

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE**  
**UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA**

**DOMAINE : Science Technologie**  
**FILIERE : GENIE MECANIQUE**  
**OPTION : Modélisation Numérique**



**DOMAINE : Science Technologie**  
**FILIERE : GENIE MECANIQUE**  
**OPTION : Modélisation Numérique**

**Mémoire présenté pour l'obtention**  
**Du diplôme de Master Académique**

**Par: Ferahtia salah eddine**

**Seraiche farouk**

**Intitulé**

**Modélisation et simulation du comportement**  
**mécanique des matériaux composites**  
**bidimensionnelle**

**Soutenu devant le jury composé de:**

- |                           |                          |                   |
|---------------------------|--------------------------|-------------------|
| <b>- Zemmamouche R</b>    | <b>Université M'sila</b> | <b>Président</b>  |
| <b>- Benhamadouche L</b>  | <b>Université M'sila</b> | <b>Rapporteur</b> |
| <b>- Latrache mohamed</b> | <b>Université M'sila</b> | <b>Examineur</b>  |

**Année universitaire : 2016 /2017**

## *Remerciement*

*Tout d'abord je remercie dieu le tout puissant qui m'a donné la volonté, le courage et l'audace pour réaliser ce modeste travail.*

*Je remercie vivement, Mon encadreur benhamadouche L pour avoir assuré la direction de ce travail, et pour m'avoir apporté rigueur scientifique nécessaire à son bon déroulement, Ses compétences et ses bonnes directives*

*m'ont aidé à achever ce mémoire de master. Merci aussi pour son attention et ses*

*exigences pendant la période de rédaction du mémoire*

*Je remercie également monsieur le président de jury Zemmamouche R et le examinateur Monsieur Latrache mohamed d'avoir acceptées d'examiner mon travail.*

*Je remercie les enseignants de la faculté de technologie de M'sila, et en particulier les enseignants de département de génie mécanique.*

*Mes vifs remerciements s'adressent également à toute personne qui a contribué à ma formation ou participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.*

# Sommaire

## Chapitre01

### Matériaux composites

I.1. INTRODUCTION .....	3
I.2. DEFINITION .....	3
I.3. CLASSIFICATION DES MATERIAUX COMPOSITES .....	4
I. 3. 1. Classement suivant la nature des constituants .....	4
I. 3. 2. Classement suivant la morphologie .....	5
I.4. CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES .....	5
I. 4. 1. Matrice .....	5
I. 4. 2. Renfort .....	7
I.5. PRESENTATION COMMERCIALES DES RENFORTS FIBREUX.....	8
1) Nappes unidirectionnelles :.....	9
2) Tissus .....	9
3) Feutres ou mats : .....	10
I.6. MISE EN OEUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES .....	10
I. 6. 1. Moulages sans pression.....	10
I. 6. 2. Moulage sous vide .....	10
I. 6. 3. Moulage par compression .....	11
I. 6. 4. Moulage en continu.....	12
I. 6. 5. Moulage par pultrusion .....	13
I.7. ARCHITECTURE DES MATÉRIAUX COMPOSITES.....	14
I. 7. 1. Stratifiés .....	14
I. 7. 2. Les matériaux sandwichs .....	15
I. 7. 3. Autres architectures .....	17
I.8. Secteurs d'application des composites.....	17
I. 8. 1. Construction aéronautique .....	17
I. 8. 2. Construction automobile.....	18
I. 8. 3. Secteur du bâtiment.....	18

## **Chapitre 02**

### **Mécanisme d'endommagement des matériaux composites**

II.1.Introduction .....	20
II.2.Caractéristiques des mécanismes d'endommagement .....	21
II. 2. 1. Fissuration matricielle .....	21
II. 2. 2. Décohésion fibre matrice .....	21
II. 2. 3. Rupture des fibres .....	22
II. 2. 4. Délaminage.....	22
II.3.Influence de la direction de sollicitation sur les modes de rupture .....	23
II.4.MESURE DE L'ENDOMMAGEMENT : .....	25

## **Chapitre 03**

### **Modalisation des comportement mécanique du matériaux composites**

III. INTRODUCTION.....	27
III.1.Principes fondamentaux de la modélisation des stratifiés composites.....	27
III.2.MECANIQUE D'ENDOMMAGEMENT .....	28
III.2.1VARIABLE D'ENDOMMAGEMENT .....	28
III. 2. 2. CONTRAINTE EFFECTIVE .....	29
III. 2. 3. Principe d'équivalence en déformation.....	30
III.3. APPROCHES FRAGILES DE LA MODELISATION DE L'ENDOMMAGEMENT .....	31
III. 3. 1. Critère de la contrainte .....	32
III. 3. 2 Critère de la déformation maximale.....	32
III. 3. 3 Les critères énergétiques .....	33
III.4.APPROCHES PROGRESSIVES DE LA MODELISATION DE L'ENDOMMAGEMENT .....	35
III. 4. 1. Modélisations micromécaniques .....	36
1 Champ de contrainte.....	36
III. 4. 2. Modélisations mésomécaniques .....	37

1 Modèle de pli.....	38
2 Modélisation de l'interface .....	39

## Chapitre 04

### Simulation numérique

IV.1. INTRODUCTION : .....	40
IV.2. Présentation de ANSYS : .....	40
IV.3 Modélisation par ANSYS : .....	41
IV.4. Simulation par ANSYS apdl : .....	42
IV.6. Le maillage.....	43
IV. 6. 1. Choix Du Type De Maillage.....	44
a. Maillage structuré (quadra/hexa) .....	44
a. Maillage non structuré .....	44
b. Maillage hybride .....	45
IV. 6. 2. Modèle physique .....	45
IV. 6. 3. Géométrie.....	46
IV. 6. 3. Déclaration des couches.....	47
IV. 6. 4. Les couches de composite dans l'élément 409 .....	48
IV. 6. 5. L'élément SHELL181 (Bibliothèque de l'ANSYS) .....	49
IV. 6. 6. Propriétés mécanique des matériaux composites.....	50
IV. 6. 7. Maillage .....	51
IV. 6. 8. Conditions aux limites .....	52
IV. 6. 9. Application de la charge sur l'éprouvette .....	53
IV. 6. 10. Solution .....	54
Contrainte selon y : .....	57
Déformation selon y : .....	58
Conclusion.....	58
Conclusion générale	
Reference bibliographique	
résumé	

## **Liste des figures**

### **Chapitre I**

<b>Figure I.1 : Matériau composite.....</b>	<b>3</b>
<b>Figure I.2: types de composites et leurs compositions.....</b>	<b>4</b>
<b>Figure I.3 : Classification des matériaux composites .....</b>	<b>5</b>
<b>Figure I.4 : Les différents types des matrices.....</b>	<b>6</b>
<b>Figure I.5 Principaux types de tissages.....</b>	<b>9</b>
<b>Figure I.6 : Moulage sous vide. ....</b>	<b>11</b>
<b>Figure I.7 : Moulage par injection de résine.....</b>	<b>11</b>
<b>Figure I.8 : Principe du moulage par compression à cha.....</b>	<b>12</b>
<b>Figure I.9 : Moulage en continu de plaques.....</b>	<b>12</b>
<b>Figure I.10 Moulage en continu de panneaux ondulés.....</b>	<b>13</b>
<b>Figure I.11 : Moulage par pultrusion.....</b>	<b>13</b>
<b>Figure I.12 : Constitution d'un stratifié.....</b>	<b>14</b>
<b>Figure I.13 : Désignation d'un stratifié.....</b>	<b>15</b>
<b>Figure I.14 : Convention de signe pour la désignation des stratifiés.....</b>	<b>15</b>
<b>Figure I.15 : Matériau sandwich.....</b>	<b>16</b>
<b>Figure I.16 : Matériaux sandwiches à âmes pleines.....</b>	<b>16</b>
<b>Figure I.17 : Matériaux sandwiches à âmes creuses.....</b>	<b>17</b>

### **Chapitre II**

<b>Figure II.1: Principaux endommagements rencontrés dans un matériau composite.....</b>	<b>20</b>
<b>Figure II.2: Images en tomographie aux rayons X de fissuration transverse de la matrice..</b>	<b>21</b>
<b>Figure II.3: Micrographies des faciès de rupture d'un composite polyester renforcé (a) par un tissu de jute non traité, (b) par un tissu de jute traité par 1% de NaOH .....</b>	<b>22</b>
<b>Figure II.4: Pull-out des fibres, rupture des fibres et délaminage dans la surface de rupture après (a) rupture en traction (b) rupture en flexion (c) rupture par'impact.....</b>	<b>23</b>
<b>Figure II.5: Mécanisme d'endommagement et surface de rupture d'un stratifié UD présentant une faible adhésion fibre/matrice .....</b>	<b>24</b>
<b>Figure II.6: Représentation graphique des mécanismes d'endommagement de composite à matrice TP renforcée par des fibres de carbone soumis à une sollicitation en traction .....</b>	<b>25</b>

## *Chapitre III*

<b>Figure III. 1 :</b> Les différentes sections dans une éprouvette endommagée.....	<b>29</b>
<b>Figure III. 2 :</b> Contrainte effective et le principe d'équivalence en déformations.....	<b>31</b>
<b>Figure III. 3 :</b> Quatre modes de rupture du critère Hashin; (A) Traction des fibres, (B) Compression des fibres, (C) Traction/cisaillement de la matrice et (D) Compression de la matrice.....	<b>33</b>
<b>Figure.III.4-</b> Méso-constituants d'un composite stratifié et repères associés.....	<b>38</b>

## *Chapitre IV*

<b>Figure IV.1:</b> Types des éléments de maillage.....	<b>43</b>
<b>Figure IV. 2 :</b> Géométrie mono-bloc.....	<b>44</b>
<b>Figure IV. 3 :</b> Géométrie Multi-bloc.....	<b>44</b>
<b>Figure IV. 4 :</b> Maillage non structure.....	<b>45</b>
<b>Figure IV.5.</b> Modèle physique de l'éprouvette.....	<b>46</b>
<b>Figure IV.6.</b> la Géométrie par de l'éprouvette .....	<b>46</b>
<b>Figure IV.7.</b> Déclaration des couches.....	<b>47</b>
<b>Figure .IV.8.</b> Les couches de composite dans l'élément 409.....	<b>48</b>
<b>Figure. IV.9.</b> L'élément SHELL181.....	<b>49</b>
<b>Figure. IV.10</b> Propriétés mécanique des matériaux.....	<b>50</b>
<b>Figure IV.11.</b> maillage de l'éprouvette.....	<b>51</b>
<b>FigureIV.12..</b> Conditions aux limites.....	<b>52</b>
<b>FigureIV.13</b> Application de la charge sur l'éprouvette.....	<b>53</b>
<b>FigureIV.14</b> Analyse statique.....	<b>54</b>
<b>Figure IV.15</b> Lancement des calculs.....	<b>55</b>
<b>Figure IV16</b> la comparaison entre l'état initiale et l'état finale de l'essai.....	<b>56</b>
<b>Figure IV.17.</b> Contrainte selon l'axe (UY).....	<b>57</b>
<b>Figure IV.18.</b> Déformation selon l'axe (UY).....	<b>58</b>

---

## *Introduction Générale*

L'utilisation des matériaux composites dans les applications industrielles tend à augmenter depuis plusieurs années, et cela dans toutes les industries : automobile, aéronautique, spatiale, marine, ferroviaire ou encore sportive, médicale et nucléaire. Les performances en termes de gain massique, de propriétés mécaniques et de fabrication offrent de nombreuses possibilités d'applications, parfois très complexes. Les activités de recherche propres à ces matériaux sont également très présentes dans les laboratoires du monde entier pour permettre de mieux comprendre le comportement des structures composites à travers de nombreux thèmes d'études, dans le but d'optimiser leur utilisation et leur adéquation avec l'application industrielle. Parmi eux, on peut citer les travaux liés à l'analyse du comportement mécanique des structures hétérogènes et multicouches. [1] Les premiers développements effectués sur ce sujet, qui remontent aux années 1950, ont permis de proposer des théories analytiques pour le dimensionnement des structures composites. Certaines d'entre elles sont actuellement pleinement reconnues et utilisées industriellement par l'intermédiaire des outils de simulation numérique commerciaux. L'analyse du comportement mécanique continue d'être étudiée et enrichie de manière à faire progresser la maîtrise des matériaux composites dans le contexte industriel.[1]

Durant ces dernières décennies, Les fibres naturelles ont réussi acquérir un grand intérêt à l'échelle académique et industrielle. Ces fibres sont résistantes, possèdent des densités relativement basses, ont de faibles coûts et proviennent de ressources renouvelables abondantes. Plusieurs techniques classiques et modernes peuvent être utilisées pour la mise en œuvre des matériaux composites à base de fibres végétales

Le deuxième chapitre est consacré d'une part à l'analyse des principaux mécanismes d'endommagement rencontrés et observés dans ce type des matériaux, et d'autre part à la présentation de comportement et la résistance d'un stratifié vis-à-vis un chargement mécanique en traction simple.

Dans Le troisième chapitre fait revenir de manière très synthétique par une revue bibliographique sur les différentes approches de la modélisation après une présentation du problème physique des mécanismes d'endommagement dans le deuxième chapitre . Les mécanismes physiques d'endommagement et leurs principales conséquences macroscopiques ont fait l'objet d'un nombre important d'études théoriques pour

---

objectif de corroborer les observations expérimentales. La variété des approches existantes reflète la complexité de l'architecture du matériau. On distingue deux types d'approches, des approches fragiles reposent sur des critères de rupture, et des approches progressives reposent sur lois d'initiation et d'évolution d'endommagement

Dans le quatrième chapitre il y a une simulation numérique d'une plaque en composite par un logiciel conçu spécialement pour étudier le comportement mécanique de toute structure, La simulation permet d'une part de comprendre les phénomènes internes en accédant aux mécanismes internes qui les régissent et d'autre part d'appliquer les connaissances des structures dans des nouvelles configurations. La simulation est un outil qui non seulement remplace des expériences qui seraient lentes et fatigantes au banc d'essai mais encore élargit le champ d'action du constructeur en découplant des variables qui sont indissolublement liées dans les structures

# ***CHAPITRE I***

## ***Matériaux composites***

---

## I.1. INTRODUCTION :

L'utilisation des matériaux composites s'est imposée depuis ces dernières années dans différents secteurs industriels. Leurs principales applications se trouvent dans le transport aérien, maritime et ferroviaire, les bâtiments, l'aérospatial, ainsi que les sports et les loisirs. Les raisons d'un tel succès sont attribuées à leurs qualités de réduction des coûts d'exploitation, telles que leur bonne résistance à la fatigue et à la corrosion, leur souplesse de forme et surtout leur faible masse qui permet un allègement conséquent des structures et leurs caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Cependant, au cours de leur utilisation, les matériaux composites subissent des agressions à l'origine d'une large variété d'endommagement: des défauts dus à l'exposition à l'humidité, à des cycles de température, à la fatigue mécanique ou à des impacts. Dans la perspective de quantifier l'endommagement des matériaux composites et d'identifier les différents mécanismes sources, les méthodes de contrôle non destructif (CND) des matériaux composites, depuis leur polymérisation jusqu'à la fin de leur cycle de vie, sont nécessaires. [1]

## I.2. DEFINITION :

Un matériau composite peut être défini d'une manière générale comme l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux, l'assemblage final ayant des propriétés supérieures aux propriétés de chacun des matériaux constitutifs. On appelle maintenant de façon courante "matériaux composites" des arrangements de fibres, les **renforts** qui sont noyés dans une **matrice** (**Figure I. 1**) dont la résistance mécanique est beaucoup plus faible. La matrice assure la cohésion et l'orientation des fibres, elle permet également de transmettre les sollicitations auxquelles sont soumises les pièces. Les matériaux ainsi obtenus sont très *hétérogènes* et *anisotropes*. [2,3]

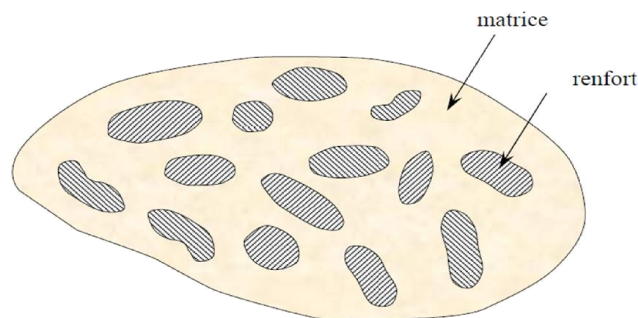


Figure I. 1 .Matériau composite.

Il faut différencier *charges* et *renforts*. Les charges, sous forme d'éléments fragmentaires, de poudres ou liquide, modifient une propriété de la matière à laquelle on l'ajoute (par exemple la tenue aux chocs, la résistance aux UV, le comportement au feu...). Les renforts, sous forme de fibres, contribuent uniquement à améliorer la résistance mécanique et la rigidité de la pièce dans laquelle ils sont incorporés.

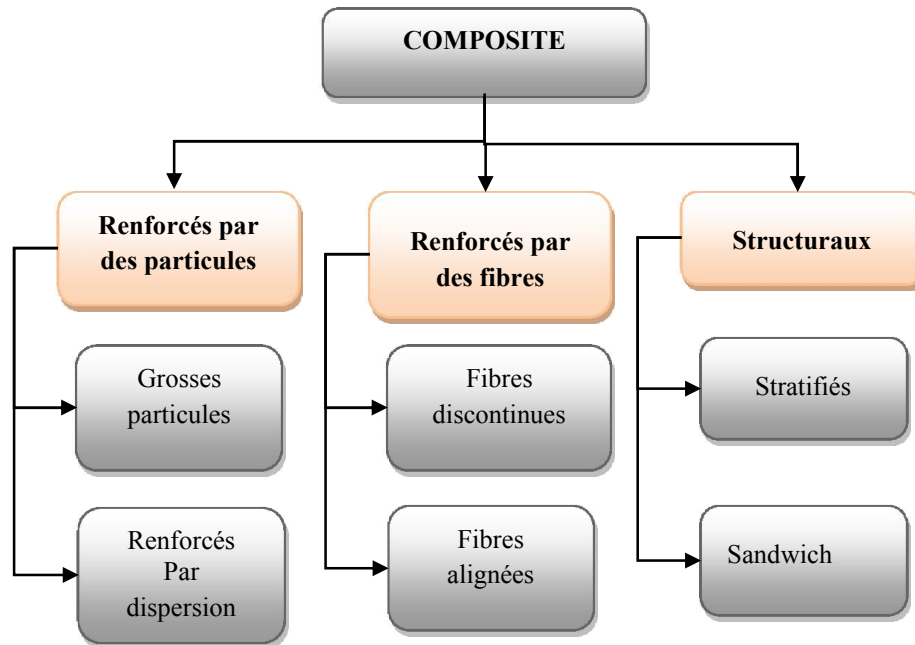


Figure I. 2. types de composites et leurs compositions.

### I.3. CLASSIFICATION DES MATERIAUX COMPOSITES :

La classification des composites peut être effectuée selon la forme des composants ou suivant leurs natures [4, 5].

#### I. 3. 1. Classement suivant la nature des constituants

✓ *Composites à matrice organique* : (résine, charges) avec :

- Fibres minérales : verre, carbone, etc. ;
- Fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc. ;
- Fibres métalliques : bore, aluminium, etc. ;

✓ *Composites à matrice métallique* : (alliages légers et ultra-légers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :

- Fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC) ;
- Fibres métalliques : bore ;

- Fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BSiC).
- ✓ **Composites à matrice minérale : (céramique), avec :**
  - Fibres métalliques : bore ;
  - Particules métalliques : cermets ;
  - Particules minérales : carbures, nitrures, oxydes réfractaires.

### I. 3. 2. Classement suivant la morphologie(Fig. I. 3) :

✓ **Composites à 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.

✓ **Composites à de paillettes** : Les paillettes ont une dimension très faible par rapport aux autres dimensions. La dispersion de ces "particules minces" est généralement aléatoire. Cependant, les paillettes peuvent être rangées parallèlement l'une à l'autre afin d'avoir des propriétés plus uniformes dans le plan.

✓ **Composites à 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).

