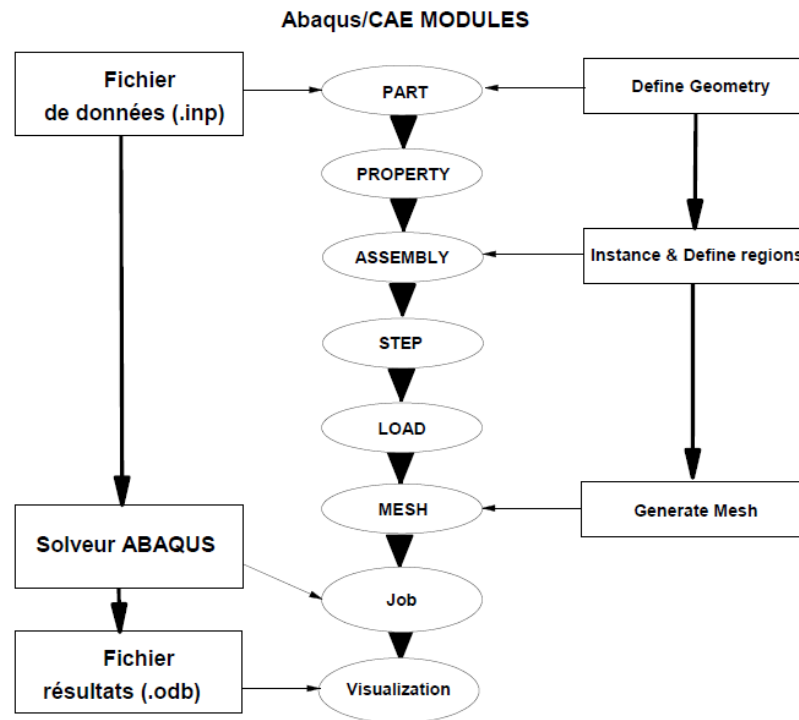


Figure.III.2 Étapes à suivre pour la programmation [36]

La résolution complète d'un calcul numérique s'effectue après un passage successif dans les modules suivants : Part, Property, Assembly, Step, Interaction, Load, Mesh, Job (pour lancer le calcul) [36]. Dans le code de calcul Abaqus le fichier de données décrit les géométries, les matériaux, les conditions aux limites avec une extension (.inp) et le fichier de résultats décrivent les contours et les courbes résultats avec l'extension (.odb).

**III.2. 2 Système d'unités dans le code de calcul Abaqus**

Comme dans beaucoup de logiciels, il n'y a pas de système d'unités fixé. C'est à l'utilisateur de définir son propre système (tableau III.1).

Tableau .III.1 : Système d'unités pour le code de calcul Abaqus[36]

Masse	Longueur	Temps	Force	pression	Energie
M	L	T	$MLT^{-2}$	$ML^{-1}T^{-2}$	$ML^2T^{-2}$
Kg	M	S	N	Pa	J
g	Mm	ms	N	MPa	mJ
Tonne	Mm	S	N	MPa	mJ

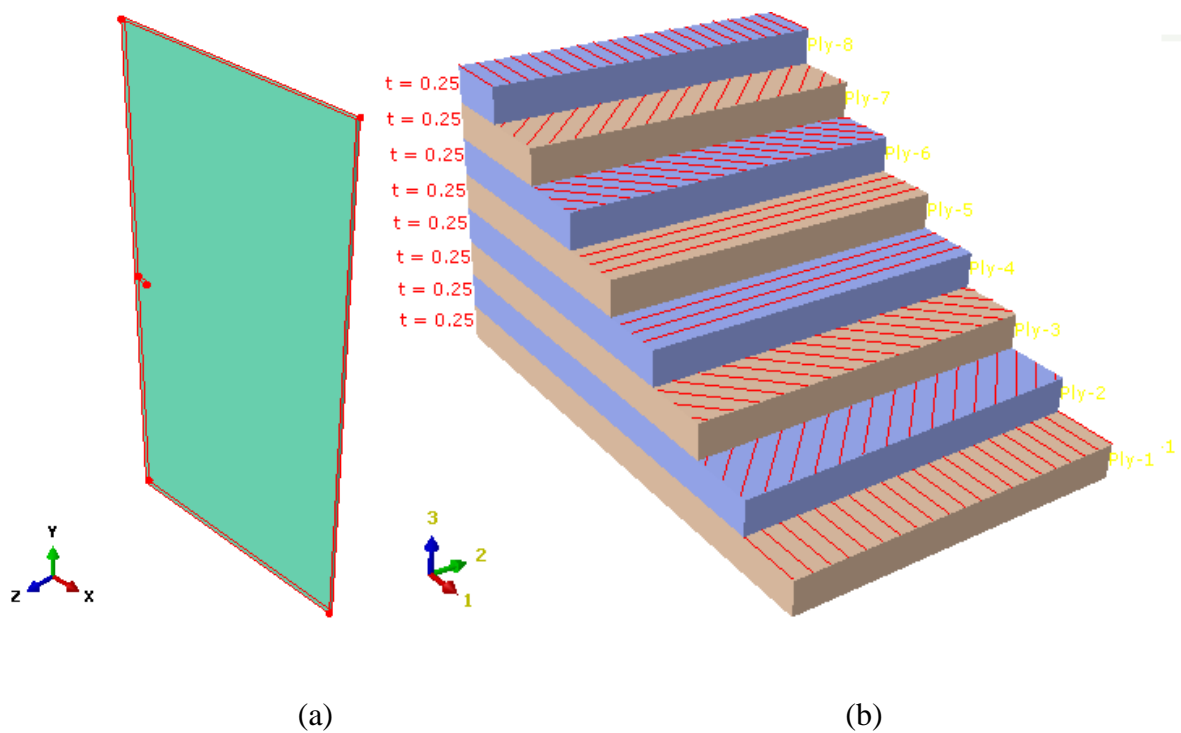
**III.3. Modélisation tridimensionnelle:**

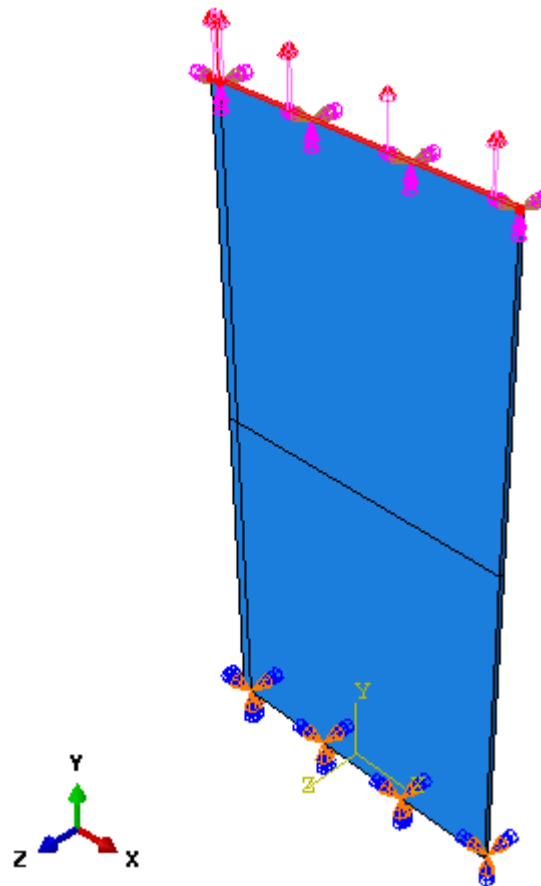
**III.3.1 Description géométrique et les conditions aux limites**

On s'intéresse à l'étude des contraintes dans une plaque rectangulaire en matériaux composites (Carbone-époxyde) soumise à un effort de traction uniaxiale (voir Figure3). la plaque simulée par un modèle en 3D dont la taille est: la longueur, la largeur et l'épaisseur du modèle ils sont mentionnés dans le tableau III.2. La structure est soumise à un chargement mécanique uniaxial P suivant l'axe Y. Une fissure latérale initiale de 12mm , 16mm et 20mm de longueur est supposée exister dans la plaque perpendiculaire à la direction de chargement. [34]

**Tableau III.2 :** Les démentions de modèle étudié.

modèle	H	W	e
Démentions (mm)	250	125	2





(c)

**Figure III.3:** Représentation schématique du modèle en 3D(a) Modèle géométrique, (b) Configuration du stratifié (c) condition aux limites.

une séquence d'empilement est prise en compte dans cette étude  $[0/-45/45/90]_s$ . L'angle des couches d'orientation sont mesurées dans la direction longitudinale de la structure (axe des x) .voir Figure III.3. La plaque a été réparée par un patch rectangulaire externe et soumis à un chargement reparti de 200 Mpa, 300 Mpa et 400 Mpa.

### III.3.3 Les propriétés mécanique

La modélisation globale est basée sur une approche élastique linéaire dont les constantes élastiques de la plaque, du patch et de l'adhésif sont illustrées dans le tableau III.3.

