

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOULOU D MAMMERI DE TIZI-OUZOU  
FACULTE DE GENIE DE LA CONSTRUCTION  
DEPARTEMENT DE GENIE-MECANIQUE



# ***MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES***

*En vue de l'obtention du diplôme de Master en Génie  
mécanique  
Option : Construction Mécanique*

## ***THEME***

**Étude de l'évolution des propriétés  
mécaniques des composites stratifiés  
avec la variation de l'élançement**

*Proposé et dirigé par :*

Mme : MANSOURI Lila

*Réalisé par :*

Mr. RAMDINI Ahmed  
Mr. YAHOUI Rachid

Promotion 2017-2018

# Remerciement

**La première personne que nous tenons à remercier est notre encadreur Mme. Mansouri Lila pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être menée au bon port.**

**Nos remerciements s'étendent également aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner et de juger le présent travail.**

**Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui nous ont enseigné et qui par leurs compétences nous ont soutenu dans la poursuite de nos études.**

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

# DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail à :*

*Mes parents, êtres plus chers au monde, je les remercie de tout cœur pour leur sacrifice, leur soutien permanent, leur précieux conseils et pour m'avoir guidé depuis mon jeune âge.*

*Que dieu me les préserve ;*

*Mes sœurs et mes frères;*

*Mon binôme Rachid, mes chers amis Chafaa, Hakim, et tous mes autres amis sans oublier personne ;*

*Mes enseignants qui ont contribué à ma formation depuis le primaire, le CEM, le lycée et l'université.*

*Ahmed*

# DEDICACE

*Je dédie ce modeste travail :*

*À mes parents .Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que Dieu leur procure bonne santé et longue vie.*

*À tous ceux qui m'ont soutenu tout au long de ce projet, bien sûr à mes frères et mes sœurs, mon binôme Ahmed sans oublier mes chères amis Hakim, Chafaa et tous mes autres amis sans oublier personne.*

*Mes enseignants qui ont contribué à ma formation depuis le primaire, le CEM, le lycée et l'université.*

*Rachid*

# Table de matière

Table de matière	
Liste des figures	
Liste des Tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale.....	1
<b><i>Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites</i></b>	
<b>I.1.</b> Introduction.....	3
<b>I.2.</b> Matériaux composites .....	3
<b>I.2.1.</b> Constituants d'un matériau composite .....	4
<b>I.2.1.1.</b> Le renfort.....	4
<b>I.2.1.2.</b> Les résines .....	9
<b>I.2.1.3.</b> Les charges .....	13
<b>I.2.1.4.</b> Les additifs .....	14
<b>I.2.1.5.</b> L'interface .....	14
<b>I.2.2.</b> Architecteurs des matériaux composites.....	14
<b>I.2.2.1.</b> Les stratifiés .....	15
<b>I.2.3.</b> Procédés d'élaboration.....	20
<b>I.2.3.1.</b> Moulage au contact .....	20
<b>I.2.3.2.</b> Avantages et inconvénients de moulage au contact .....	21
<b>I.2.4.</b> Domaine d'application.....	21
<b>I.2.4.1.</b> Applications aéronautiques .....	21
<b>I.2.4.2.</b> Applications automobiles .....	22
<b>I.2.4.3.</b> Application dans les sports et loisirs .....	22
<b>I.2.4.4.</b> Application marines .....	23
<b>I.2.4.5.</b> Autres applications.....	24
<b>I.3.</b> Conclusion .....	24

## ***Chapitre II : Endommagement et vieillissement des matériaux composites***

<b>II.1.</b> Introduction .....	25
<b>II.2.</b> Endommagement des composites stratifiés .....	25
<b>II.2.1.</b> Les différentes échelles d'observation de l'endommagement.....	25
<b>II.2.2.</b> Les divers mécanismes d'endommagement .....	28
<b>II.3.</b> Endommagement des composites stratifiés .....	29
<b>II.3.1.</b> Modes de rupture .....	29
<b>II.3.2.</b> Les fissurations .....	31
<b>II.4.</b> Le vieillissement .....	32
<b>II.4.1.</b> Influence de l'environnement sur les matériaux composites .....	32
<b>II.4.2.</b> Vieillissement des matériaux composites à matrice polymères en présence d'un fluide.....	33
<b>II.4.3.</b> Les modes de Vieillissement des matériaux composites à matrice polymères en présence d'un fluide.....	33
<b>II.4.3.1.</b> Le vieillissement physique .....	33
<b>II.4.3.2</b> Le vieillissement chimique .....	35
<b>II.5.</b> Facteurs influençant la résistance du composite .....	35
<b>II.6.</b> Conclusion.....	37

## ***Chapitre III : Calcul et comportement des composites stratifiés***

<b>III.1.</b> Introduction .....	38
<b>III.2.</b> Comportement élastique linéaire .....	38
<b>III.2.1.</b> Matrice de rigidité.....	38
<b>III.2.2.</b> Matrice de souplesse ou flexibilité .....	38
<b>III.2.3.</b> Changement de base .....	39
<b>III.2.4.</b> Matériaux isotrope .....	39
<b>III.2.5.</b> Matériau anisotrope .....	40
<b>III.3.</b> Caractéristiques du mélange (renfort + matrice) .....	41
<b>III.3.1.</b> Fractions volumiques .....	42
<b>III.3.2.</b> Fractions massiques. ....	42
<b>III.3.3.</b> Relations entre fractions volumiques et massiques .....	42

<b>III.3.4.</b> Épaisseur du pli.....	43
<b>III.4.</b> Comportement élastique d'un matériau unidirectionnel .....	43
<b>III.4.1.</b> Concept d'homogénéisation.....	43
<b>III.4.2.</b> Loi de Hooke pour un matériau unidirectionnel .....	44
<b>III.4.3.</b> Modules d'élasticité en fonction des constantes des rigidité et de souplesse ....	45
<b>III.4.4.</b> Les modules l'élasticité d'un composite unidirectionnel en fonction des caractéristiques mécaniques de ces constituants .....	46
<b>III.5.</b> Modules d'élasticité en fonction des coefficients de souplesse dans un matériau orthotrope .....	47
<b>III.5.1.</b> Loi de Hooke pour un matériau orthotrope.....	47
<b>III.5.2.</b> Module de l'ingénieur.....	48
<b>III.6.</b> comportement mécanique des stratifiés.....	49
<b>III.6.1.</b> Théorie classique des stratifiés .....	49
<b>III.7.</b> cisaillement interlaminaire.....	60
<b>III.7.1.</b> Essai de flexion avec appuis rapprochés.....	60
<b>III.7.2.</b> les paramètres influents sur la contrainte de cisaillement interlaminaire .....	61
<b>III.8.</b> conclusion.....	62

### *Chapitre IV : Partie expérimentale*

<b>IV.1.</b> Introduction.....	63
<b>IV.2.</b> présentation de matériau .....	63
<b>IV.2.1.</b> Élaboration de matériau .....	63
<b>IV.2.2.</b> Découpage et géométrie des éprouvettes .....	64
<b>IV.3.</b> Déroulement des essais.....	65
<b>IV.3.1.</b> Essai physico-chimique (calcination) .....	65
<b>IV.3.1.1.</b> Le matériels utilisés.....	65
<b>IV.3.1.2.</b> Déroulement de l'essai de calcination.....	68
<b>IV.4.</b> Essai de flexion trois points .....	68
<b>IV.4.1.</b> Machine de flexion utilisée .....	68
<b>IV.4.2.</b> Géométrie de l'essai.....	68
<b>IV.5.</b> Les résultats de l'essai de flexion trois point.....	70
<b>IV.5.1</b> Analyse et interprétation des résultats.....	76

<b>IV.6. Observation de facies de rupture au microscope électronique à balayage MEB .....</b>	<b>80</b>
<b>IV.6. Conclusion .....</b>	<b>82</b>
Conclusion générale .....	83
Références bibliographiques	

## Liste des figures

<b>Figure I.1</b> : Schéma illustratif d'un matériau composite.....	3
<b>Figure I.2</b> : types de matériau composite. ....	4
<b>Figure I.3</b> : Les différents types de renfort .....	5
<b>Figure I.4</b> : Formes de mats : (a) mat à fibres courtes, (b) mat à fibres continues.....	7
<b>Figure I.5</b> : chaîne et trame d'un tissu.....	7
<b>Figure. I.6</b> : Taffetas équilibré (roving verre E 150 g/m <sup>2</sup> ) .....	8
<b>Figure. I.7</b> : sergé 2x2 équilibré (verre E silionne 295 g/m <sup>2</sup> ) .....	8
<b>Figure. I.8</b> : satin de 4 équilibré (carbone T300 3K, 285 g/m <sup>2</sup> ).....	8
<b>Figure. I.9</b> : tresse plate (verre E).....	8
<b>Figure I.10</b> : tissu plan (ici non équilibré).....	8
<b>Figure I.11</b> : les divers types de résines .....	9
<b>Figure I.12</b> : Schéma illustratif d'un matériau composite stratifié.....	15
<b>Figure I.13</b> : pli à fibre unidirectionnelles .....	15
<b>Figure I.14</b> : Désignation d'un stratifié.....	16
<b>Figure I.15</b> : Convention de signe pour la désignation des stratifiés .....	16
<b>Figure I.16</b> : Moulage au contact .....	20
<b>Figure I.17</b> : Airbus A380.....	21
<b>Figure I.18</b> : matériaux composites dans la voiture .....	22
<b>Figure I.19</b> : navire de luxe kingcat .....	24
<b>Figure II.1</b> : Les différentes échelles d'observation de l'endommagement : illustration sur un matériau stratifié.....	26
<b>Figure II.2</b> : Rupture de fibre.....	27

<b>Figure II.3</b> : différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre.....	27
<b>Figure II.4</b> : Rupture transverse de la matrice .....	28
<b>Figure II.5</b> : rupture longitudinale de la matrice.....	29
<b>Figure II.6</b> : décohésion fibre-matrice.....	29
<b>Figure II.7</b> : Modes de sollicitations mécaniques de la rupture .....	30
<b>Figure II.8</b> : Différents types de fissuration au sein d'un composite stratifié: Modes de sollicitations mécanique de la rupture .....	31
<b>Figure II.9</b> : Mécanisme de rupture dans les stratifiés.....	32
<b>Figure II.10</b> : Schéma de la plastification d'une macromolécule .....	34
<b>Figure II.11</b> : Effet de la longueur d'une fibre de verre E sur la résistance moyenne de la fibre .....	35
<b>Figure II.12</b> : Influence du diamètre des fibres de verre sur la résistance à la compression d'un composite .....	36
<b>Figure II.13</b> : Corrélation entre la résistance au cisaillement du composite et le taux de porosité.....	36
<b>Figure II.14</b> : Influence du taux de porosité sur la résistance à la Compression du composite à fibre de verre.....	37
<b>Figure III.1</b> : Volume élémentaire représentatif.....	44
<b>Figure III.2</b> : couche de matériau composite orthotrope .....	47
<b>Figure III.3</b> : éléments de stratifié .....	49
<b>Figure III.4</b> : Déformation dans le cas d'un schéma du premier degré, en absence de cisaillement transverse .....	51
<b>Figure III.5</b> : schématisation des résultantes en membrane des actions exercées sur un élément stratifié.....	54
<b>Figure III.6</b> : Schématisation des moments de flexion et de torsion .....	55

<b>Figure III.7</b> : Déformation dans le cas d'un schéma du premier degré avec cisaillement transverse.....	57
<b>Figure IV.1</b> : Moulage au contact .....	64
<b>Figure IV.2</b> : Scie à disque diamanté .....	64
<b>Figure IV. 3</b> : Géométrie des éprouvettes de flexion et calcination.....	65
<b>Figure IV.4</b> : Matériel utilisé. ....	66
<b>Figure IV.5</b> : Échantillons avant calcination.....	67
<b>Figure IV.6</b> : Échantillon après calcination .....	67
<b>Figure IV.7</b> : Machine de flexion et de traction IBERTEST. ....	68
<b>Figure IV.8</b> : Géométrie de l'essai statique de flexion trois points .....	69
<b>Figure IV.9</b> : Évolution de force/flèche de Lot 1 pour L=40mm.....	71
<b>Figure IV.10</b> : Évolution de force/flèche de Lot 2 pour L=40mm.....	71
<b>Figure IV.11</b> : Faces en compression de lot 1 et lot 2 avec L=40mm .....	71
<b>Figure IV.12</b> : Faces en traction de lot 1 et lot 2 avec L=40mm .....	71
<b>Figure IV.13</b> : Évolution de force/flèche de Lot 1 pour L=50mm.....	72
<b>Figure IV.14</b> : Évolution de force/flèche de lot 2 pour L=50mm .....	72
<b>Figure IV.15</b> : Faces de compression de lot 1 et lot 2 avec L=50 mm .....	72
<b>Figure IV.16</b> : Faces traction de lot 1 et lot 2 avec L=50mm .....	72
<b>Figure IV.17</b> : Évolution de force/flèche de lot 1 pour L=64mm.....	73
<b>Figure IV.18</b> : Évolution de force/flèche de lot 2 pour L=64mm.....	73
<b>Figure IV.19</b> : Faces de compression de Lot 1 et lot 2 avec L=64 mm .....	73
<b>Figure IV.20</b> : Faces de traction de lot 1 et lot 2 avec L=64 mm .....	73
<b>Figure IV.21</b> : Évolution de force/flèche de lot 1 pour L =80mm.....	74
<b>Figure IV.22</b> : Évolution de force/flèche de lot 2 pour L=80mm.....	74

<b>Figure IV.23</b> : Faces en compression de lot 1 et lot 2 avec L=80mm .....	74
<b>Figure IV.24</b> : Faces en traction de lot 1 et lot 2 avec L=80mm .....	74
<b>Figure IV.25</b> : Évolution de force/flèche de lot 1 pour L=100mm. ....	75
<b>Figure IV.26</b> : Évolution de force/flèche de lot 2 pour L=100mm.....	75
<b>Figure IV.27</b> : Faces en compression de lot 1 et lot 2 avec L=100mm .....	75
<b>Figure IV.28</b> : Faces en traction de lot 1 et lot 2 avec L=100mm .....	75
<b>Figure IV.29</b> : Courbe force/flèche pour le lot 1 avec différents élancements. ....	76
<b>Figure IV.30</b> : Courbe force/flèche pour le lot 2 avec différents élancements. ....	76
<b>Figure IV.31</b> : Résultats de E apparent obtenus pour lot 1 et lot 2. ....	77
<b>Figure IV.32</b> : Résultats de $\sigma_e$ pour le lot 1 et lot 2 avec différents élancements. ....	77
<b>Figure IV.33</b> : Résultats de $\sigma_r$ pour le lot 1 et lot 2 avec différents élancements.....	78
<b>Figure IV.34</b> : Résultats de $\epsilon_r$ pour le lot 1 et lot 2 avec différents élancements.....	78
<b>Figure IV.35</b> : Résultats de $\epsilon_e$ pour le lot 1 et lot 2 avec différents élancements. ....	79
<b>Figure IV.36</b> : Évolution de la contrainte du cisaillement en fonction de l'élancement pour les deux lots.....	80
<b>Figure IV.37</b> : Observation du faciès de rupture d'un composite renforcé par fibres de verre en mats.....	81
<b>Figure IV.38</b> : Observation du faciès de rupture d'un composite renforcé par fibres de verre en tissus. ....	81

## Liste des Tableaux

<b>Tableau I.1</b> : différents types de fibre de verre.....	6
<b>Tableau I.2</b> : Les caractéristique de résine polyester.....	10
<b>Tableau I.3</b> : Les caractéristique de résine polyester.....	11
<b>Tableau I.4</b> : Les caractéristique de résine époxydes.....	13
<b>Tableau I.5</b> : Avantages et inconvénients de moulage au contact.....	21
<b>Tableau IV.1</b> : présentation des matériaux utilisés.....	63
<b>Tableau IV.2:</b> Résultats de l'essai de perte au feu.....	67
<b>Tableau IV.3</b> : les caractéristiques mécaniques du « lot 1 » et « lot 2 » pour L=40 mm ....	70
<b>Tableau IV.4</b> : les caractéristiques mécaniques du « lot1 » et « lot 2 » pour L= 50mm ....	71
<b>Tableau IV.5</b> : les caractéristiques mécaniques du « lot 1 » et « lot 2 » pour L=64mm .....	72
<b>Tableau IV.6</b> : les caractéristiques mécaniques du «lot 1 » et « lot 2 » pour L=80mm .....	73
<b>Tableau IV.7</b> : les caractéristiques mécaniques du « lot 2 » pour L=100mm .....	74
<b>Tableau IV.8</b> : Les résultats de $\tau$ pour différents élancements .....	79

## Liste des Symboles

$E_L$  : Module de Young longitudinal. [MPa]

$E_T$  : Module de Young transversale. [MPa]

$E_{chaîne}$  : Module de Young suivant le sens chaîne. [MPa]

$E_{trame}$  : Module de Young suivant le sens trame. [MPa]

$\nu_{lt}$  : Coefficient de poisson.

$\sigma_{xx}$  : Contrainte normale. [MPa]

$\sigma_r$  : Contrainte à rupture en flexion. [MPa]

$\sigma_e$  : Contrainte élastique en flexion. [MPa]

$\tau$  : Contrainte de cisaillement. [MPa]

$\tau_{IL}$  : Contrainte de cisaillement interlaminaire. [MPa]

$T_V$  : Taux de vide du composite. [%]

$F$  : Charge appliquée [N]

$F_r$  : Charge à la rupture. [N]

$Y_r$  : Flèche a la rupture.[mm]

$F_e$  : Force élastique.[N]

$Y_e$  : Flèche élastique. [mm]

$M_f$  : Taux massique des fibres [%]

$M_m$  : Taux massique de la matrice [%]

$\rho$  : Masse volumique.[Kg/m<sup>3</sup>]

$\epsilon$  : Déformation relative.

$E_{app}$  : Module de Young apparent. [GPa]

$l$  : Longueur de l'éprouvette [mm]

$b$  : Largeur de l'éprouvette [mm]

$h$  : Épaisseur de l'éprouvette [mm]

$h_m$  : Épaisseur moyenne [mm]

$b_m$  : Largeur moyenne [mm]

$L$  : longueur entre appuis (élanement). [mm]

## Introduction générale

Les composites stratifiés sont souvent présentés comme des matériaux d'avenir, assurent diverses fonctions qui peuvent être regroupées selon des objectifs de durée de vie, de sécurité et facilite de conception.