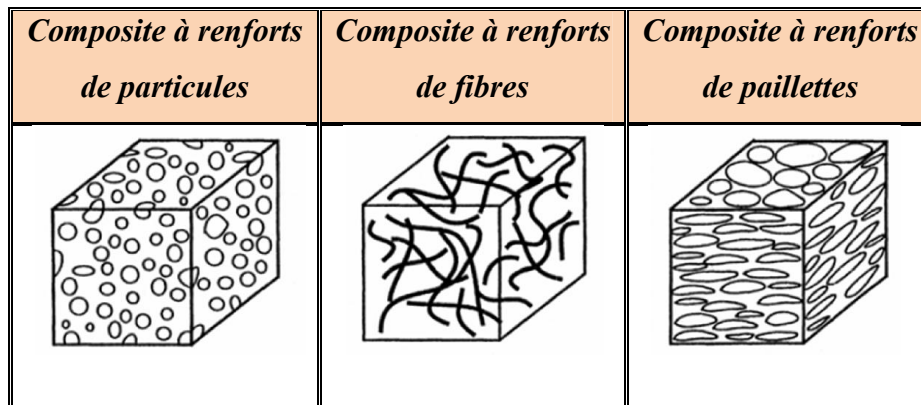


Figure I. 3. Classification des matériaux composites.

## I.4. CONSTITUANTS DES MATERIAUX COMPOSITES :

### I. 4. 1. Matrice

La matrice est la phase continue dont les fonctions sont [6] :

- ✓ De réaliser la liaison entre les renforts de manière à répartir les sollicitations et ainsi de prévenir les ruptures catastrophiques.
- ✓ D'assurer la protection de ces renforts vis-à-vis des agents agressifs.

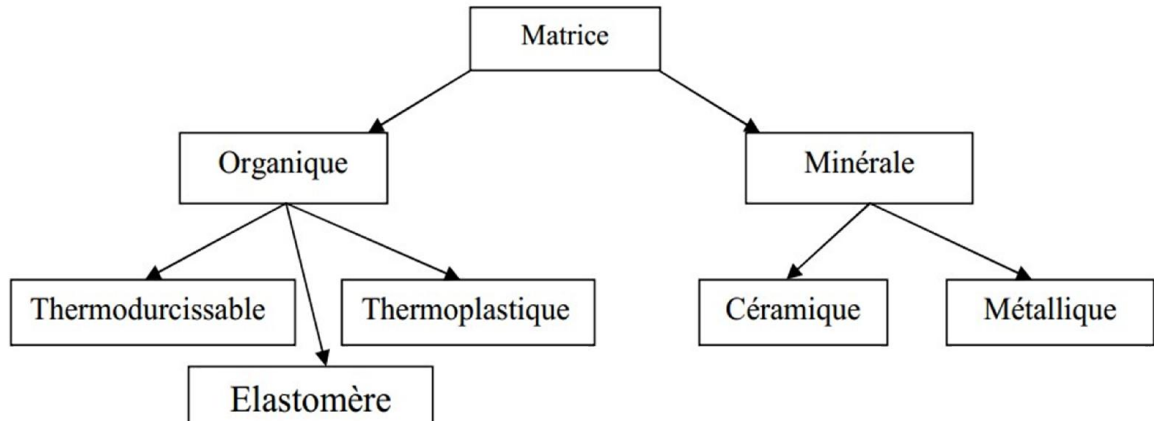


Figure I. 4 Les différents types des matrices [6]

- ✓ De donner la forme à la pièce et garantir ses caractéristiques géométriques.

Les matrices utilisées dans les matériaux composites se divisent en deux grandes familles : les matrices organiques et les matrices inorganiques (minérales). La figure. I. 4 présente les types des matrices.

Les matrices les plus employées sont les matrices thermodurcissables et thermoplastiques.

**a) Matrices thermoplastiques :**

Les matrices ou les résines thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux [7].

<b>Avantages</b>	<b>inconvénients</b>
-Mise en œuvre rapide -Possibilité de retansformation -Meilleure ténacité	-Une faible tenue en température -Peu de résistance aux solvants

**b) Matrices thermodurcissables :**

Ces résines possèdent la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à l'état solide [8] ; elles durcissent après un cycle de chauffage appelé "cycle de polymérisation" ou "cycle de réticulation".

Les résines thermodurcissables principalement utilisées dans la fabrication des matériaux composites sont :

- **Résine polyester** : présente un bon accrochage sur les fibres, un prix bas, mais un retrait important et une tenue réduite à la chaleur humide.
- **Résine phénolique** : ayant de moins bonnes propriétés mécaniques que les résines époxydes, elle n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis-à-vis de tenu au feu.
- **Résine polyamide** : d'un emploi relativement difficile et cher, elle a l'avantage de garder des bonnes caractéristiques sur une large plage de température (de -100 à +260°C).
- **Résine époxyde** : les résines époxydes se présentent sous la forme de plusieurs ingrédients à mélanger.

Le **Tableau.1.1** donne une comparaison entre les différentes résines.

	<b>Polyesters</b>	<b>Phénoliques</b>	<b>Epoxydes</b>	<b>Polyamides</b>
<b><i>Caractéristiques Mécanique</i></b>	Moyennes	Faibles	Très bonnes	Excellentes
<b><i>Tenue aux chocs</i></b>	Très bonne	Très faible	Bonne	Très bonne
<b><i>Tenue en fatigue</i></b>	Faible	Faible	Moyenne	Bonne
<b><i>Pouvoir adhésif</i></b>	Moyen	Moyen	Très bon	Très bon
<b><i>Température Maxi d'utilisation</i></b>	140°C	130°C	190°C	260°C
<b><i>Tenue au feu</i></b>	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
<b><i>Retrait</i></b>	Important	Faible	Très faible	Très faible
<b><i>Durée de polymérisation</i></b>	Courte	Courte	longue	Moyenne
<b><i>Mise en œuvre</i></b>	Très facile	Difficile	Facile	Difficile

**Tab. 1. 1 : Tableau comparatif entre les résines thermodurcissables [9]**

#### **I. 4. 2. Renfort :**

Le renfort est le constituant qui confère au composite ses caractéristiques mécaniques : la rigidité, la résistance à la rupture, la dureté. Les caractéristiques recherchées pour les renforts sont de propriétés mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec les résines, une facilité de mise en œuvre, un faible cout.

Il existe un grand nombre de renforts sous forme de fibres que l'on peut diviser en quatre grandes catégories [10] :

✓ **Les fibres naturelles** : il s'agit essentiellement de fibres végétales (lin, chanvre, Sisal, jute, ect....) ou animales (poiles et la soie de sécrétion) ;

✓ **Les fibres artificielles** : elles sont obtenues après dissolution de matières naturelles et filage de la solution par un procédé d'extrusion. Les fibres les plus utilisées sont : les fibres de viscose haute ténacité ; les fibres d'alginate et les fibres de chitosane.

✓ **Les fibres synthétiques** : ces fibres sont obtenues par filage d'un polymère synthétique et mise en œuvre à partir d'un procédé d'extrusion/filage par voie fondu ou solvant. Les principales variétés sont : polyamides, polyesters polyoléfines, chlorofibres, fibres de PVA et les thermoplastiques hautes performances.

### 1) Fibres organiques à haute performance

(a) Mécanique : para-aramides (Kevlar, Twaron), para-polyéthylène haute ténacité ;

(b) Thermique : méta-aramide (Nomex), polyamide-imide (Kermel), copolyimide

(c) Mécanique et thermique : Zylon, M5.

### 2) Fibres inorganiques

- Fibres de verre.

- Fibres de basalte (issues des roches volcaniques).

- Fibres céramiques haute température.

- Fibres de carbone.

- Fibres métalliques.

## I.5. PRESENTATION COMMERCIALES DES RENFORTS FIBREUX

**a) Fibres discontinues** : Des fibres courtes ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écailles ou de poudres), améliorent le comportement mécanique du matériau composé de la matrice seule, mais celle-ci reste l'élément de base et on obtient un polymère renforcé.

**b) Fibres continues** : Celles-ci jouent un rôle principal dans le comportement mécanique du composite, la fonction de la matrice étant, en particulier, d'empêcher les déplacements relatifs des fibres continues. C'est ce type de composites qui est utilisé dans les applications structurelles fortement sollicitées [11].

Les renforts continus se trouvent sous plusieurs formes commerciales :

## 1) Nappes unidirectionnelles :

Elles sont constituées de fibres parallèles entre elles orientées dans une seule direction.

La cohésion transversale est assurée :

- Pour les préimprégnés, par la résine.
- Pour les nappes sèches :
  - Soit par un ruban adhésif déposé suivant un pas déterminé
  - Soit par un léger tissage, on obtient un tissu unidirectionnel dans lequel

La masse de fibres dans le sens chaîne présente plus de 70% de la masse totale.

## 2) Tissus :

Les fibres (monofilaments) sont en général rassemblées en mèche (ou fil), éventuellement réunies par torsion. Le renfort tissé est constitué par l'entrecroisement de fils de chaîne (suivant la direction d'enroulement sur son support) et des fils de trame (déposés perpendiculairement). Un tissu est équilibré si le poids de chaîne est égal au poids de trame.

Les armures les plus courantes utilisées sont les suivantes :

- **Taffetas** : dans lequel les fibres de chaîne et trame s'entrecroisent alternativement, on obtient un tissu peu déformable ayant une planéité excellente (Fig. I. 5a).
- **Le sergé** : est intermédiaire de taffetas et de satin. Un fil de chaîne passe sous plusieurs fils de trame successif puis en dessus d'un fil de trame, en suivant un schéma régulier. Ce type d'armure produit un motif diagonal, ces tissus sont à la fois denses et souples (Fig. I. 5b).
- **Le satin** : le fil de chaîne flotte au-dessus de plusieurs fils de trame, cette forme est la plus déformable : elle est utilisée pour réaliser des formes complexes. Les satins utilisés pour les composites sont les satins de 5 et 8 (Fig. I. 5c).

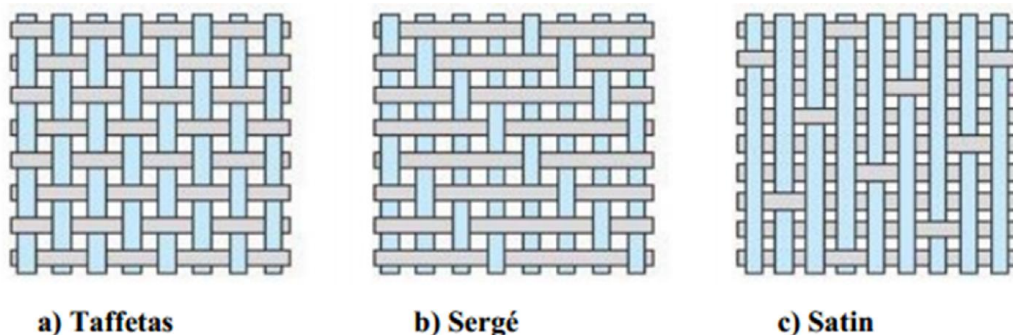


Figure I. 5 Principaux types de tissages

### 3) Feutres ou mats :

Nous appelons feutre ou mat un tapis de fibres, coupées ou non, aléatoirement orientées dans un plan. tels quels ou sous forme préimprégnés.

Les fibres doivent être liées entre elles : soit chimiquement par le dépôt à faible taux de colles, soit mécaniquement par aiguilletage pour conserver leur comportement en feuilles lors de leur mise en œuvre.

## I.6. MISE EN OEUVRE DES MATÉRIAUX COMPOSITES

### I. 6. 1. Moulages sans pression

Les méthodes de moulage à froid et sans intervention d'une presse sont les méthodes les plus simples à mettre en œuvre. Elles nécessitent un minimum d'équipement et par conséquent d'amortissement. Cette facilité a été à l'origine du succès des matériaux composites à fibres de verre, dans l'industrie et l'artisanat. Ces méthodes permettent la réalisation de pièces en petites et moyennes séries, sans restriction de formes et dimensions. Bien que la proportion de fibres puisse varier, elle reste toutefois limitée. Les pièces comportent une seule face lisse, reproduisant l'aspect du moule. Enfin, la qualité de la pièce moulée dépend dans une large mesure du savoir-faire du mouleur. [12]

### I. 6. 2. Moulage sous vide (Figure I. 6)

Le moulage sous vide consiste à utiliser simultanément le vide et la pression atmosphérique. Après enduction de gel-coat, on dispose le renfort sur un moule rigide, puis on coule la matrice. Le contre-moule, recouvert d'une membrane assurant l'étanchéité (feuille de caoutchouc, nylon, etc.), est ensuite emboîté. Une pompe à vide crée une dépression à travers le moule et le contre-moule poreux, qui étale et débulle la résine. Le contre-moule peut éventuellement être limité à la seule membrane d'étanchéité.

Ce procédé de moulage convient pour la fabrication de pièces en petites et moyennes séries. Il permet d'obtenir de bonnes qualités mécaniques, grâce à une proportion de résine uniforme et à une diminution des inclusions d'air. Dans le cas de l'utilisation d'un contre-moule rigide, un bel aspect de surface est obtenu sur les deux faces. Les cadences de production sont toutefois assez lentes. [12]

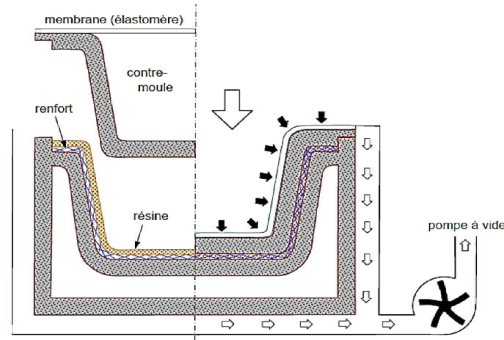


Figure I. 6 Moulage sous vide. [12]

### I. 6. 3. Moulage par compression

#### 1. Moulage par injection de résine (Figure I. 7)

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation. La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées. [12]

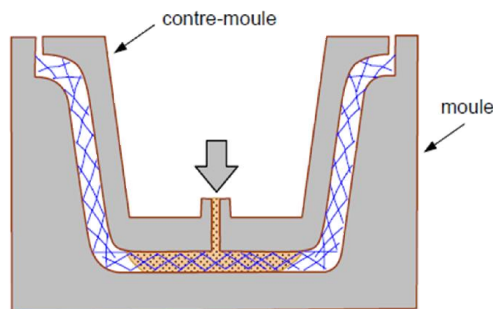


Figure I. 7 Moulage par injection de résine. [12]

#### 2. Moulage par compression à chaud (Figure I. 8)

Cette technique permet d'obtenir des pièces en grandes séries au moyen de presses hydrauliques et de moules métalliques chauffants. Le renfort, constitué par du mat à fils coupés ou à fils continus, par des tissus ou par des préformes, est déposé sur le moule chauffant, enduit au préalable d'un agent de démoulage. Puis la résine catalysée est coulée en vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre moule. [12]

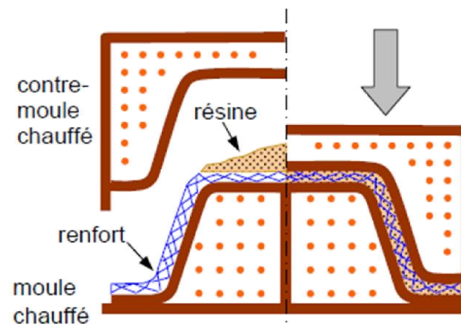


Figure I. 8 Principe du moulage par compression à chaud. [12]

### I. 6. 4. Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques planes, panneaux, sandwiches (*Figure I. 9*), de panneaux ondulés pour toitures (*Figure I. 10*), plaques nervurées, etc. Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases. [12]

1. Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort sont véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, polyéthylène, etc.).

2. Une phase de mise en forme.

3. Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (60 à 150 °C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long).

4. Une phase de refroidissement et découpage. Dans le cas de la fabrication de plaques planes (*Figure I. 9*), la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par pressage entre des rouleaux de calandrage. Dans le cas de panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation (*Figure I. 10*), par l'intermédiaire de rouleaux mobiles.

Le procédé de moulage en continu peut être entièrement automatisé, et permet alors d'élaborer des plaques ou panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel.

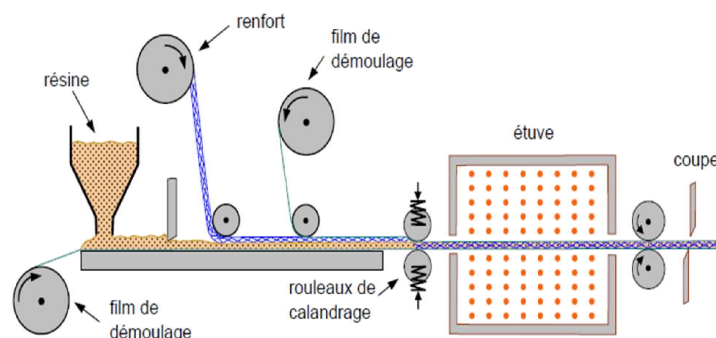


Figure I. 9 Moulage en continu de plaques.

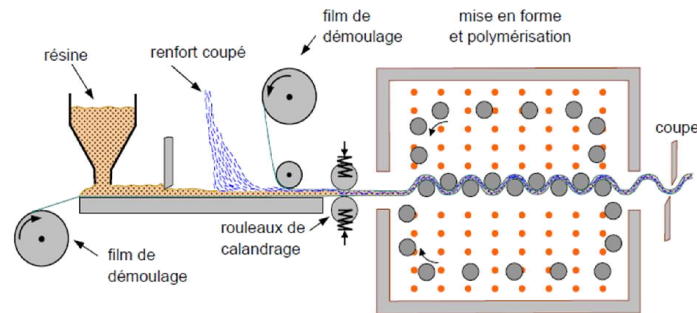


Figure I. 10 Moulage en continu de panneaux ondulés.

### I. 6. 5. Moulage par pultrusion

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés, rectilignes ou courbes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale. Dans cette technique (*Figure I. 11*), les renforts : fils, stratifils, rubans, etc., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine. Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80 % en volume. Le procédé est adapté aux productions d'assez grandes séries (vitesse de défilement jusqu'à 20 m/h). Il nécessite un investissement important de matériel. [12]

Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs, etc.

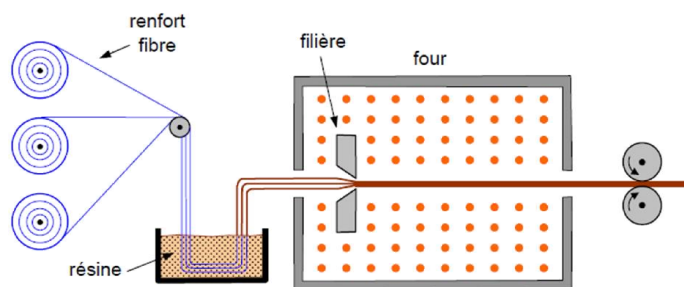


Figure I. 11 Moulage par pultrusion. [12]

## I.7. ARCHITECTURE DES MATÉRIAUX COMPOSITES

L'ensemble des procédés de mise en œuvre montre la prépondérance d'une conception des pièces en matériaux composites :

- Par surface : plaques, coques,
- Par stratification de couches successives.

Ce concept justifie l'importance qui sera donnée par la suite à l'étude des matériaux composites considérés sous la forme de plaques ou de coques, constituées de couches différentes (ou non). Les coques peuvent être modélisées comme un ensemble de plaques, et leur étude déduite de l'étude des plaques. L'objet de ce paragraphe est de dégager l'architecture générale des matériaux composites. [12]

### I. 7. 1. Stratifiés

Les stratifiés sont constitués (*Figure I. 12*) de couches successives (appelées parfois plis) de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines. Les divers types de stratifiés.

#### 1. Stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels

Les stratifiés à base de fils ou de tissus unidirectionnels constituent un type de stratifié de base auquel peut se ramener en théorie tout autre type de stratifié. Ces stratifiés sont constitués (*Figure I. 13*) de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche. [12]

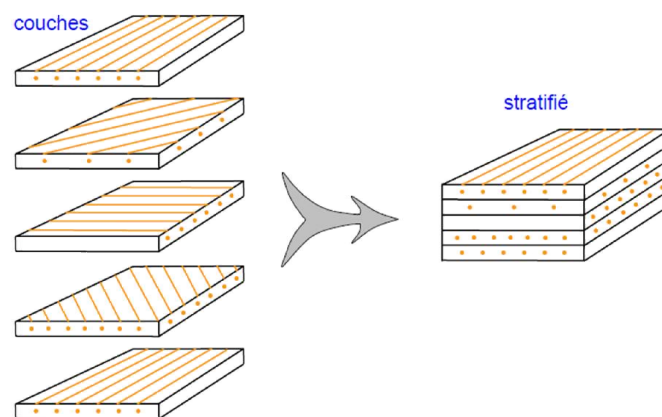


Figure I. 12 Constitution d'un stratifié.