Tableau III. 3 : Propriétés mécaniques [34]

Coefficients d'élasticité					
$E_1$	$E_2$	$\nu_{12}$	$G_{12}$	$G_{13}$	$G_{23}$
170	9	0.34	4.8	4.8	4.5

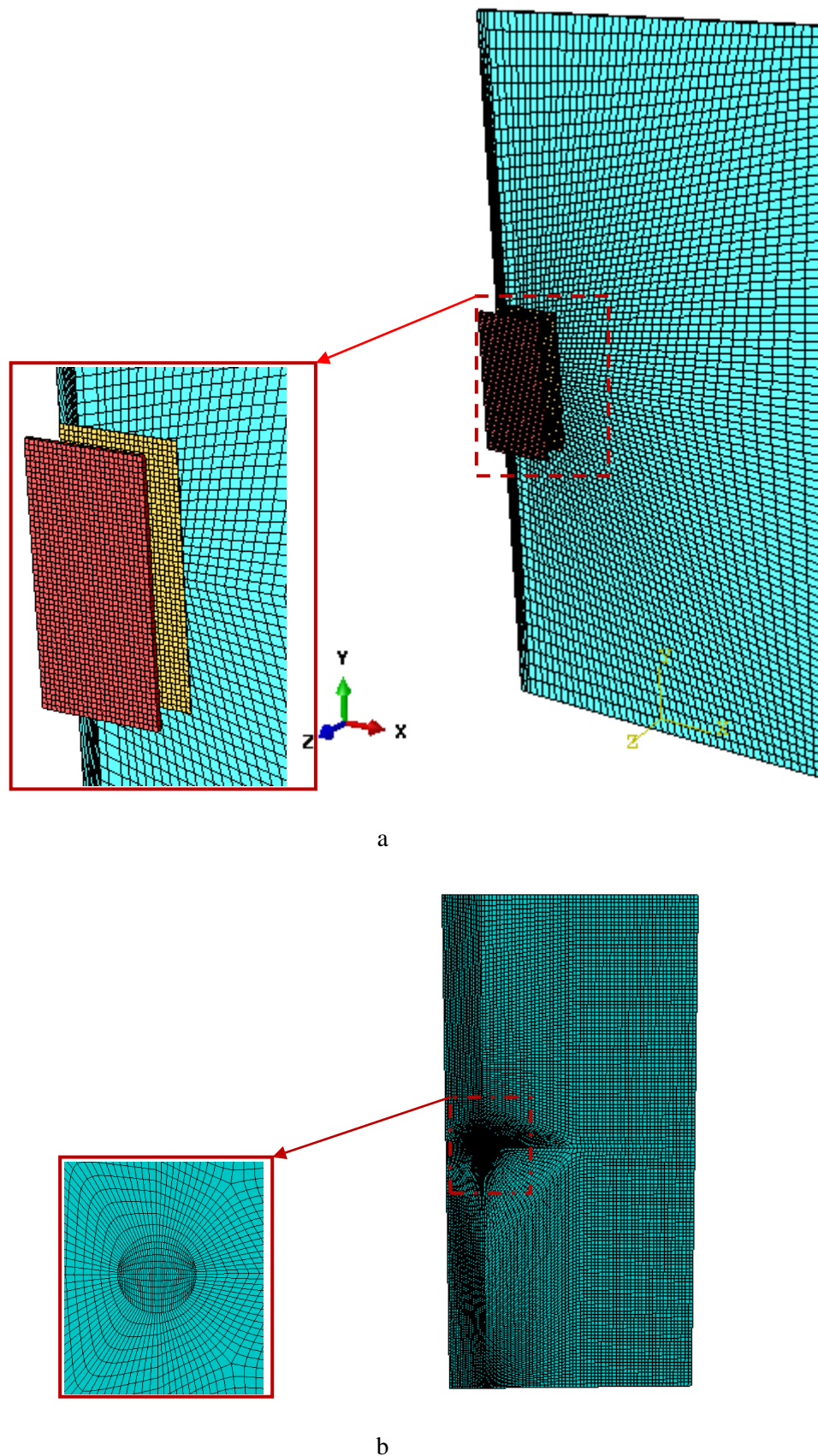
Coefficients de critère de rupture de Hashin					
$X_T$	$X_C$	$Y_T$	$Y_C$	$S_L$	$S_T$
2050	1200	62	190	81	81

Ténacité			
$G_{ft}$	$G_{fc}$	$G_{mt}$	$G_{mc}$
45	45	0.6	0.6

- $E_1$  Module de Young dans la direction X (GPa).
- $E_2$  Module de Young dans la direction-Y (GPa).
- $G_{12}$  Module de cisaillement dans le plan- XY (GPa).
- $G_2$  Module de cisaillement dans le plan- XZ(GPa).
- $G_{23}$  Module de cisaillement dans le plan- YZ (GPa).
- $\nu_{13}$  Coefficients de Poisson dans le plan XY.
- $X_T$  Résistance à la traction dans la direction- X (MPa),
- $X_{12}$  Résistance à la compression dans la direction- X (MPa).
- $Y_{Tc}$  Résistance à la traction dans la direction- Y (MPa).
- $Y$  Résistance à la compression dans la direction- Y (MPa).
- $S$  Résistance au cisaillement dans la direction longitudinale des fibres (MPa).
- $S_{TLc}$  Résistance au cisaillement dans la direction transverse des fibres (MPa).
- $G_{ft}$  Energie de rupture en traction longitudinale (kJ/m<sup>2</sup>).
- $G_{mc}$  Energie de rupture en compression longitudinale (kJ/m<sup>2</sup>).
- $G_{mt}$  Energie de rupture en traction transversale (kJ/m<sup>2</sup>).
- $G_{fc}$  Energie de rupture en compression transversale (kJ/m<sup>2</sup>).

### III.3.4.Maillage

Le maillage de la plaque analysée est représenté sur la figure 4. Le code éléments finis ABAQUS [35] a été utilisé dans la simulation EF du stratifié avec des éléments de type SC8R (Continuum Shell Elements).



**Figure.III.4** (a) Maillage de la plaque réparée, (b) maillage d'une fissure latérale.

Le maillage de la plaque représenté sur la figure III.4. Un raffinement du maillage est indispensable à proximité du défaut, ce qui permettra d'obtenir une bonne convergence et une

meilleure précision des résultats. Evaluer la distribution des déformations dans notre modèle et d'identifier la région à risque de fracture. . Le patch en composite est collé à la plaque fissurée pour le renforcement de la fissure latérale (Figure III.1). Les dimensions du patch sont : Longueur  $H_r = 50\text{mm}$ , largeur  $w_r = 25\text{mm}$  et épaisseur  $e_r = 1.2\text{ mm}$ . [34]

### III.3.6. Critère d'initiation de l'endommagement (Hashin)

- L'initiation du dommage définit le point de l'initiation de la dégradation de la raideur
- Le comportement du matériau non endommagé est linéaire élastique
- Le critère de l'initiation du dommage pour des composites fibreux est basé sur la théorie de

Hashin

- il ne mène dans ce cas à l'endommagement à moins que l'évolution du dommage soit également spécifiée

Des variables de sortie sont associées à chaque critère. Utile pour évaluer la sévérité de l'état de déformation courant

- HSNFTCRT – Critère de Hashin pour des fibres en tension ,
- HSNFCCRT – Critère de Hashin pour des fibres en compression , ;
- HSNMTCRT – Critère de Hashin pour une matrice en tension ;
- HSNMCCRT – Critère de Hashin pour matrice en compression .
- DAMAGESHR- Critère de Hashin pour l'endommagement par cisaillement

L'endommagement statique est considéré comme un processus de détérioration progressive de la matière suivant des phénomènes physiques intervenant à l'échelle microscopique ou mésoscopique susceptible de se développer dans les matériaux composites stratifiés. Notamment, une analyse a été faite par la méthode des éléments finit peuvent nous conduire à déterminer le mode d'endommagement du stratifié soumis à un déplacement bidimensionnel imposé.

L'endommagement des stratifié analysé par le code de calcul Abaqus donne comme résultats des variables d'endommagement définis comme suit :

- DAMAGEFC : endommagement des fibres en compression ;
- DAMAGEFT: endommagement des fibres en tension ;
- DAMAGEMC: endommagement de la matrice en compression ;
- DAMAGEMT: endommagement de la matrice en tension ;
- DAMAGESHR: endommagement par cisaillement;