Le développement des matériaux composites est né de la volonté d'allier les qualités techniques au besoin d'allègement dans un même matériau, qui par la suite doit s'adapter aux solutions technologiques des problèmes à résoudre. Les matériaux composites à matrice polymère renforcée par des fibres de verres sont de plus en plus employés dans plusieurs domaines de l'industrie comme l'aéronautique, l'automobile et la construction navale. Ces matériaux se présentent sous forme de stratifiés qui consistent en un empilement de plis de fibres (tissées ou non) imprégnés de résine, et protégés du milieu environnant par une couche de résine pigmentée de protection, le gel-coat.

Ainsi, pour promouvoir une plus grande utilisation des matériaux composites, il est primordial de déterminer leurs comportements mécaniques et analyser les défauts dans ces matériaux. Pour cela, plusieurs méthodes de caractérisation de ces matériaux ont été mises au point. Elles permettent le choix optimal du type de composite et mettent en évidence les paramètres prépondérants dans le comportement du matériau.

L'utilisation des structures en matériaux composites soumises à des sollicitations de flexion nécessite la connaissance du comportement au cisaillement de ces matériaux en statique et en dynamique. La sensibilité de ces matériaux au cisaillement inter laminaire peut entraîner des ruptures brutales. Le facteur géométrique  $l/h$  (élancement) permet de varier le taux du cisaillement au niveau d'un matériau composite.

Pour atteindre ces objectifs, nous tentons d'apporter notre contribution à partir de la caractérisation des propriétés mécanique et leur évaluation en fonction de différentes distance entre appuis par le biais de flexion trois points, en tenant compte de la contrainte du cisaillement et de voir les mécanismes de ruptures engendrés.

Ce mémoire est devisé en deux parties, une partie théorique constituée de trois chapitres, le premier consacré aux généralités sur les matériaux composites, dans le second chapitre c'est les différents mécanismes d'endommagement des stratifiés composites ainsi que les critères de rupture et vieillissement. L'étude de comportement mécanique des composites stratifiés, ainsi que la présentation de la théorie classique simplifiée des stratifiés seront présentés au troisième chapitre. La deuxième partie est une étude expérimentale, dans laquelle nous exposons la

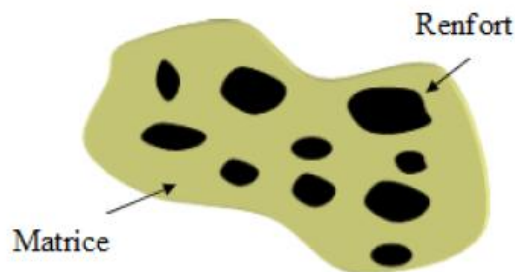
description des matériaux utilisés et la détermination des propriétés mécaniques des différentes stratifiés (différent type de renfort) sous sollicitations statiques par des essais de flexion trois points et l'essai physico-chimique (calcination). Nous terminons ce travail par une conclusion générale.

## I.1. Introduction

L'utilisation des matériaux composites étant en perpétuelle augmentation, ils occupent une place de plus en plus importante dans la réalisation des structures à hautes performances (aérospatiale, aéronautique, automobile, biomécanique). Les matériaux composites à hautes performances mécaniques possèdent des propriétés mécaniques spécifiques (propriétés rapportées à la masse volumique) élevées. Ces matériaux, de nature anisotrope, sont réalisés soit sous forme de matériaux sandwichs, soit sous forme de matériaux stratifiés. Les composites stratifiés proposent un excellent rapport masse/résistance/rigidité et permettent de répondre efficacement aux sollicitations soumises aux différentes pièces structurales grâce à la possibilité de diriger les renforts fibreux dans la direction des sollicitations.

## I.2. Matériaux composites

Par définition, un matériau composite est constitué de l'assemblage d'au moins deux ou plusieurs matériaux de nature différente, se complétant pour créer un matériau dont les performances générales sont supérieures à celles de chacun de ces composants pris séparément. [1] En effet, il est constitué de renfort de performances mécaniques supérieures est d'une matrice dont les propriétés mécaniques sont plus faible, voire la figure I.1.

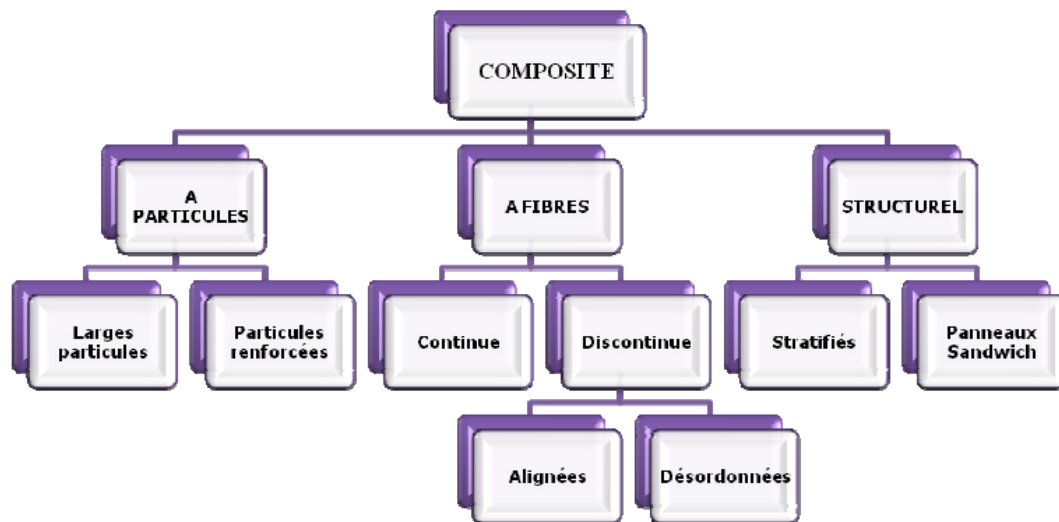


**Figure I.1** : Schéma illustratif d'un matériau composite.

Les composites sont des matériaux à la carte grâce à leurs avantages : [2]

- Gain de masse
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur des structures métalliques)
- Grande résistance à la fatigue.
- Insensibles aux produits chimiques utilisés en mécanique comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole.

Il existe plusieurs types de matériau composite, on les représente dans la figure I.2 :



**Figure I.2 :** types de matériau composite.

Les propriétés mécaniques des composites renforcés de fibres de verre dépendent principalement des caractéristiques des fibres, de leur orientation, de leur forme, de leur rapport volumétrique par rapport à la matrice, de la qualité de l'interface fibre résine ainsi que du procédé de fabrication.

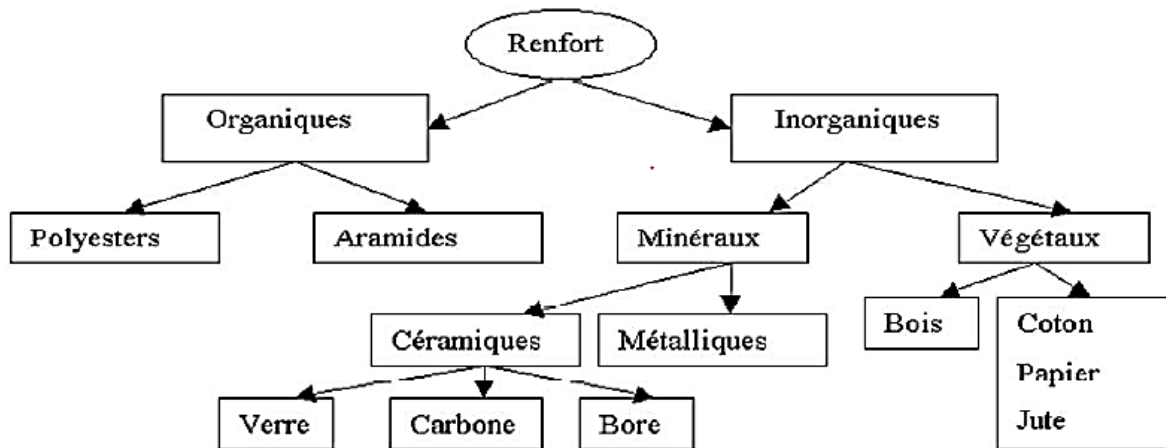
## I.2.1. Constituants d'un matériau composite

### I.2.1.1. Le renfort

Ils sont de nature filamentaire, ils constituent l'armature ou le squelette du matériau composite à une fraction volumique de (30 à 70%) destinés à améliorer ou assurer la tenue mécanique (rigidité, résistance à la rupture, à la traction) tel que cette dernière est proportionnelle au rapport longueur /diamètre ( $l/d$ ). [3]

Les renforts se caractérisent par la nature de la fibre (organique ou inorganique) ainsi que par leurs formes.

La figure I.3 représente les différentes natures de renfort.



**Figure I.3 :** Les différents types de renfort.

✓ Dans notre cas on s'intéresse aux fibres de verre

### a. fibre de verre

La fibre de verre domine dans la majorité des applications. Sa vaste gamme de propriétés, son rapport résistance/coût élevé, sa disponibilité et sa facilité de mise en œuvre en font la plus importante fibre au niveau industriel [1]. Les fibres de verre ont une bonne adhérence avec toutes les résines, elles sont élaborées à partir d'un verre faible, appelé verre textile, composé de silice  $\text{SiO}_2$ , aluminium  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , chaux  $\text{CaO}$ , magnésie  $\text{MgO}$  etc. ces produits peu coûteux, associés à des procédés assez simple d'élaboration par fibrage de verre fondu à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage **platine-rhodium**, et percés à leur bases d'orifices calibrés d'environ 2mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières chauffées par effet joule aux environs de  $1250^\circ\text{C}$ . À cette température, la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices sous forme de fibres de quelques dixièmes de mm. À la sortie de la filière, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grand vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et de vitesse d'étirage permettent d'obtenir soit des filaments continus ou discontinus.

Les fibres de verres sont fragiles est élastique, elles sont susceptible d'être endommagé par abrasion, c'est pour cette raison, que les fibres sont revêtues pendant le filage d'une résine dont le premier rôle est de protéger les fibres. Ce revêtement est appelé ensimage.

Suivant leurs compositions, différents types de verre fiables peuvent être obtenus (tableau I.1).

Type	Caractéristiques générales
<b>E</b>	A usage générale, bonne propriété électrique, essentiellement utilisée dans les composites Grande Diffusion <b>GD</b>
<b>D</b>	Hautes propriétés diélectrique
<b>A</b>	Haute tenue en alcali
<b>C</b>	Bonne résistance chimique
<b>R ,S</b>	Haute résistance mécanique essentiellement utilisé pour les composites <b>HP</b>

**Tableau I.1** : différents types de fibre de verre.

### **b. formes de renforts**

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

[3]. Il existe différentes géométries et textures de renforts :

- **forme linéique**

Les fibres sont élaborées suivant un diamètre de quelque micromètre (une dizaine), et ne peuvent par conséquent être utilisée sous forme unitaire. Pour leur utilisation pratique, ces fibres sont réunies en fils ou en mèches de différentes formes. la nomenclature générale des diverses formes linéiques est encore mal déterminée, est généralement dérivée de celle utilisée pour la fibre de verre. [4]

La fibre unitaire généralement appelée filament élémentaire ou monofilament. Les monofilaments sont ensuite réunis en fils ou mèches. Les fils continus ou discontinus sont caractérisés par leur masse linéique ou titre, qui dépend du diamètre et du nombre de monofilaments. L'unité de masse linéique est le tex, masse d'un fil de longueur égale à 1000 mètres. Soit :

$$1 \text{ tex} = 1 \text{ g/km}$$

En fait, on devrait plutôt écrire :

$$1 \text{ tex} = 10^{-6} \text{ kg/m}$$

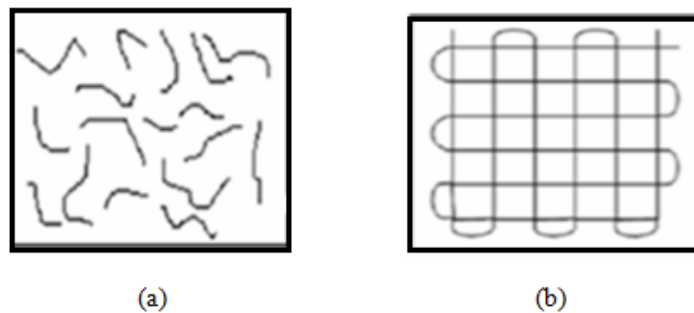
Conformément au système S.I d'unités.

- **Formes surfaciques**

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types : mats, tissus ou rubans, essentiellement développés dans le cas de fibres de verre.

- **Les mats**

Les mats sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle. Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines, suivant la mise en œuvre. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan.

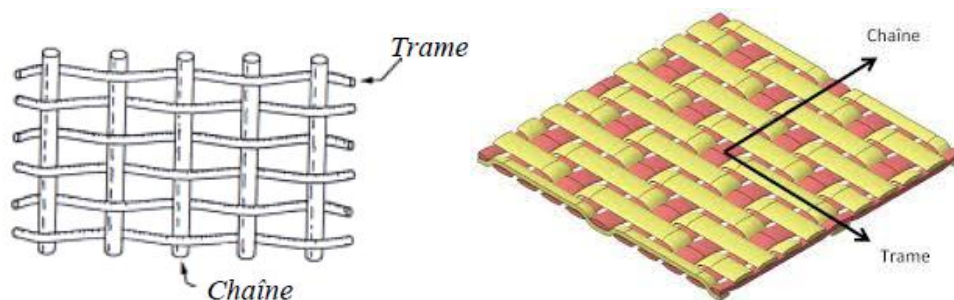


**Figure I.4** : Formes de mats : (a) mat à fibres courtes, (b) mat à fibres continues.

- **Les tissus et rubans**

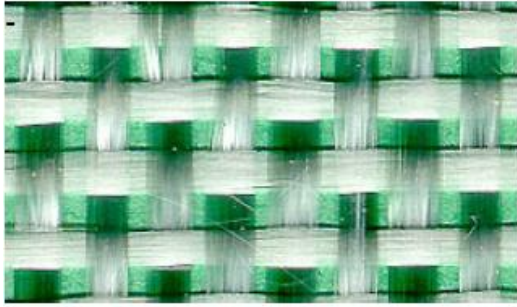
Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils, de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser. Il est constitué (figure I.4).

- D'une chaîne, ensemble de fils parallèle répartie dans un plan suivant la longueur de tissu,
- D'une trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne.



**Figure I.5** : chaîne et trame d'un tissu.

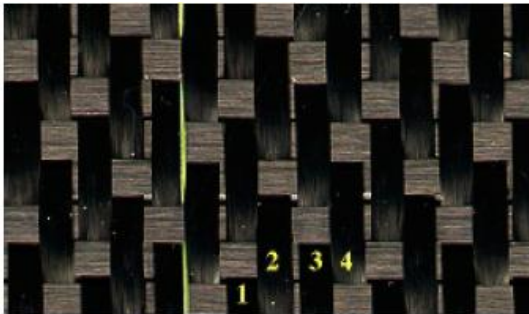
Les tissus diffèrent par le type de fils utilisé (fils simples, mèches, ... etc.), donc par la masse linéique des fils, et par le mode d'entrecroisement (ou armure) des fils de chaîne et des fils de trames (figure I.5) illustre les armures classiques utilisées : toile ou taffetas, satin, sergé, armure haut module, armure unidirectionnelle. (Figures I.6, I.7, I.8, I.9)



**Fig. I.6 :** Taffetas équilibré (roving verre E 150 g/m<sup>2</sup>)



**Fig. I.7 :** sergé 2x2 équilibré (verre E silionne 295 g/m<sup>2</sup>)

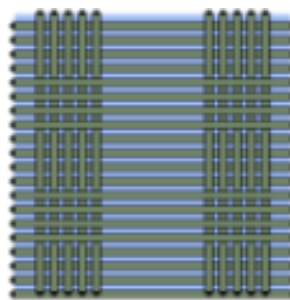


**Fig. I.8 :** satin de 4 équilibré (carbone T300 3K, 285 g/m<sup>2</sup>)



**Fig. I.9 :** tresse plate (verre E)

Les motifs du tissu peuvent être extrêmement variés. De nombreux tissus sont plans (figure : I.6, I.7, I.8) et ne comportent qu'une couche de fils ; l'épaisseur de la pièce est alors obtenue en cousant plusieurs couches entre elles, ou encore en les empilant pour former un stratifié. Les tissus de les figures précédents sont équilibrés, c'est-à-dire qu'ils comportent autant de fils dans les deux directions de tissage. Ils possèdent donc la même résistance et la même rigidité dans ces deux directions, mais il faut bien noter qu'ils n'ont pas pour autant un comportement isotrope : ils résistent a priori mieux en traction dans la direction des fils qu'en traction à 45° ou en cisaillement. En outre, il est possible de faire varier la proportion de fils dans les deux directions pour jouer sur cette anisotropie, lorsque le chargement appliqué à la pièce le justifie : les tissus ainsi obtenus sont dits non équilibrés (voir figure I.10).



**Figure I.10 :** tissu plan (ici non équilibré)

On préférera un tissu en raison des avantages suivants : [5]

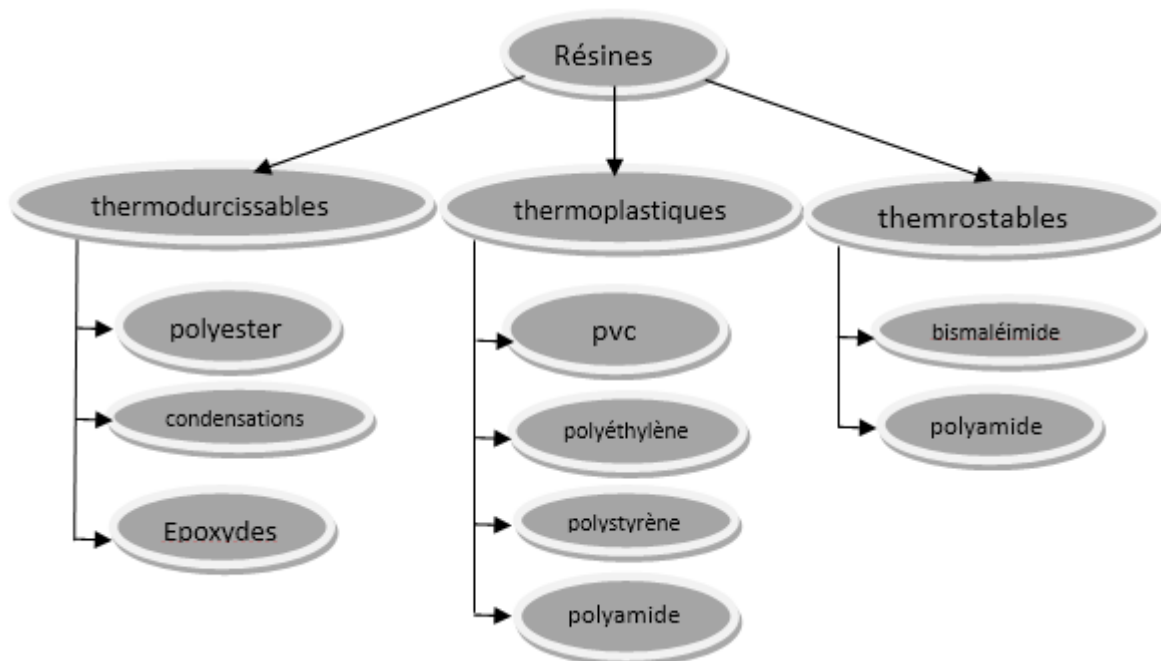
- meilleure résistance au délaminage ;
- tolérance à l'endommagement grâce au tissage des fibres ;
- épaisseur régulière grâce au maintien latéral des fibres ;
- propriétés mécaniques dans le sens transverse ;
- drapabilité.