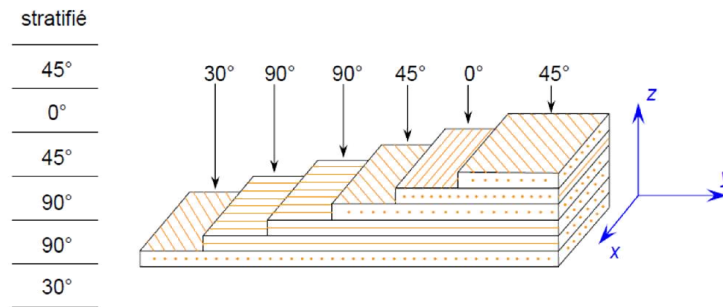


Figure I. 13 Désignation d'un stratifié.

La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code Suivant : [12]

1. Chaque couche est désignée par un nombre indiquant la valeur en degrés de l'angle que fait la direction des fibres avec l'axe  $x$  de référence.
2. Les couches successives sont séparées par un / si leurs angles sont différents.
3. Les couches successives de même orientation sont désignées par un indice numérique.
4. Les couches sont nommées successivement en allant d'une face à l'autre. Des crochets (ou parenthèses) indiquent le début et la fin du code. La désignation dépend du système d'axes choisi. Un exemple est donné à la (Figure I. 14).

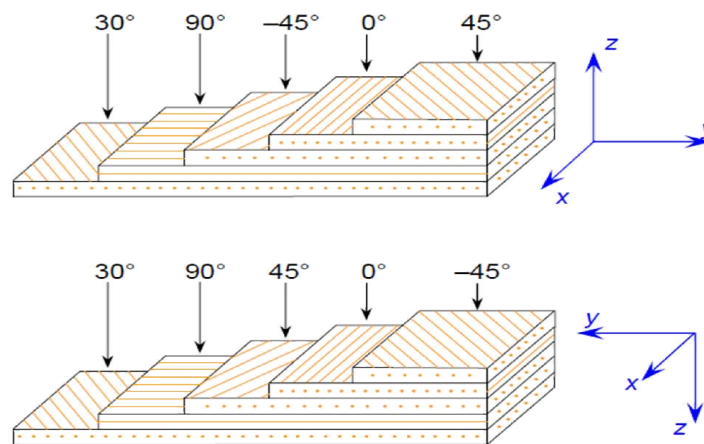


Figure I. 14 Convention de signe pour la désignation des stratifiés.

### I. 7. 2. Les matériaux sandwichs :

Les structures dites "sandwich" occupent un large créneau de la construction des pièces composites. Elles apparaissent dans quasiment tous les domaines d'application. Historiquement ce sont les premières structures composites allégées et performantes. Dans la majorité des cas on doit les confectionner dans un but bien spécifique ; cependant, certains matériaux sandwichs sont disponibles dans le commerce sous forme de demi-produits

Les sandwich sont des matériaux composés de deux parties différentes, l'une s'appelle : "revêtement (semelles ou peaux)", et l'autre : "cœur (ou âme)". Les semelles c'est une partie de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant le cœur qui a une grande épaisseur et faible résistance (*Figure I.15*). [13]

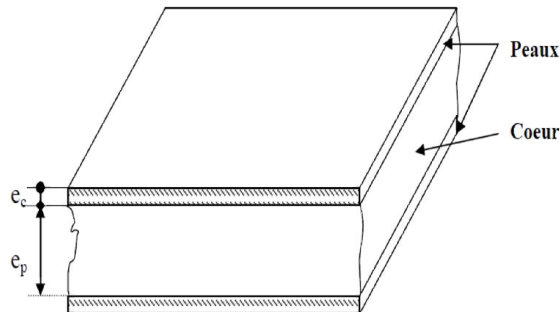


Figure I. 15 Matériau sandwich

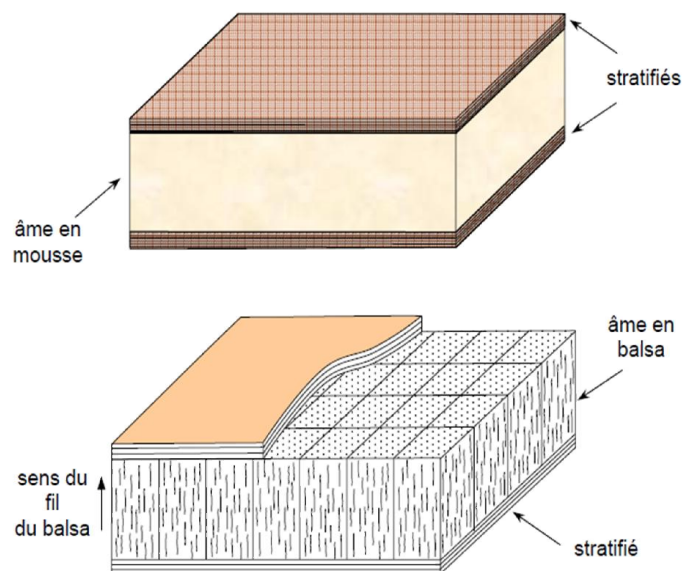


Figure I. 16 Matériaux sandwichs à âmes pleines.

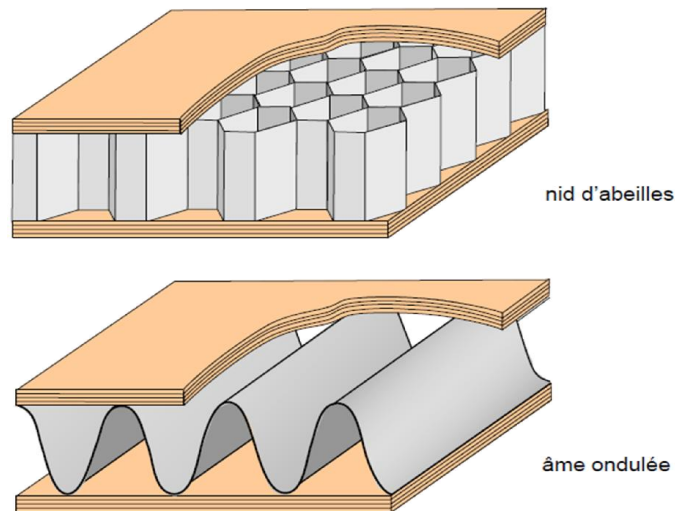


Figure I. 17 Matériaux sandwiches à âmes creuses. [13]

### I. 7. 3. 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. [12]

## I.8. Secteurs d'application des composites

Les composites sont largement utilisés dans l'industrie, parce qu'ils présentent de bonnes caractéristiques telles la rigidité, légèreté et résistance à des contraintes d'origine mécanique ainsi qu'à celles d'origine thermique.

### I. 8. 1. Construction aéronautique

Le choix des matériaux, tel que l'industrie aéronautique, aérospatiale, automobile, ferroviaire, sports et loisirs, bâtiment, génie civil est toujours un problème complexe où le comportement coût/performance règne en maître.

L'utilisation des matériaux composites dans les constructions aéronautiques entraîne un gain de poids substantiel. Leur emploi permet, à performances égales, des gains de masse

variant de 10% à 20%. Le poids de l'avion moyen-courrier Boeing 767 a été réduit, par l'emploi des composites, de 921 kilogrammes par rapport à la solution conventionnelle. Les matériaux composites sont essentiellement utilisés pour la conception et réalisation des propulseurs à poudre des lanceurs de satellites et de leur tuyère d'éjection des gaz de propulsion, obtenue par bobinage de fibres de verre, de kevlar ou de carbone[14]. Afin de résister à la pression interne résultant de la combustion du propergol solide et aux efforts de lancement qui, dans certain cas, se traduisent par des chocs et des vibrations.

### **I. 8. 2. Construction automobile**

L'utilisation des composites dans le secteur automobile remonte à des origines relativement anciennes (fin des années 1980), mais ne s'est généralisé que très récemment, chez les grands constructeurs étrangers (Volvo, Mercedes) pour développer des coffres et hayons.

La société LOHEAC de transports routiers, [15]a pu réduire substantiellement sa consommation de carburant grâce à l'économie du poids obtenue en remplaçant les cabines conventionnelles de ses tracteurs par de nouveaux éléments moulés en une seule pièce renforcés de fibre à haute résistance. [16]

Les composites sont choisis pour la conception de ressorts à lames[17]. Ce sont des pièces de suspension routières très sollicitées, utilisées par les véhicules de gros tonnage et dont la lame secondaire, assurant 80% de la fonction suspension en évitant des ruptures brutales.

### **I. 8. 3. Secteur du bâtiment**

Hormis le béton, les composites ont relativement peu pénétré le secteur du BTP, notamment du fait :

- D'un prix élevé comparé aux matériaux traditionnels (6 €/kg contre 3 €/kg pour l'acier et 1€/kg pour le bois),
- D'une relative méconnaissance des architectes et bureaux d'études vis-à-vis des composites,
- D'un manque d'information sur le cycle de vie (recyclabilité, durabilité). Les qualités des composites (légèreté, résistance au feu, résistance mécanique et chimique), permettent de prévoir un développement prometteur. Les fournisseurs de solutions composites ont développé de nombreux produits :

- ✓ Fenêtres,
- ✓ Portes,
- ✓ Substituts d'ardoise,
- ✓ Renforts de poutres, ...etc.

# CHAPITRE I I

*Mécanismes d'endommagement des  
matériaux composites*

---

---

## II.1.Introduction :

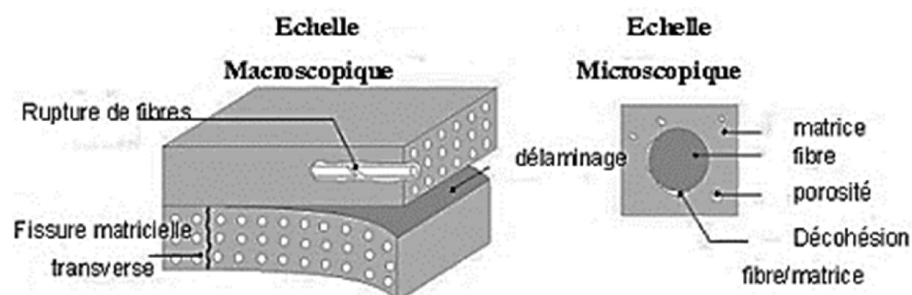
L'endommagement d'un matériau est un processus irréversible qui conduit à l'apparition de défauts locaux. Contrairement aux matériaux métalliques, pour lesquels l'endommagement dépend du chargement imposé, les composites présentent toujours les mêmes endommagements. Du fait de l'hétérogénéité de leur structure, il n'existe pas de mécanisme unique mais plusieurs types de dégradations différentes par leur nature et leur mode de développement. Ces dégradations apparaissent à différentes échelles (Figure II. 1). Ainsi, on distingue [18] :

- A l'échelle microscopique apparaissent des ruptures d'adhérence entre les fibres et la matrice (décohésion fibres/matrice) ou de porosité,

- A l'échelle mésoscopique, ou échelle du pli, on observe des fissures intra/laminaires transverses (perpendiculaires à la direction de sollicitation) ou longitudinales (dans la direction de l'application de l'effort) et des ruptures de fibres au stade ultime de la ruine du matériau,

- A l'échelle macroscopique, on observe le phénomène de délaminage qui correspond à une séparation locale entre deux couches liées à une concentration importante des contraintes en cisaillement s'amorçant généralement aux bords libres de la structure.

Ces endommagements ne sont pas présents uniformément dans la structure. Ils dépendent du type de sollicitation, mais aussi de l'orientation et de la proportion des renforts. Sandhu [19] 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  $\pm 45^\circ$  ce sont les contraintes en cisaillement qui contribuent fortement à la dégradation



**Figure II. 1 :** Principaux endommagements rencontrés dans un matériau composite [18]

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...)

## II.2. Caractéristiques des mécanismes d'endommagement :

### II. 2. 1. Fissuration matricielle

Dans le cas des matrices fragiles, les fissures s'initient dans la matrice en premier lieu ( $\epsilon_m^R < \epsilon_f^R$ ). La fissuration de la matrice se produit, soit par fissuration transverse ou longitudinale. Selon la nature de l'interface fibre-matrice, on assiste à une décohésion entre les fibres et la matrice ou au cisaillement de la matrice ( $\tau_c$ ). Cette dernière aura lieu lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à ( $\tau_c$ ). [20]

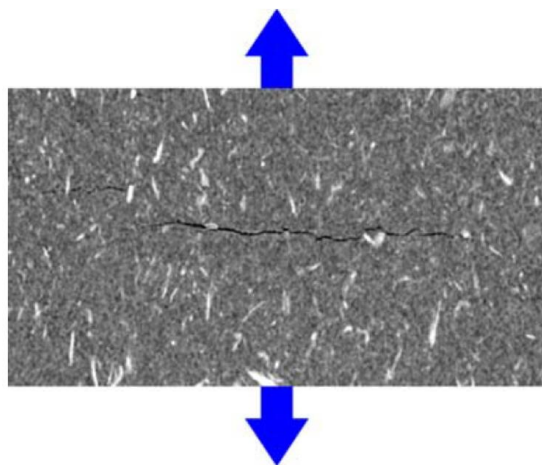
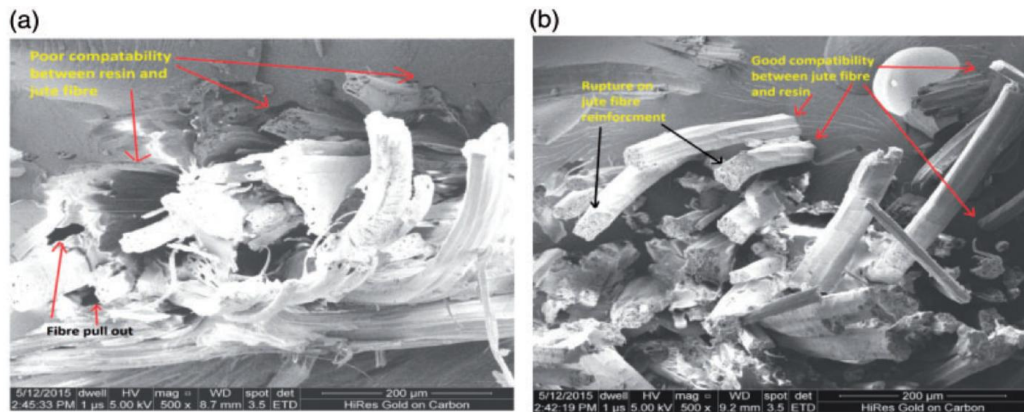


Figure II. 2 : Images en tomographie aux rayons X de fissuration transverse de la matrice

### II. 2. 2. Décohésion fibre matrice :

La fissuration de la matrice est accompagnée d'une redistribution des contraintes en faisant intervenir les frottements à l'interface fibre/matrice. On assiste à une perte d'énergie, nécessaire à la création de nouvelles microfissures dans l'interface. Ce mécanisme de fissuration dépend fortement de la nature de l'interface fibre /matrice. Cette caractéristique

peut être contrôlée par de différents traitements adéquates de la fibre ou même par l'addition d'agents de couplages. Lakshmanan et Laks ont montré que le traitement alcalin du tissu (toile) de Jute améliore sa compatibilité avec la résine polyester (Figure II. 3). Par conséquent, il y a une nette amélioration des propriétés mécaniques des composites (en traction, en flexion, et cisaillement interlaminaire du composite à renfort traité). Ces propriétés sont supérieures à celles du composite à base de jute non traité.



**Figure II. 3 :** Micrographies des faciès de rupture d'un composite polyester renforcé (a) par un tissu de jute non traité, (b) par un tissu de jute traité par 1% de NaOH .

Une contrainte de cisaillement interfaciale faible favorise le processus de décohésion. Dans le cas contraire (cas lié), le comportement du matériau se traduit par une rupture brutale. Tandis que pour une contrainte intermédiaire, la rupture du composite est de type semi contrôlé. À ce stade la charge est transmise aux fibres et aux torons du renfort (fissuration inter-toron).

### II. 2. 3. Rupture des fibres :

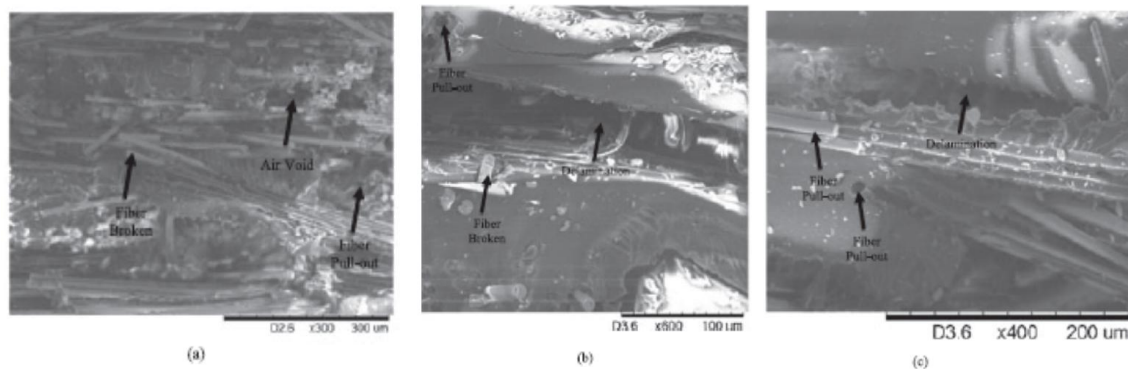
Après la fissuration matricielle, si la contrainte de rupture des torons est atteinte, on assiste à la rupture de ces derniers. La rupture des fibres et des torons aura lieu de part et d'autre de la fissure principale. Les longueurs déchaussées ( $l_c$ ) sont contrôlées par la distribution des défauts les plus sévères. Si le module de Weibull des fibres est grand, toutes les fibres se rompent au même endroit et les longueurs déchaussées sont relativement faibles. [21]

### II. 2. 4. Délaminage

C'est la décohésion entre les couches qui apparaît sur le bord libre et à l'intérieur de la couche. Il se produit principalement dans les stratifiés à empilement de plis croisés dû au fait de la différence de module entre les couches. À cause des contraintes inter-laminaires élevées

près des bords, le délaminage s'amorce généralement à cet endroit, puis progresse entre les couches. Dans de nombreuses situations (notamment lors d'un impact) la fissuration matricielle et le délaminage sont des phénomènes fortement couplés. La figure II- 4 présente des micrographies MEB des faciès de rupture de composite hybride (tissu de jute/Mat de fibres de verre/résine époxy) à différents essais mécaniques. On note la présence du délaminage lors de la flexion et de l'impact, en outre en traction ce mécanisme n'a pas apparu.

[22]



**Figure II. 4 :** Pull-out des fibres, rupture des fibres et délaminage dans la surface de rupture après (a) rupture en traction (b) rupture en flexion (c) rupture par'impact

### II.3. Influence de la direction de sollicitation sur les modes de rupture :

Selon le type de composite et le mode de sollicitation, notamment la direction de sollicitation par rapport à la direction des renforts, certains mécanismes d'endommagement peuvent être favorisés.

✓ En traction dans l'axe des fibres, trois modes de rupture interviennent : microfissuration de la matrice et se développe ensuite perpendiculairement aux fibres avec décohésion aux interfaces. Des zones de concentration de contraintes se forment aux interfaces et provoquent la rupture de fibres qui conduisent à la rupture finale du matériau.