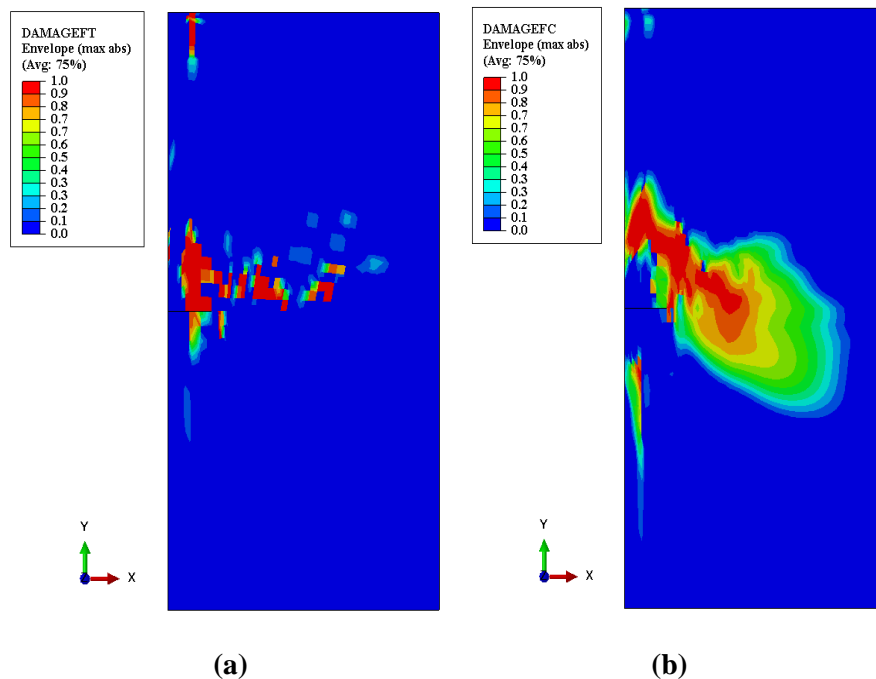


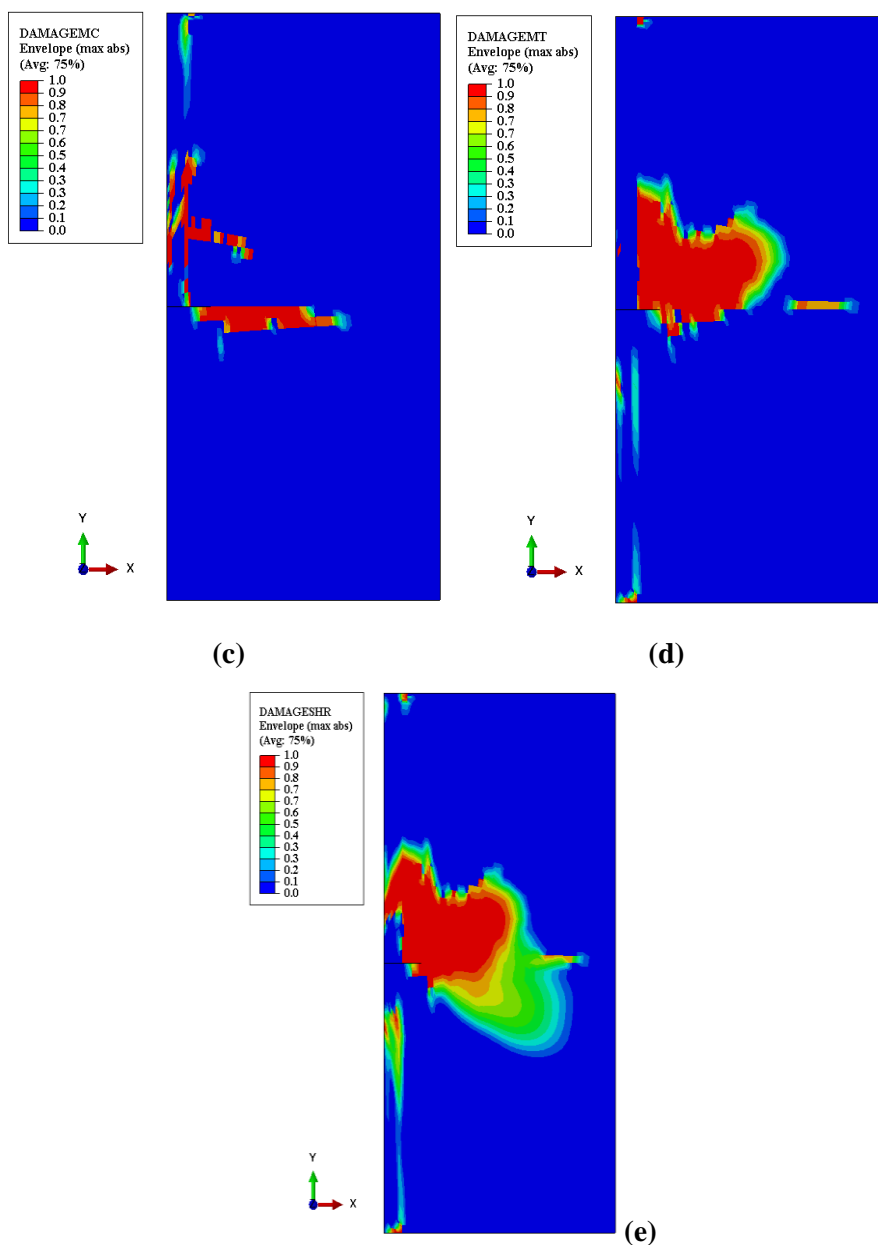
### III.4. Résultats et discussions

#### III.4.1. Distribution de l'endommagement de la plaque non-réparée:

La figure III-3 montre les zones endommagées où les fibres de la matrice sur les plis stratifiés sont étirées sous compression et en tension. La zone endommagée est située près de la fissure. Le graphique montre clairement la fiabilité du critère d'endommagement. La figure III-3 (a) montre la zone endommagée de la fibre en tension. Le comportement inverse a été constaté. En fait, les dommages sont plus prononcés sur le pli à  $0^\circ$ .

Cette série de cartographies montre l'état d'endommagement des fibres en compression dans les plis du stratifié (La figure III-3 (b)). On remarque que la taille des zones qui concentrent l'endommagement sur les plis de mêmes orientations est semblable. La taille des zones endommagées de la matrice en compression est représentée sur la figure III-3 (c). Les zones les plus importantes sont celles sur les plis à  $0^\circ$ . La figure III-3 (b) représente les zones endommagées de la matrice en tension sur les plis du stratifié. les plis à  $90^\circ$  la taille des zones endommagées sont plus étendus.



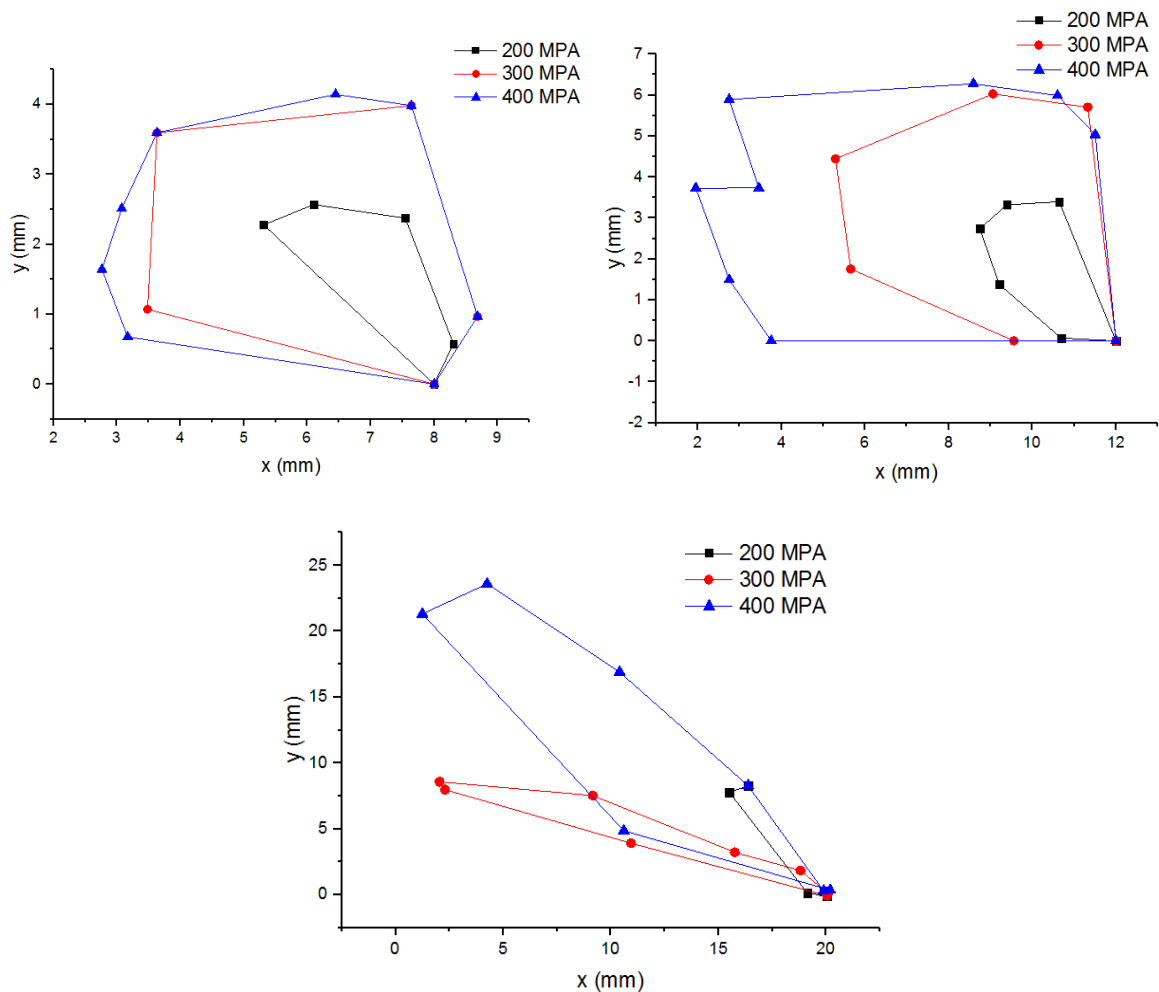


**Figure III.5** Distribution de l'endommagement dans une plaque non-réparée- DAMAGEFC : (a)endommagement des fibres en tension; (b)endommagement des fibres en compression ;(c) endommagement de la matrice en compression ;(d) endommagement de la matrice en tension ;(e) endommagement par cisaillement.