Mais les tissus présentent les inconvénients suivants : [5]

- rigidité et résistance mécanique diminuées dans le plan du tissu ;
- fraction volumique de fibres réduite dans le composite;
- gauchissement des structures minces dans certains cas ;
- coût plus élevé (opération de tissage).

### I.2.1.2. Les résines

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur [4]. Les divers types de résines sont (figure I.11) :



**Figure I.11** : les divers types de résines

- ✓ Dans notre cas on s'intéresse aux résines thermodurcissables (les résines polyesters).

### ❖ Les résines thermodurcissables

Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage : [4]

- Les résines polyesters insaturées : polyesters condensés, vinylesters, dérivée allylique...etc.,
- Les résines de condensation : phénoliques, aminoplastes, furaniques...etc.,
- Les résines époxydes.

#### a. Les résines polyesters

Les résines polyesters instaurées (Tableau I.2) viennent de très loin en tête dans la mise en œuvre des matériaux composites. Leur développement est le résultat de son faible coût de production, de leur diversité offrant de multiples possibilités et aussi de son adaptation à des procédés de fabrication facile à mettre en œuvre et à automatiser, d'où un développement industriel sans cesse croissant. [4]

Suivant leur module d'élasticité, les résines polyesters sont classées en : résines souples, résines semi-rigides et résines rigides. Les résines habituellement utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont des types rigides, et nous retiendrons pour ces résines durcies les caractéristiques suivantes :

Caractéristique	Polyester
Masse volumique	1200 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité en traction	2,8 à 3,5 GPa
Module d'élasticité en flexion	3 à 4,5 GPa
Contrainte a la rupture en traction	50 à 80 MPa
Contrainte a la rupture en flexion	90 à 130 MPa
Allongement a la rupture en traction	2 à 5 %
Allongement a la rupture en flexion	7 à 9 %
Résistance en compression	90 à 200 MPa
Résistance au cisaillement	10 à 20 MPa
Température de fléchissement sous charge	60 à 100 °C

**Tableau I.2** : Les caractéristique de résine polyester

Parmi les avantages des polyesters insaturés, nous retiendrons :

- Une bonne rigidité résultant d'un module d'élasticité assez élevé,
- Une bonne stabilité dimensionnelle,
- Une bonne mouillabilité des fibres est des tissus,

- La facilité de mise en œuvre,
- Une bonne tenue chimique,
- Un faible cout de production,
- Une bonne résistance chimique aux hydrocarbures (essence, fuel, etc.) à température ambiante, etc.

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- Une tenue médiocre en température : inférieur à 120 °C en service continu,
- Une sensibilité à la fissuration, essentiellement dans le cas de chocs,
- Un retrait important de l'ordre de 8 à 10 %,
- Un mauvais comportement à la vapeur, à l'eau bouillante avec risque d'hydrolyse, d'où la nécessité de recouvrir les matériaux composites à résines polyesters d'une couche de «gel-coat» de manière à les rendre étanches,
- Une dégradation a la lumière par les rayons ultraviolets,
- Une inflammabilité.

### b. Les résines de condensation

Les résines de condensation comportent les résines phénoliques, les aminoplastes et les résines furaniques.

#### ➤ Les résines phénoliques

Sont les plus anciennes des résines thermodurcissables dont la plus connue est la bakélite. Les caractéristiques de ces résines sont les suivantes :

Caractéristique	résine phénolique
Masse volumique	1 200 kg/m <sup>3</sup>
Module d'élasticité en flexion	3 GPa
Contrainte à la rupture en traction	40 MPa
Allongement à la rupture en traction	2,5 %
Contrainte à la rupture en flexion	90 MPa
Résistance à la compression	250 MPa
Température de fléchissement sous charge	120 °C

**Tableau I.3** : Les caractéristique de résine phénolique

Parmi les avantages, nous citerons :

- une excellente stabilité dimensionnelle,
- une bonne tenue à la chaleur et au fluage,
- une bonne résistance aux agents chimiques,
- un faible retrait,

- de bonnes caractéristiques mécaniques,
- un faible coût.

Parmi les inconvénients, nous noterons :

- une mise en œuvre sous pression, donc à faibles cadences,
- les couleurs foncées des résines,
- une non adaptation à des utilisations alimentaires.

Les résines phénoliques seront donc utilisées dans le cas de pièces nécessitant une tenue élevée en température ou une bonne résistance aux agents chimiques.

#### ➤ **Résines aminoplastes**

Les caractéristiques des résines aminoplastes sont voisines de celles des résines phénoliques. Aux avantages de ces résines, il faut ajouter :

- la possibilité d'utilisations alimentaires,
- la possibilité de colorer les résines.

#### ➤ **Résines furaniques**

Les résines furaniques sont assez peu utilisées à cause de leur coût, trois fois plus élevé que les résines polyester. Parmi leurs avantages :

- un durcissement plus rapide que les résines phénoliques,
- une grande inertie vis-à-vis des agents chimiques corrosifs.

Cette dernière caractéristique conduit à utiliser les résines furaniques dans le cas de matériaux devant résister aux produits chimiques : citernes, tuyaux, bacs, etc.

### **c. Les résines époxydes**

Les résines les plus utilisées après les résines polyester insaturées sont les résines époxydes. Elles ne représentent cependant que de l'ordre de 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyester).

Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

Caractéristique	résines époxydes
<b>Masse volumique</b>	1 100 à 1 500 kg/m <sup>3</sup>
<b>Module d'élasticité en traction</b>	3 à 5 GPa
<b>Contrainte à la rupture en traction</b>	60 à 80 MPa
<b>Contrainte à la rupture en flexion</b>	100 à 150 MPa
<b>Allongement à la rupture</b>	2 à 5 %
<b>Résistance au cisaillement</b>	30 à 50 MPa
<b>Température de fléchissement sous charge</b>	290 °C

**Tableau I.4 :** Les caractéristique de résine époxydes.

Les résines époxydes conduisent donc à un ensemble de performances élevées. Toutefois, pour bénéficier réellement de ces performances, il est nécessaire d'avoir des durées de transformation et surtout de cuisson très longues (de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures), à des températures relativement élevées (50 à 100 °C).

Parmi les avantages des résines époxydes, nous retiendrons :

- de bonnes propriétés mécaniques (en traction, flexion, compression, choc, fluage, etc.) supérieures à celles des polyesters,
- une bonne tenue aux températures élevées : jusqu'à 150 °C à 190 °C en continu;
- une excellente résistance chimique,
- un faible retrait au moulage (de 0,5 à 1 %),
- une très bonne mouillabilité des renforts,
- une excellente adhérence aux matériaux métalliques.

Parmi les inconvénients, nous citerons :

- un temps de polymérisation long,
- un coût élevé,
- la nécessité de prendre des précautions lors de la mise en œuvre,
- une sensibilité à la fissuration.

### **I.2.1.3. Les charges**

L'objet de la charge renforçant est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine, ou diminuer le coût des résines en conservant les performances des résines. En générales ces charges sont des microbilles ou des particules (poudre). [4]

Les principales charges utilisées sont :

- microbille en (verre, carbone, époxyde, phénolique, polystyrène, etc. ...)
- des poudres ou paillettes métalliques : (cuivre, fer, aluminium, etc. ...)
- des particules de carbone (noir de carbone)

#### **I.2.1.4. Les additifs [4]**

Ils sont nécessaires pour assurer une adhérence suffisante entre le renfort fibreux et la matrice et de modifier l'aspect ou les caractéristiques de la matière à laquelle ils sont ajoutés.

Les additifs se trouvent en faible quantité (quelques % et moins) et interviennent comme :

- lubrifiants et agents de démoulage.
- pigments et colorants.
- agents anti-retraits.
- agents anti-ultraviolets.
- accélérateur.
- catalyseur.

#### **I.2.1.5. L'interface**

En plus de ces fibres et la matrice, il faut rajouter : une interface qui assure la compatibilité renfort/matrice, qui transmet les contraintes de l'un à l'autre sans déplacement relatif. Bonne adhérence en couche fine.

Des produits chimiques entre aussi dans la composition du composite, l'interphase etc... qui peut jouer sur le comportement mécanique, mais n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite. [4]

**-l'interphase** : est un milieu continu qui peut être une zone de réaction chimique formée par les constituants du composite lors de son élaboration, ou une fine couche introduite volontairement dans le but de protéger la fibre ou de contrôler la liaison inter faciale.

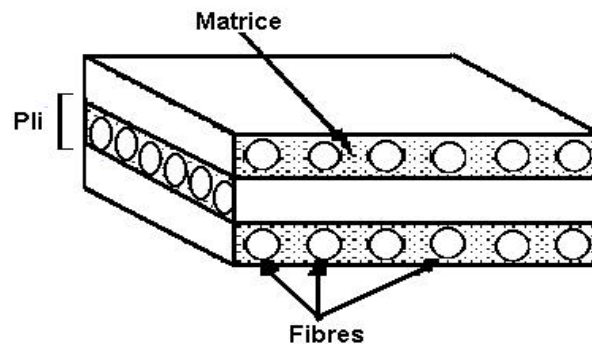
### **I.2.2. Architecteurs des matériaux composites**

Les structures des matériaux composites peuvent être classés en trois types :

- Les stratifiés
- Les monocouches
- Les sandwiches

### I.2.2.1. Les stratifiés

Les structures composites stratifiées sont constituées de couches successives de renforts (fils, stratifils, mats, tissus, etc.) imprégnés de résines (Figure I.12). Les couches sont également nommées plis. Les stratifiés sont utilisés, comme matériaux structuraux, à chaque fois qu'on a d'un côté, la nécessité d'excellentes performances mécaniques en termes de résistance, rigidité, comportement à la fissuration, et de l'autre, l'exigence de limiter le poids.



**Figure I.12** : Schéma illustratif d'un matériau composite stratifié.

#### ➤ Plis :

Un pli est un demi-produit qui se présente sous une forme quasi-bidimensionnelle et qui est constitué de fibres imprégnées de résine (d'où l'appellation pré imprégnée). Ce demi-produit est utilisé pour fabriquer le produit final. (Figure I.13)

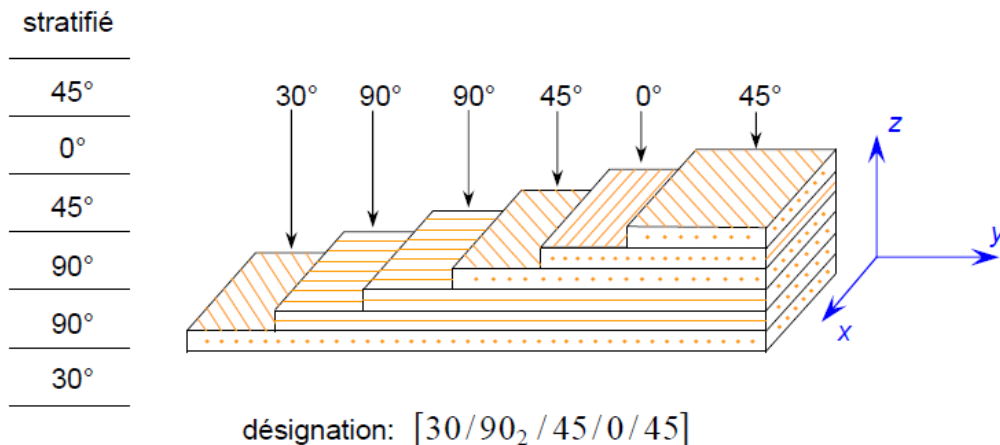


**Figure I.13** : pli à fibre unidirectionnelles.

#### a. Désignation d'un stratifié

##### • 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 [4]. Ces stratifiés sont constitués de couches de fils ou de tissus unidirectionnels, dont la direction est décalée dans chaque couche (figure I.14).

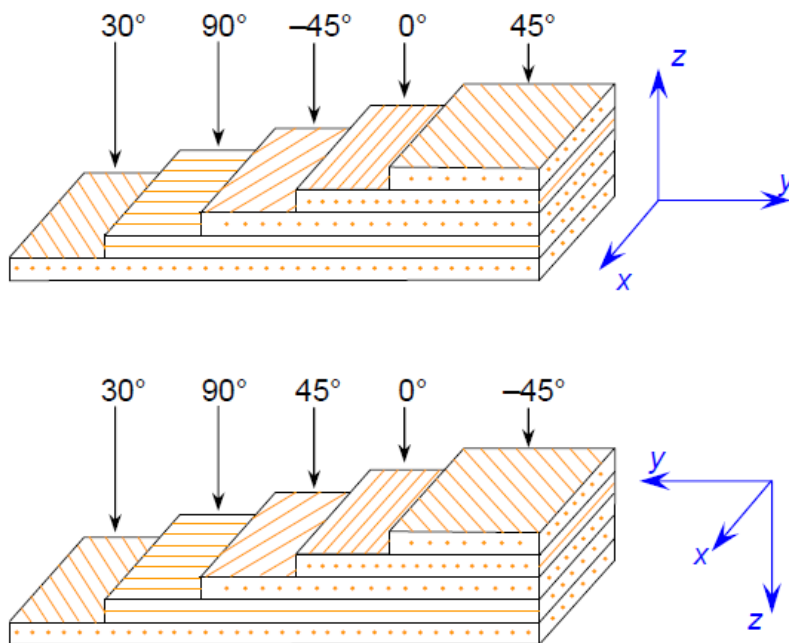


**Figure I.14 :** Désignation d'un stratifié

La désignation de ces stratifiés est généralement effectuée selon le code suivant :

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.15 .



**Figure I.15 :** Convention de signe pour la désignation des stratifiés.

### ➤ Angles positifs et négatifs

Lorsque des couches sont orientées à des angles égaux en valeurs absolues, mais de signes opposés, les signes (+) ou (-) sont utilisés. La convention pour les angles positifs ou négatifs dépend du système d'axes choisi : une inversion peut apparaître suivant le choix effectué, voir (figure I.15).

#### ➤ Exemples :

Stratifiés	Désignations
$\begin{array}{c} \hline 0^\circ \\ \hline 30^\circ \\ \hline -30^\circ \\ \hline -45^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline \hline \end{array}$	[ $\mp$ 45 / $\pm$ 30/0]
$\begin{array}{c} \hline 0^\circ \\ \hline -45^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline -45^\circ \\ \hline -45^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline \hline \end{array}$	[ $\mp$ $\pm$ $\mp$ 45/0] Ou [45/-45 <sub>2</sub> /45 <sub>2</sub> /-45/0]

#### • Stratifié symétrique

Un stratifié est symétrique si son plan moyen est plan de symétrie. Sa désignation ne nécessite alors que la moitié des couches successives.

Si le stratifié a un nombre pair de couches, la désignation débute sur une face pour finir au plan de symétrie. Un indice S indique que le stratifié est symétrique. [4]

Par exemple :

$\begin{array}{c} \hline 90^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 0^\circ \\ \hline 0^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 90^\circ \\ \hline \hline \end{array}$	[ 90 / 45 <sub>2</sub> / 0 ] <sub>s</sub>
--	---

Si le stratifié comporte un nombre impair de couches, la désignation est semblable à la précédente, la couche centrale étant surlignée.

Par exemple :

$$\begin{array}{c} \hline 90^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 0^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 90^\circ \\ \hline \end{array} \quad [ 90 / 45_2 / \bar{0} ]_S$$

### ➤ Séquence

La répétition de séquences peut être indiquée par un indice indiquant le nombre de fois où une séquence est successivement répétée. Par exemple :

$$\begin{array}{c} \hline 0^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 90^\circ \\ \hline 0^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 90^\circ \\ \hline 90^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 0^\circ \\ \hline 90^\circ \\ \hline 45^\circ \\ \hline 0^\circ \\ \hline \end{array} \quad \begin{array}{l} [ (0 / 45 / 90)_2 ]_S \\ \text{Ou } [ 0 / 45 / 90 ]_{2S} \end{array}$$

L'alternance  $[0 / 90]_n$  est souvent désignée par stratifié croisé.

### • Stratifiés hybrides

Les stratifiés hybrides sont constitués de couches successives comportant des fibres de natures différentes. Il sera alors nécessaire de les mentionner dans la désignation. Par exemple, pour des stratifiés avec la même résine : **[4]**

$$\begin{array}{c} \hline 0^\circ \quad V \\ \hline 45^\circ \quad C \\ \hline -45^\circ \quad C \\ \hline 90^\circ \quad C \\ \hline 90^\circ \quad C \\ \hline -45^\circ \quad C \\ \hline 45^\circ \quad C \\ \hline 0^\circ \quad V \\ \hline \end{array} \quad [ 0_V / \pm 45_C / 90_C ]_S$$

0°	K
0°	K
45°	V
90°	V
45°	V
0°	C
0°	C

[ 0<sub>2C</sub> / (45 / 90)<sub>SV</sub> / 0<sub>2K</sub> ]

avec V : verre, C : carbone, K : Kevlar

Parmi les différents hybrides, on peut distinguer :

- des hybrides intercouches, constitués d'une suite de couches, chacune de nature différente;
- des hybrides intracouches, constitués par une séquence de couches identiques, chaque couche étant constituée de renforts différents;
- des couches métalliques peuvent également être intercalées entre les couches.

### b. Désignation générale d'un stratifié

Dans le cas général, le renfort de chaque couche sera de natures diverses : fils, stratifils, mats, tissus, fibres de verre, fibres de carbone, etc. Chaque couche doit alors être désignée par l'indication de la nature des fibres, du type de renfort : fils, mat, tissu avec indication de la proportion de fibres suivant le sens chaîne et trame.[4]

#### ➤ Le choix de la nature et de la séquence des couches

Le choix dépendra de l'utilisation du matériau composite, en l'adaptant au mieux au champ des contraintes imposé : [4]

- les couches unidirectionnelles ont de bonnes performances mécaniques dans la direction des fibres;
- les mats sont peu résistants en traction et devront être réservés aux zones comprimées;
- une stratification croisée sera sensible au délaminage interlaminaire;
- une stratification avec au moins trois directions de fibres sera nécessaire pour avoir une pseudo-isotropie dans le plan du stratifié.