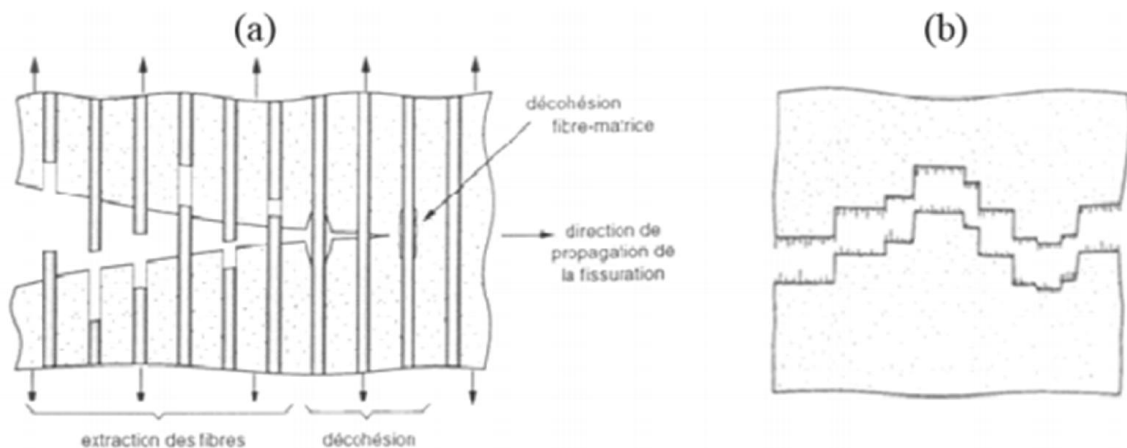
✓ En traction perpendiculaire aux fibres, la matrice et les interfaces sont les seules sollicitées. Des microfissures se développent au niveau des défauts. La qualité d'adhésion des interfaces fibre/matrice détermine le type de microfissures qui se propagera et mène à la rupture du matériau.

✓ En traction à 45° par rapport à l'axe des fibres, l'endommagement inter facial est favorisé par cisaillement.

✓ En traction déviée par rapport à l'axe des fibres, la matrice, les fibres et les interfaces sont toujours sollicités et peuvent s'endommager. La répartition entre les différents

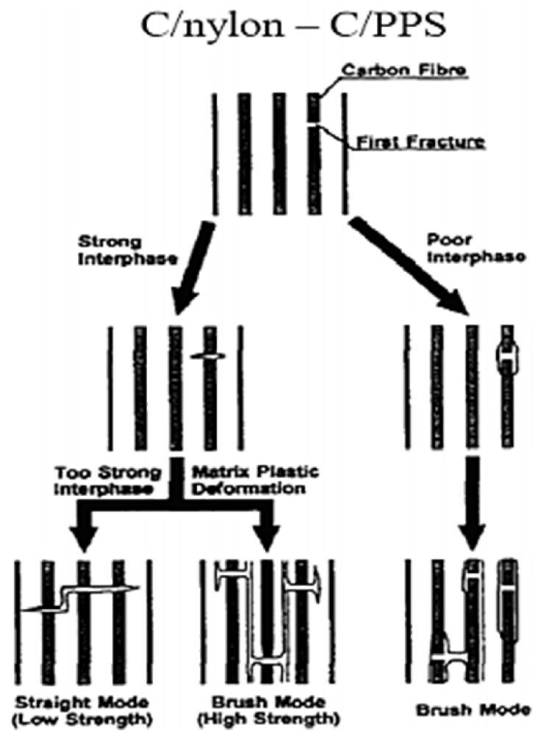
mécanismes d'endommagement varie en fonction de l'inclinaison des fibres par rapport à la direction de sollicitation.

Il est toutefois important de tenir compte de la nature de l'interface fibre/matrice, qui peut jouer un rôle important dans la propagation de la rupture. Si celle-ci est forte, la rupture initiée par les fibres ou la matrice induit en front de fissure une concentration de contraintes conduisant ainsi à la propagation de la rupture successivement dans la matrice et les fibres. Si celle-ci est faible, en front de fissure, la propagation de la fissure de la matrice ne se poursuit pas par une rupture de fibre mais par une décohésion fibre/matrice. L'ouverture de la fissure finit par entraîner une sur contrainte des fibres voisines qui finissent également par rompre. Avec la propagation de la fissuration transversale de la matrice, ces fibres rompues n'adhèrent plus à la matrice. Les fissures transverses de la matrice peuvent s'initier à différents endroits et se rejoindre par propagation de la rupture à l'interface fibre/matrice. Il en résulte ainsi une rupture en escalier (Figure 2. 5).



**Figure 2. 5 :** Mécanisme d'endommagement et surface de rupture d'un stratifié UD présentant une faible adhésion fibre/matrice [23]

Dans le cas des composites fibres de carbone/ matrice polyamide, l'interface présente une meilleure adhésion en raison de la présence de transcristaux en surface des fibres. Oya et al. [23] ont étudié les mécanismes de rupture de stratifiés UD de ce matériau. Ils ont ainsi mis en évidence que l'endommagement était initié par une rupture des fibres suivie d'une fissuration transversale de la matrice, donnant un faciès de rupture en escalier ou droit (Figure 2. 6).



**Figure 2. 6 :** Représentation graphique des mécanismes d'endommagement de composite à matrice TP renforcée par des fibres de carbone soumis à une sollicitation en traction [23]

#### II.4.MESURE DE L'ENDOMMAGEMENT :

Il est indispensable de contrôler les mécanismes d'endommagement et leurs évolutions au cours du chargement d'un composite. L'endommagement est souvent contrôlé et étudié par différentes méthodes. Ces méthodes sont classées en deux catégories, les méthodes directes et les méthodes indirectes :

**Méthodes de contrôle directes** : qui permettent de déterminer l'état d'une structure à un moment précis. Cette catégorie comprend notamment les méthodes de contrôles non destructif (CND). Ces méthodes fournissent des informations concernant l'état d'endommagement des pièces contrôlées sans altérer ni modifier leur état. Parmi les méthodes les plus couramment employées on cite : l'ultrasons, la thermographie infrarouge active et la radiographie et tomographie à rayons X

**Méthodes de contrôle indirectes** : contrairement aux méthodes discrètes, ces méthodes permettent de faire un suivi du comportement d'une structure lors de sollicitations mécaniques. Elles sont utilisées lorsque la pièce est en service. Ceci implique que l'excitation et la perturbation permettant de faire le contrôle sont générées par la sollicitation mécanique de la pièce elle-même. Les méthodes de cette catégorie permettent donc de faire un suivi de

l'endommagement et des propriétés du matériau en temps réel, sans perturber la sollicitation ou le matériau. Dans cette catégorie on peut citer :

- ✓ L'émission acoustique (EA),
- ✓ La corrélation digitale d'images (CDI),
- ✓ La thermographie infrarouge passive (TI). [24]

# **CHAPITRE III**

*Modalisation des comportement  
mécanique des matériaux  
composites*

---

### III. INTRODUCTION

Nous proposons dans ce chapitre de passer une revue bibliographique des différentes approches de la modélisation des mécanismes de dégradation des composites stratifiés. La variété des approches existantes reflète la complexité de l'architecture du matériau. On distingue deux types d'approches, des approches fragiles qui reposent sur des critères de rupture à l'échelle macro, et des approches progressives qui reposent sur les lois d'initiation et d'évolution de l'endommagement distinguées à l'échelle micro et méso. De manière générale, les dégradations ont tendance à être modélisées à l'échelle macro, les dégradations dans notre travail seront prises en compte aux échelles micro ou méso. Cependant, deux visions sont généralement adoptées pour modéliser les dégradations intervenant au sein des stratifiés. La vision micro va prendre en compte de manière directe la dégradation considérée alors, que la vision méso prendra en compte de manière homogénéisée les dégradations par l'intermédiaire des paramètres des matériaux évolutifs. Un pont micro-méso a été établi pour faire le lien entre une variable d'endommagement à l'échelle mésoscopique et la dégradation micromécanique sous-jacente.

#### III.1.Principes fondamentaux de la modélisation des stratifiés composites

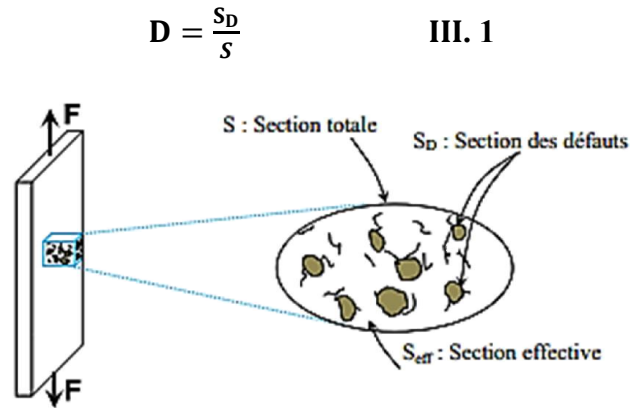
La démarche classique d'analyse de la tenue structurale repose sur une approche "fragile" de la rupture. L'approche la plus ancienne et la plus utilisée dans les bureaux d'étude, de par sa simplicité, consiste à employer un critère de rupture macroscopique (par exemple les critères de contraintes ou de déformations maximales, ou le critère de Tsai-Wu). L'amélioration de ces critères a fait l'objet d'un concours de publication, appelé "World Wild Failure Exercise" (WWFE) où les auteurs étaient invités à tester leur critère de manière normalisée sur des données expérimentales de référence (enveloppe de rupture en sollicitations couplées), à partir de caractéristiques matériaux fournies. Ces critères de rupture ont pour objectif de définir le domaine de résistance d'un stratifié donné, pour les chargements complexes, à partir d'essais simples à rupture, le plus souvent uniaxiaux, effectués sur ce stratifié. Ils n'ont donc aucun caractère prédictif en cas de changement d'empilement ou de nuance de matériau. L'identification expérimentale d'un tel critère s'avère ainsi d'autant plus coûteuse qu'elle doit être répétée pour chaque stratification envisagée, tandis que des approches progressives prennent en considération

le caractère progressif et prédictif de l'endommagement du stratifié. Deux approches progressives sont généralement adoptées pour modéliser les dégradations intervenant au sein des stratifiés. Les approches micromécaniques visent à prévoir à partir des propriétés des constituants la rupture des plis, voire du stratifié, où les simulations sont directement traitées à l'échelle des fibres et de la matrice (souvent intégrées dans des approches multiéchelles pour traiter des problèmes de taille. Dans le cas des approches mésomécaniques, il s'agit de prévoir la rupture du stratifié à partir des propriétés des plis. Cependant, l'un des problèmes de ces approches progressives est qu'elle ne fait pas nécessairement le lien entre une variable d'endommagement à l'échelle mésoscopique et la dégradation micromécanique sous-jacente. Par exemple, lorsqu'un pli à 90° est sollicité en traction, on voit apparaître d'abord des décohésions fibres- matrice et de la microfissuration, puis des fissures discrètes qui traversent à travers toute l'épaisseur du pli. Ce phénomène restant assez diffus, la mécanique de l'endommagement permet de le représenter, mais les variables ne font pas la différence entre décohésions/microfissuration et fissures discrètes. Par conséquent, elles ne permettent pas de remonter au taux de fissuration du pli défini par  $\rho$  ( $\rho = h_{\text{pli}} / L_f$ ) où  $h_{\text{pli}}$  est l'épaisseur du pli et  $L_f$  la distance moyenne entre deux fissures, valeur plus facilement mesurable par les constructeurs et organismes de certification. C'est pour redonner confiance dans cette vision mésomécanique de la modélisation des stratifiés qu'un pont micro-méso a été établi au LMT-Cachan depuis quelques années. Le principe est d'établir une équivalence énergétique entre des modèles micromécaniques et le mésomodèle d'endommagement par l'intermédiaire d'une technique d'homogénéisation. Sous certaines hypothèses, notamment de chargement et de mécanismes de dégradation, cette équivalence permet d'extraire des lois de comportement méso basées sur la réponse micro.

## III.2.MECANIQUE D'ENDOMMAGEMENT

### III.2.1 VARIABLE D'ENDOMMAGEMENT

Considérons une section d'une éprouvette sollicitée en traction (voir figure III. 1). Soit  $S$  une section prise de l'éprouvette. Dans cette dernière, on suppose l'existence de microfissures qui la traversent, constituant le dommage. Sa section, qui est capable de transmettre des efforts, est dite section effective  $S_{\text{eff}}$  ( $S_{\text{eff}} < S$ ). Soit  $S_D$  la différence :  $S_D = S - S_{\text{eff}}$ . Pour décrire l'état de cette section, la mécanique de l'endommagement propose de définir une variable interne appelée variable d'endommagement. Cette variable est notée  $D$  et est donnée par la relation



**Figure III. 1 :** Les différentes sections dans une éprouvette endommagée

La variable interne  $D$  varie de 0 à 1, lorsque  $D=0$ , la section est à l'état non endommagée ou vierge, et lorsque  $D=1$ , l'élément est complètement endommagé.  $D$  compris entre 0 et 1, caractérise l'état d'endommagement de l'éprouvette. [25]

En général, cette définition est adaptée pour des sollicitations multiaxiales. On peut supposer par exemple, le cas où toutes les micro-fissures sont distribuées uniformément dans toutes les directions de l'espace (endommagement isotrope). On peut retrouver également l'endommagement anisotrope, constitué de fissures d'orientation privilégiée, et c'est ainsi que la variable d'endommagement peut être représentée par une variable tensorielle de 2<sup>ème</sup> et de 4<sup>ème</sup> ordre.

### III. 2. 2. CONTRAINTE EFFECTIVE

La contrainte effective est utilisée pour modéliser l'état mécanique réel de l'élément de l'éprouvette sans décrire explicitement les "micro – fissures" qu'ils contiennent. Dans le cas unidirectionnel (1D), nous supposons, par exemple, que l'on applique une force  $F$  sur l'éprouvette. A l'échelle de la structure, on considère que la section n'a pas changé, et on définit ainsi la contrainte apparente  $\sigma$  par :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{III. 2}$$

En présence d'un endommagement isotrope de mesure interne  $D$ , la section résistance effective est défini par :

$$S_{\text{eff}} = S - S_D = (1-D) S \quad \text{III. 3}$$

Cependant, à l'échelle microscopique, l'équation 3.1 ne tient pas compte de la présence des "micro-fissures". La contrainte effective  $\sigma_{eff}$  est donnée par :

$$\sigma_{eff} = \frac{F}{S_{eff}} \quad \text{III. 4}$$

En introduisant la mesure interne  $D$  dans la formulation, celle-ci permet de relier la contrainte moyenne réellement appliquée à la section et la contrainte effective. Cette dernière est donnée par :

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma}{(1-D)} \quad \text{III. 5}$$

La charge appliquée à l'éprouvette n'est sûrement pas homogène à cause des concentrations de contraintes autour des "micro-fissures", mais on suppose que cela n'a que peu d'influence sur son comportement. [26]

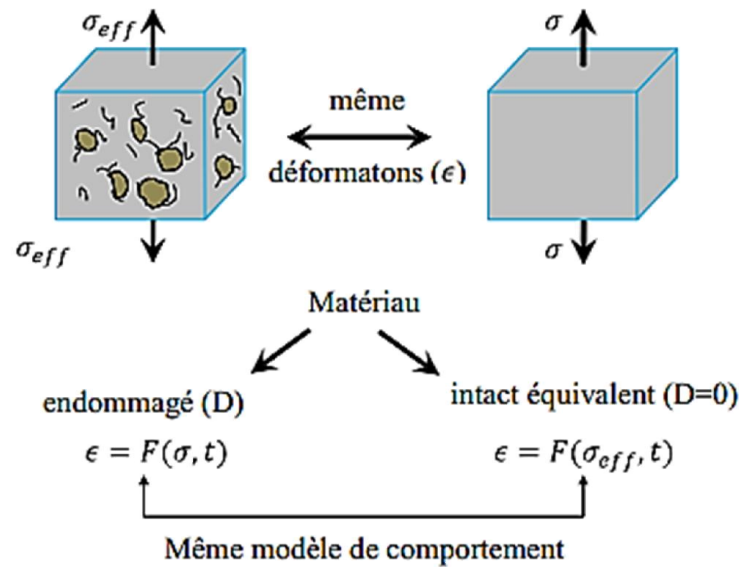
### III. 2. 3. Principe d'équivalence en déformation

La notion de contraintes effectives offre un moyen simple d'intégrer les effets de l'endommagement dans les modèles de comportement donnés. Elle offre éventuellement la possibilité de coupler l'endommagement à d'autres comportements comme l'élasticité, l'élasto-plastique ou l'élasto-visco-plastique. Pour plus de détails, le lecteur peut se référer à [25][26]. Pour ce faire, on suppose que le modèle de comportement "non endommagé" fournit en réalité la contrainte effective. Par exemple, dans le cas d'un comportement élastique linéaire, la contrainte effective est liée à la déformation par :

$$\sigma_{eff} = E \varepsilon \quad \text{III. 6}$$

A partir de la relation ci-dessus, on peut retrouver le modèle de comportement élastique endommagé apparent, donné par :  $\sigma = E(1-D)\varepsilon$  III. 7

Pour un chargement monotone, l'évolution d'endommagement traduite par  $D > 0$  implique une augmentation de la contrainte effective. Dans le même temps, la quantité  $E(1-D)$  est appelée module de Young endommagé de la section. On a donc défini le comportement endommagé qui s'applique pour l'éprouvette. Ce comportement "endommagé" sous l'effet de  $\sigma$ , donne la même déformation que le comportement "intact" sous l'effet de  $\sigma_{eff}$ . Cette définition est appelée le principe d'équivalence en déformations et a été proposée par Lemaitre, voir figure III. 2. [26]



**Figure III. 2 :** Contrainte effective et le principe d'équivalence en déformations

Il est possible d'ajouter de la même façon l'endommagement continu aux différents comportements (viscosité, plasticité,...). Toutefois, cette approche ne permet pas de modéliser tous les comportements endommageables rencontrés dans la réalité ; on observe parfois des interactions complexes entre les phénomènes physiques demandant des modèles fortement [25] couplés. Par contre, le principe d'équivalence en déformations conduit à des modèles faiblement couplés car l'endommagement est supposé ne pas influencer directement les autres phénomènes

### III.3. APPROCHES FRAGILES DE LA MODELISATION DE L'ENDOMMAGEMENT

Les approches fragiles sont des approches macroscopiques, qui consistent à rechercher soit une loi, soit un critère permettant de situer la résistance ultime du matériau pour un état de contraintes complexes. Le critère est une expression mathématique reliant les contraintes effectives régnant dans le matériau aux contraintes ultimes pouvant être supportées par ce dernier. Lorsque le critère est atteint, la propriété d'intégrité du matériau n'existe plus et il y a une ruine locale du milieu. Les critères de rupture existant peuvent être classés comme suit:

- ✓ le critère de la contrainte,
- ✓ de la déformation maximale,
- ✓ les critères énergétiques.

### III. 3. 1. Critère de la contrainte

Critère relativement rustique mais qui reste très utilisé pour la recherche des premières solutions technologiques dans la conception d'une pièce composite.1

$$\begin{aligned} \frac{\sigma_{11}}{X^t} &\leq 1 \text{ si } \sigma_{11} \geq 0 \\ \frac{\sigma_{11}}{X^c} &\leq 1 \text{ si } \sigma_{11} \leq 0 \\ \frac{\sigma_{22}}{Y^t} &\leq 1 \text{ si } \sigma_{22} \geq 0 \\ \frac{\sigma_{22}}{Y^c} &\leq 1 \text{ si } \sigma_{22} \leq 0 \\ \frac{\sigma_{12}}{S} &\leq 1 \end{aligned} \quad \text{III. 8}$$

Avec :

$\sigma_{ij}$  : termes du tenseur des contraintes

$X^t$  : Résistance à la traction dans la direction 1

$X^c$  : Résistance à la compression dans la direction 1

$Y^t$  : Résistance à la traction dans la direction 2

$Y^c$  : Résistance à la compression dans la direction 2

$S$  : résistance au cisaillement (supposée identique dans toutes les directions) La connaissance des contraintes aux limites ( $\sigma_{ij}$ ,  $X^t$ ,  $X^c$ ,  $Y^t$ ,  $Y^c$ ,  $S$ ) dans les différentes directions implique la détermination rapide de l'état de contraintes limites. Ce critère de la contrainte maximale est un critère qui ne prend pas en compte les interactions possibles entre les différents mécanismes de rupture.[27]

### III. 3. 2 Critère de la déformation maximale

Le critère de la déformation maximale est pu utiliser car en bureau d'études, les concepteurs raisonnant plutôt en contraintes. Il est utilisé avec le critère de contrainte maximale. Le critère de la déformation maximale est comme celui de la contrainte maximale, à la seule différence que dans ce cas les limites sont posées sur les déformations dans l'équation (3.1)

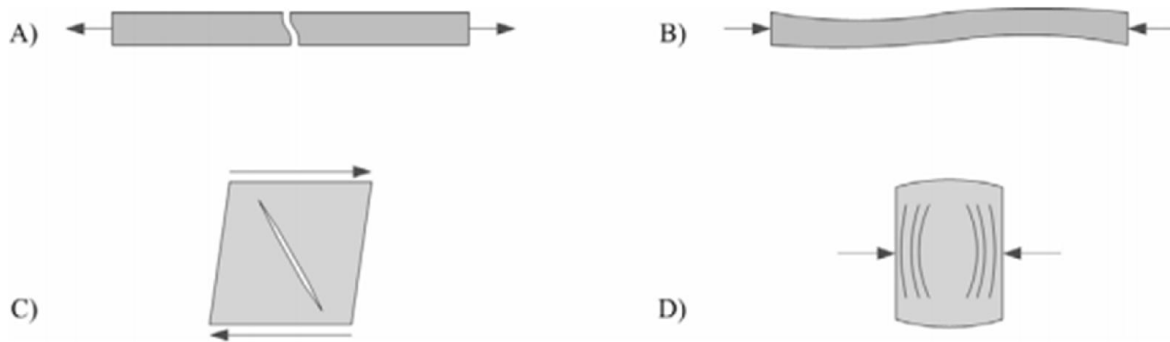
### III. 3. 3 Les critères énergétiques

Il existe de nombreuses expressions de ces critères, les plus connues étant celles de Tsai-Hill, Hill, Tsai-Wu, ...etc

#### 1. Critère de Hashin

L'initiation de rupture dans les composites à matrice thermoplastique est définie en utilisant le critère de rupture de Hashin, exprimé en fonction du tenseur de déformations ( $\epsilon_{ij}$ ) et la déformation à la rupture est mesurée expérimentalement (équations III. 10 et III. 13). Ces valeurs de déformation peuvent être obtenues à partir du produit de la composante de contraintes et du tenseur de compliance. Ce modèle est implanté dans de nombreux logiciels industriels de calcul, notamment dans Abaqus. Il est couramment utilisé chez Airbus dans les simulations de choc sur des stratifiés. Le critère Hashin permet de déterminer quatre modes d'endommagement, qui sont illustrés sur la figure III. 4. Chaque mode est représenté par sa propre variable de rupture ( $\phi_i$ ).