### Endommagement en compression des fibres " DAMAGEFC"

Cette série de cartographies montre l'étendue de la zone endommagée des fibres en compression dans les plis du stratifié (**Figure III.6**) pour trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm) pour trois charment supposé (200MPa, 300MPa, et 400MPa) . On remarque que la taille des zones qui concentrent l'endommagement sur les plis varie en fonction de la longueur de la fissure,

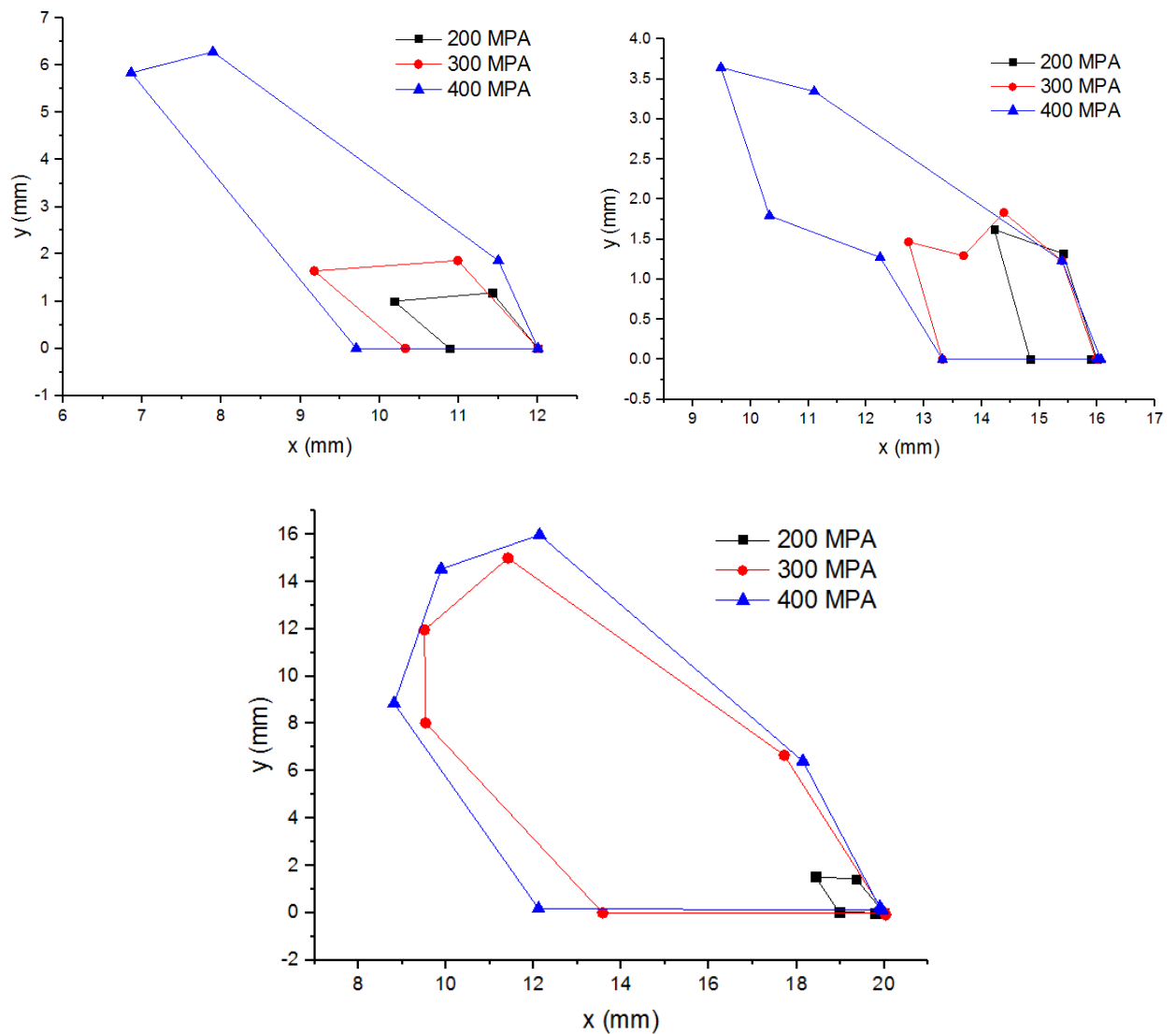
en effet la taille de la zone endommagée varie proportionnellement avec la taille de la fissure et le chargement exercé



**Figure III.6** Distribution de l'endommagement en compression des fibres " DAMAGEFC " pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm).

**Endommagement des fibres en tension "DAMAGEFT":**

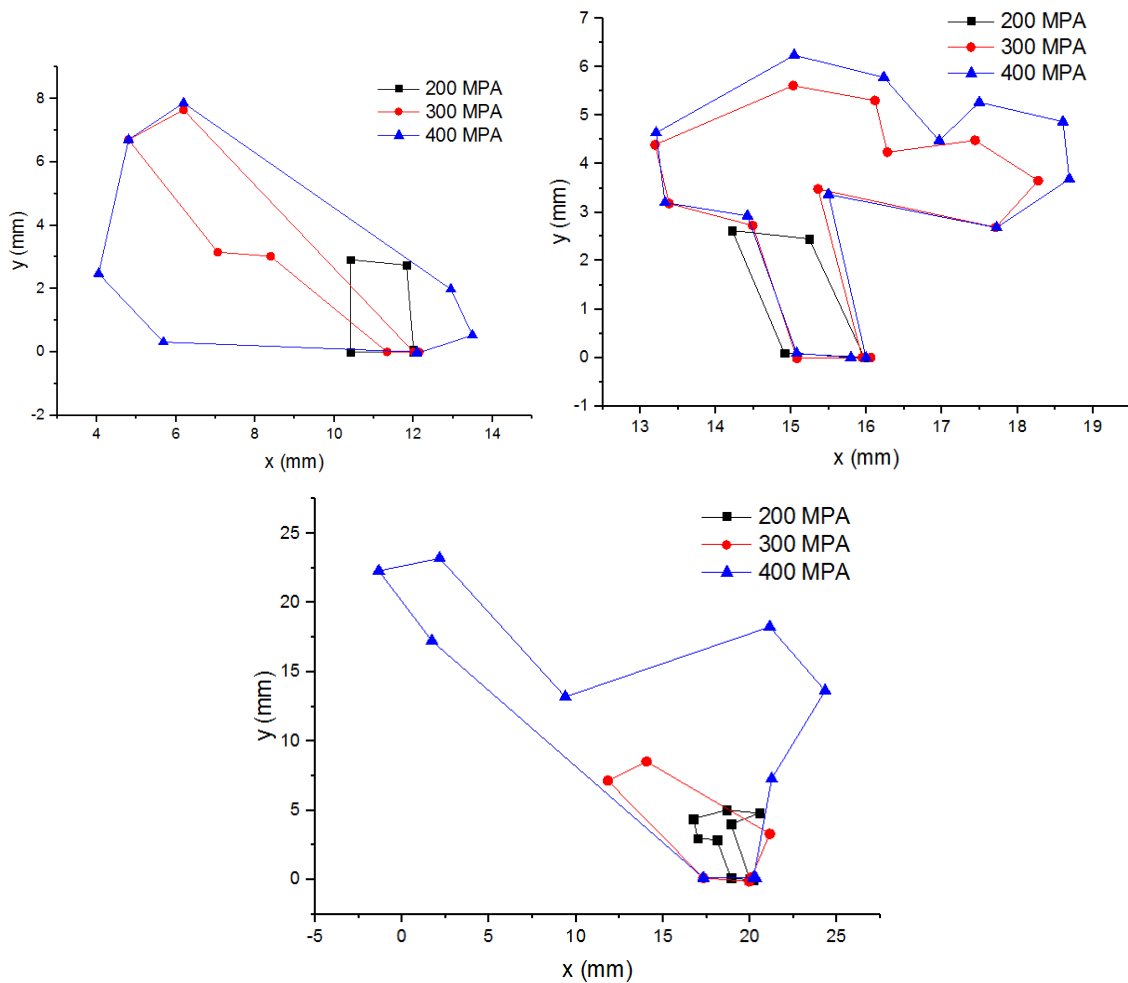
Les résultats de l'étude de l'impact relatifs à l'effet de la taille de la fissure sur l'endommagement en compression des fibres sont présentés dans la **Figure III.7**. Comme le montre cette figure, l'allure générale des contours de la zone endommagés varie en fonction de la taille de la fissure. On remarque aussi que le chargement a un effet remarquable sur le comportement des structures composites. En effet, il est à constater que plus le chargement applique et importante, plus la zone endommagée est importante.



**Figure III.7** Distribution de l'endommagement en tension des fibres " DAMAGEFT " pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm).