Enfin, il est intéressant de noter qu'une stratification symétrique garantira généralement une bonne planéité du stratifié après démoulage.

### I.2.3. Procédés d'élaboration

L'élaboration d'un matériau composite consiste en trois opérations indispensables qui sont:

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement du système :
  - soit par polycondensation et réticulation pour les matrices thermodurcissables,
  - soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Le moulage reste le procédé le plus utilisé dans l'élaboration de matériaux composites, mais Il existe d'autres procédés aussi importants:

- Moulage par contact
- Moulage par projection simultanée
- Injection thermodurcissable BMC
- Compression thermodurcissable SMC
- Enroulement filamentaire (ou bobinage)

#### I.2.3.1. Moulage au contact

Procédé manuel (figure I.16) pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée. [7]

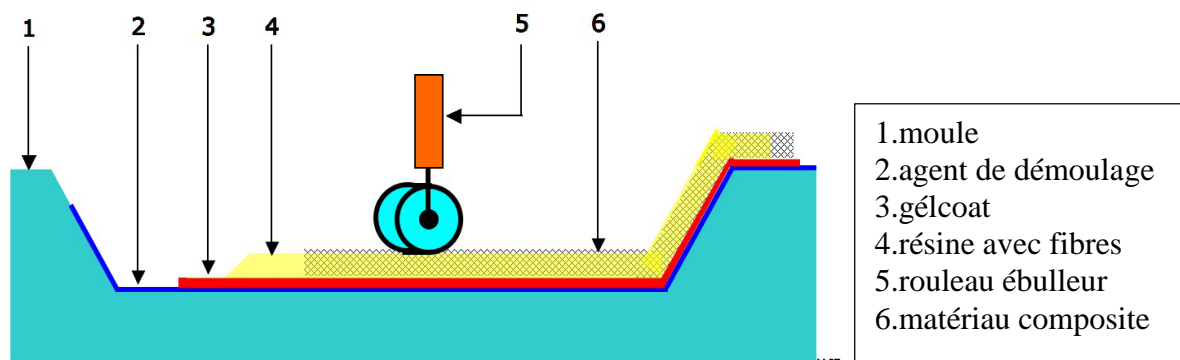


Figure I.16 : Moulage au contact

### I.2.3.2. Avantages et inconvénients de moulage au contact

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> <li>-Très large possibilité de formes et de dimensions.</li> <li>- Une surface lisse (gelcoatée).</li> <li>-Investissements faibles.</li> <li>-Moules simples, peu onéreux.</li> <li>-Propriétés mécaniques : bonne a moyennes.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>-Une seule face lisse.</li> <li>-Nécessités de finition de la pièce.</li> <li>-Qualité tributaire de la main d'œuvre.</li> <li>-Cadences faibles.</li> <li>-Espace de travail important.</li> </ul>

**Tableau I.5 :** Avantages et inconvénients de moulage au contact

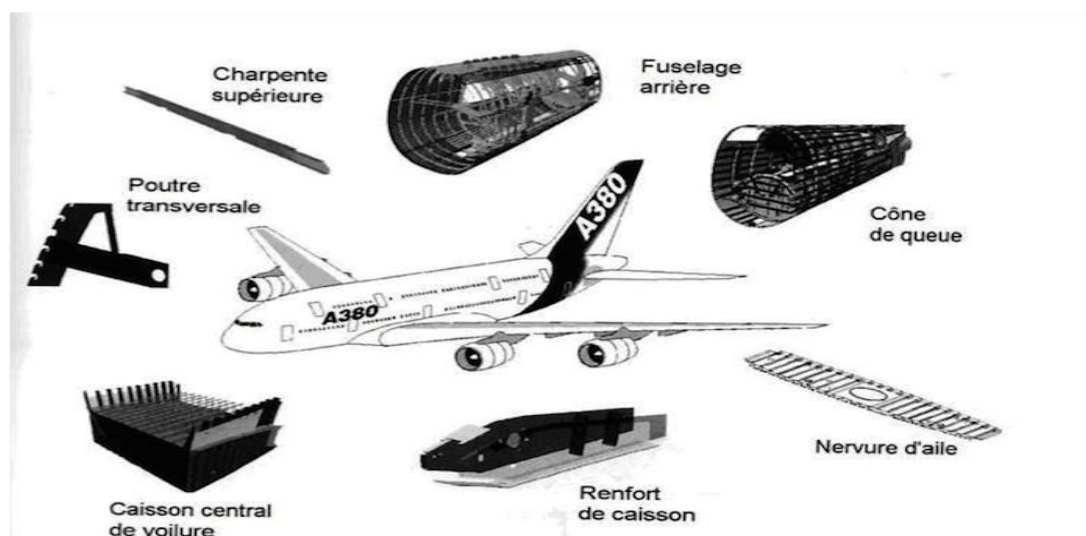
### I.2.4. Domaine d'application

#### I.2.4.1. Applications aéronautiques

Leur mise en œuvre dans les applications aéronautiques a progressé en plusieurs étapes depuis les années 1960. Ils ont d'abord été testés dans les structures secondaires pour remplacer les composantes métalliques d'avions existants afin d'explorer leur durabilité en vol, puis dans les structures primaires.

La principale motivation d'utilisation des matériaux composites pour la réalisation de structures sur les produits aéronautiques est essentiellement le gain de masse tout en conservant d'excellentes caractéristiques mécaniques.[8]

Les matériaux composites présentent aussi une quasi-insensibilité à la fatigue en comparaison des matériaux métalliques qui nécessitent en maintenance en suivi régulier de la propagation des fissures de fatigue dans les pièces de structure. [8]



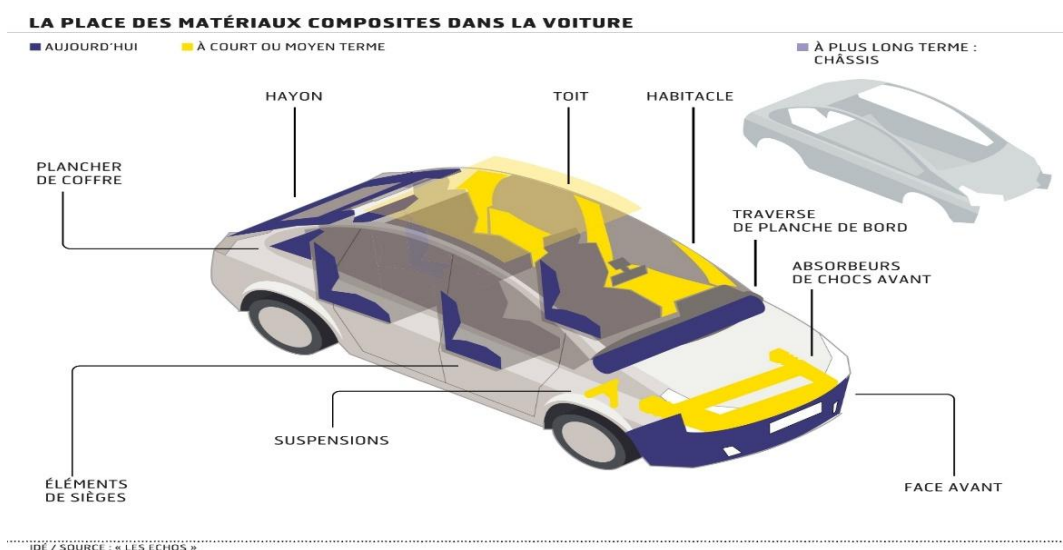
**Figure I.17 :** Air bus A380

### I.2.4.2. Applications automobiles

Les matériaux composites ont fait leur apparition en grande série dans l'automobile durant les années 60 – 70 dans des applications à l'intérieur du véhicule essentiellement constitué de matériau polymère et de composite, les principales application concernent : la planche de bord et le poste de conduit, les ébénisteries et les habillages de porte, les garnitures de toit, les sièges, la tablette arrière, les tapis de sol , les textiles etc.

Les matériaux composites sont également largement utilisés :

- Pour la réalisation des principaux accessoires extérieurs des véhicules (les peaux de boucliers, les calandres, les grilles d'avant, les enjoliveurs de roue, les rétroviseurs, les faux de signalisation) ;
- Dans le compartiment moteur (filtre à air, batteries, boîte à eau de radiateur, carénage, collecteurs d'admission, les rampes d'injection, les couvercles culasses, les turbines de pompe à eau, les carters d'huile, etc.[9]



**Figure I.18 :** matériaux composites dans la voiture

### I.2.4.3. Application dans les sports et loisirs

Les composites se sont imposés dans les sports et loisirs en se substituant principalement au bois (en particulier dans la nautisme et la glisse) et quelquefois aux métaux (notamment dans le cyclisme). Plusieurs critères ont favorisé cette utilisation :

- Leur légèreté ;
- Leur stabilité dimensionnelle (ni gonflement ni voilage parasite) ;

- Leur bon comportement à l'humidité et à la corrosion (produits pouvant rester dehors voir dans l'eau ou sous la neige) ;
- Leur bonne tenue à la fatigue répétée ;
- Leur grande rigidité (ou flexibilité, modulable en fonction du type de renforcement) d'où une amélioration des performances par rapport aux plastiques ;
- Leur souplesse de mise en œuvre ;
- Une grande liberté de forme réalisable ;

Ce domaine est pratiquement le seul où l'on emploie des composites de haute performances HP pour des articles de très grande consommation (cannes à pêche, raquettes, ski...) ce qui représente de l'ordre de 20% de leurs utilisations.

Toutefois, de nombreux articles de sport utilisent des composites de grande diffusion GD ou simplement des plastiques : (planche à voile, chausseurs de ski, balles de golf, ballons de football etc.) plus encore pour les loisirs : compact disc, bandes magnétiques, ou vidéos, magasins et films photographique, cartouches de chasses, la plupart des jouets, des articles de bricolage et des valises. Si l'on compte dans les loisirs, la télévision, la micro-informatique et les jeux électroniques, ce sont tous les carters des appareils qu'il faut aussi considérer.

#### **I.2.4.4. Application marines**

Il existe une longue tradition d'utilisation des matériaux composites pour les applications marines. Des bateaux de plaisance sont fabriqués en composites depuis plus de quarante ans, et les premières applications militaires pour les chasseurs de mines datent des années 1960.

L'image de cette industrie est celle de résines << tartinées >> sur des tissus de fibre de verre mais depuis une dizaine d'années des changements très importants sont constatés, autant sur les matériaux employés que sur les méthodes de mise en œuvre. En effet, une combinaison de législation de compétition mondiale et d'évolution techniques a fortement influencé les petits chantiers qui représentent la majorité de la production. Aujourd'hui, il existe certes des chantiers qui pratiquent toujours la stratification manuelle, mais les techniques d'infusion, de moulage sous vide et même d'autoclave sont maintenant couramment utilisées.[9]



**Figure I.19** :navire de luxe kingcat.

#### **I.2.4.5. Autres applications**

Autres applications présentent de nombreuses possibilités d'utilisation pour les matériaux composites comme l'industrie ferroviaire, l'équipement industriel et électronique, le domaine de la santé, secteur du bâtiment etc.

### **I.3. Conclusion**

L'objectif des productions des matériaux composites est de concurrencer et de surpasser les métaux qui, de leur côté, ne cessent d'optimiser leurs propres caractéristiques. La diversité des matériaux composites et leur souplesse, qui permet de fabriquer ou de composer des caractéristiques à la carte, rendent cet objectif légitime. Pour atteindre ces objectifs, ce secteur doit se développer par l'innovation.

Lors d'une sollicitation de la structure réelle, des paramètres influents négativement sur des différentes caractéristiques mécanique qui résulte l'endommagement de cette dernière. Il est donc indispensable d'étudier le mécanisme d'endommagement dans le chapitre suivant.

## II.1. Introduction

Les composites peuvent subir des modifications ou transformation structurelles où ces dernières peuvent être réversibles ou irréversibles, alors il est nécessaire de connaître le comportement chimique, physique, mécanique et leurs milieux de mise en service, sans oublier sa durabilité avant toutes utilisations.

Les premiers endommagements détectés commencent à se développer à l'échelle microscopique lorsque la contrainte localisée atteint la limite de rupture d'un des trois constituants (la fibre, la matrice et l'interface). Les microfissures qui se développent sont habituellement trop petites pour causer la rupture finale du composite, les paramètres, tels que la fraction volumique, l'orientation des fibres, l'épaisseur des plis et l'espacement entre fibres, jouent un rôle très important dans la cinétique de l'endommagement.

## II.2. Endommagement des composites stratifiés

Lorsque les composites stratifiés sont soumis à des sollicitations mécaniques, différents types d'endommagements apparaissent et se développent.

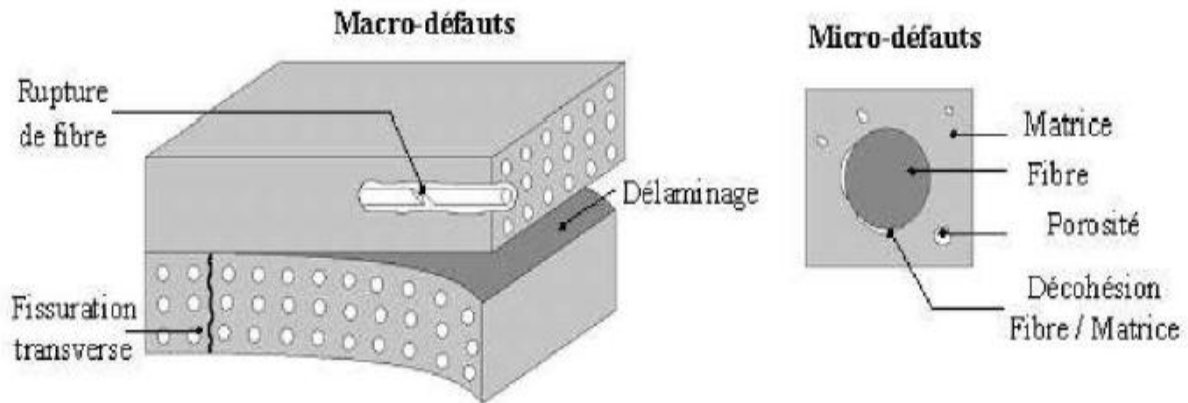
L'endommagement est un problème complexe dans les composites stratifiés car il varie suivant l'empilement et l'épaisseur des plis où les défauts ne sont pas sollicités de la même façon, en plus il est défini comme une augmentation de la taille ou du nombre de fissure, ceci engendre une diminution des caractéristiques mécaniques du système qui mène à sa ruine, en plus l'endommagement des composites est un phénomène de séparation de la matière de nature essentiellement irréversible.

### II.2.1. Les différentes échelles d'observation de l'endommagement

Il existe plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée, unidirectionnelle ou tissés qui se révèlent à différentes échelles d'observation (figure II.1). Les plus significatifs sont les suivants : [10]

- à l'échelle microscopique apparaissent les ruptures d'interfaces : c'est le phénomène de décohésion fibre/matrice et d'autre part, la rupture de fibre, de matrice;
- à l'échelle macroscopique on observe le phénomène de décollement inter pli : c'est le délaminage ;

- à l'échelle mésoscopique on observe l'apparition de nombreuses fissures intralaminaires mais également la rupture de fibres qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau, qui sont parallèles à la direction des fibres.



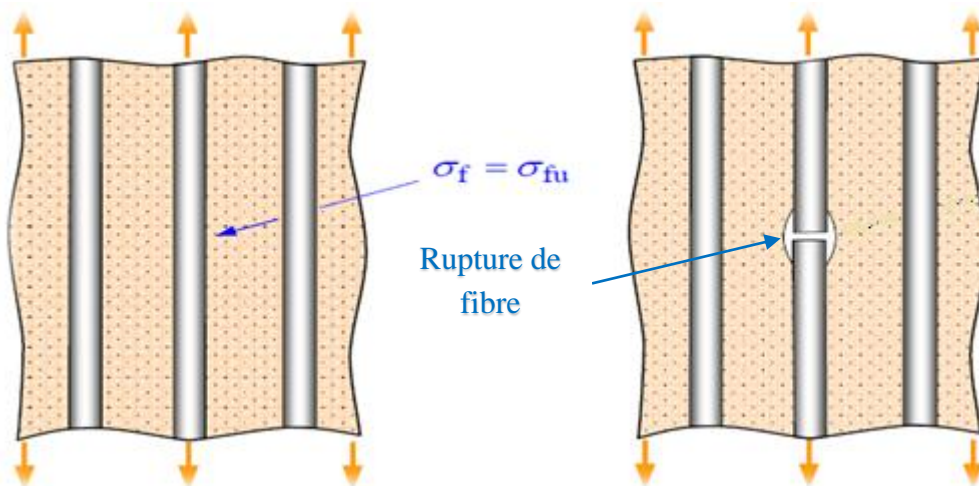
**Figure II.1:** Les différentes échelles d'observation de l'endommagement: illustration sur un matériau stratifié.

### II.2.2. Les divers mécanismes d'endommagement

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires : [4]

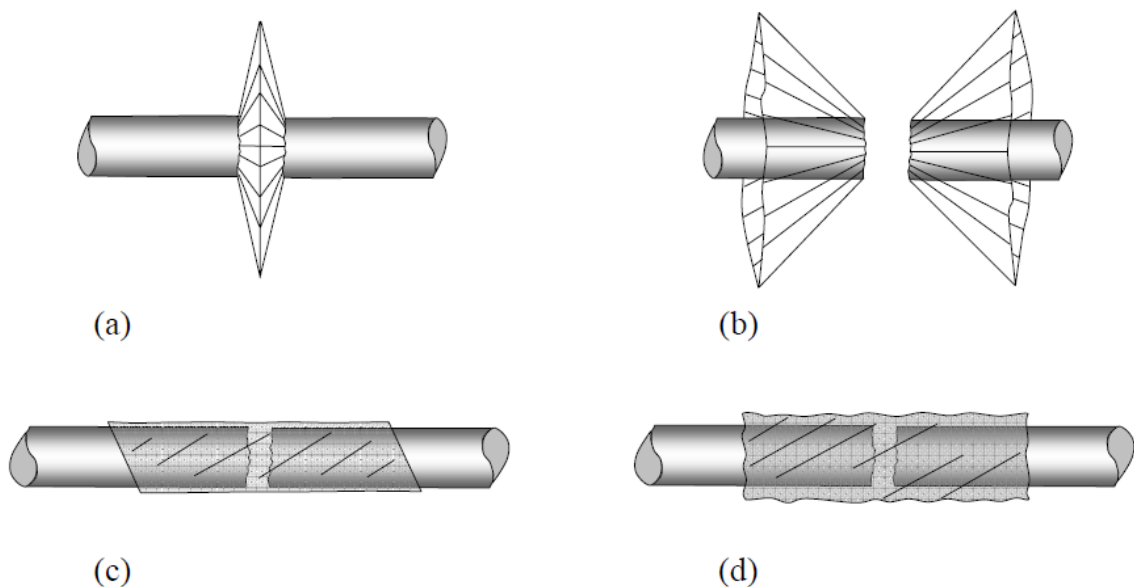
- la rupture des fibres,
- la rupture transverse de la matrice,
- la rupture longitudinale de la matrice,
- la rupture de l'interface fibre-matrice.