[28]



**Figure III. 3 :** Quatre modes de rupture du critère Hashin;

(A) Traction des fibres, (B) Compression des fibres, (C) Traction/cisaillement de la matrice et  
(D) Compression de la matrice

➤ mode de rupture des fibres dans la direction longitudinale en traction ( $\sigma_{11} < 0$ )

$$f_{L.T} = \left(\frac{\sigma_{11}}{X_{f.c}}\right)^2 + \alpha \left(\frac{T_{12}}{S_l}\right)^2 \geq 1 \dots \dots \dots 3.10$$

➤ mode de rupture des fibres dans la direction longitudinale en compression ( $\sigma_{11} > 0$ )

$$f_{L.c} = -\left(\frac{\sigma_{11}}{X_{f.c}}\right) \geq 1 \dots \dots \dots 3.11$$

➤ mode de rupture des fibres dans la direction transverse en traction ( $\sigma_{22} > 0$ )

$$f_{T.T} = \left(\frac{\sigma_{22}}{X_{f.c}}\right)^2 + \alpha \left(\frac{T_{12}}{S_l}\right)^2 \geq 1 \dots \dots \dots 3.12$$

➤ mode de rupture des fibres dans la direction transverse en compression ( $\sigma_{22} < 0$ )

$$f_{T.c} = \left(\frac{\sigma_{22}}{2_{S.L}}\right)^2 + \left[\left(\frac{X_{F.C}}{2_{S.L}}\right)^2 - 1\right] \left(\frac{\sigma_{22}}{X_{f.c}}\right) + \left(\frac{T_{12}}{S_L}\right) \geq 1 \dots \dots \dots 3.13$$

Ce critère permet de déterminer la rupture des fibres dans les deux directions longitudinale et transversale qui apparaît dans les couches du composite, et il est utilisé en tant que critère d'initiation de rupture. Les valeurs des contraintes maximales ont été déterminées expérimentalement par des essais de traction, de cisaillement et de compression. Dans notre cas, on a pris  $\alpha = 1$ , ce qui signifie qu'il y a une interaction entre ces composantes

## 2 Critère de Tsai Wu

Le critère de rupture de Tsai et Wu [29] propose une forme mathématique la mieux adaptée à la rupture des matériaux anisotropes, est une expression polynomiale en contrainte. Ce critère considère uniquement la rupture de la fibre comme mécanisme de ruine du composite. Dans notre cas, ce critère permet de déterminer le seuil d'endommagement dans les empilements des plis du composite et est appliqué au post-traitement du calcul. Il peut être couplé avec une loi d'endommagement appropriée qui correspond à l'évolution de l'endommagement cumulé. Les paramètres contrôlant ce seuil d'endommagement sont les coefficients  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_{11}$ ,  $F_{22}$ ,  $F_{12}$  et  $F_{33}$  qui apparaissent dans la formule. Les valeurs limites sont issues d'essais simples de traction et de compression. Le critère de Tsai-Wu [29] prend une forme assez proche :

$$F_1 \sigma_{11} + F_2 \sigma_{22} + F_{11} \sigma_{11}^2 + F_{22} \sigma_{22}^2 + F_{12} \sigma_{22} \sigma_{11} < 1 \quad \text{III. 14}$$

Où

$$F_1 = \frac{1}{X_{s,t}} - \frac{1}{X_{f,c}} ; F_2 = \frac{1}{Y_{s,t}} - \frac{1}{Y_{f,c}}$$

$$F_{11} = \frac{1}{X_{s,t} X_{f,c}} ; F_{22} = \frac{1}{Y_{s,t} Y_{f,c}} ; F_{12} = \frac{1}{S^2}$$

Dans les expressions ci-dessus, les indices "T" et "C", "s" représentent la traction, la compression et le seuil d'endommagement respectivement.

Le critère de Tsai-Wu est très utilisé dans la modélisation numérique, cela est dû à ses nombreux avantages parmi lesquels, on peut citer :

- Le critère ne change pas par rapport au changement d'axe,
- La résistance est similaire à celles des contraintes,
- Le critère prend en considération les interactions entre les contraintes.

Les différents coefficients ne sont plus fonction du signe des contraintes mais prennent directement en compte les contraintes du seuil d'endommagement de traction et de compression dans les directions (Ox) et (Oy).[29]

### III.4.APPROCHES PROGRESSIVES DE LA MODELISATION DE L'ENDOMMAGEMENT

La modélisation de l'endommagement et de son évolution ne peut pas être retracée par ce genre de critères décrits précédemment. En effet, le matériau est considéré soit en un état parfaitement sain, soit en ruine, et l'influence de l'apparition d'une dégradation n'est absolument pas prise en compte dans le modèle de comportement. Aussi, l'interprétation physique des résultats au-delà du critère de ruine du matériau n'est tout simplement pas possible. De manière générale, l'endommagement est défini comme un ensemble de changements microstructuraux au sein du matériau qui occasionne une détérioration irréversible plus ou moins importante. Notons également que l'endommagement présente un caractère unilatéral, les microfissures pouvant se refermer sous l'action du chargement. Par exemple, quand une structure est sollicitée, la dégradation de ses propriétés est effective bien avant sa rupture finale. En outre pour les matériaux composites, notamment ceux à forte anisotropie, la géométrie de la dégradation dépend, non pas du mode de chargement comme pour les matériaux métalliques, mais de l'arrangement géométrique des constituants du composites.

D'après P. Costa [30], le premier dommage dans le composite se produit dans la matrice. En effet d'après [31] et Chaboche- Lemaitre [32] l'endommagement est dû :

Au niveau micro

- ✓ Microfissuration de la matrice parallèlement aux fibres ;
- ✓ Décohésion fibres/matrice ;
- ✓ Rupture de fibres.

• Au niveau méso :

- ✓ Rupture transverse ;
- ✓ Rupture longitudinale ;
- ✓ Endommagement qui provoque la redistribution des contraintes et des déformations.

• Au niveau macro : Ruine totale du matériau

Par conséquent, on voit clairement le lien qu'il peut exister entre les mécanismes se produisant à l'échelle microscopique et ceux à l'échelle mésoscopique et macroscopique.

L'endommagement est donc le résultat d'un processus de dégradation plus ou moins lent dont l'origine se trouve dans des mécanismes de détérioration se produisant à une échelle plus fine [33] et s'accumulent à l'échelle mésoscopique [34][35]. A partir de ce résultat, deux principales approches ont été distinguées pour modéliser l'endommagement : l'approche microscopique et l'approche mésoscopique. On se propose dans ce qui suit de réaliser un éclairage des travaux existants (micromécaniques et mésoscopiques) au travers de certains points qui nous semblent cruciaux dans la représentation du comportement des matériaux composites stratifiés.

### III. 4. 1. Modélisations micromécaniques

La caractéristique principale des visions micromécaniques est de se placer à l'échelle de la dégradation, en représentant la géométrie de celle-ci. De fait, cette vision possède un contenu physique très fort. Pour des raisons de simplicité, ce sont généralement les stratifiés de type [0n/90m]s qui sont pris en compte. En effet, les premières méthodes présentées ici étant analytiques, des stratifications complexes ne permettraient pas une détermination correcte du champ de contrainte. De nombreux modèles proposent donc de prédire les évolutions de la densité de fissure et du module de rigidité longitudinal du stratifié en fonction du chargement de traction et de comparer avec des résultats expérimentaux sur éprouvette simple de traction. Les études sur l'évolution de rigidité en cisaillement sont moins nombreuses. Les travaux de micromécanique nécessitent deux étapes :

- ✓ la description du champ de contrainte en présence de dégradation
- ✓ application des critères d'initiation et d'évolution.

#### 1 Champ de contrainte

Les premières méthodes qui apparaissent sont unidirectionnelles et basées sur les hypothèses de type "shear lag" ont été les plus répandues [36]. Cette théorie néglige la variation des contraintes et de la déformation suivant l'épaisseur de stratifié. Le principe est de calculer la contrainte dans la couche fissurée à l'aide de la contrainte de cisaillement  $\tau$  dans l'interface dénommée "zone de cisaillement". Si on décrit cette bande comme une couche d'épaisseur  $h_a$  et de module  $G$ , le résultat de cette approche dépend du paramètre  $(G/h_a)$  qui doit être recalé expérimentalement. En pratique, il s'avère difficile d'obtenir des résultats satisfaisants avec des

paramètres  $t_a$  et  $G$  de l'ordre de grandeur de leurs significations physiques. La contrainte de cisaillement à l'interface est définie à partir de la différence de déplacement entre les plis à  $0^\circ$

Dans quelque modèle initial de shear lag l'épaisseur de la zone de cisaillement est remplacé par l'épaisseur de la couche à  $90^\circ$   $h_{90}$ [37], tandis que dans d'autres travaux [38], est considéré comme une zone riche en résine entre les couches  $0^\circ/90^\circ$ . Par utilisation des équations constitutives et d'équilibres d'une cellule élémentairement  $dx$  du pli fissuré, on obtient l'équation différentielle du second ordre de la contrainte de cisaillement  $\tau$ , et de la contrainte dans les couches endommagées à  $90^\circ$   $\sigma_x^{90}$  [39][40].

### III. 4. 2. Modélisations mésomécaniques

L'échelle méso se place entre les échelles micro et macro. C'est à dire à l'échelle du pli unidirectionnel, mais sans représentation directe des fissures. Ce choix est fait car d'une part, l'évolution des dégradations est très distincte d'un pli à l'autre, si bien qu'il serait impossible de représenter par des modèles intrinsèques le comportement de deux stratifiés aux séquences d'empilement différentes.

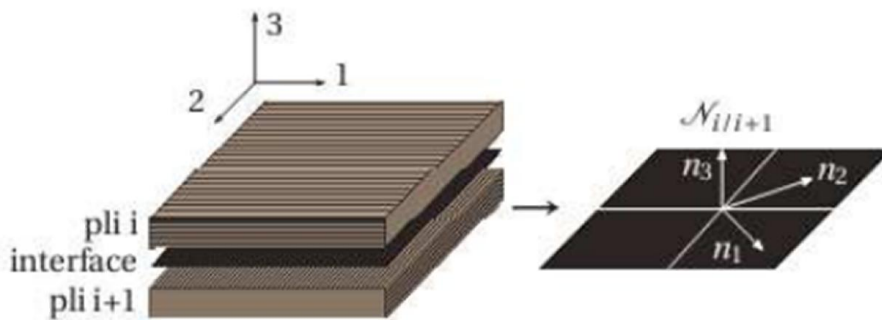
Appliquée à la modélisation des dégradations des stratifiés, l'une des voies adoptée est la mécanique de l'endommagement. Son objectif est de représenter ces dégradations à travers une évolution des paramètres matériaux des zones dégradées, par opposition à la micromécanique qui représente directement la géométrie de la dégradation. L'idée de base décrite dans [41] et est d'introduire l'effet des dégradations sur les rigidités du matériau considéré. Appliqué au composite, le concept d'endommagement doit prendre en compte le côté anisotrope des dégradations. [42]

Historiquement, le premier modèle mésoscopique a été proposé par Talreja et n'est doté que d'une seule variable d'endommagement isotrope affectant la raideur du pli [43].

La nature fondamentalement anisotrope de l'endommagement du matériau fibres/matrice n'est donc pas reproduite. Peu après, Ladevèze proposa un modèle d'endommagement anisotrope à deux variables, une pour le cisaillement et une pour la traction transverse dans le pli (en plus d'un modèle pour le délaminage entre les plis) [44]. Ce modèle offre d'ores et déjà une meilleure reproduction des premières dégradations qui s'initient dans le pli, à savoir la décohésion fibres/matrice et la microfissuration. L'identification des lois d'évolution de l'endommagement est alors purement phénoménologique. la prise en compte de la refermeture des fissures en compression nécessite un traitement local pour chaque variable affectée. Le modèle de Ladevèze

gère cet aspect en introduisant une dépendance au signe des contraintes dans les directions d'endommagement .

L'introduction de trois variables scalaires est préférée devant celle d'un tenseur d'ordre 2 ou 4, les variables d'endommagement étant pilotées par le critère de Hashin [45]. Peu après, Maire et Chaboche ont prolongé ce type d'approche en y intégrant les effets visqueux de la matrice [46]



**Figure.III.4**-Mésocostituants d'un composite stratifié et repères associés

En ce qui concerne les interfaces, leur faible épaisseur riche en matrice ( $\approx 5 \mu\text{m}$ ) permet de les modéliser grâce à des interfaces dégradables. L'initiation du délaminage peut alors être prédite par une analyse asymptotique [47] ou, dans le cadre de la Méthode de Éléments Finis, par des éléments cohésifs. Son rôle est essentiellement limité aux zones de bords et au voisinage des macrodéfauts. En effet, suffisamment loin des bords, une structure stratifiée mince peut être étudiée directement par la théorie classique des plaques ou des coques, ne faisant alors pas travailler l'interface.

## 1 Modèle de pli

La méso-modélisation utilise la base locale d'orthotropie au pli (1, 2, 3). La direction des fibres est notée 1, 2 la direction transverse et 3 la direction hors-plan. (Fig. III.5). La version initiale du modèle de pli, consacrée au comportement sous contraintes planes, prend en compte trois mécanismes distincts : rupture des fibres, décohésions fibres-matrice et fissuration transverse. Classiquement, trois variables scalaires d'endommagement notées  $d_{12}$ ,  $d_{22}$  et  $d_{11}$  sont introduites. Elles sont respectivement liées à la chute de rigidité en cisaillement  $G_{12}$ , en traction transverse  $E_{22}$  et à la rupture des fibres  $E_{11}$ .

## 2 Modélisation de l'interface :

L'interface est une entité surfacique qui assure le transfert des déplacements et des contraintes entre deux plis adjacents. Cette modélisation, couplée à la mécanique de l'endommagement, permet de prendre en compte les phénomènes de délaminage qui peuvent survenir lors du chargement de pièces mécaniques structurales. Considérons les interfaces indépendantes les unes des autres. On associe à chacune un repère  $N_{i/i+1}$ , comme indiqué par la figure III.5 :  $n_1$  est la bissectrice des direction des fibres des plis  $i$  et  $i + 1$ ,  $n_2$  sa normale dans le plan et  $n_3$  sa normale hors-plan .Les interfaces sont le lieu de la dégradation dite de délaminage, laquelle est souvent initiée aux bords de la structure (zones de singularités ou de forts gradients) ou au point d'impact de chocs (même petits) [48]. La pertinence du modèle d'interface, introduit et identifié par (Allix et Ladevèze, [49]) a été montrée dans de telles situations. On note le saut de déplacement dans la base d'orthotropie à l'interface.

# **Chapitre IV**

## *Simulation numérique*

---

### IV.1. INTRODUCTION :

Le chapitre qui suit sera une simulation numérique d'une plaque en composite par un logiciel conçu spécialement pour étudier le comportement mécanique de toute structure, La simulation permet d'une part de comprendre les phénomènes internes en accédant aux mécanismes internes qui les régissent et d'autre part d'appliquer les connaissances des structures dans des nouvelles configurations. La simulation est un outil qui non seulement remplace des expériences qui seraient lentes et fatigantes au banc d'essai mais encore élargit le champ d'action du constructeur en découplant des variables qui sont indissolublement liées dans les structures. .[50]

### IV.2. Présentation de ANSYS :

Pour déterminer les distributions des contraintes, le logiciel ANSYS a été adopté. Ce code général de calcul est basé sur la méthode des Eléments Finis et conçu pour l'analyse des structures. Il permet de traiter des problèmes d'élasticité linéaire, et non linéaires (élastovisco-plastique), des problèmes dynamiques transitoires et stationnaires, des problèmes thermiques transitoires et stationnaires, des problèmes mécaniques du fluide et des problèmes acoustiques [50].

Pour effectuer un calcul, ce logiciel passe par trois stades :

- **Partie I** : définition de la géométrie du modèle.
  1. Introduction des éléments convenables pour le type d'analyse considéré.
  2. Définition des données caractérisant le modèle :
    - ✓ Coefficients des matériaux utilisés pour le modèle.
    - ✓ Construction de la géométrie dans les cas bidimensionnel et tridimensionnel (surfaces, volumes et combinaison des surfaces et volumes).
    - ✓ Maillages du modèle considéré.
    - ✓ Vérification des tailles de maillages obtenues.
- **Partie II** : solution du problème défini.
  - ✓ Application des conditions aux limites.
  - ✓ Application des chargements.
  - ✓ Arrangement des types d'analyse.
  - ✓ Vérification complète du modèle avant la solution.
  - ✓ Solution du problème :

- Assemblage des matrices de rigidité et de masse de la structure complète.
- Application des conditions aux limites.
- Application des chargements externes.

➤ **Partie III** : analyse et post-traitement des résultats qui peuvent être, soient des quantités locales tels les déplacements, les contraintes, les déformations, soient des quantités globales, telle l'énergie de déformation.

### IV.3 Modélisation par ANSYS :

ANSYS, est l'un des plus grands développeurs et fournisseur de logiciels de simulation numérique au monde. Ses produits majeurs sont des logiciels qui mettent en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles discrétisés.

Ce produit permet d'effectuer des simulations mécaniques. Ses principales capacités sont :

1. l'analyse statique.
2. l'analyse modale.
3. l'analyse harmonique (réponse forcée).
4. l'analyse temporelle ou transitoire.
5. la gestion de différentes situations non linéaires (contacts, plasticité des matériaux, grands déplacements ou grandes déformations.
6. simulations en matière de mécanique des fluides.  
permet de résoudre des modélisations mettant en jeu des phénomènes électromagnétiques. .[50]

#### Implémentation d'un problème en 5 étapes :

- Analyse du problème : modèles physiques, géométrie, conditions aux limites, propriétés physiques,...
- Création de la géométrie avec un modéleur.
- Création du maillage avec un mailleur.
- Définition des données du problème (physiques, CL, propriétés physiques, schémas numériques,..) et résolution avec le solveur.
- Exploitation des résultats.

➤ **Analyse du problème :**

*Identification de la physique :*

- Modèle physique : équations, propriétés physiques, ...
- Quelles sont les variables inconnues ?