**Endommagement de la matrice en compression "DAMAGEMC":**

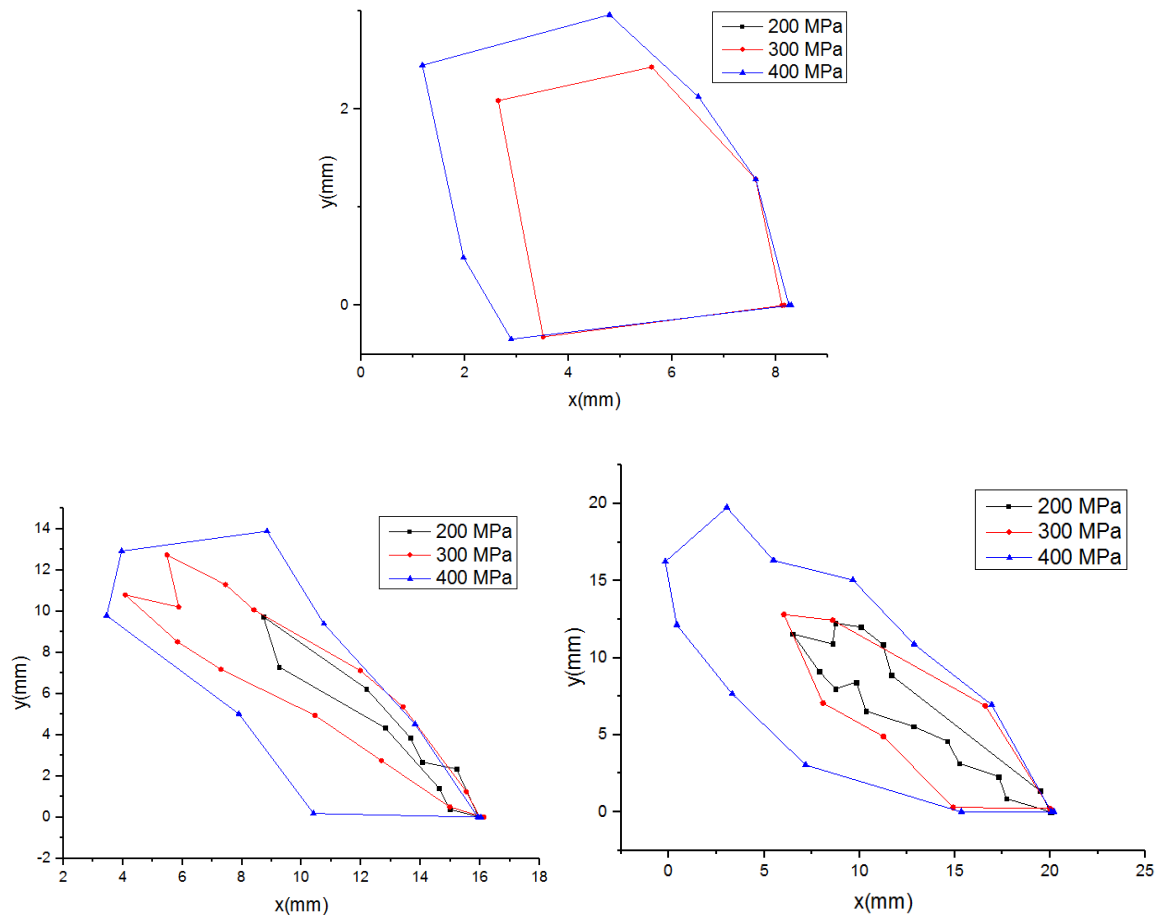
Cette série de cartographies montre l'étendue de la zone endommagée de la matrice en compression dans les plis du stratifié (Figure III.8) pour trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm) pour trois charment supposé (200MPa, 300MPa, et 400MPa). On remarque que la taille des zones qui concentrent l'endommagement sur les plis varie en fonction de la longueur de la fissure, en effet la taille de la zone endommagée varie proportionnellement avec la taille de la fissure et le chargement exercé.



**Figure III.8** Distribution de l'endommagement de la matrice en compression "DAMAGEMC" pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm).

**Endommagement de la matrice en tension "DAMAGEMC":**

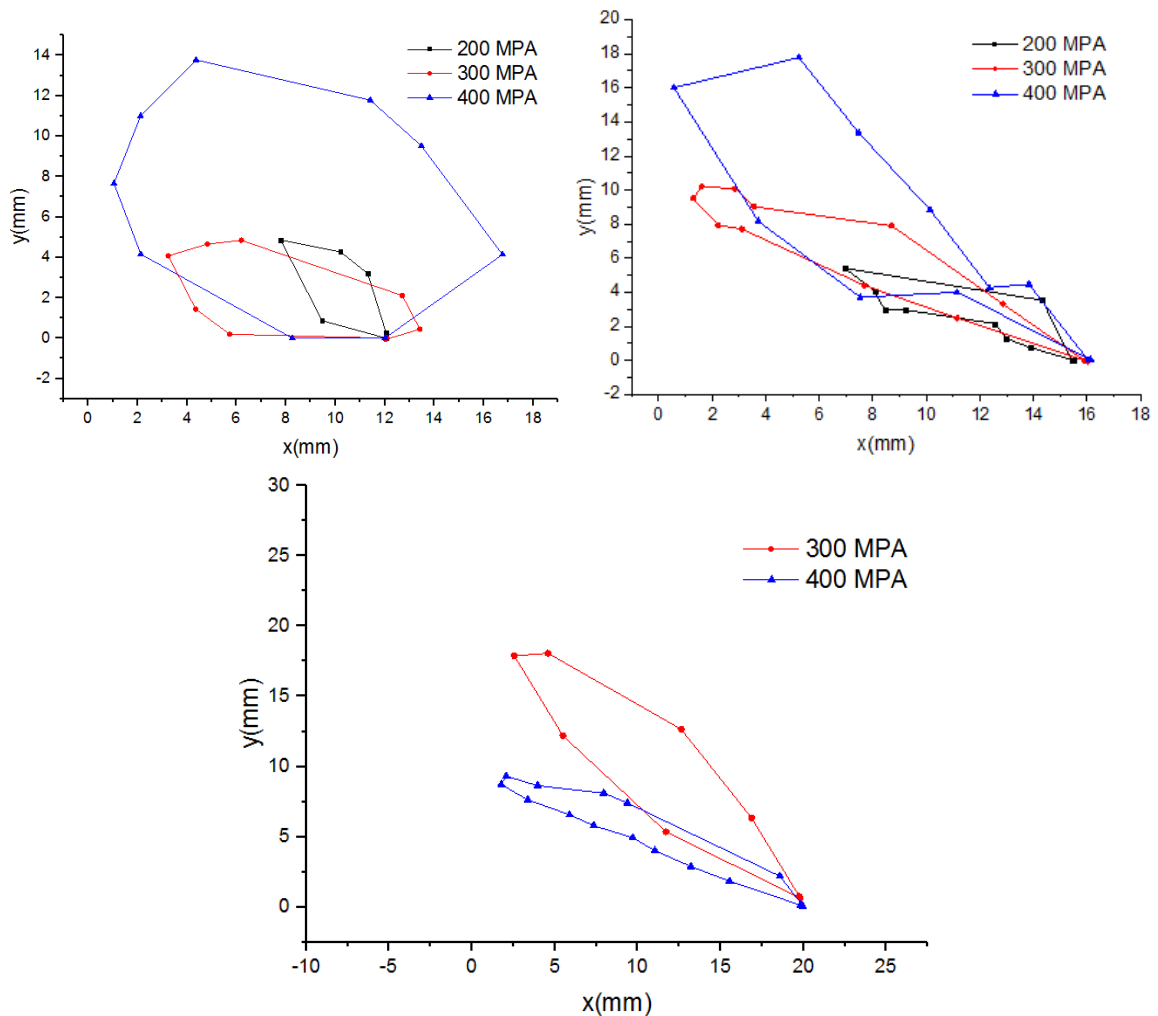
Les résultats de l'étude de l'impact relatifs à l'effet de la taille de la fissure sur l'endommagement en compression des fibres sont présentés dans la **Figure III.9**. Comme le montre cette figure, l'allure générale des contours de la zone endommagés varie en fonction de la taille de la fissure. On remarque aussi que le chargement a un effet remarquable sur le comportement des structures composites. En effet, il est à constater que plus le chargement appliqué est importante, plus la zone endommagée est importante.



**Figure III.9** Distribution de l'endommagement de la matrice en tension " DAMAGEMT " pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm).

**Endommagement par cisaillement " DAMAGESHR ":**

Cette série de cartographies montre l'étendue de la zone endommagée **par cisaillement** dans les plis du stratifié (Figure III.10) pour trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm) pour trois charment supposé (200MPa, 300MPa, et 400MPa). On remarque que la taille des zones qui concentrent l'endommagement sur les plis varie en fonction de la longueur de la fissure, en effet la taille de la zone endommagée varie proportionnellement avec la taille de la fissure et le chargement exercé.



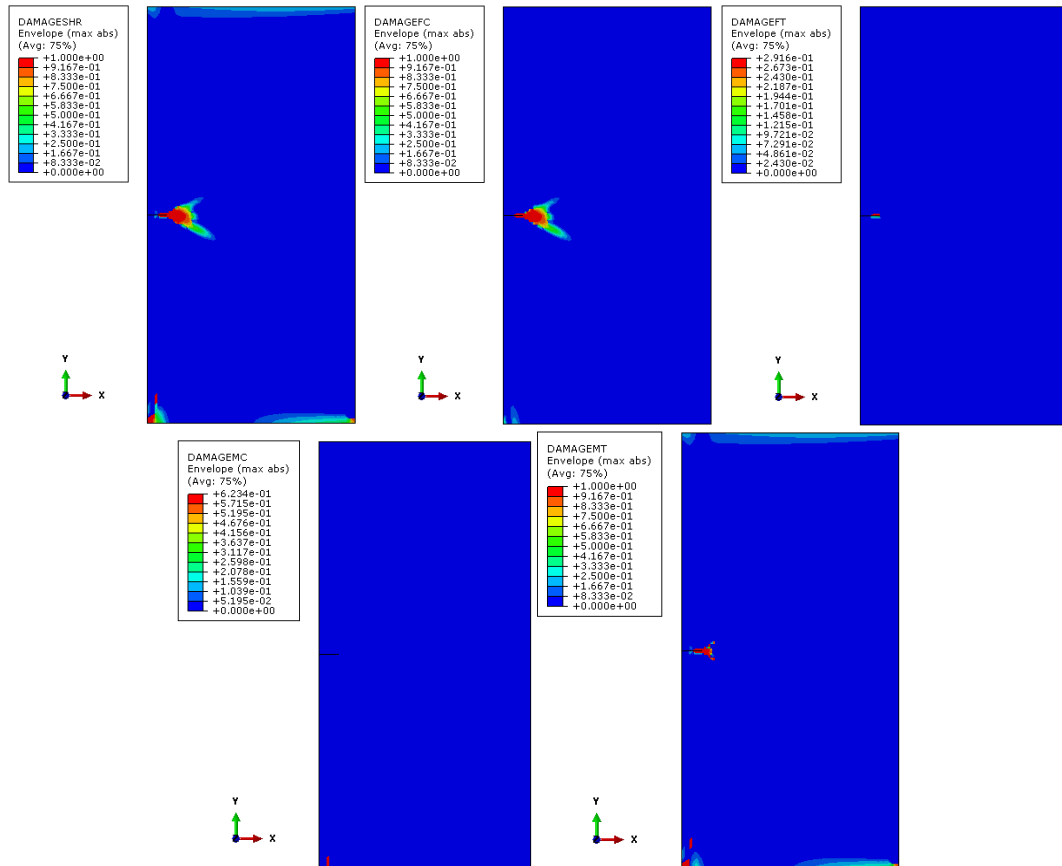
**Figure III.10** Distribution de l'endommagement par cisaillement " DAMAGESHR " pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm).