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanisme coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées. [4]



**Figure II.2 :** Rupture de fibre.

Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction  $\sigma_f$  dans une fibre atteint la contrainte à la rupture  $\sigma_{fu}$  de la fibre (figure II.2). La rupture de la fibre produit une concentration de contraintes au voisinage de la rupture. La redistribution de ces contraintes, et par conséquent le processus de rupture résultant, dépend principalement : de la contrainte à la rupture des fibres, de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libérée, des propriétés de l'interface fibre-matrice, etc. Les figures (II.3) montrent les différents processus de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre



**Figure (II.3) :** différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre

(a) : Rupture transverse de la matrice, (b) : Rupture en cisaillement de la matrice,

(c) : Décohésion de l'interface fibre-matrice et (d) : Rupture longitudinale de la matrice.

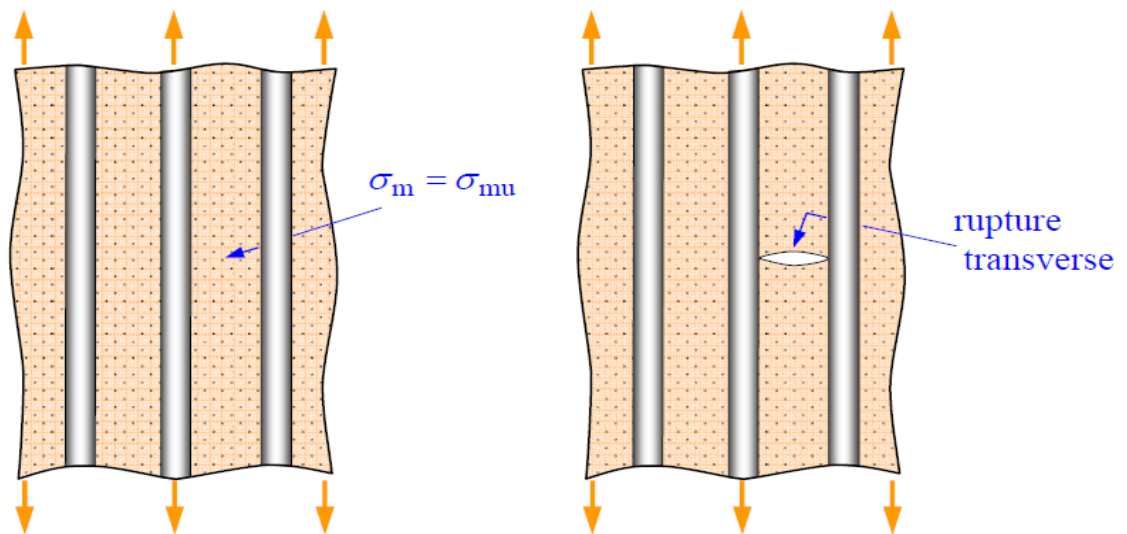


Figure II.4 : Rupture transverse de la matrice

La fissuration de la matrice peut se produire, soit par fissuration transverse (figure II.4) lorsque la contrainte en traction  $\sigma_m$  dans la matrice atteint la contrainte à rupture  $\sigma_{mu}$  de la matrice ; soit par fissuration longitudinale (figure II.5) lorsque la contrainte de cisaillement  $\tau_m$  dans la matrice atteint la contrainte en cisaillement à la rupture  $\tau_m$ , généralement au voisinage d'une fibre .ce dernier modes rupture appelé (*splitting*) par les anglo-saxons, se produit lorsque la contrainte de décohésion est supérieure à la contrainte de cisaillement à la rupture de matrice . Dans le cas contraire il se produit une rupture par décohésion de l'interface fibre-matrice (figure II.4).

La rupture finale d'un matériau composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de ses divers mécanismes élémentaires. L'initiation, puis la propagation de la rupture dépendent des propriétés des fibres et de la matrice, de l'interface, fibre-matrice de la fraction volumique des fibres, de l'état et des conditions sollicitations mécaniques imposées

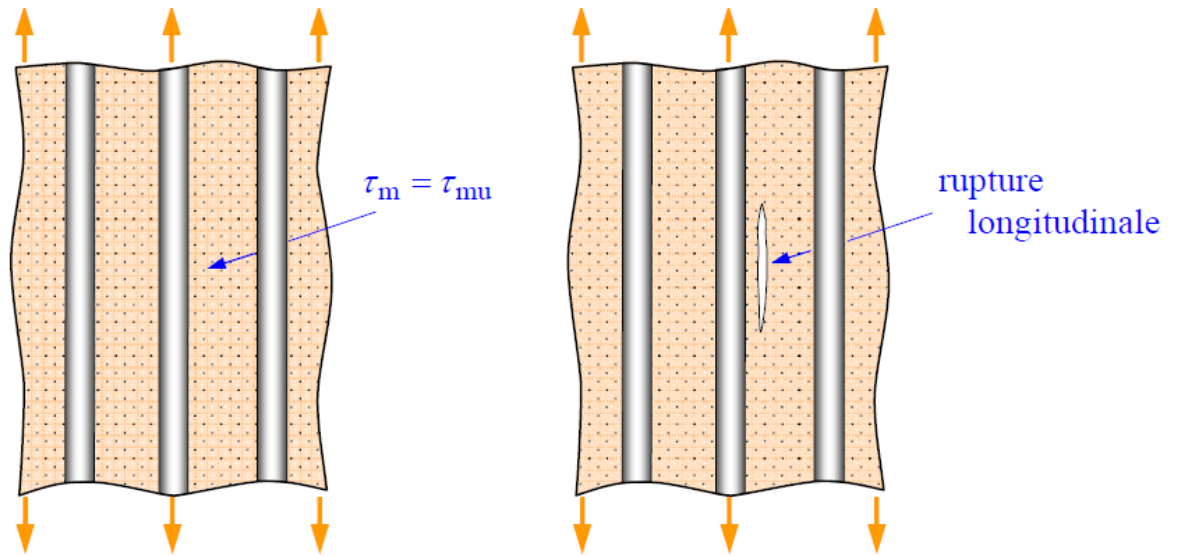


Figure II.5 : rupture longitudinale de la matrice.

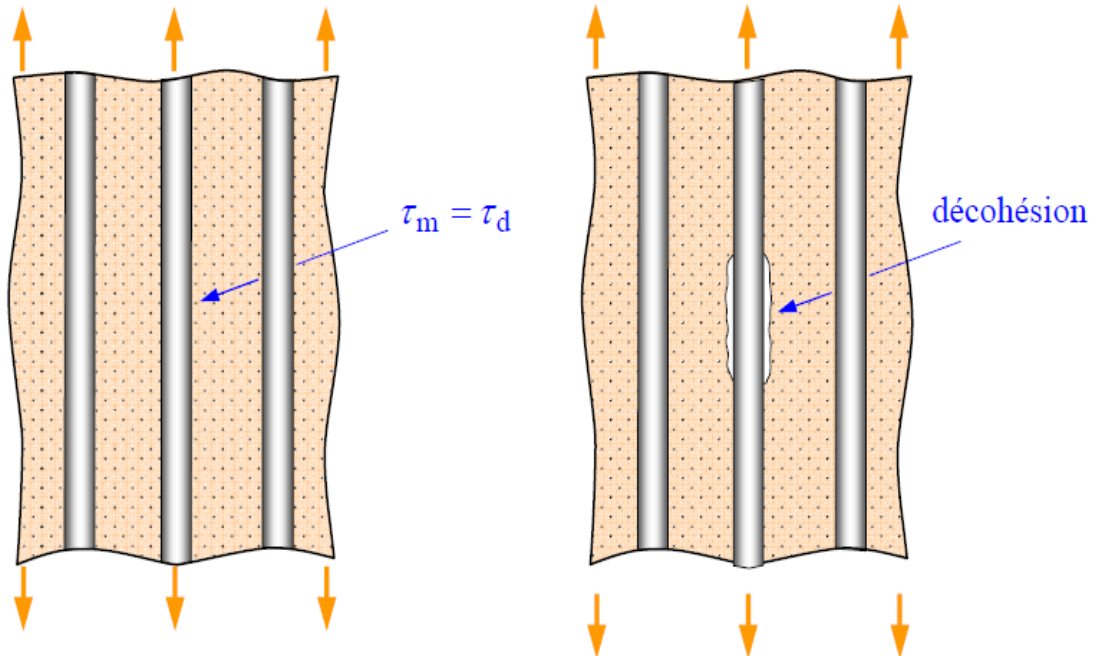
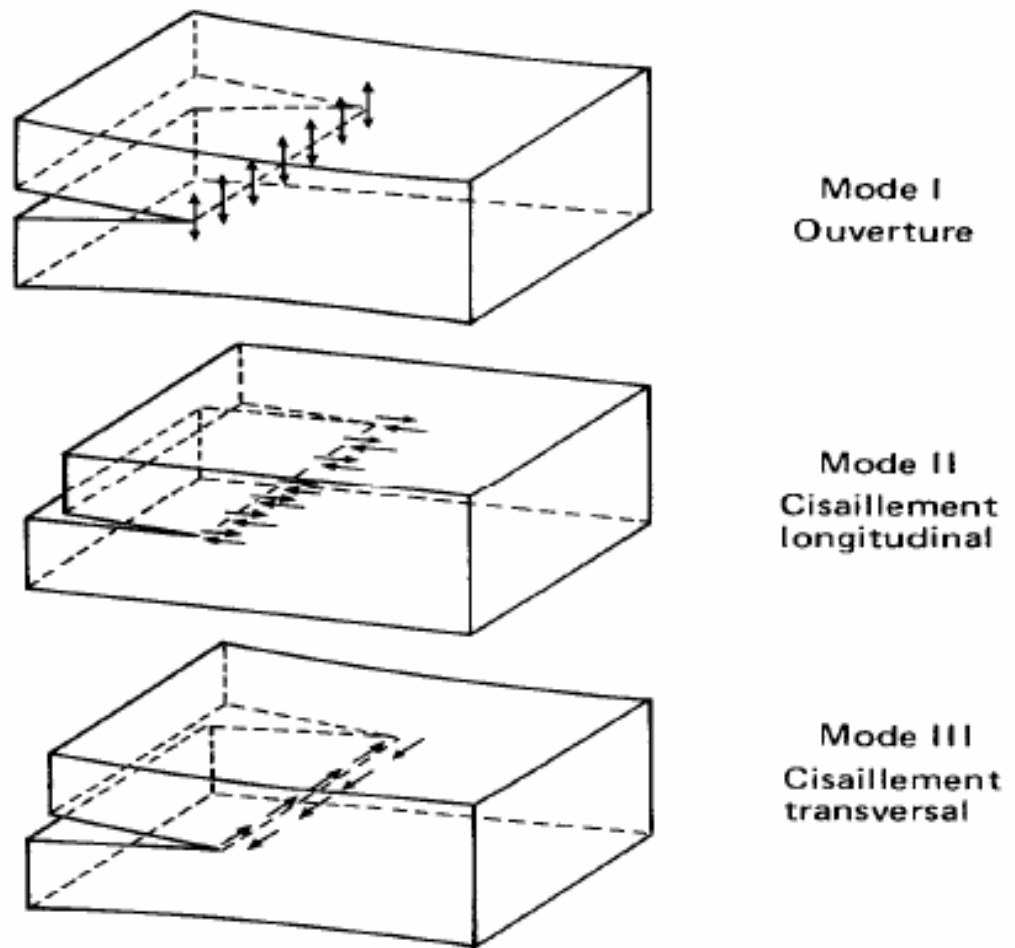


Figure II.6 : décohésion fibre-matrice.

### II.3. Endommagements des composites stratifiés

#### II.3.1. Modes de rupture

Ils constituent les trois modes élémentaires de sollicitation d'un matériau quel que soit l'état de contraintes d'une pièce soumise à une sollicitation complexe résumera d'une combinaison de trois modes simples Mode I, Mode II et Mode III présenté par la figure (II.7).



**Figure II.7 :** Modes de sollicitations mécanique de la rupture.

On distingue trois modes de rupture suivant la direction du déplacement relatif des lèvres de la fissure :

- **Mode I** ou mode d'ouverture

Les surfaces de la fissure se déplacent dans des directions opposées et perpendiculairement au plan de fissure.

- **Mode II** ou mode de glissement droit

Les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction perpendiculaire au front de fissure.

- **Mode III** ou mode de glissement vis

Les surfaces de la fissure se déplacent dans le même plan et dans une direction parallèle au front de la fissure

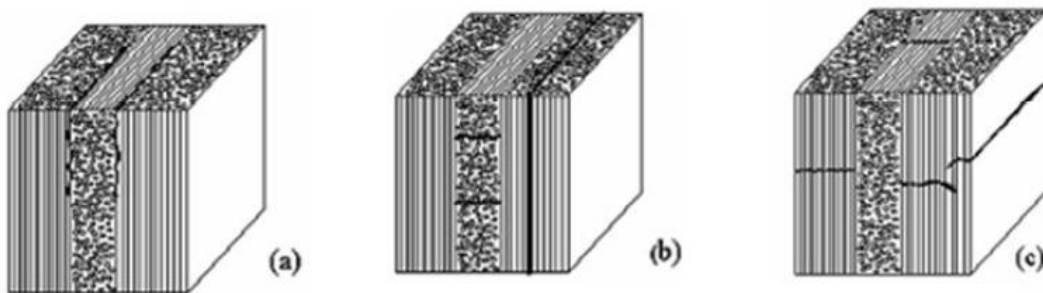
### II.3.2. Les fissurations

Les matériaux composites stratifiés constitués des couches superposées renforcées de fibres unidirectionnels, de tissus ou de mats peuvent présenter différents types de fissuration (interlaminaire, intralaminaire, ou translaminaire) [4]. Ces termes définissent les plans dans lesquels peuvent se développer les fissures dans les matériaux composites.

- **Fissures interlaminaire** : la fissure se développe suivant un plan parallèle aux couches de renfort, entre deux couches (figure II.8. a). Ce type d'endommagement se rencontre lors d'essai en mode I ou II, lors d'essai de flexion entre appuis rapprochés ;
- **Fissures Intralaminaire** : le plan de la fissure est perpendiculaire ou parallèle aux couches de renfort à l'intérieure des couches (figure II.8.b).

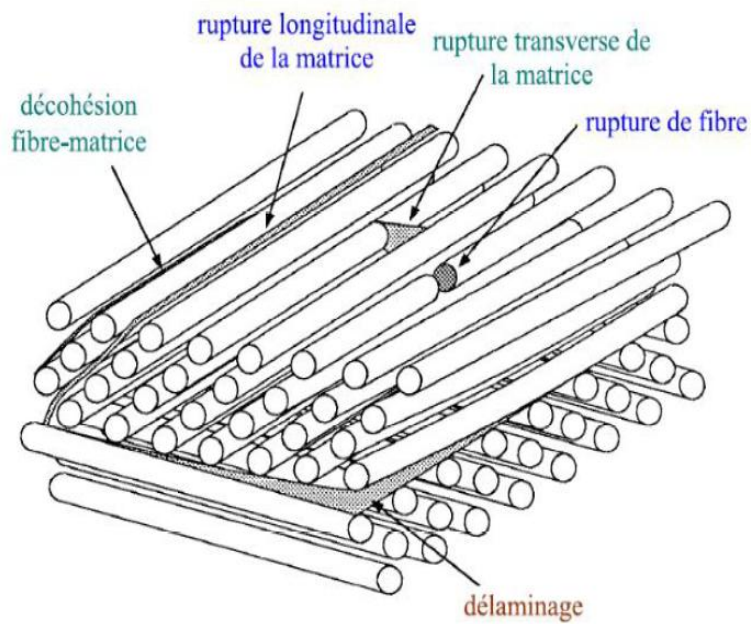
Ce mode d'endommagement se rencontre lors d'essai de cisaillement ou de traction transverse sur matériau unidirectionnel par exemple.

- **Fissures translaminaire** : le plan de la fissure est perpendiculaire aux couches et aux renforts (figure II.8.c). Ce mode d'endommagement est par exemple observé lors d'essai de traction ou compression uni axial dans le sens des fibres.



**Figure II.8** : Différents types de fissuration au sein d'un composite stratifié.

Dans le cas des stratifiés, aux mécanismes élémentaires décrits précédemment (Décohésion fibre matrice ; rupture longitudinale de la matrice ; rupture transverse de la matrice ; rupture des fibres) s'ajoute un mécanisme de rupture entre couches, il est dit rupture par délaminage (figure II.9). Les mécanismes de rupture induits dépendent de la nature des constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé.



**Figure II.9 :** Mécanisme de rupture dans les stratifiés.

#### II.4. Le vieillissement

Le vieillissement consiste en toute altération lente et irréversible des propriétés d'un matériau, résultant de son instabilité propre ou d'effets de l'environnement.

Cette altération peut concerner la structure chimique des macromolécules ou des adjuvants (vieillissement chimique), la composition du matériau (pénétration ou départ de petites molécules), ou son état physique (taux de cristallinité, fraction de volume libre, contraintes internes...).

Les chercheurs tentent d'abord d'identifier les causes de ce vieillissement et parviennent à la conclusion que les facteurs les plus importants sont l'absorption d'eau et l'état de contrainte auquel est soumis le matériau.