*Conditions aux limites :*

- Identifier les conditions aux limites et leur type.
- Mettre en correspondance les CL avec les traitements proposés aux frontières par le solveur.
- Domaine de calcul.
- Définir le domaine de calcul, l'espace physique dans lequel les équations seront résolues.
- Sauf cas particulier les représentations informatiques de domaine de calcul sont des espaces finis. Comment prendre en compte cette contrainte :
  - Création de la géométrie avec un modeleur
  - Création du maillage avec un mailleur

#### **IV.4. Simulation par ANSYS apdl :**

La simulation de cet essai a été faite par le logiciel de simulation par éléments finis ANSYS. Ce logiciel est très important dans le champ des simulations pour obtenir des résultats sur les diverses variables, et pouvoir comprendre le comportement des matériaux.

Pendant cette étude, on va changer les différents paramètres pour connaître l'effet de ceux ci dans les résultats numériques obtenus.

Les paramètres choisis pour l'étude sont le maillage, le coefficient de poisson et module de Young.[50]

#### **Évaluation des propriétés mécaniques apparentes**

• Module de Young : Le module d'Young est le facteur de proportionnalité entre la contrainte ( $\sigma$ ) et la déformation ( $\epsilon$ ).

$$\mathbf{E} = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

- Coefficient de Poisson ( $\nu$ ) : Le coefficient de Poisson représente le rapport entre les déformées transversale et longitudinale. Pour ce calcul, la moyenne des déformations transversales ( $\epsilon_x, \epsilon_y$ ) a été divisée par la déformation longitudinale ( $\epsilon_z$ ):

$$\nu = -(\epsilon_x + \epsilon_y) / 2 / \epsilon_z$$

#### IV.6. Le maillage

- Le maillage est un ensemble recouvrant « au mieux » le domaine géométrique étudié. Il peut être constitué d'éléments linéiques, surfaciques et volumiques.
- La connectivité d'un maillage est la définition des liaisons entre les sommets de ses éléments.
- On parle de maillage hybride lorsqu'il mêle des éléments de nature différente. Par exemple en 2D quadrangle et triangle ou en 3D hexaèdres et tétraèdres
- Le maillage est qualifié de structuré (b) lorsque la connectivité des nœuds est de type différences finies.
- Un maillage est dit non structuré (a) lorsque la connectivité est quelconque.

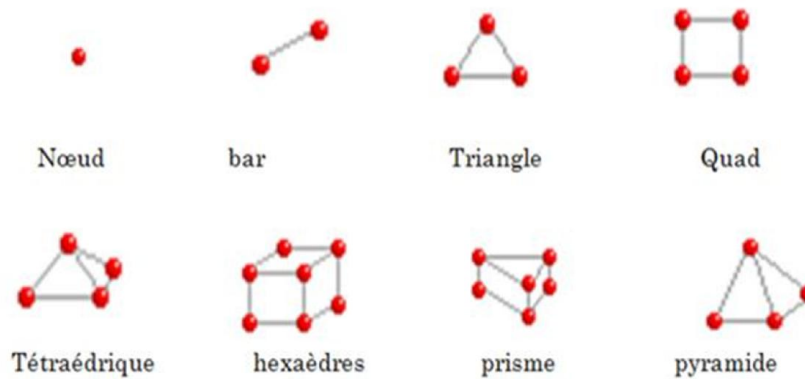


Figure IV.1: Types des éléments de maillage

### IV. 6. 1. Choix Du Type De Maillage

#### a. Maillage structuré (quadra/hexa)

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à mono bloc ou multi bloc.

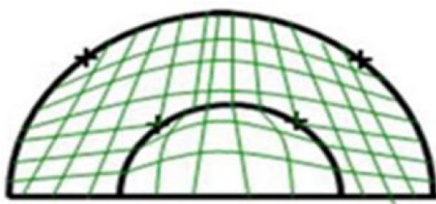


Figure IV. 2 : Géométrie mono-bloc.

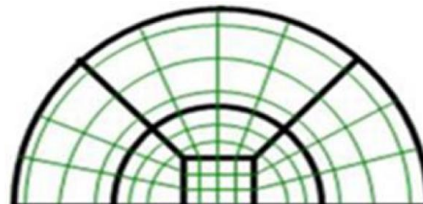


Figure IV. 3 : Géométrie Multi-bloc.

Il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients :

- Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.

#### a. Maillage non structuré

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition.

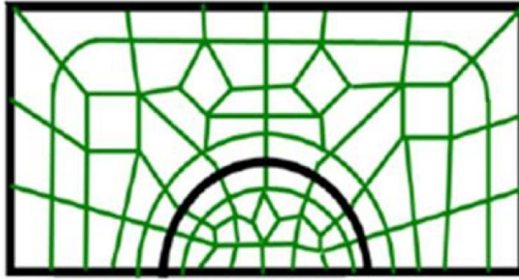


Figure IV. 4 : Maillage non structure.

*Ses avantages :*

- Peut-être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments.
- Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/tétra) sont très automatisés.

*Ses inconvénients :*

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

### **b. Maillage hybride**

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. Ses avantages :

- Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré.

### **IV. 6. 2. Modèle physique**

Nous considérons le model suivant ( Eprouvette ASTM D 3518-76), la figure IV.5 montre la géométrie et les dimensions de l'éprouvette.

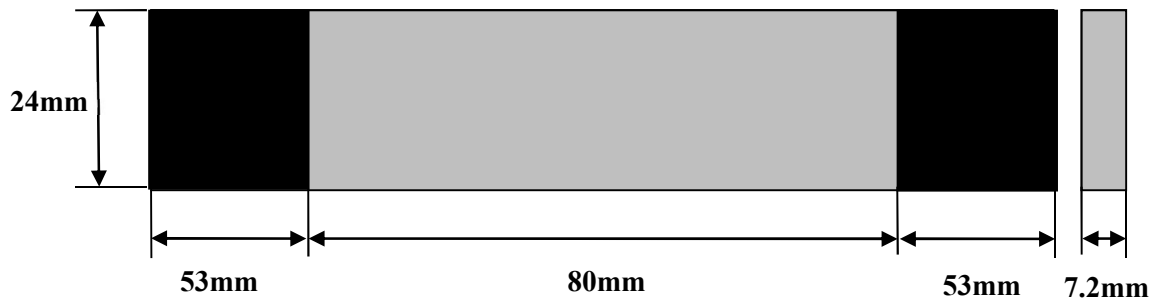


Figure IV.5. Modèle physique de l'éprouvette

### IV. 6. 3. Géométrie

La figure suivante (IV.6) présente insertion de la géométrie de l'éprouvette modélisé.

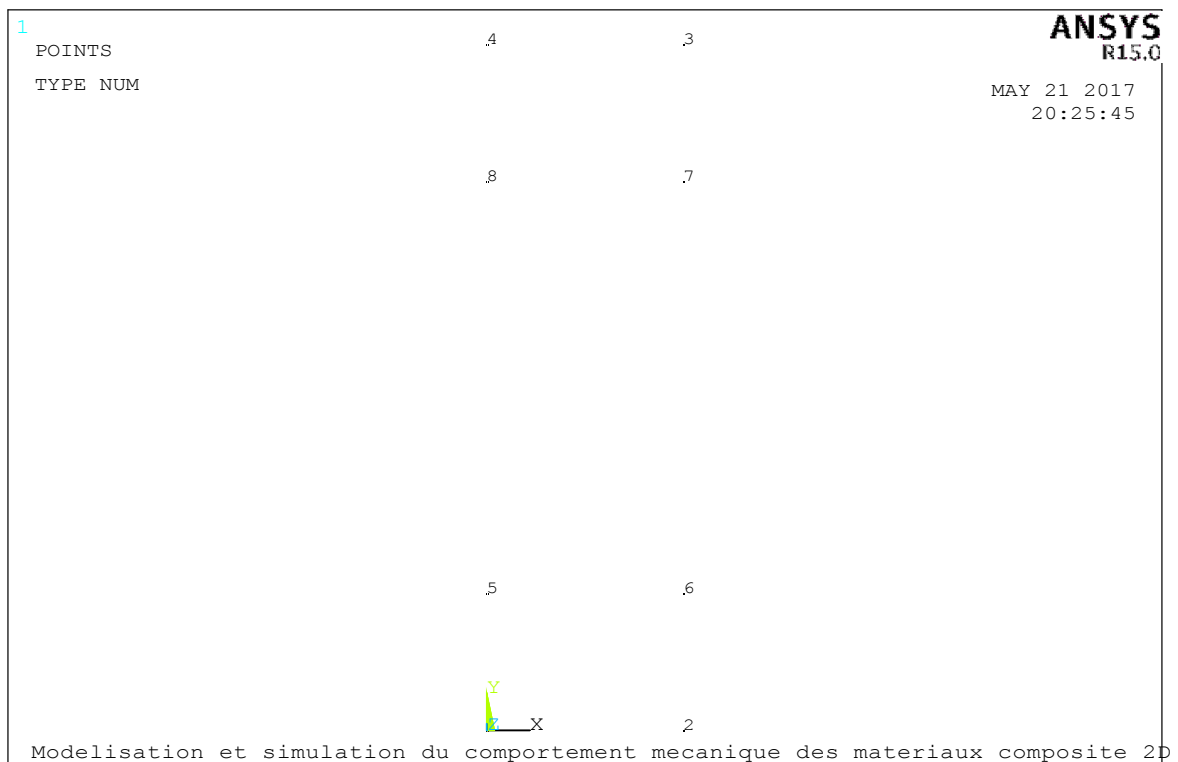


Figure IV.6. la Géométrie par de l'éprouvette

### IV. 6. 3. Déclaration des couches

Les commandes de la figure ( VI.7) permettent d'insérer les huit couches orthotrope de l'éprouvette.

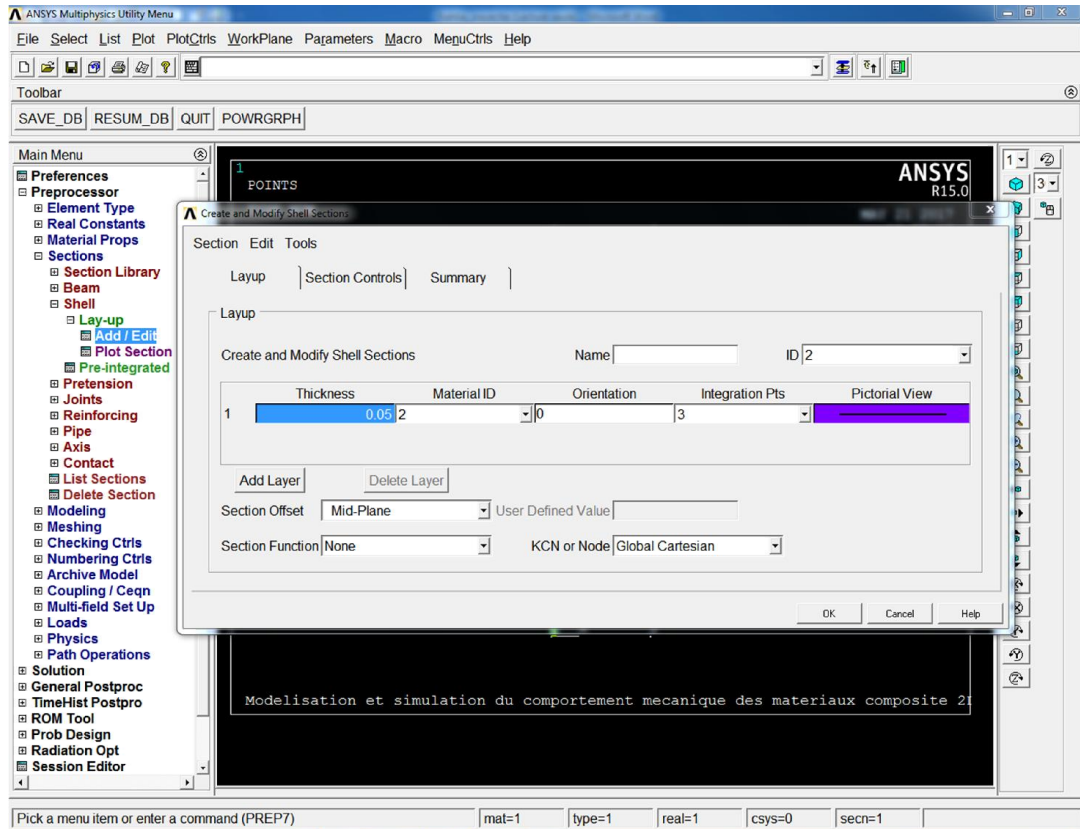
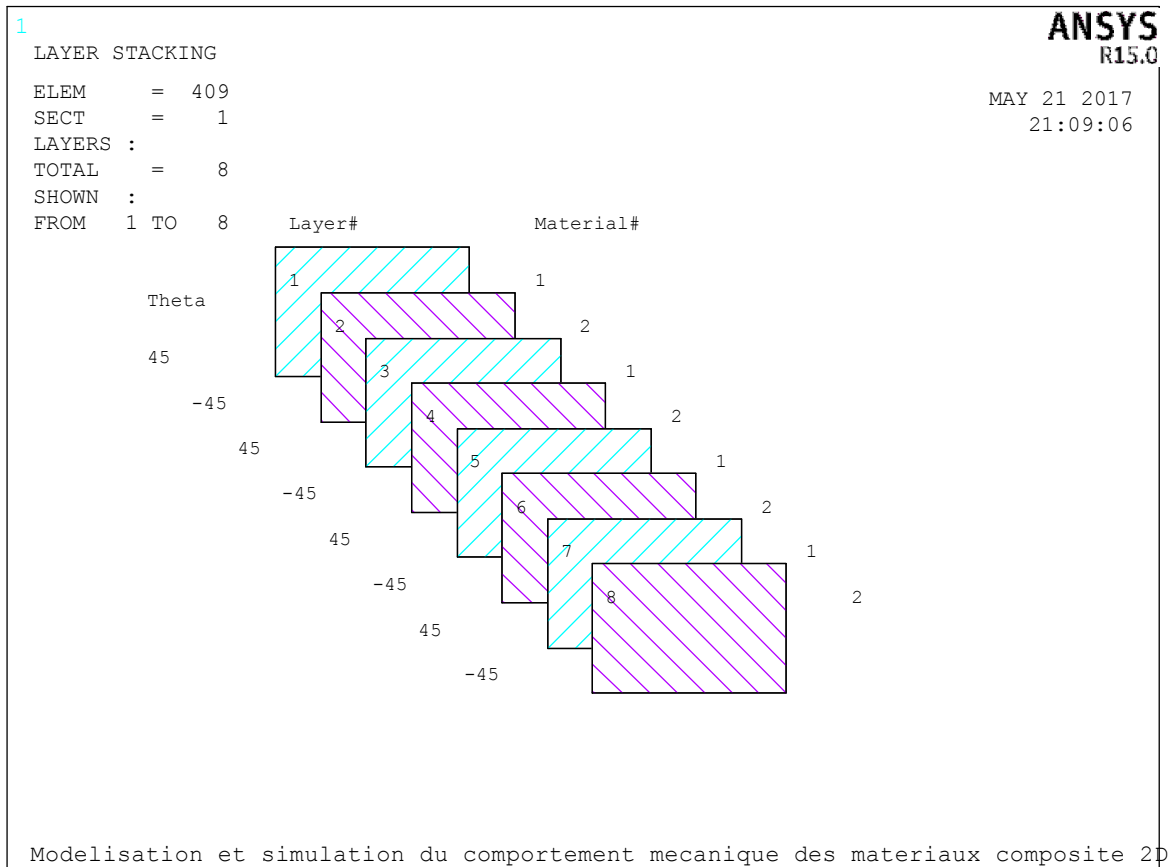


Figure IV.7. Déclaration des couches

**IV. 6. 4. Les couches de composite dans l'élément 409**

La figure VI.8 présente le schéma des couches orientées d'un élément fini 409 .

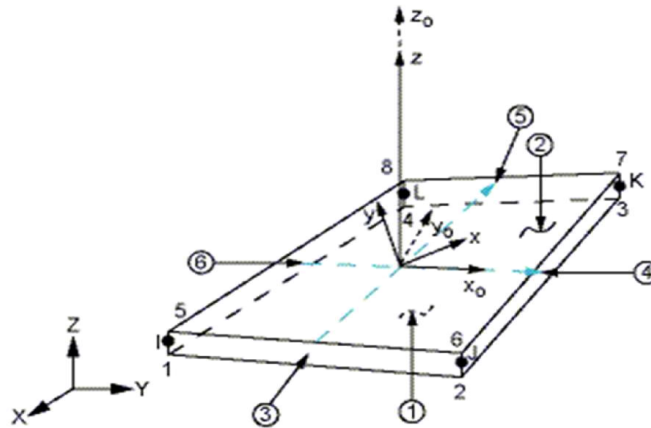


**Figure .IV.8.** Les couches de composite dans l'élément 409

**IV. 6. 5. L'élément SHELL181 (Bibliothèque de l'ANSYS)**

L'élément SHELL181 de la bibliothèque du code ANSYS apdl ( Figure VI.9)

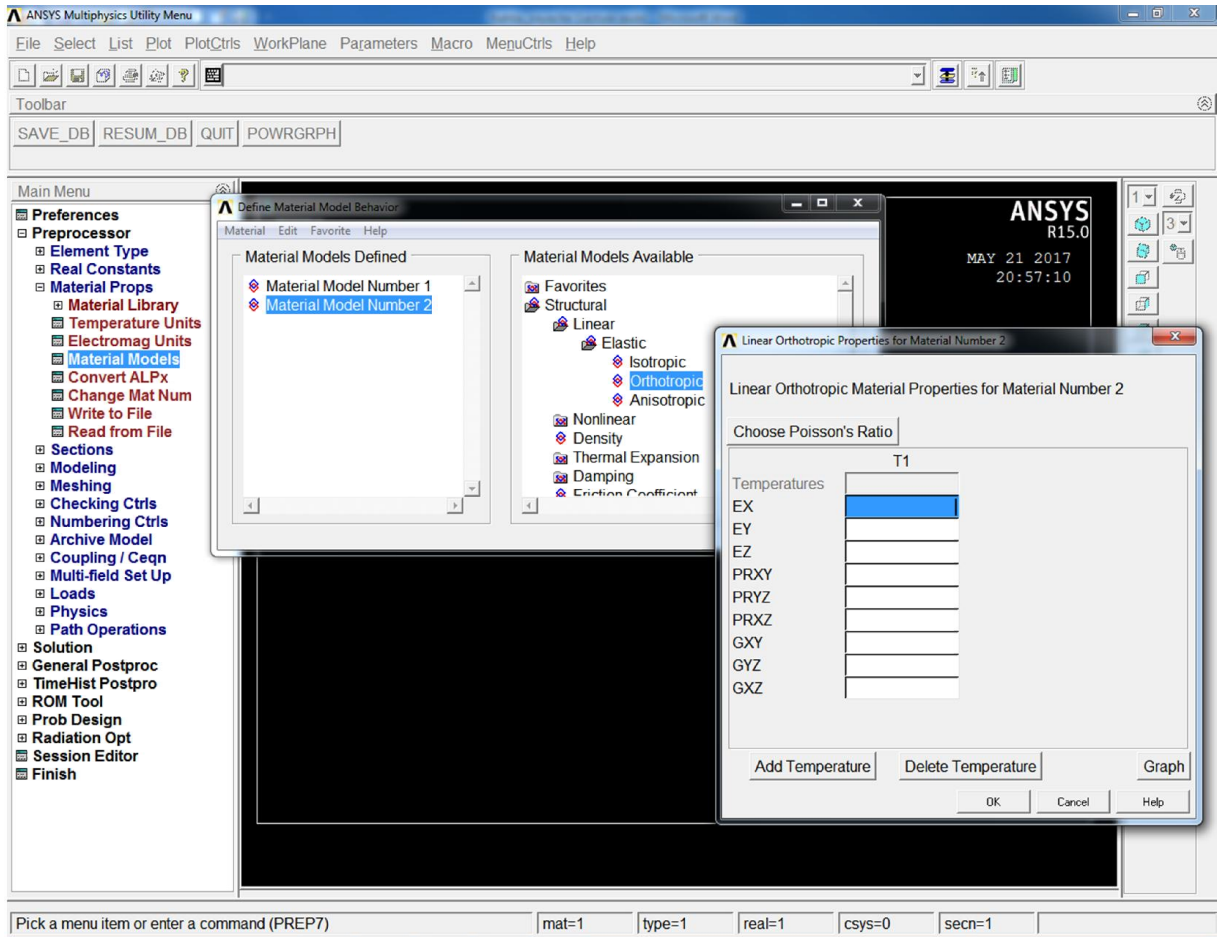
permet de modéliser les couches orthotropes du model.