#### III.4.1. Distribution de l'endommagement de la plaque réparée:

La figure III-11 montre les zones endommagées **de la plaque réparée** où les fibres de la matrice sur les plis stratifiés sont étirées sous compression et en tension. La zone endommagée est située près de la fissure. Le graphique montre clairement la fiabilité du critère d'endommagement. La figure III-3 (a) montre la zone endommagée de la fibre en tension. Le comportement inverse a été constaté. En fait, les dommages sont plus prononcés sur le pli à  $0^\circ$ .

Cette série de cartographies montre l'état d'endommagement des fibres en compression dans les plis du stratifié (La figure III-3 (b)). On remarque que la taille des zones qui concentrent l'endommagement sur les plis de mêmes orientations est semblable. La taille des zones endommagées de la matrice en tension plus faible est représentée sur la figure III-3 (c). La taille des zones endommagées de la matrice en compression et fibre en tension est absente. Les zones les plus importantes sont celles sur les plis à  $0^\circ$ . La figure III-3 (b) représente les zones

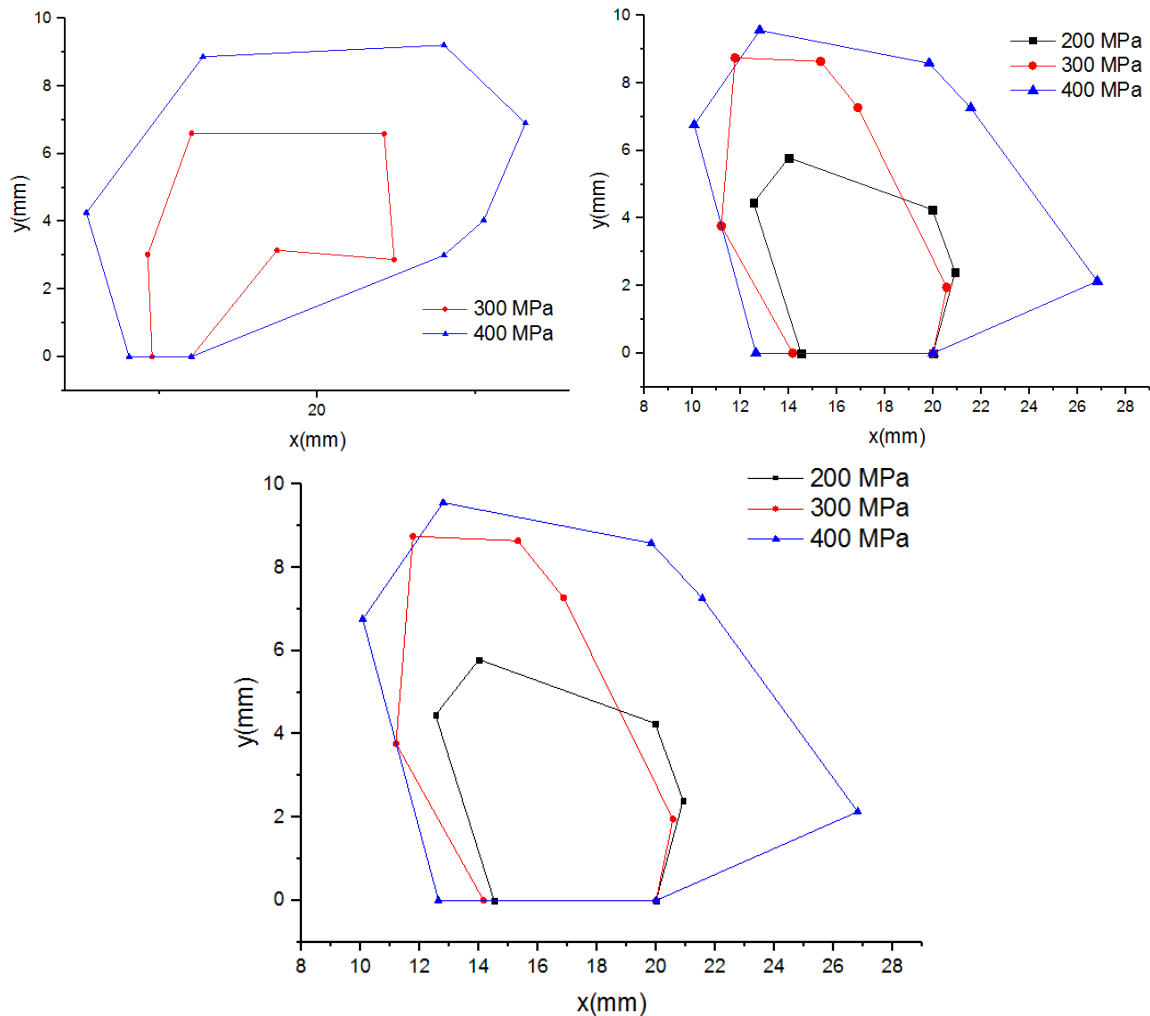
endommagées de la matrice en tension sur les plis du stratifié. les plis à 90° la taille des zones endommagées est plus étendus.



**Endommagement des fibres en compression DAMAGEFC :**

la figure suivante montre l'étendue de la zone endommagée des fibres en compression dans les unes plaque en composite réparé par patch en matériaux composites (**Figure III.**) pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm) et pour trois charment supposé (200MPa, 300MPa, et 400MPa) . On remarque une absence d'endommagement pour une fissure de longueur de 12 mm. on peut observer aussi que la taille des zones qui concentrent l'endommagement sur les plis varie en fonction de la longueur de la fissure, en effet la taille de la zone endommagée varie proportionnellement avec la taille de la fissure et le chargement exercé.





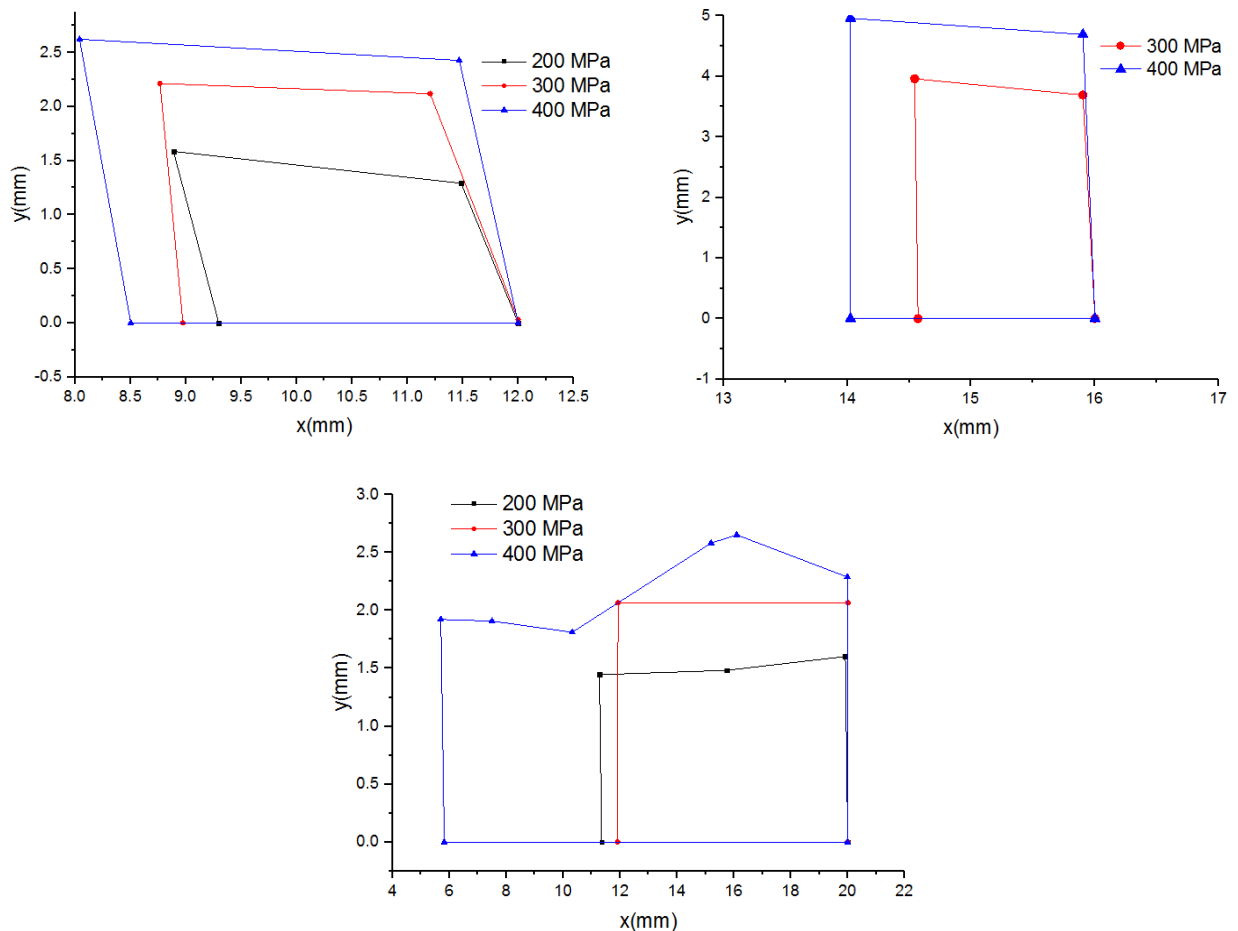
**Figure III.9** Distribution de l'endommagement en compression des fibres " DAMAGEFC" pour une plaque réparée pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm).