##### II.4.1. Influence de l'environnement sur les matériaux composites

La durabilité des composites revêt une importance primordiale. Ces matériaux se détériorent graduellement au cours de leurs utilisations et le mécanisme de la dégradation dépend fortement de l'intensité et de la durée des agressions chimiques et physiques lorsque le composite est exposé séparément ou combiné aux différents facteurs : lumière, chaleur, humidité, oxygène, produits chimiques. Quel que soit l'origine de la dégradation, elle mène toujours à la détérioration des propriétés des matériaux composites conduisant au vieillissement de ces derniers, ce qui se traduit par la réduction de leurs durées de vie. [11]

### **II.4.2. Vieillissement des matériaux composites à matrice polymères en présence d'un fluide**

Le vieillissement est défini comme étant une dégradation provoquant un processus irréversible qui entraîne un changement significatif dans la structure du matériau. Le changement est classiquement caractérisé par une perte des propriétés initiales (poids moléculaire, structure moléculaire, résistance à la traction) et/ou une fragmentation. Quant à la dégradation elle est affectée par les paramètres environnementaux et se déroule en une ou plusieurs étapes. Cependant cette définition ne prend pas en compte le vieillissement physique qui est un phénomène réversible pour cela nous distinguons deux types de vieillissement. [12]

### **II.4.3. Les modes de Vieillissement des matériaux composites à matrice polymères en présence d'un fluide**

#### **II.4.3.1. Le vieillissement physique**

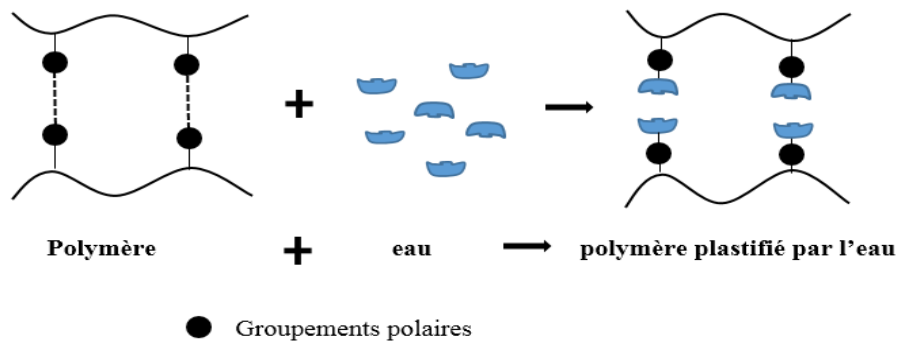
Le vieillissement physique englobe tous les phénomènes dans lesquels la structure chimique du matériau n'est pas modifiée. On peut distinguer deux types d'absorption d'eau, dans le réseau macromoléculaire de la matrice et dans les hétérogénéités du matériau composite.[13]

Il peut résulter de modifications de la configuration spatiale des macromolécules (relaxations d'enthalpie, relaxation de volume, cristallisation...), phénomènes de transport (pénétration de liquides, migration d'adjuvants), de phénomène de surface (fissuration en milieu tensioactif), ces mécanismes influent sur la résistance mécanique du matériau.

Généralement, lorsque le terme «vieillissement physique» est utilisé, il se réfère au vieillissement sans transfert de masse. Le vieillissement physique est en fait un phénomène lié à l'instabilité propre aux matériaux amorphes au-dessous de leur température de transition vitreuse ( $T_g$ ). La cause principale de ce vieillissement est l'absorption de l'eau dans le matériau. On peut distinguer deux types d'absorption d'eau, dans le réseau macromoléculaire de la matrice et dans les hétérogénéités du matériau composite issues des microvides. [14]

#### **a) Plastification de la matrice**

La plastification de la matrice est due à une réorganisation morphologique du réseau et à l'établissement d'interactions secondaires (liaisons H) entre les molécules d'eau et le polymère. En s'insérant entre les chaînes macromoléculaires, les molécules d'eau brisent les liaisons secondaires entre groupes polaires portés par les chaînes pour établir avec elles des liaisons préférentielles (*Figure II.10*).



**Figure II.10 :** Schéma de la plastification d'une macromolécule

Il y a une destruction partielle de la cohésion mécanique du réseau qui était assurée par ces liaisons et ainsi une augmentation de la mobilité moléculaire. Ces effets « classiques » de plastification sont dits réversibles, autrement dit les propriétés initiales du matériau sont restaurées après dessiccation. Divers phénomènes peuvent altérer cette réversibilité en particulier les ruptures par gonflements différentiels. [14]

#### **b) Absorption d'eau dans les hétérogénéités**

La résistance au cisaillement interlaminaire dépend principalement de la fraction volumique de pores incluant leur distribution en taille et leur localisation inter- ou intra.

Les microvides peuvent être préexistants du fait d'une maîtrise imparfaite de la mise en œuvre comme un dégazage insuffisant (des bulles d'air se retrouvant prisonnières dans la résine visqueuse), ou encore un cycle de cuisson non adapté avec des fissurations dues à des contraintes thermiques. L'absorption d'eau à haute température peut provoquer l'extraction des espèces non polymérisées créant ainsi des vides.

Des microvides peuvent résulter de l'endommagement par gonflements différentiels. Avant saturation, il y a un gradient de concentration dans l'épaisseur du composite qui crée des contraintes liées aux gonflements différentiels, il est important de préciser que ces derniers ne sont pas liés au développement d'interactions avec le réseau de la matrice et n'ont donc pas de conséquence sur la température de transition vitreuse, mais affectent d'autres propriétés physiques et mécaniques par création de contraintes internes. Ce type d'absorption d'eau augmente la sensibilité du système au phénomène de fissuration. Des fissures peuvent s'amorcer à leur surface lors de chocs thermiques.

L'eau peut atteindre ainsi plus facilement l'interface fibre-matrice et par la suite engendrer la décohésion de façon plus ou moins importante selon la qualité de la liaison interfaciale et la

température d'immersion. Le mécanisme par lequel la décohésion fibre-matrice est initiée est celui de la pression osmotique. [14]

### II.4.3.2 Le vieillissement chimique

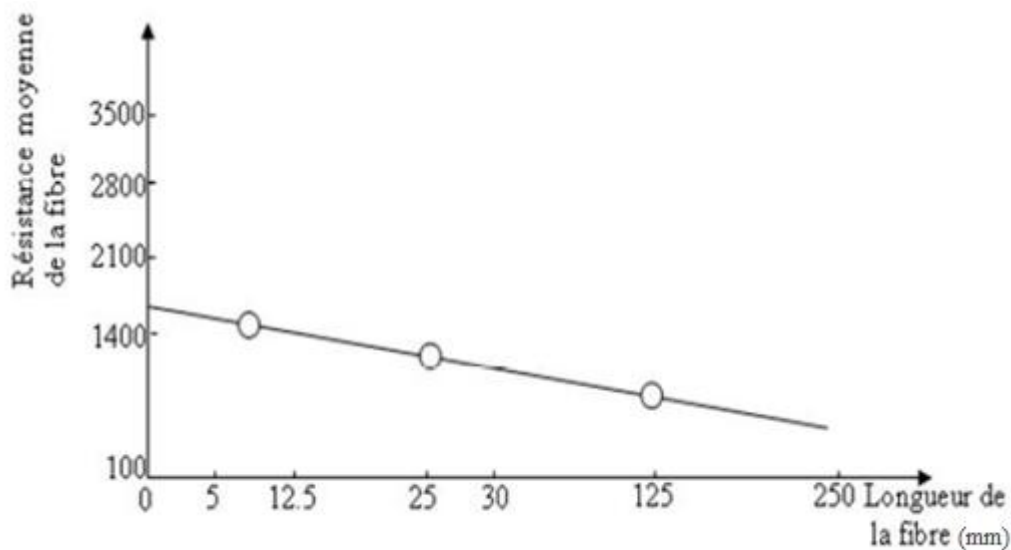
Le vieillissement chimique englobe tout phénomène impliquant une modification chimique du matériau sous l'influence d'un environnement donné. En ce qui concerne le vieillissement chimique lié à l'absorption d'eau, on parle alors de vieillissement hydrolytique : les polymères adsorbent une certaine quantité d'eau en fonction de leur structure et en particulier de la polarité de leur motif monomère et ils peuvent réagir avec les molécules d'eau, c'est l'hydrolyse. Le vieillissement hydrolytique est irréversible :



La coupure des liaisons a lieu principalement le long des chaînes macromoléculaires. La concentration en fonctions hydrophiles influe directement sur la concentration en eau dans le matériau et donc sur sa tendance à l'hydrolyse.

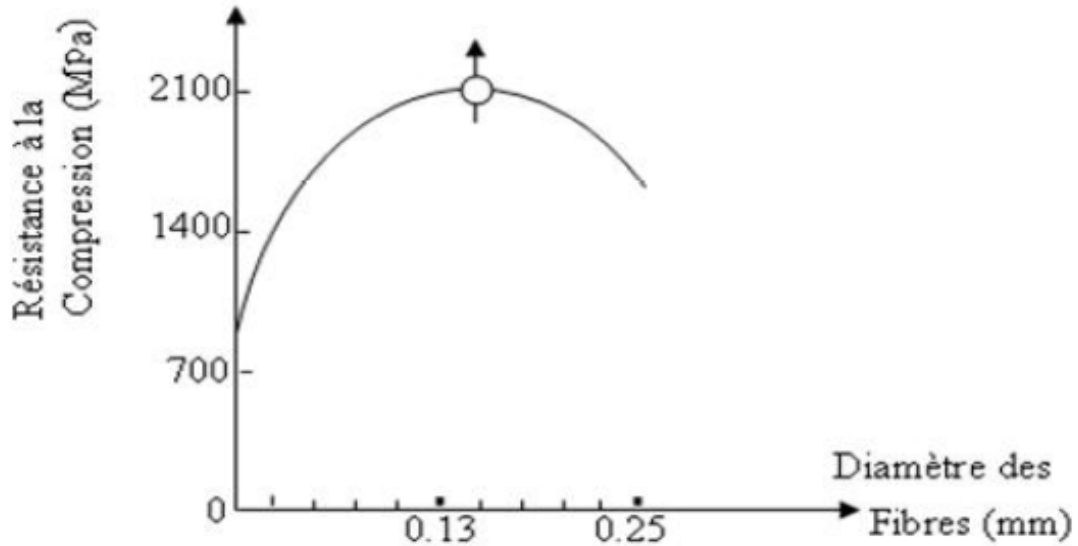
### II.5. Facteurs influençant la résistance du composite

Plusieurs facteurs agissent sur la résistance à la rupture des composites. Une analyse exacte de la rupture devient compliquée par la présence de contraintes résiduelles, par la nature hétérogène et anisotrope du matériau, par la présence de défauts et le manque de connaissance sur le comportement de l'interface.



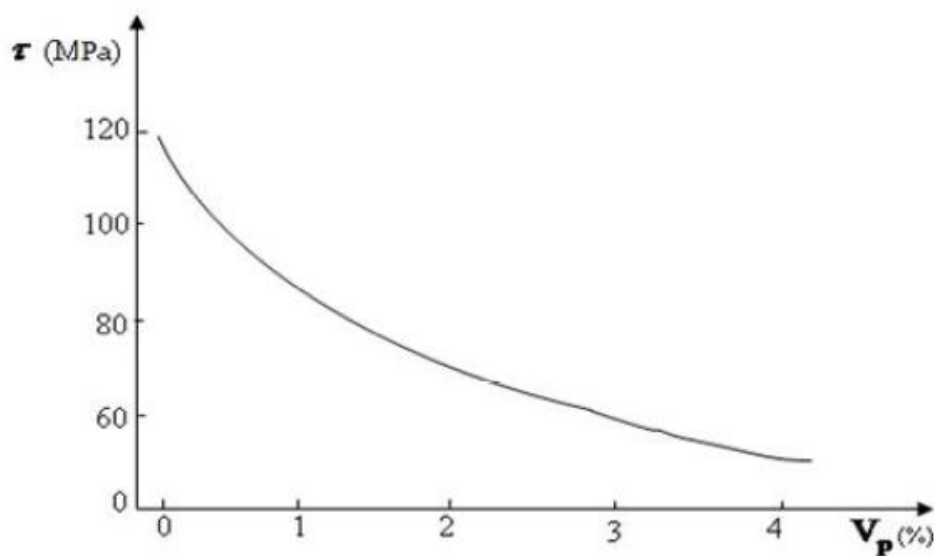
**Figure II.11:** Effet de la longueur d'une fibre de verre E sur la résistance moyenne de la fibre

La probabilité de trouver des défauts dans la fibre augmente quand sa longueur augmente ce qui réduit sa résistance à la rupture (Figure II.12) [10] ;

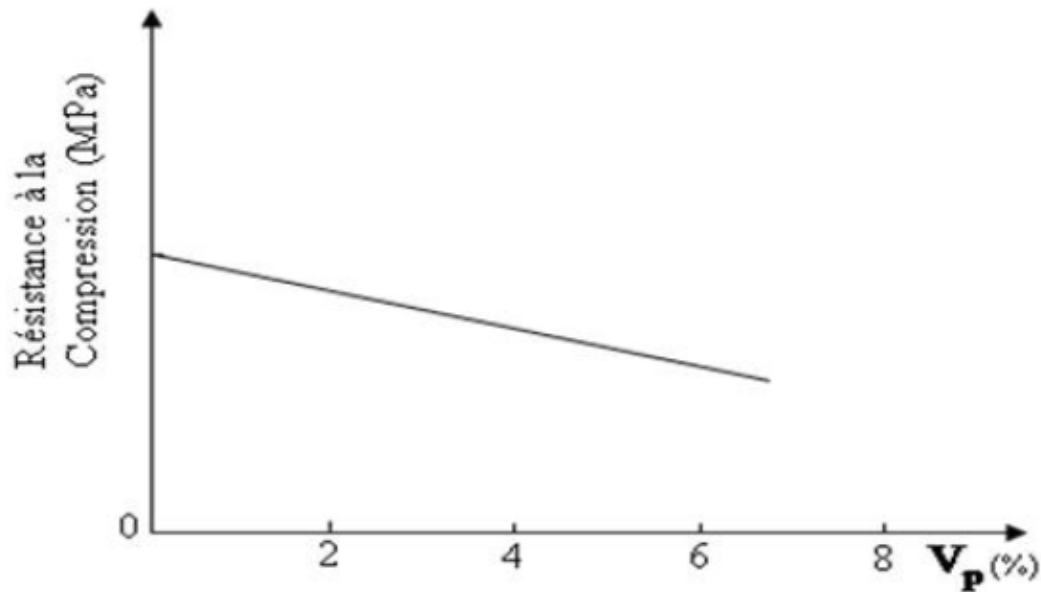


**Figure III.12 :** Influence du diamètre des fibres de verre sur la résistance à la compression d'un composite.

La résistance de la résine dépend de son degré de cuisson, de son degré d'homogénéité et du taux de porosité. Les figures III.13 et III.14 montrent l'influence du taux de porosité sur la résistance au cisaillement et à la compression des matériaux composites. [10]



**Figure III.13 :** Corrélation entre la résistance au cisaillement du composite et le taux de porosité.



**Figure III.14 :** Influence du taux de porosité sur la résistance à la Compression du composite à fibre de verre

L'espace entre les fibres est aussi un paramètre important. La diminution de celui-ci augmente le risque de rupture brutale du composite.

## II.6. Conclusion

Les composites sont des matériaux qui connaissent un grand essor au niveau de notre pays, le choix de ces matériaux doit dépendre de leurs comportements mécaniques et leur endommagement vis-à-vis des conditions et l'environnement imposés, le matériau utilisé dans le cadre de notre étude est le composite à matrice polyester renforcé par des fibres de verre.

La connaissance de l'état d'endommagement d'une structure travaillante en matériaux composites est une nécessité largement reconnue, et ce tant pour des raisons de fiabilité, et par conséquent de sécurité. Si on considère le cycle de vie d'un matériau, on s'aperçoit qu'à chaque étape de sa vie, il est soumis obligatoirement à différentes conditions d'exposition au cours de laquelle ce matériau voit ses propriétés initiales décroître en totalité ou en partie jusqu'à atteindre un seuil minimal qui définit la durée de vie. L'endommagement désigne toute altération des propriétés d'un matériau au cours du temps, ces propriétés peuvent être des caractéristiques mécaniques, physico-chimiques, de surface... Dans cet intérêt une étude sera l'objet du troisième chapitre.

### III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons une théorie générale de l'étude du comportement mécanique des composites. Nous nous sommes intéressés au cas spécifique des stratifiés.

Pour mieux comprendre le comportement de ces matériaux. Il a été utile d'en parler sur la mécanique des milieux continus et des différents types des matériaux. Pour en arriver au comportement linéaire des composites et à la théorie classique des stratifiés qui est un concept d'homogénéisation, qui exprime les modules d'élasticités du stratifiés en fonction des caractéristiques mécaniques et géométrique des constituants.

### III.2. Comportement élastique linéaire

Le comportement élastique linéaire est caractérisé par une relation linéaire entre les contraintes et déformations.

#### III.2.1. Matrice de rigidité

La relation d'élasticité linéaire s'écrit sous la forme matricielle suivante:

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & R_{14} & R_{15} & R_{16} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & R_{24} & R_{25} & R_{26} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & R_{34} & R_{35} & R_{36} \\ R_{14} & R_{24} & R_{34} & R_{44} & R_{45} & R_{46} \\ R_{15} & R_{25} & R_{35} & R_{45} & R_{55} & R_{56} \\ R_{16} & R_{26} & R_{36} & R_{46} & R_{56} & R_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{III.1})$$

Soit sous forme condensée :

$$\sigma = R\varepsilon \quad (\text{III.2})$$

Cette relation appelée loi de Hooke généralisée.

$R$  est dit matrice de rigidité, symétrique. Le comportement linéaire est donc décrit dans le cas général à l'aide de 21 coefficients indépendants.

#### III.2.2. Matrice de souplesse ou flexibilité

La relation d'élasticité (III.1) peut être écrite sous la forme matricielle inverse suivante :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & S_{14} & S_{15} & S_{16} \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & S_{24} & S_{25} & S_{26} \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & S_{34} & S_{35} & S_{36} \\ S_{14} & S_{24} & S_{34} & S_{44} & S_{45} & S_{46} \\ S_{15} & S_{25} & S_{35} & S_{45} & S_{55} & S_{56} \\ S_{16} & S_{26} & S_{36} & S_{46} & S_{56} & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (\text{III.3})$$

Soit sous forme condensée :

$$\varepsilon = S \cdot \sigma \quad (\text{III.4})$$

Avec  $S = R^{-1}$  (III.5)

Ou :  $S$  est dite matrice de souplesse ou flexibilité.

Et  $R^{-1}$  est la matrice de rigidité inverse.

### III.2.3. Changement de base

Les relations de changement de base relatives aux contraintes et déformation, sont écrites sous forme suivants :

$$R' = T_{\sigma} \cdot R \cdot T_{\varepsilon}^{-1} \quad (\text{III.6})$$

$$S' = T_{\varepsilon} \cdot S \cdot T_{\sigma}^{-1} \quad (\text{III.7})$$

Avec :  $\left\{ \begin{array}{l} T_{\sigma} \text{ et la matrice de changement de base des contraintes.} \\ T_{\varepsilon} \text{ et la matrice de changement de base des déformations.} \end{array} \right.$

Les relations inverses s'écrivent respectivement :

$$R = T_{\sigma}^{-1} \cdot R' \cdot T_{\varepsilon} \quad (\text{III.8})$$

$$S = T_{\varepsilon}^{-1} \cdot S' \cdot T_{\sigma} \quad (\text{III.9})$$

### III.2.4. Matériaux isotrope

Ce sont des matériaux invariants quel que soit le changement de repère, toutes les directions sont donc identiques.