**Figure. IV.9.** L'élément SHELL181

**IV. 6. 6. Propriétés mécanique des matériaux composites**

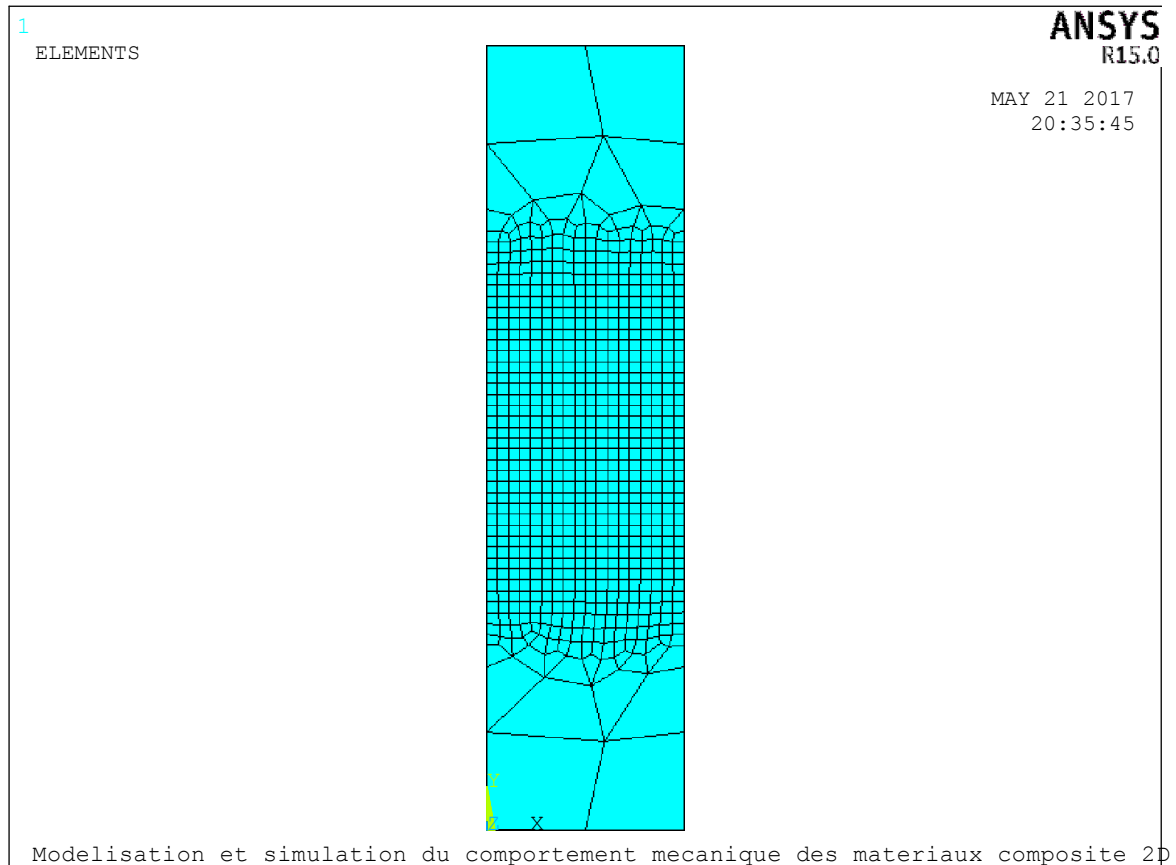
les commandes de la figure IV.10 insèrent les propriétés mécaniques des deux matériaux. le matériaux utilisé et jute/ polyester



**Figure. IV.10** Propriétés mécanique des matériaux

### IV. 6. 7. Maillage

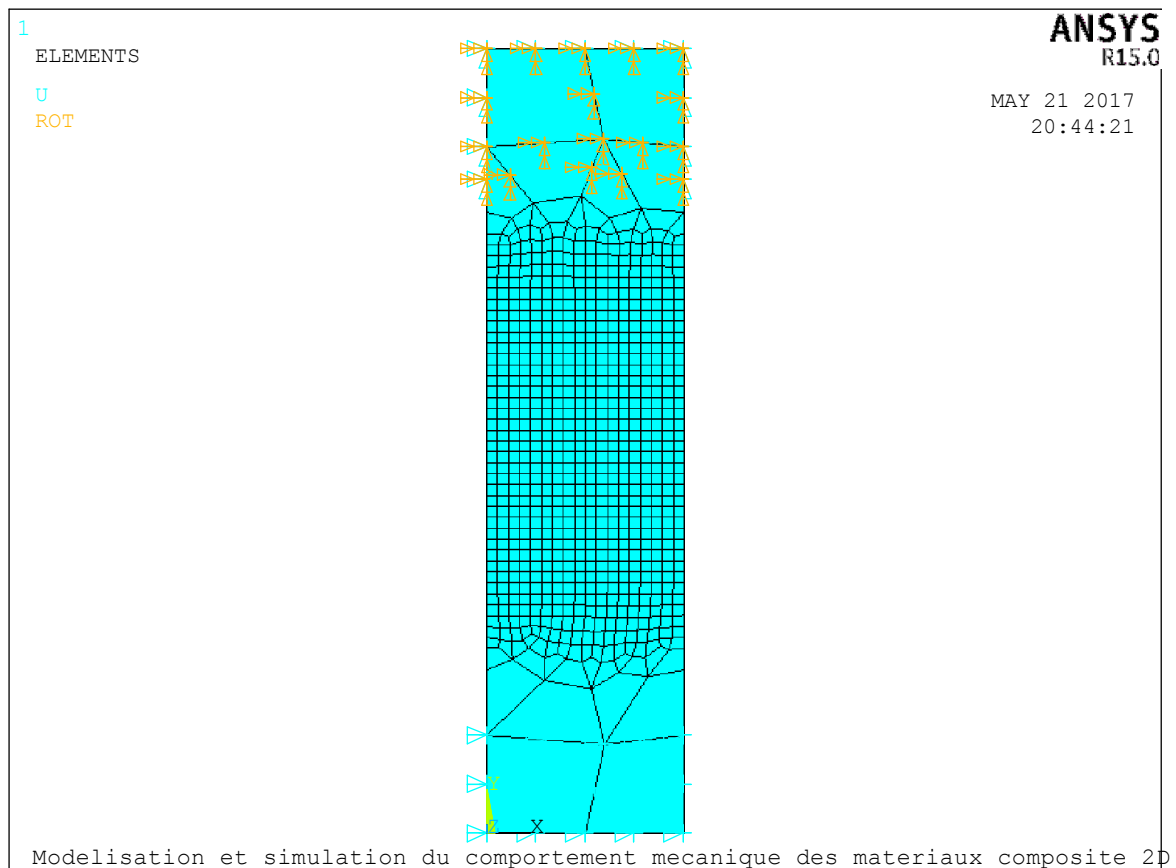
Dans ce travail, nous avons utilisé un maillage quadratique parce que ce maillage nous permet une répétition régulière de motifs identiques.



**Figure IV.11.** maillage de l'éprouvette

**IV. 6. 8. Conditions aux limites**

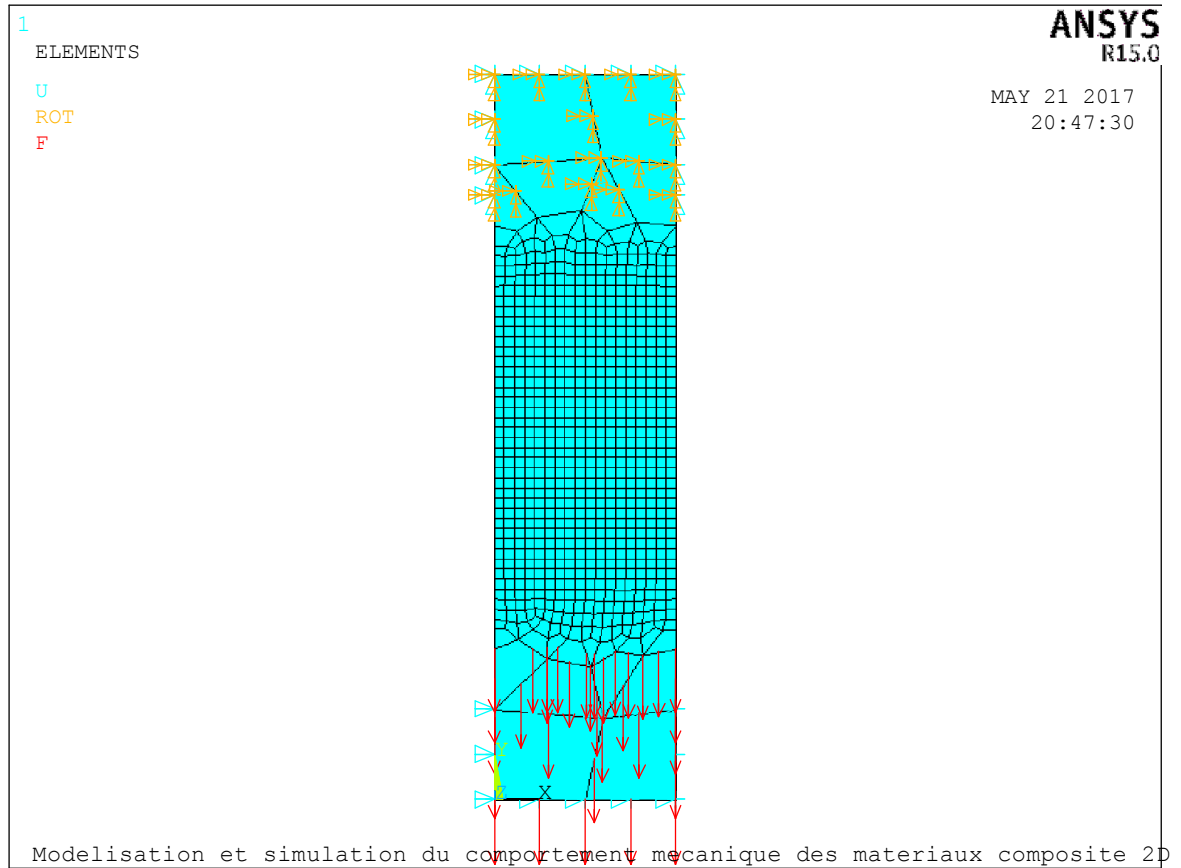
on effectue les degrés de liberté de chaque nœud pour éliminer tous les DDL dans les nœuds dans la zone de fixation et tous les DDL sauf (UY) de la zone de l'application des charges (x,y,z)



**Figure IV.12..Conditions aux limites**

**IV. 6. 9. Application de la charge sur l'éprouvette**

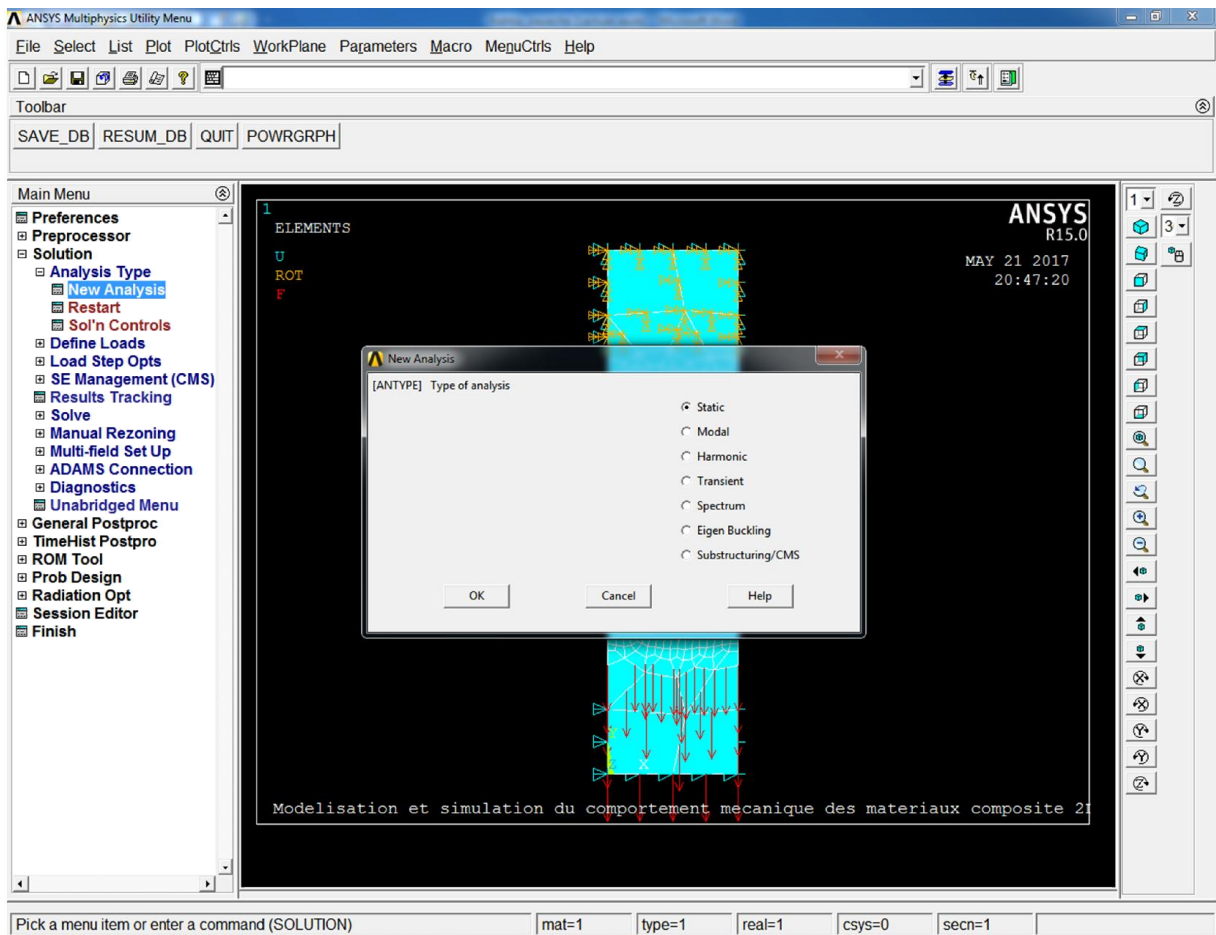
On applique une charge de 7530 N sur chaque nœuds de la zone de l'application



**FigureIV.13** Application de la charge sur l'éprouvette

**IV. 6. 10. Solution**

Pour obtenir les résultats de l'essai de traction, nous appliquons une analyse statique ( Figure IV.14 et Figure IV.15).



**FigureIV.14** Analyse statique

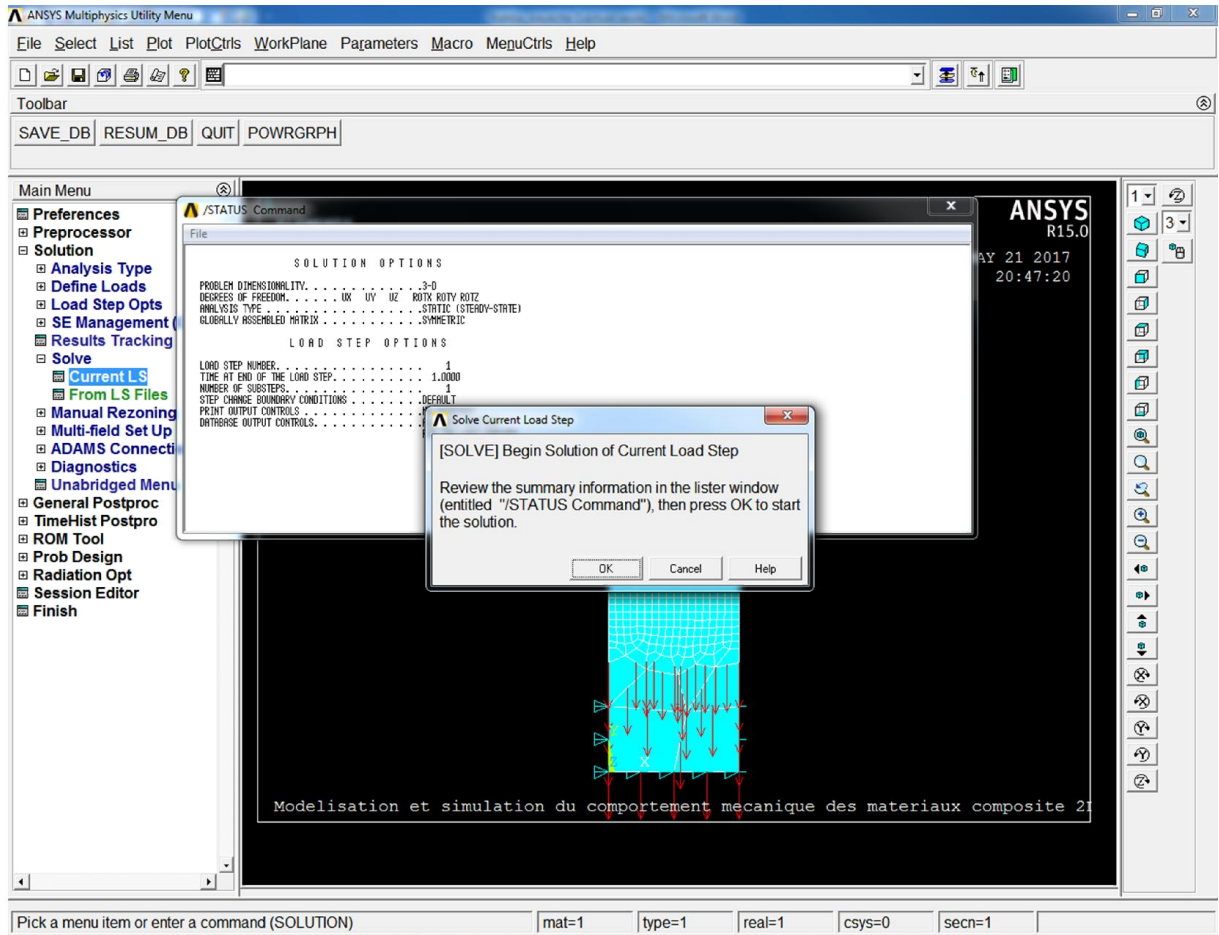
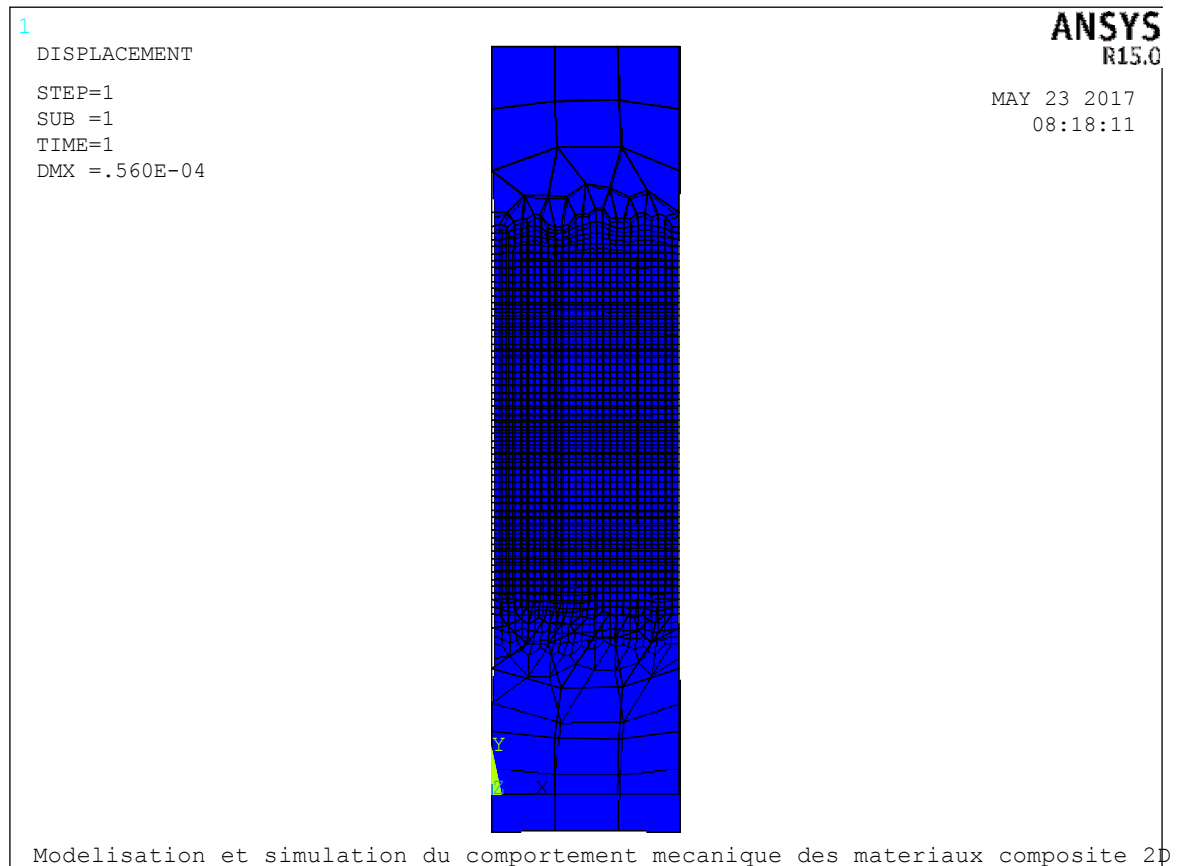