#### **Endommagement des fibres en tension DAMAGEFT:**

On remarque une absence d'endommagement des fibres en tension dans une plaque en composite réparé par patch en matériaux composites pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm) et pour les trois chargements supposés (200MPa, 300MPa, et 400MPa).

#### **Endommagement de la matrice en compression DAMAGEMC:**

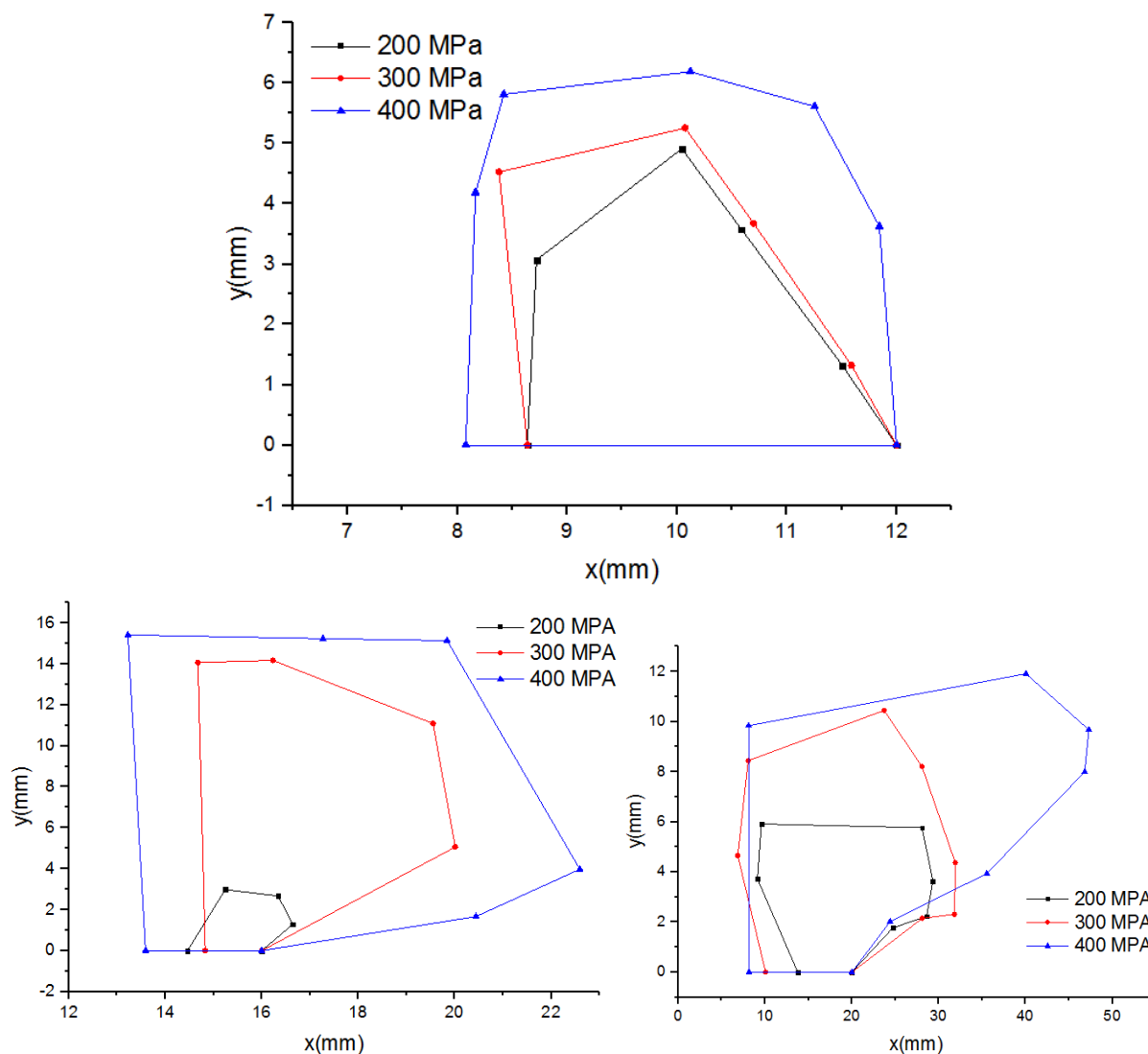
Les résultats de l'étude de l'impact relatifs à l'effet de la taille de la fissure sur l'endommagement en compression des fibres sont présentés dans la **Figure III.10**. Comme le montre cette figure, l'allure générale des contours de la zone endommagés varie en fonction de la taille de la fissure. On remarque une absence d'endommagement pour une fissure de longueur de 12 mm. On remarque aussi que le chargement a un effet peu remarquable sur le comportement des structures composites par rapport au plaque non réparée. En effet, il est à constater que plus le chargement applique et importante, plus la zone endommagé est importante.



**Figure III.10** Distribution de l'endommagement en compression de la matrice " DAMAGEFC" pour une plaque réparée pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm).

**Endommagement de la matrice en tension DAMAGEMT:**

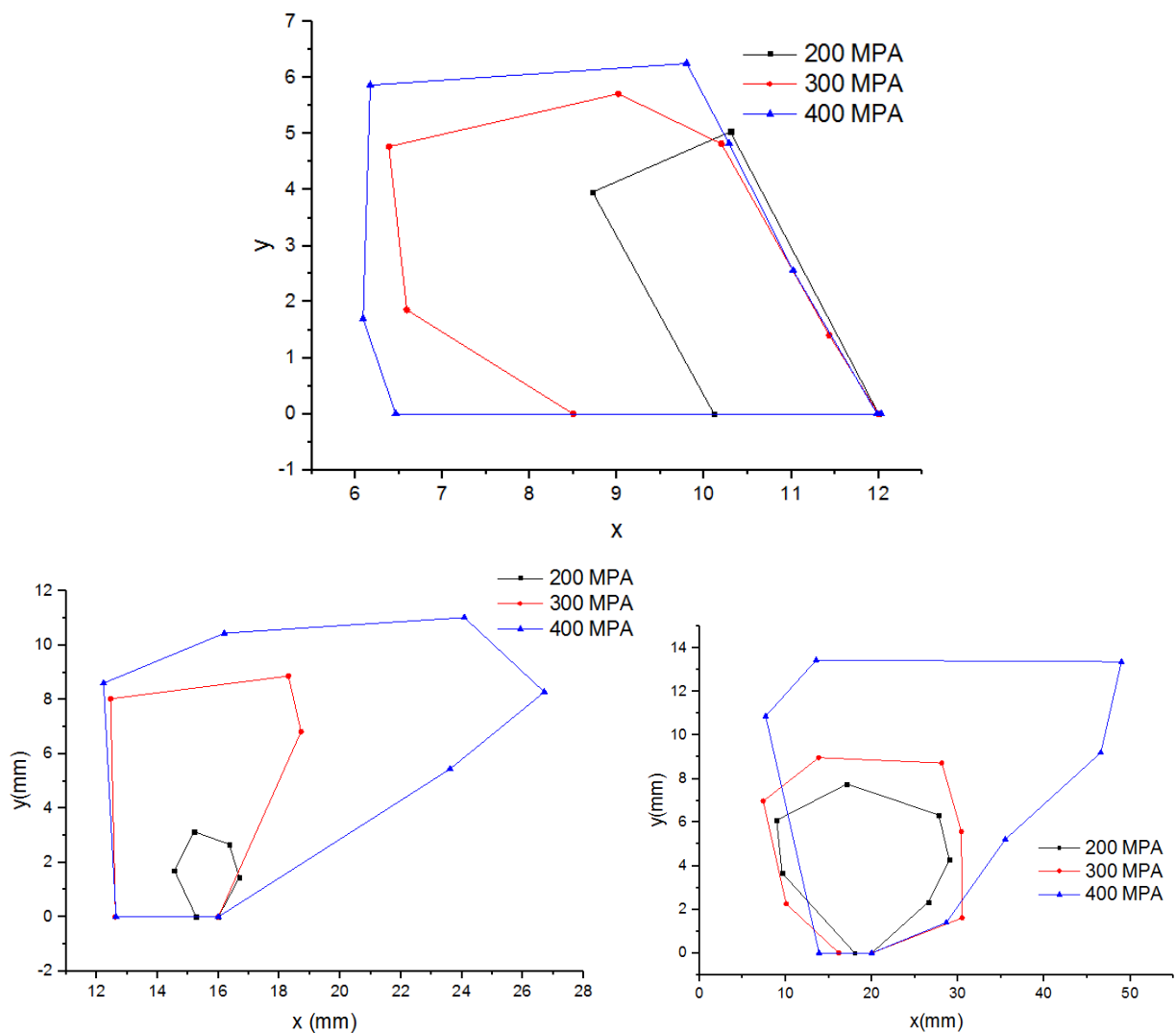
Les résultats de l'étude de l'impact relatifs à l'effet de la taille de la fissure sur l'endommagement en tension des fibres sont présentés dans la **Figure III.11**. Comme le montre cette figure, l'allure générale des contours de la zone endommagée varie en fonction de la taille de la fissure. On remarque aussi que le chargement a un effet remarquable sur le comportement des structures composites. En effet, il est à constater que plus le chargement appliqué est important, plus la zone endommagée est importante.