La relation entre contrainte et déformation est indépendante du repère choisi.

Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est donc réduit à deux et conduit à la matrice de rigidité suivante :

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{12} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{11} & R_{12} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{12} & R_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(R_{11} - R_{12}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(R_{11} - R_{12}) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(R_{11} - R_{12}) \end{bmatrix} \quad (\text{III.10})$$

Généralement les constantes de rigidité sont exprimées en introduisant les coefficients de lamé  $\lambda$  et  $\mu$  :

$$R_{12} = \lambda, \quad \frac{1}{2}(R_{11} - R_{12}) = \mu \quad (\text{III.11})$$

D'où :

$$R_{11} = \lambda + 2\mu \quad (\text{III.12})$$

La relation (III.10) devient alors :

$$R = \begin{bmatrix} \lambda + 2\mu & \lambda & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda + 2\mu & \lambda & 0 & 0 & 0 \\ \lambda & \lambda & \lambda + 2\mu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \mu & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \mu \end{bmatrix} \quad (\text{III.13})$$

### III.2.5. Matériau anisotrope

Dans le cas le plus générale, la matrice de rigidité et la matrice de souplesse sont déterminées chacune par 21 constantes indépendantes. Ce cas correspond à un matériau ne possédant aucune propriété de symétrie. Un tel matériau est appelé matériau triclinique.

La plupart des matériaux anisotropes possèdent une structure présentant une ou plusieurs symétries. Les propriétés de symétrie géométriques réduisent alors les nombres de constantes indépendantes nécessaires pour décrire le comportement d'un matériau.

#### a. matériau monoclinique

Un matériau monoclinique est un matériau qui possède un plan de symétrie. La forme de la matrice de rigidité (souplesse) doit être tel que le changement de base effectué par symétrie par rapport à ce plan ne modifié pas la matrice [15]. Dans le cas où le plan de symétrie et le plan (1, 2), l'exploitation des changements de base conduit à une matrice de rigidité de la forme :

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 & 0 & R_{16} \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & 0 & 0 & R_{26} \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & 0 & 0 & R_{36} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} & R_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{45} & R_{55} & 0 \\ R_{16} & R_{26} & R_{36} & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{III.14})$$

La forme de la matrice des souplesse est identique à celle des rigidités.

#### b. Matériau orthotrope

Un matériau est dit orthotrope s'il possède 3 plans de symétrie orthogonaux entre eux.

La forme de la matrice de rigidité est donc obtenue en ajoutant un matériau monoclinique un plan de symétrie perpendiculaire : [15]

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & 0 & 0 & 0 \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{III.15})$$

La matrice de souplesse a la même forme.

Le nombre de constantes d'élasticité indépendantes est ramené à 9.

### c. Matériau unidirectionnel

Un matériau unidirectionnel se comporte comme un matériau orthotrope possédant en plus un axe de révolution. Le matériau est alors appelé matériau orthotrope de révolution ou isotrope transverse et est caractérisé élastiquement par 5 constantes indépendantes.

La matrice de rigidité s'écrit : [1]

$$R = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{12} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{23} & R_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(R_{22} - R_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{III.16})$$

et la matrice de souplesse :

$$S = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \quad (\text{III.17})$$

### III.3. Caractéristiques du mélange (renfort + matrice)

Un des facteurs les plus importants qui déterminent les caractéristiques mécanique d'un matériau composite est la proportion relative de matrice et de renfort. Cette proportion peut être exprimée soit en fraction volumique  $V$  soit en fraction massique  $M$ . [1]

### III.3.1. Fractions volumiques

Considérons un volume  $v_c$  de matériau composite, composé d'un volume  $v_f$  de fibre et d'un volume  $v_m$  de la matrice.

Donc le volume total du matériau composite s'écrit :

$$v_c = v_f + v_m \quad (\text{III.18})$$

La fraction volumique de fibre  $V_f$  est donnée par la relation suivante :

$$V_f = \frac{v_f}{v_c} \quad (\text{III.19})$$

La fraction volumique de la matrice  $V_m$  est donnée par la relation suivante :

$$V_m = \frac{v_m}{v_c} \quad (\text{III.20})$$

Avec :

$$V_f + V_m = 1 \quad (\text{III.21})$$

### III.3.2. Fractions massiques

Considérons une masse  $m_c$  de matériau composite, composé d'une masse  $m_f$  de fibre et d'une masse  $m_m$  de la matrice.

La masse totale du matériau composé est :

$$m_c = m_f + m_m \quad (\text{III.22})$$

La fraction massique de la fibre  $M_f$  est donnée par la relation suivante :

$$M_f = \frac{m_f}{m_c} \quad (\text{III.23})$$

La fraction massique de la matrice  $M_m$  est donnée par la relation suivante :

$$M_m = \frac{m_m}{m_c} \quad (\text{III.24})$$

### III.3.3. Relations entre fractions volumiques et massiques

Les relations entre fractions volumiques et massiques font intervenir les masses volumiques  $\rho_c$ ,  $\rho_f$  et  $\rho_m$  respectives du matériau composite, des fibres et de la matrice.

Les masses et volumes sont liée par les relations :

$$\begin{aligned} \rho_c &= \frac{m_c}{v_c} \longrightarrow m_c = \rho_c \cdot v_c \\ \rho_f &= \frac{m_f}{v_f} \longrightarrow m_f = \rho_f \cdot v_f \\ \rho_m &= \frac{m_m}{v_m} \longrightarrow m_m = \rho_m \cdot v_m \end{aligned} \quad (\text{III.25})$$

En combinant les relations (III.18), (III.19), (III.20) et (III.25). on obtient les fractions volumiques et massiques de la fibre et de la matrice :

$$V_f = \frac{\frac{M_f}{\rho_f}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad \text{et} \quad V_m = \frac{\frac{M_m}{\rho_m}}{\frac{M_f}{\rho_f} + \frac{M_m}{\rho_m}} \quad (\text{III.26})$$

De même pour les fractions massiques de la fibre et de la matrice. On combinant les relations (III.22), (III.23) et (III.25) on obtient :

$$M_f = \frac{\rho_f V_f}{\rho_f V_f + \rho_m V_m} \quad \text{et} \quad M_m = \frac{\rho_m V_m}{\rho_m V_m + \rho_f V_f} \quad (\text{III.27})$$

### III.3.4. Épaisseur du pli

On définit le terme de *grammage* la masse  $m_{of}$  de renfort par mètre carré.

L'épaisseur du pli notée  $h$  est alors telle que :

$$h = \frac{v_c m_{of}}{\rho_f v_f} \quad (\text{III.28})$$

soit :

$$h = \frac{m_{of}}{\rho_f v_f} \quad (\text{III.29})$$

Cette expression peut être réécrite en introduisant la fraction massique  $M_f$  de renfort au lieu de la fraction volumique  $V_f$  ; on obtient :

$$h = m_{of} \left[ \frac{1}{\rho_f} + \frac{1}{\rho_f} \left( \frac{1-M_f}{M_f} \right) \right] \quad (\text{III.30})$$

## III.4. comportement élastique d'un matériau unidirectionnel

### III.4.1. Concept d'homogénéisation

À une échelle suffisamment petite, tous les matériaux sont hétérogènes, même les matériaux communément appelés homogènes. Cependant, lors de la conception d'une structure macroscopique, l'échelle est si grande que l'on observe une moyenne statistique des propriétés microscopiques et il est licite de faire l'hypothèse de continuité de la matière. Une fois l'hypothèse de continuité est admise, le concept d'homogénéité s'en déduit. Le milieu homogène est celui qui possède des propriétés identiques en chaque point.

Par exemple, dans le cas des matériaux composite, à fibres, il existe une dimension caractéristique d'hétérogénéité qui est la distance moyenne entre les fibres.

Si le composite est considéré à une dimension  $\delta$  très supérieur à la distance moyenne entre les fibres, les propriétés mesurées sur cette échantillon peuvent être considérées comme homogène est correspondent à une certaine moyenne des propriétés des fibres et la matrice.[4]

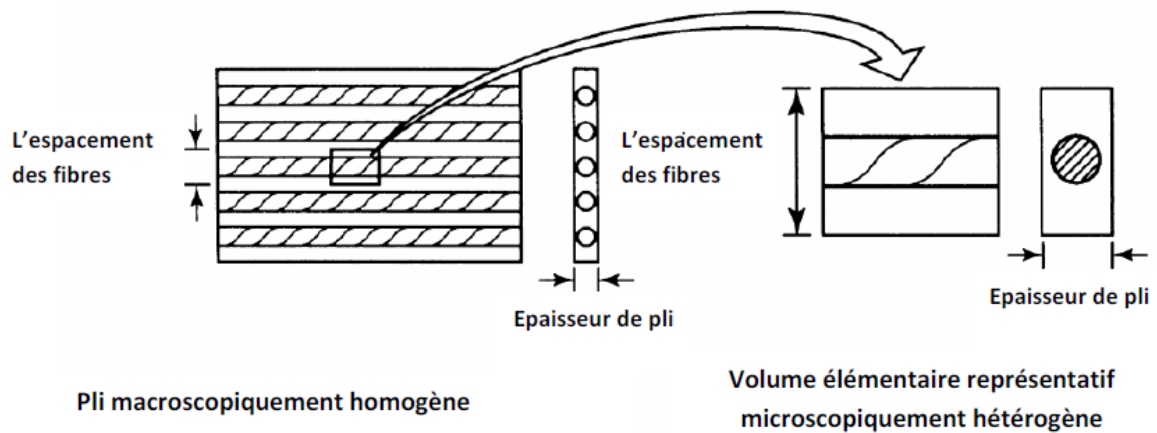


Figure III.1 : Volume élémentaire représentatif

### III.4.2. loi de Hooke pour un matériau unidirectionnel

La loi de Hooke pour un matériau unidirectionnel s'écrit, en introduisant les constantes de rigidité  $R_{ij}$ , les constantes de souplesse  $S_{ij}$  suivant les deux forme directes :[4]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{12} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{23} & R_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(R_{22} - R_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (III.31)$$

ou la forme inverse :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{12} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{23} & S_{22} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2}(S_{22} - S_{23}) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (III.32)$$

### III.4.3. modules d'élasticité en fonction des constantes des rigidité et de souplesse

Les modules d'élasticité sont les modules de Young  $E$ , les coefficients de poisson  $\nu$  et les modules de cisaillement  $G$ .

Ces modules sont mesurés dans des essais simple tels que les essais de traction uni axiale ou de cisaillement. [4]

- **Traction longitudinale :**

En fonction des constantes de rigidité :

$$E_L = R_{11} - \frac{2R_{12}^2}{R_{22} + R_{23}}, \quad \nu_{LT} = \frac{R_{12}}{R_{22} + R_{23}} \quad (\text{III.33})$$

En fonction des constantes de souplesse :

$$E_L = \frac{1}{S_{11}}, \quad \nu_{LT} = -\frac{S_{12}}{S_{11}} \quad (\text{III.34})$$

- **Traction transversale :**

En fonction des constantes de rigidité :

$$E_T = R_{22} - \frac{R_{12}^2(R_{22} - 2R_{23}) + R_{11}R_{23}^2}{R_{12}^2 - R_{11}R_{22}}$$

$$\nu_{TL} = \frac{R_{12}(R_{23} - R_{22})}{R_{12}^2 - R_{11}R_{22}} \quad (\text{III.35})$$

$$\nu_{TT'} = \frac{R_{12}^2 - R_{11}R_{23}}{R_{12}^2 - R_{11}R_{22}}$$

En fonction des constantes de souplesse :

$$E_T = \frac{1}{S_{22}}, \quad \nu_{TL} = -\frac{S_{12}}{S_{22}}, \quad \nu_{TT'} = -\frac{S_{23}}{S_{22}} \quad (\text{III.36})$$

- **Cisaillement longitudinal :**

$$G_{LT} = R_{66} \quad \text{ou} \quad G_{LT} = \frac{1}{S_{66}} \quad (\text{III.37})$$

- **Cisaillement transverse :**

$$G_{TT'} = \frac{1}{2}(R_{22} - R_{23}) \quad \text{ou} \quad G_{TT'} = \frac{1}{2(S_{22} - S_{23})} \quad (\text{III.38})$$

### III.4.4. Les modules l'élasticité d'un composite unidirectionnel en fonction des caractéristiques mécaniques de ces constituants

- **Module de Young longitudinal :**

$$E_L = E_f V_f + E_m (1 - V_f) \quad (\text{III.39})$$

- **Module de Young transversal :**

$$E_T = \frac{E_f E_m}{V_f E_f + V_m E_m} \quad (\text{III.40})$$

- **Coefficient de poisson longitudinal :**

$$\nu_{LT} = \nu_f V_f + \nu_m (1 - V_f) \quad (\text{III.41})$$

Ou :

$\nu_f$  : coefficient de poisson des fibres

$\nu_m$  : coefficient de poisson e la matrice

- **Module de cisaillement longitudinal :**

$$G_{LT} = G_m \frac{G_f(1+V_f)+G_m(1-V_f)}{G_f(1-V_f)+G_m(1+V_f)} \quad (\text{III.42})$$

- **Module de cisaillement transversal :**

$$G_{TT'} = G_m \left( 1 + \frac{V_f}{\frac{G_m}{G_f - G_m} + \frac{k_m + \frac{7G_m}{3}}{2k_m + \frac{8G_m}{3}} (1 - V_f)} \right) \quad (\text{III.43})$$

Ou :

$E_f, \nu_f, G_m, G_f, k_m, \nu_m, E_m$  sont les modules des fibres et de matrice.

Avec :

$$k_m = \frac{E_m}{3(1-2\nu_m)} \quad (\text{III.44})$$

$$G_f = \frac{E_f}{2(1-\nu_f)}, \quad G_m = \frac{E_m}{2(1-\nu_m)} \quad (\text{III.45})$$

### III.5. modules d'élasticité en fonction des coefficients de souplesse dans un matériau orthotrope

Les stratifiés sont constitués de couches de matériaux composites unidirectionnels ou de composite à base de tissus. Généralement, les tissus sont constitués de fils unidirectionnels croisés à 90° (l'un dans le sens chaîne, l'autre dans le sens trame). Ces couches possèdent trois plans de symétries orthogonaux deux à deux, et se comporte d'un point de vue élastique comme un matériau orthotrope. Les directions (1,2) seront prise respectivement suivant la direction chaîne et la direction trame . [1]

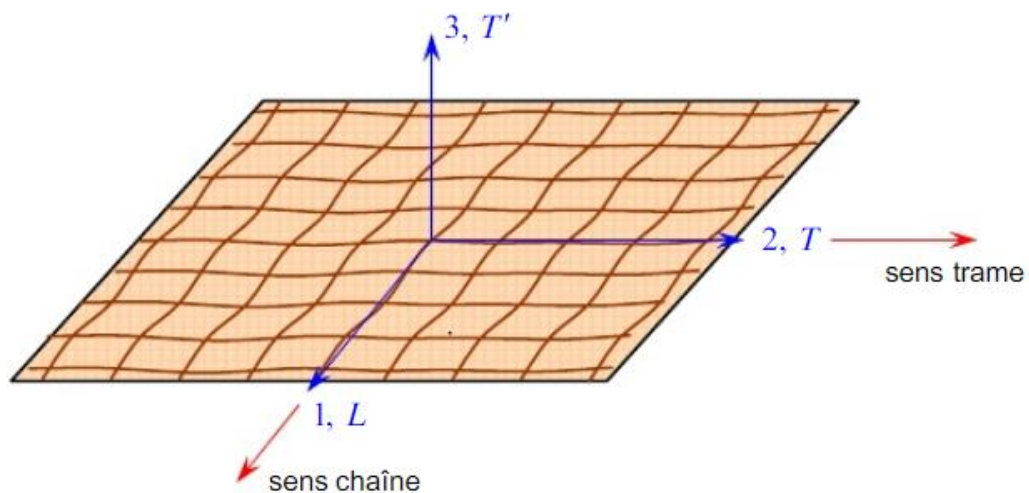


Figure III.2 : couche de matériau composite orthotrope.

#### III.5.1. Loi de Hooke pour un matériau orthotrope

La loi de Hooke pour un matériau orthotrope s'écrit, en introduisant les constantes de rigidité  $R_{ij}$ , les constantes de souplesse  $S_{ij}$  suivant les deux forme directes. [1]

$$\begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{11} & R_{12} & R_{13} & 0 & 0 & 0 \\ R_{12} & R_{22} & R_{23} & 0 & 0 & 0 \\ R_{13} & R_{23} & R_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & R_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & R_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} \quad (\text{III.46})$$

Ou:

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \varepsilon_3 \\ \varepsilon_4 \\ \varepsilon_5 \\ \varepsilon_6 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} & 0 & 0 & 0 \\ S_{12} & S_{22} & S_{23} & 0 & 0 & 0 \\ S_{13} & S_{23} & S_{33} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & S_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & S_{55} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & S_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sigma_1 \\ \sigma_2 \\ \sigma_3 \\ \sigma_4 \\ \sigma_5 \\ \sigma_6 \end{bmatrix} \quad (\text{III.47})$$

### III.5.2. Module de l'ingénieur

Les modules usuels de l'ingénieur (module de Young, coefficients de poisson, module de cisaillement) s'expriment simplement en fonction des coefficients de souplesse. [1]

- **traction dans le sens chaîne**

Le module de YOUNG et les coefficients de poisson, mesurés dans un essai de traction suivant le sens chaîne :

$$E_{chaîne} = E_L = E_1 = \frac{1}{S_{11}} \quad (III.48)$$

$$\nu_{LT} = \nu_{12} = -\frac{S_{12}}{S_{11}}; \nu_{LT'} = \nu_{13} = -\frac{S_{13}}{S_{11}}$$

- **traction dans le sens trame :**

Le module de YOUNG et les coefficients de poisson, mesurés dans un essai de traction suivant le sens trame :

$$E_{trame} = E_T = E_2 = \frac{1}{S_{22}} \quad (III.49)$$

$$\nu_{TL} = \nu_{21} = -\frac{S_{12}}{S_{22}}; \nu_{TT'} = \nu_{23} = -\frac{S_{23}}{S_{22}}$$

- **traction transversale :**

La traction transversale effectuée dans une direction normale au plan de la couche (suivant  $T'$ ).