Figure IV.15 Lancement des calculs

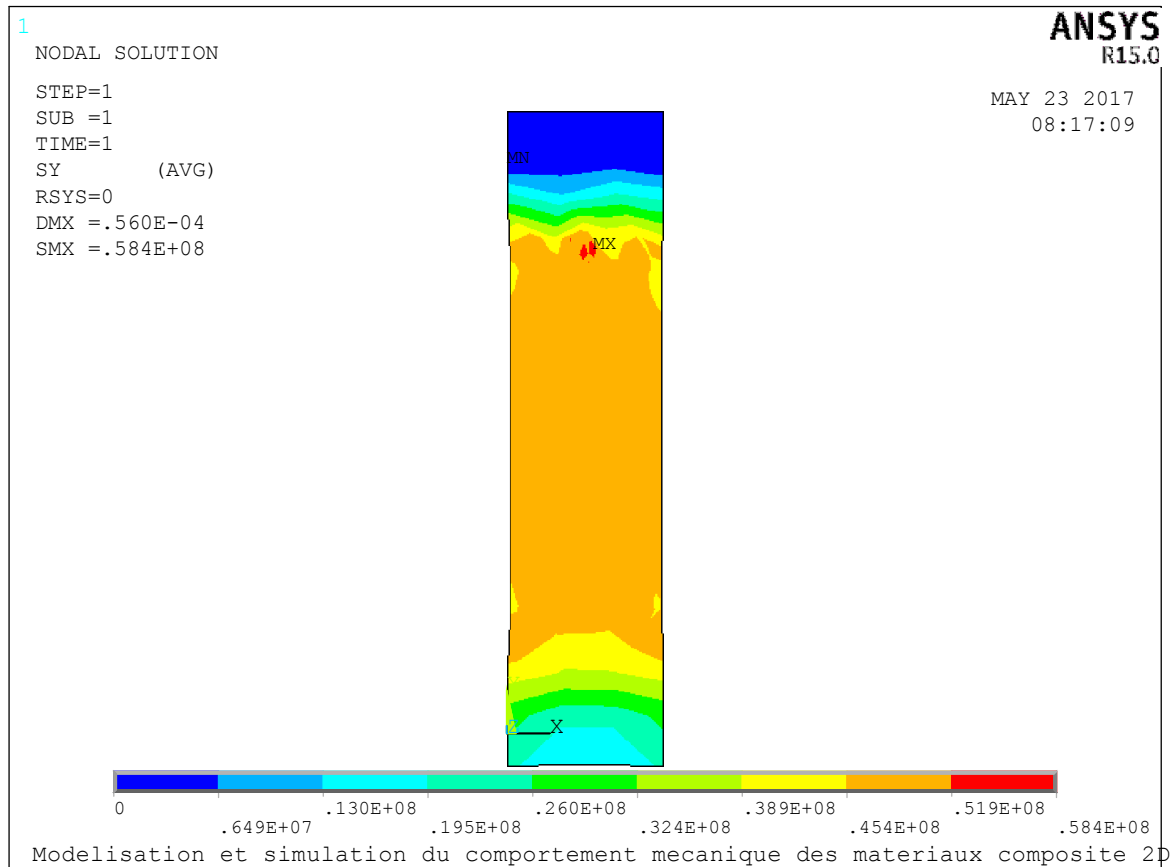
La figure suivante montre la comparaison entre l'état initiale et l'état finale de l'essai de traction, le résultat numérique de la dilatation est 0.000056m.



**Figure IV16.** la comparaison entre l'état initiale et l'état finale de l'essai

**Contrainte selon y :**

Les deux figures VI.17 et VI.18 montrent la variation des contraintes et les déformations selon l'axe (UY) respectivement.



**Figure IV.17.**Contrainte selon l'axe (UY)

Déformation selon y :

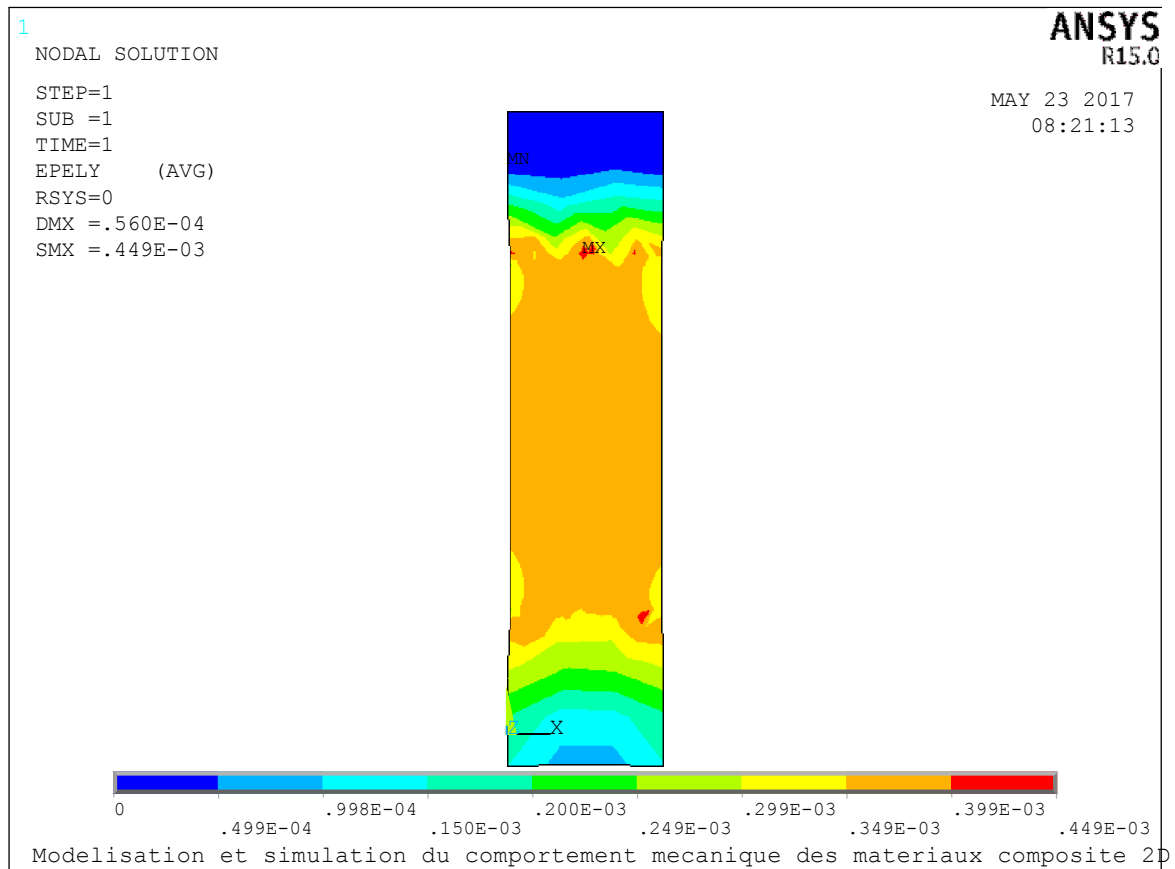


Figure IV.18. Déformation selon l'axe (UY)

IV.6. 11. Calcule de module de Youg

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad / \quad S = L \times l \quad / \quad \epsilon = 0.000056m \quad S = 24 \times 7.2 = 172.8 \text{ mm}^2$$

$$\sigma = \frac{F}{S} = \frac{7530}{172.8} = 64.32 \text{ Pa} \quad E = 7.78 \text{ Gpa}$$

Conclusion

La simulation c'est la base du maillage c'est un aspect rhéologique, l'aspect réel prend en compte les propriétés réelles du matériau, et les propriétés de la décohésion entre le renfort et la matrice.

## *Conclusion générale*

L'objectif de notre travail était de réaliser des plaques de composites multifonctionnelles jute/polyester destinés à l'application mécanique, et de soumettre les éprouvettes représentatives à diverses sollicitations normalisées (traction) afin de définir les niveaux maximums avant rupture pour une application réelle en service.

Nous pouvons conclure que la reproductibilité des courbes des différents essais mécaniques dénote de l'homogénéité des plaques réalisées, aussi bien pour le composite jute/polyester. Cependant, les phénomènes et les mécanismes liés à l'endommagement des structures sous différentes sollicitations sont difficiles à établir. La nature, l'orientation et l'arrangement des fibres constituent des paramètres primordiaux pour optimiser la durée de vie dans des conditions réelles en service.

Les principales conclusions peuvent être rassemblées comme suit :

- Sur la base des résultats de traction qui présentent globalement un comportement linéaire avec une rigidité très élevée de fibre de verre, nous avons procédé à un protocole de fluage à contrainte imposée de 80% de la contrainte ultime.
- L'observation des faciès de rupture en microscopie électronique à balayage montrant le délaminage des fibres par rapport à la matrice pour la plaque jute/polyester conforte l'importance de traitement d'ensimage des fibres de verre, ce qui assure une excellente adhérence fibre-matrice.

Le choix du modèle élastique pour la simulation par maillage (logiciel ANSYS: APDL) est conforté par la concordance des résultats par rapport à la même plage expérimentale. Il est plus précis dans le cas du stratifié jute/polyester car ce dernier présente une plage de déformation permanente au cours des essais monotone.

Le choix de tel ou tel renfort dépendra des types de sollicitation et de déformations appliquées sur chaque partie de l'éprouvette.

*Perspectives* : nous pouvons suggérer, pour compléter ce travail :

Etudier l'endommagement thermique aux ultraviolets pour tous les composites réalisés.

*Reference bibliographique*

- [1] R.G. Loewy, Recent developments in smart structures with aeronautical applications. *Smart Materials and Structures*, 1997; 6: 11–42.
- [2] REINHART, T.J. & CLEMENTS, L.L. « introduction to composites. » dans (engineered materials handboo - volume 2 international,(1993).
- [3] GÜRDAL, Z, HAFTKA, R.T, & HAJELA, P « design and optimization of laminated composite materials » Canada: wiley-interscience publication, (1999).
- [4] Rokbi. M, «Comportement à la rupture et caractérisation mécanique de composites polyester-fibres de verre», thèse Magister, M'sila, 2001.
- [5] Prombut. P, «caractérisation de la propagation de délaminage des stratifiées composites multidirectionnels» , thèse Doctorat, Toulouse, 2007.
- [6] BOUZIT. F, «élaboration et caractérisation mécanique, en statique et en fatigue, des panneaux sandwichs à base de renforts naturels», thèse Magister, BOUMERDES 2015
- [7] BARRAU. J.J, «Structures en matériaux composites», Éditions Techniques de l'Ingénieur, bm5080, 2004
- [8] RIGAL. J.C, NEGRIER. A, «Présentation des matériaux composites», Éditions Techniques de l'Ingénieur, a7790, 2013
- [9] PERROT. Y, «Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites», thèse de doctorat, Université de Bretagne Sud, 2006.
- [10] CARAMARO. L, «Fibres et fils à usage technique», Éditions Techniques de l'Ingénieur, n2510, 2005.
- [11] BOISSE. P, «Mise en forme des renforts fibreux de composites», Éditions Techniques de l'Ingénieur, am3734, 2004
- [12] JEAN-MARIE BERTHLOT, ((Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures)) ; 4eme édition, ed tec&doc, Lavoisier, (2005).
- [13] NOOR AK., "Computational Models for Sandwich Panels and Shells," *Appl Mech Rev*, vol.49, (1996).
- [14] CHERDOUD-CHIHANI A., MOUZALI M., ABADIE M.J.M., « study of cross linking ams/dgeba system by ftir », *journal of applied polymer science*, vol. 69, (1998).
- [15] PUGLIA D., VALENTINI L., KENNY J.M., « analysis of the cure reaction of carbon nanotubes/epoxy resin composites through thermal analysis and raman spectroscopy », *journal of applied polymer science*, vol. 88, (2003).

- [16] LIANG G., ZUO R., LU T., WANG J., « Modification of Vinyl Ester Resin by a New Thermoset Liquid crystalline Diacrylate », *Journal of Materials Science*, vol. 40, (2005).
- [17] NARAYANAN S., SCHADLER L.S., « Mechanisms of Kink-band Formation in Graphite/Epoxy Composites : a Micromechanical Experimental Study », *Composite Materials and Technology*, vol. 59, (1999).
- [18] Mercier J., *Prise En Compte Du Vieillissement Et De L'endommagement Dans Le Dimensionnement De Structures En Matériaux Composites*, Thèse De Doctorat, 2006, Ecole Nationale Supérieure Des Mines De Paris
- [19] SANDHU R.S., non linéaire réponse of unidirectionnel angle-ply laminaires, *journal aircraft* 1975, vol.13, pp 104-111
- [20] RENARD J., THIONNET A, damage in composite :from physical mechanism to modelling. *Composites Science and Technology*, 2006, Vol. 66, pp 642/646
- [22] DUPLESSIS KERGOMARD Y., , Thèse de Doctorat, Ecole Nationale 2007, Supérieure des Mines de Paris
- [21] KIM J.K., KIM C.S., SONG D.Y., , *Materials Science and Engineering A*, 2003, Vol. 340, pp 33/40
- [23] OYA N., HAMADA H., , *Composites Part A*, 1997, Vol. 28 1, pp 823/832P
- [24] J. Lemaitre and J. L. Chaboche. *mécanique des matériaux solides*. Dunod, 1988.
- [25]. J. Lemaitre and J.-L. Chaboche. *Mécanique des matériaux solides*, chapter 7, pages 343–444. Dunod, 2eme édition, 1988.
- [26]. J. A Lemaitre. *A course on damage mechanics*. Springer-Verlag, 1992.
- [27]. Berthelot J. M. *Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures*, Edition Technique & documentation, 1999.
- [28] Hashin, Z., Failure criteria for unidirectional fiber composites. *Journal of applied mechanics*, 47:329-334, 1980
- [29]. TSAI, S. et WU, E. (1971). A general theory of strength for anisotropic materials. *Journal of Composite Materials*, 5:58–80.
- [30] Costa, P., *Les matériaux de l'industrie Aérospatial-les composites*. *L'Armement*, vol. 7:119-143, 1987.
- [31] Hashin, Z., *Analysis of Composite Materials*. *J. Applied Mechanics*, vol.50: 481-505, 1983.

- [32] Fitoussi, J., Etude micromécanique de l'influence de l'endommagement à l'interface fibre/matrice sur le comportement des composites organiques à renforts discontinus. Thèse de l'ENSAM, Paris, 1995.
- [33] [Allix et al., 1990] Allix, O., Ladevèze, P., Le Dantec, E., Vittecoq, E., Damage mechanics for composite laminates under complex loading, *Damage and failure of anisotropic solids*. EDFG 5, Ed. J.P. Boehler, Engineering publications: 551-569, London, 1990.
- [34] [Ladevèze, 1983] Ladevèze, P., Sur une théorie de l'endommagement anisotrope, Laboratoire de Mécanique et Technologie Cachan, 1983.
- [35] Garrett, K. W. et Bailey, J. E., Multiple transverse fracture in 90-degree cross-ply laminates of a glass fiber-reinforced polyester. *J. Mat. Sci.*, vol. 12, no. 1: 157-168, 1977.
- [36] Manders, P. W., Chou, T. W., Jones, F. R. et Rock, J. W., Statistical analysis of multiple fracture in 0/90/0 glass fibre/epoxy resin laminates. *Journal of Material Sciences*, 18:2876-2889, 1983.
- [37] Garrett, K. W. et Bailey, J. E., Multiple transverse fracture in 90-degree cross-ply laminates of a glass fiber-reinforced polyester. *J. Mat. Sci.*, vol. 12, no. 1: 157-168, 1977.
- [38] Fukunaga, H., Chou, T. W., Peters, P. W. M. and Schulte, K., Probabilistic failure strength analyses of graphite epoxy cross-ply laminates. *J. Compos. Mater.*, vol. 18, no. 4 : 339-356, 1984.
- [39] Masters, J. M. et Reifsnider, K. L., An investigation of cumulative damage development in quasi-isotropic graphite/epoxy laminates," in *Damage in Composite Materials*, K.L. Reifsnider, Ed: pp.40-62. ASTM STP, Philadelphia, 1982.
- [40][Manders et al,1983] Manders, P. W., Chou, T. W., Jones, F. R. et Rock, J. W., Statistical analysis of multiple fracture in 0/90/0 glass fibre/epoxy resin laminates. *Journal of Material Sciences*, 18:2876-2889, 1983.
- [41] Kachanov, L. M. , On creep rupture time. *Otd. Tekhn. Nauk., Mekh. Mashinostr.*, 8:26-31,1958.
- [42] Rabotnov, Y. N., Creep rupture. XII International Congress on Applied Mechanics, Stanford, 1968.
- [43] Talreja, R., A continuum mechanics characterization of damage in composite materials. In *Proceedings of the Royal Society of London*, volume A399: 195-216, 1985.
- [44] Ladevèze, P., Sur la mécanique de l'endommagement des composites. *Comptes-rendus des 5ème Journées Nationales sur les Composites, JNC-5* : 667-683,1986.

- 
- [45] Matzenmiller, A., Lubliner, J. et Taylor, R. L., A constitutive model for anisotropic damage in fiber-composites. *Mechanics of Materials*,20:125–152, 1995.
- [46] Maire, J.F. et Chaboche, J.L., A new formulation of continuum damage mechanics (cdm) for composite materials. *Aerospace Science and Technology*, 4:247–257, 1997.
- [47] Leguillon, D., Calcul du taux de restitution de l'énergie au voisinage d'une singularité. *Comptes rendus de l'Académie des sciences. Série 2, Mécanique, Physique, Chimie, Sciences de l'univers, Sciences de la Terre*, 309(10):945–950,1989.
- [48] Wang, S. S., An analysis of delamination in angle-ply fiber-reinforced composites. *ASME, Transactions. Journal of Applied Mechanics*, 47:64–70, 1980.
- [49] Allix, O. et Ladevèze, P., Interlaminar interface modelling for the prediction of delamination. *Composite Structures*, 22(4): 235–242,1992.
- [50]** ZALT Abdulkader, «Endommagement par Fatigue et Prédiction de la durée de vie des joints Soudés de type Caisson», thèse Doctorat, L'Université de LORRAINE, 2012.

*Résumé*

L'objectif principal de ce projet est de mieux comprendre les phénomènes relatifs à la mise en œuvre et l'utilisation des matériaux composites à base de polyester renforcé par des fibres de Jute en utilisant une presse à chaud. L'influence des paramètres de fabrication des matériaux composites à base de la polyester renforcée par des tissu de Jute est présenté en détail. La simulation et la modélisation numériques sur les matériaux composites ont montré que les paramètres de mise en œuvre de nos matériaux composites ont un effet significatif sur les caractéristiques mécaniques de tels matériaux.

*ملخص*

الهدف الرئيسي من هذه المشروع هو الفهم الحسن لكل ما هو متعلق بتصنيع واستعمال المواد المركبة والمتكونة من البولبيستر المدعم بالخيش وذلك باستعمال ضاغطة حرارية. حيث يرد تأثير متغيرات التصنيع (المواد المركبة) على البولبيستر المقوي بالخيش المنسوج , وأظهرت الاختبارات الميكانيكية على انا المواد المركبة لها تأثير كبير على الخصائص لكسر هذه المواد .