**Figure III.11** Distribution de l'endommagement de la matrice en tension " DAMAGEMT" pour une plaque réparée pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm).

**Endommagement par cisaillement " DAMAGESHR ":**

Cette série de cartographies montre l'étendue de la zone endommagée **par cisaillement** dans les plis du stratifié (Figure III.8) pour trois longueurs de fissure (8mm, 12mm, 16mm et 20mm) pour trois charment supposé (200MPa, 300MPa, et 400MPa) . On remarque que la taille des zones qui concentrent l'endommagement sur les plis varie en fonction de la longueur de la fissure, en effet la taille de la zone endommagée varie proportionnellement avec la taille de la fissure et le chargement exercé.



**Figure III.12** Distribution de l'endommagement par cisaillement " DAMAGESHR " pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm).

### III.6.Conclusion

Dans ce travail, nous avons traité la dégradation d'un stratifié croisé [0/-45/45/90]s par critère de HSHIN pour étudier la distribution de l'endommagement dans une plaque mince soumise à un effort de traction. Les paramètres géométriques tels que la taille et la fissure et la charge appliquée sont les variables de cette étude. Les principaux résultats de ces simulations sont résumés comme suit:

- Nous pouvons conclure que la dégradation des propriétés mécaniques du stratifié est principalement causée par les fissures transverses et l'initiation /développement des décohésions entre les couches désorientées (délaminages locaux).
- absence d'endommagement des fibres en tension dans une plaque en composite réparé par patch en matériaux composites pour les trois longueurs de fissure (12mm, 16mm et 20mm) et pour les trois chargements supposés (200MPa, 300MPa, et 400MPa) .

## Conclusion générale

---

Le travail que nous avons mené, nous a permis de traiter l'influence du patch en composite sur les valeurs des paramètres de rupture calculées pour une plaque sollicitée à une traction contenant une fissure latérale.

Sur la base des résultats de cette mémoire, les conclusions suivantes peuvent être tirées:

- La présence d'un patch réduit considérablement la concentration de contraintes qui peut retarder la naissance de la fissure et par la suite l'augmentation de la durée de vie de la structure en service.
- la distribution des contraintes dans les différents plis n'est pas identique quel que soit le type de la modification effectuée sur le patch.
- Le transfert de charge à travers l'adhésif est très important pour les différentes couches de patch
- Nous pouvons conclure que la dégradation des propriétés mécaniques du stratifié est principalement causée par les fissures transverses et l'initiation /développement des décohésions entre les couches désorientées (délaminages locaux).
- Une absence de l'endommagement des fibres en tension dans la plaque en composite réparé par patch en matériaux composites pour toute longueurs de fissure.

## Référence bibliographique

---

- [1] LAAZIZ. K, introduction aux modélisations et aux méthodes de calcul des matériaux composites, mémoire de magister, université des sciences et technologie d’Tizi-Ouzou, 2010
- [2] P. JACQUINET, Utilisation de matériaux composites, Ed. HERMES. Paris 1991
- [3] J-M. Berthelot. Matériaux composites. Editions Eyrolles, 2010
- [4] L. Gendre. Matériaux Composites et Structures Composites, thèse de doctorat, Université Paris-Saclay, 2011.
- [5] L. Gornet, Généralité sur les matériaux composites, thèse de doctorat ECN, Centre Nantes, 2011.
- [6] J-Marie BERTHLOT, Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures, 4eme édition, Ed TEC&DOC, Lavoisier, 2005
- [7] G. CHRETIEN. Matériaux composites à matrice organique, Technique et Documentation, Edition EYROLLES 1986
- [8] J-Paul BAILON ET J-M. DORLOT, Des matériaux, 3eme édition, école Polytechnique de Montréal, 2000
- [9] H.H. Kausch, N. Heymans, C.J. Plumer, P. Decroly, Matériaux polymères : propriétés mécaniques et physiques (Volume 14), Livre: Traité des Matériaux, juin 2001.
- [10] F. Belhadj Ahmed, Etude de la diffusion d’un matériau composite « résine époxy », Thèse de doctorat, Université d’Oran, 2016.
- [11] Pic, Aurélie, « Les matériaux élastomériques». L’Orthodontie Française 80, 2009.
- [12] L. Hubert, Étude des COV issus de la dégradation thermique et oxydative de matériaux polymères, Thèse de doctorat, Université Paris-sud, p12, 2014.
- [13] J-Paul BAILON ET J-M. DORLOT, Des matériaux, 3eme édition, école Polytechnique de Montréal, 2000
- [14] L. Berreur, B. Maillard, S. Nösperger, L’industrie Française des Matériaux Composites, Nodal Consultants, p17, 2002.
- [15] D. Gay, Matériaux composites, Lavoisier 5eme édition, p19-260, 2005.

## Référence bibliographique

---

- [16] J-M. Berthelot, Matériaux composites comportement mécanique et analyse des structures, 4eme édition, p1-63, Lavoisier, 2005.
- [17] V.V.D. Thi, Matériaux composites fibres naturelles/polymère biodégradables ou non, thèse de doctorat, Université de Grenoble, 2011.
- [18] F. Michaud, Rhéologie de panneaux composites bois/thermoplastiques sous chargement thermomécanique : aptitude au post formage, thèse de doctorat, Université Bordeaux I, 2003.
- [19] A. Stanojlovic-Davidovic, Matériaux biodégradables à base d'amidon expansé renforcé de fibres naturelles : Application à l'emballage alimentaire, thèse de doctorat, Université du Sud Toulon-Var, 2006.
- [20] G.G. Giménez, « Aportaciones a la Química del Esparto Español », Anales de l'Universidad de Murcia. Vol 13, N° 1. Curso 1954-55.
- [21] P. Laumont, A. Berbigier, L'Alfa et l'Expérimentation alfatière en Algérie. Journal d'Agriculture Traditionnelle et de Botanique Appliquée, 33:125-40, 1953
- [22] A. Maghchiche, A. Haouam, B. Immirzi, Extraction and characterization of Algerian Alfa grass short fibers (Stipa Tenacissima). Chemistry & Chemical Technology, 339-44.2013.
- [23] S.B. Brahim, R.B. Cheikh, Influence of fiber orientation and volume fraction on the tensile properties of unidirectional Alfa-polyester composite, Composites Science and Technology, 67,140-7, 2007.
- [24] IKOP<sup>o</sup>+ O. Pierard, C. Gonzalez, J. Segurado, J. LLorca, I. Doghri, 2007. Micromechanics of elasto-plastic materials reinforced with ellipsoidal inclusions. International Journal of Solids and Structures 44, 6945-6962.
- [25] Stephen W. Tsai – Introduction to Composite Materials . A Technomic Publishing Company book Includes index p.453. Congress Card n° 80-51965 Lancaster, Pennsylvania 17604 U.S.
- [26] J. Chaboche, P. Suquet, 1998. Endommagement, interfaces. Ecole d'été méthodes d'homogénéisation en mécanique des Matériaux. La Londe-les-Maures.
- [27] I. Gitman, H. Askes, L. Sluys, 2007. Representative volume: Existence and size determination. Engineering fracture mechanics 74, 2518–2534. A 1980



## Référence bibliographique

---

- [28]Zairi imad « étude du comportement mécanique d'un matériau composite  $[\theta_m/90_n]_s$  fissuré et soumis à des conditions hygrothermiques » mémoire de mestre, université Saad dahlab de blida, 2015
- [29] Melle Zeddour Mohamed Brahim Zahera « PREDICTION DES MECANISMES D'ENDOMMAGEMENT DANS UN MATERIAU COMPOSITE » thèse doctorat, université Oran Mohamed Boudiaf, 15/05/2018
- [30] Juan Pedro Berro Ramirez « Caractérisation et modélisation de l'endommagement des composites bobines. Application a la prédiction de l'eclatement des réservoirs bobines hyperbares. » THESE doctorat, L'ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE MECANIQUE ET D'AEROTECHNIQUE 28/11/2013
- [31]Sébastien Blassiau «< Modélisation des phénomènes microstructuraux au sein d'un composite unidirectionnel Carbone/époxy et prédiction de durée de vie » Thèse doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris (2005).
- [32] H. OSMANI << Rupture des composites céramiques- céramique à fibres>> thèse de Doctorat, INSA de lyon, 1989, 226 p.
- [33]D- FRANCOIS << strenght and modulus with short random fibers: part 2>>, journal of materials. Science 20, 1985, PP: 431- 437
- [34] ZOUAMBI, L., FEKIRINI, H., & MAHMOUDI, N. Critère de Hashin sur l'initiation de l'endommagement pour des composites fibreux.
- [35] Stephanie Miot. Tutorial 11b: "Composites, Modelling ply failure". Simulia.  
[www.simuleon.nl](http://www.simuleon.nl)
- [35] ABAQUS. Ver 6-17. (2017), User guide, Cornell University.
- [36] Osher S, Sethian J. (1988). "Fronts propagating with curative dependent speed, algorithms based on Hamilton-Jacobi formulations". J comput phys; 71(1):12-49.