D'où :

$$E_{T'} = E_3 = \frac{1}{S_{33}} \quad (III.50)$$

$$\nu_{T'L} = \nu_{31} = -\frac{S_{13}}{S_{33}}; \nu_{T'T} = \nu_{32} = -\frac{S_{23}}{S_{33}}$$

- **Essai de cisaillement :**

Le module de cisaillement dans le plan de la couche :

$$G_{12} = G_{LT} = R_{66} = \frac{1}{S_{66}} \quad (III.51)$$

Les modules de cisaillement dans les essais transversaux :

➤ Sens chaîne :  $G_{13} = G_{LT'} = R_{55} = \frac{1}{S_{55}} \quad (III.52)$

➤ Sens trame :  $G_{23} = G_{LT} = R_{66} = \frac{1}{S_{66}} \quad (II.53)$

Les modules de la couche s'expriment suivant :

$$E_L = (1 - \alpha)\alpha_u [KE_{Lu} + (1 - K)E_{Tu}]$$

$$E_T = (1 - \alpha)\alpha_u [KE_{Tu} + (1 - K)E_{Lu}]$$

(III.54)

$$v_{LT} = \frac{1}{k + (1 - K) \frac{E_{Lu}}{E_{Tu}}} v_{LTu}$$

$$G_{LT} = G_{LTu}$$

Avec :

$$\alpha_u = \frac{1}{1 - \frac{E_{Tu}}{E_{Lu}} v_{LTu}^2} \quad \text{et} \quad \alpha = \frac{v_{LTu}^2}{\left[ K \frac{E_{Lu}}{E_{Tu}} + 1 - K \right] \left[ K + (1 - K) \frac{E_{Lu}}{E_{Tu}} \right]} \quad (\text{III.55})$$

Ou :  $E_{Lu}$ ,  $E_{Tu}$ ,  $v_{LTu}$  et  $G_{LTu}$  sont les modules d'une couche unidirectionnelle ayant une fraction volumique égale à celle de la couche à renfort tissu.

- $K$  est appelé *coefficient d'équilibrage*.

### III.6. comportement mécanique des stratifiés

L'étude du comportement mécanique des stratifiés comporte 02 étape :

1<sup>ère</sup> étape : L'étude du comportement mécanique en chaque couche (comportement microscopique ou micromécanique des matériaux composites) ;

2<sup>ème</sup> étape : L'étude du comportement global du matériau composite constitué de plusieurs couches (comportement macroscopique du stratifié). Cette étape sera étudiée dans ce paragraphe. [1]

#### III.6.1. Théorie classique des stratifiés

Considérons un stratifié de hauteur  $h$  constitué de  $n$  couches (figure III.3), numérotées de la face inférieure à la face supérieure. La surface moyenne est choisie comme plan de référence ( $Oxy$ ) et l'axe  $\vec{OZ}$  est dirigé dans le sens croissant des numéros des couches. Chaque couche  $k$  est repérée par les côtés algébriques dans sa face inférieure  $h_{k-1}$  et sa face supérieure  $h_k$ . [1]

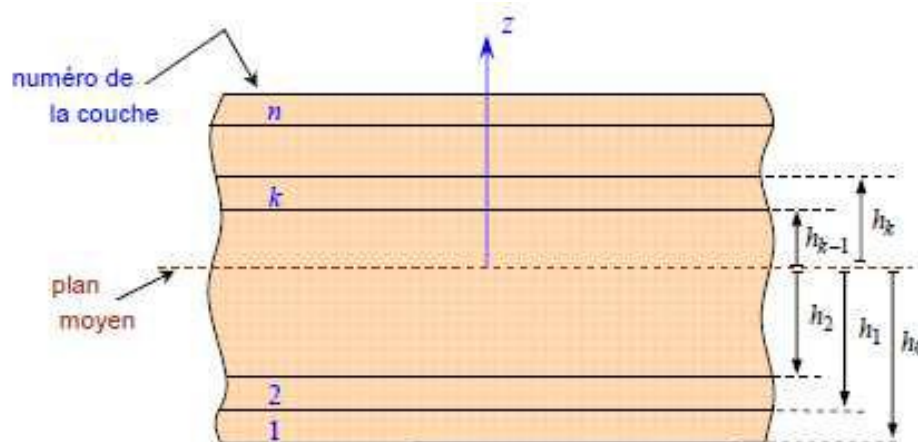


Figure III.3 : éléments de stratifié

**a. Hypothèses de la théorie classique des stratifiés**

La théorie classique des stratifiés utilise, pour décrire le comportement des plaques, un schéma du champ des déplacements du premier degré sous la forme :

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) + z\varphi_x(x, y) \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) + z\varphi_y(x, y) \\ w(x, y, z) &= w_0(x, y) \end{aligned} \quad (\text{III.56})$$

Avec :

$\varphi_x, \varphi_y$  coefficients qui dépendent de  $(x, y)$  ;

$u_0, v_0, w_0$  champ de déplacement du point  $M_0(x, y, 0)$  du plan  $(oxy)$ .

$$\begin{aligned} \text{Ou :} \quad u_0 &= u_0(x, y) = u(x, y, 0) \\ v_0 &= v_0(x, y) = v(x, y, 0) \\ w_0 &= w_0(x, y) = w(x, y, 0) \end{aligned} \quad (\text{III.57})$$

Dans le cas d'un schéma du premier degré, le champ des déformations s'écrit :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} + z \frac{\partial \varphi_x}{\partial x}, \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} + z \frac{\partial \varphi_y}{\partial y}, \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial w_0}{\partial z} = 0, \\ \gamma_{yz} &= 2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \varphi_y + \frac{\partial w_0}{\partial y}, \\ \gamma_{xz} &= 2\varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \varphi_x + \frac{\partial w_0}{\partial x}, \\ \gamma_{xy} &= 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \left( \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + z \left( \frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \right). \end{aligned} \quad (\text{III.58})$$

Cette théorie fait ensuite une hypothèse supplémentaire qui ne prend pas en compte le cisaillement transverse :  $\gamma_{xz} = 0$  et  $\gamma_{yz} = 0$

Cette hypothèse implique :

$$\varphi_x(x, y) = -\frac{\partial w_0}{\partial x} \quad (\text{III.59})$$

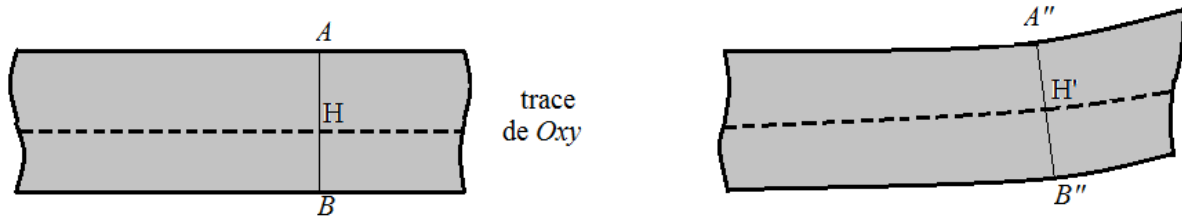
$$\varphi_y(x, y) = -\frac{\partial w_0}{\partial y}$$

Les champs de déplacements s'écrivent alors :

$$\begin{aligned} u(x, y, z) &= u_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial x}(x, y) \\ v(x, y, z) &= v_0(x, y) - z \frac{\partial w_0}{\partial y}(x, y) \end{aligned} \quad (\text{III.60})$$

$$w(x, y, z) = w_0(x, y).$$

Les points sur la normale au plan moyen ( $Oxy$ ) avant déformation restent sur un segment de droite au cours de la déformation (figure III.4).



**Figure III.4 :** Déformation dans le cas d'un schéma du premier degré, en absence de cisaillement transverse

### b. Expression du champ des déformations

Le tenseur de déformation en point  $M$  est en tenant compte des hypothèses, est : [1]

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & 0 \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.61})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u_0}{\partial x} - z \frac{\partial^2 \varphi_x}{\partial x^2}, \\ \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v_0}{\partial y} - z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2}, \\ \varepsilon_{zz} &= 0, \\ \gamma_{yz} &= 0, \quad \gamma_{xz} = 0 \\ \gamma_{xy} &= \left( \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) - 2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y}, \end{aligned} \quad (\text{III.62})$$

Et la matrice de déformation se réduit à trois composantes non nulles : [1]

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.63})$$

Le champ es déformations est la superposition :

- Des déformations en membrane

$$\varepsilon_m(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\partial u_0}{\partial x} \\ \frac{\partial v_0}{\partial y} \\ \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \end{bmatrix} \quad (\text{III.64})$$

- Des déformations en flexion et torsion :

$$\varepsilon_f(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^f \\ \varepsilon_{yy}^f \\ \varepsilon_{xy}^f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -z \frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2z \frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (\text{III.65})$$

- Généralement, les déformations en flexion et torsion s'expriment suivant la relation :

$$\varepsilon_f(M) = zk(x, y), \quad (\text{III.66})$$

Où :

$$k(x, y) = \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\partial^2 w_0}{\partial x^2} \\ -\frac{\partial^2 w_0}{\partial y^2} \\ -2\frac{\partial^2 w_0}{\partial x \partial y} \end{bmatrix} \quad (\text{III.67})$$

La matrice  $k(x,y)$  est appelée matrice des courbures de la plaque sollicitée en flexion.

Finalement, le champ des déformations s'écrit :

$$\varepsilon(M) = \varepsilon_m(M) + \varepsilon_f(M) \quad (\text{III.68})$$

Ou bien :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.69})$$

Sous la forme abrégée, le champ des déformations s'écrit donc :

$$\varepsilon(M) = \varepsilon(x, y, z) = \varepsilon_m(x, y) + zk(x, y) \quad (\text{III.70})$$

Les déformations en membrane  $\varepsilon_m(x, y)$  ne dépendent que des coordonnées  $(x,y)$  du point  $H$  (figure III.2) du plan moyen du stratifié. [1]

### c. Champ des contraintes

La forme de la matrice de rigidité d'une couche de composite unidirectionnel ou tissu, rapportée aux axes ( $Oxyz$ ) du stratifié. si le point  $M$  appartient à la couche  $k$  du stratifié, le champ des contraintes s'écrit donc : [1]

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R'_{11} & R'_{12} & R'_{13} & 0 & 0 & R'_{16} \\ R'_{12} & R'_{22} & R'_{23} & 0 & 0 & R'_{26} \\ R'_{13} & R'_{23} & R'_{33} & 0 & 0 & R'_{36} \\ 0 & 0 & 0 & R'_{44} & R'_{45} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R'_{45} & R'_{55} & 0 \\ R'_{16} & R'_{26} & R'_{36} & 0 & 0 & R'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \varepsilon_{zz} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.71})$$

La théorie des plaques a pour objet de simplifier le problème de l'analyse du comportement mécanique d'une plaque en trois dimension ( $x,y,z$ ) en un problème à deux dimension ( $x,y$ ).

Cette théorie fait l'hypothèse que les contraintes normales  $\sigma_{zz}$  sont négligeables dans le volume de la plaque, par rapport aux autres composantes  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ , soit :  $\sigma_{zz} = 0$   
L'état de contraintes  $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$  et des déformations  $\varepsilon_{xx}, \varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}, \gamma_{xy}$  correspond à l'état de contrainte planes.

Le tenseur des contraintes en  $M$  est donc de la forme :

$$\sigma(M) = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & \sigma_{xy} & 0 \\ \sigma_{xy} & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.72})$$

Le champ des contraintes dans le cadre de la théorie classique des stratifiés s'écrit : [4]

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.73})$$

Ou bien :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = Q'_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.74})$$

En tenant compte des relations (II.39), les contraintes dans la couche  $k$  s'expriment alors :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.75})$$

Ou :

$$\sigma_k(M) = \sigma_k(x, y, z) = Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z Q'_k k(x, y) \quad (\text{III.76})$$

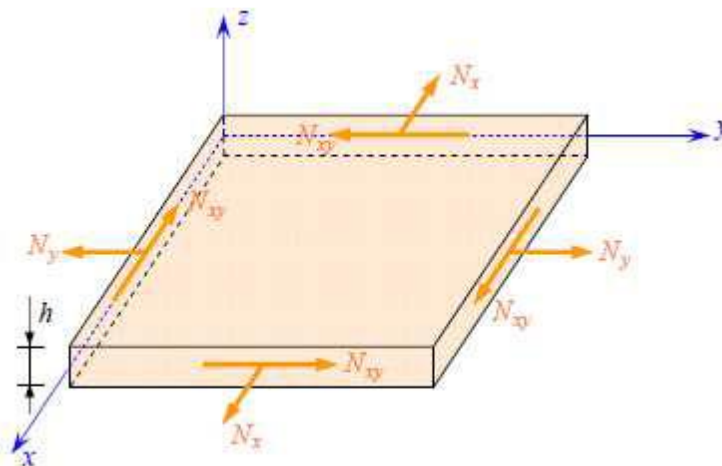
La matrice  $\sigma_k(M)$  représente la matrice des contraintes dans la couche  $k$  :  $h_{k-1} \leq z \leq h_k$ . La matrice de rigidité réduite  $Q'_k$  varie d'une couche à l'autre. Il en résulte donc une discontinuité du champ des contraintes entre couches successives.

#### d. Résultante en membrane

Le champ de résultantes en membrane, noté  $N(x,y)$ , est défini par :

$$N(x, y) = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \int_{-h/2}^{h/2} \sigma_k(M) dz = \int_{-h/2}^{h/2} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (\text{III.77})$$

Les composantes  $N_x$ ,  $N_y$ ,  $N_{xy}$  sont les résultantes, par unité de longueur des plaques respectivement des contraintes normales (suivant  $x$  et  $y$ ) et es contraintes de cisaillements, dans le plan  $(x, y)$ . elles sont représentées sur la (figure III.5). [1]



**Figure III.5 :** schématisation des résultantes en membrane des actions exercées sur un élément stratifié.

La discontinuité des contraintes en passant d'une couche à l'autre conduit à réécrire la relation (III.79) suivante :

$$N(x, y) = \begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} dz \quad (\text{III.79})$$

L'expression (III.79) associée à la relation (III.75) conduit à l'expression des résultantes en membrane, dans le cadre de la théorie classique des stratifiés, nous obtenons (III.80) :

$$N(x, y) = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} [Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z Q'_k \kappa(x, y)] dz \quad (\text{III.80})$$

Soit :

$$N(x, y) = \sum_{k=1}^n \left[ Q'_{ik} \varepsilon_m(x, y) \int_{h_{k-1}}^{h_k} dz + Q'_{ik} k(x, y) \int_{h_{k-1}}^{h_k} z dz \right] \quad (\text{III.81})$$

L'expression de la matrice des résultantes peut finalement s'écrire sous la forme :

$$N(x, y) = A \varepsilon_m(x, y) + B k(x, y) \quad (\text{III.82})$$

Avec :

$$A = [A_{ij}] = \sum_{k=1}^n (h_k - h_{k-1}) (Q'_{ij})_k \quad (\text{III.83})$$

$$B = [B_{ij}] = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^n (h_k^2 - h_{k-1}^2) (Q'_{ij})_k \quad (\text{III.84})$$

L'expression développée des résultantes en membrane s'écrit donc :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.85})$$

### e. Comportement en flexion et torsion

#### • Résultantes en flexion

Les relations fondamentales des stratifiés font également intervenir les moments résultants des contraintes sur un élément du stratifié. Les moments de flexion et de torsion sont définis par :

$$M_f(x, y) = \begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^k \begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} z dz \quad (\text{III.86})$$

Les composantes  $M_x$  et  $M_y$  sont les moments de flexion suivant les directions  $x$  et  $y$ , respectivement, et la composante  $M_{xy}$  est le moment de torsion. Ces composantes sont schématisées sur la figure (III.6) :

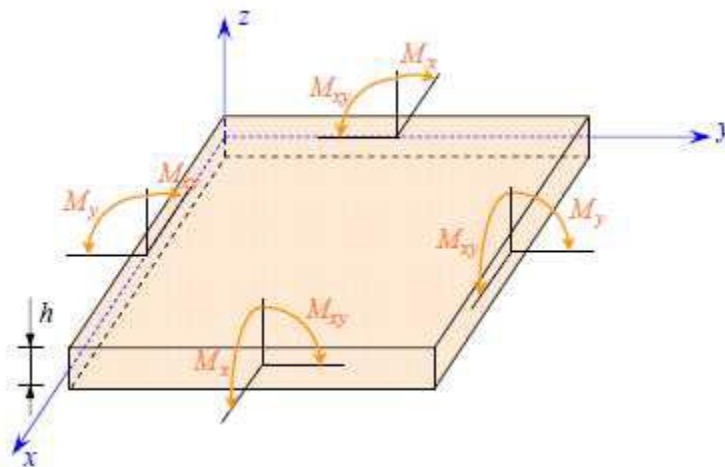


Figure III.6: Schématisation des moments de flexion et de torsion

En introduisant l'expression (III.76) et (III.86), on obtient :

$$M_f(x, y) = \sum_{k=1}^n \int_{k-1}^k [zQ'_k \varepsilon_m(x, y) + z^2 Q'_k k(x, y)] dz \quad (\text{III.87})$$

Après développement, on aboutit à :

$$M_f(x, y) = B \varepsilon_m(x, y) + C k(x, y) \quad (\text{III.88})$$

En introduisant la nouvelle matrice  $C$ , dite matrice de rigidité en flexion, telle que :

$$C_{ij} = \frac{1}{3} \sum_{k=1}^n (h_k^3 - h_{k-1}^3) (Q'_{ij})_k \quad (\text{III.89})$$

L'expression développée des moments s'écrit sous la forme suivante : [1]

$$\begin{bmatrix} M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.90})$$

### f. Équation du comportement mécanique d'un stratifié

L'équation constitutive d'une plaque stratifié exprime les résultantes et moments en fonction des déformations en membrane et des courbures. Elle s'obtient en regroupement les expressions (III.85) et (III.90) suivant une seule écriture matricielle sous la forme : [1]

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & C_{11} & C_{12} & C_{16} \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & C_{12} & C_{22} & C_{26} \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & C_{16} & C_{26} & C_{66} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.91})$$

Sous la forme contractée :

$$\begin{bmatrix} N \\ M \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ B & C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_m \\ k \end{bmatrix} \quad (\text{III.92})$$

Les termes  $A$ ,  $B$  et  $C$  peuvent être exprimés en introduisant l'épaisseur  $e_k$  et la côte  $z$  du centre de la couche  $k$ , sous la forme :

$$A_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q'_{ij})_k e_k \quad (\text{III.93})$$

$$B_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q'_{ij})_k e_k z_k \quad (\text{III.94})$$

$$C_{ij} = \sum_{k=1}^n (Q'_{ij})_k \left( e_k z_k^2 + \frac{e_k^3}{12} \right) \quad (\text{III.95})$$

### g. Détermination des déformations et des contraintes

Connaissant les résultantes en membrane, on pourra déterminer les déformations en membrane et les courbures, et cela en inversant la relation (III.91).

Le champ des déformations s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.96})$$

Les contraintes dans la couche  $k$  sont obtenues :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix} = Q'_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.97})$$

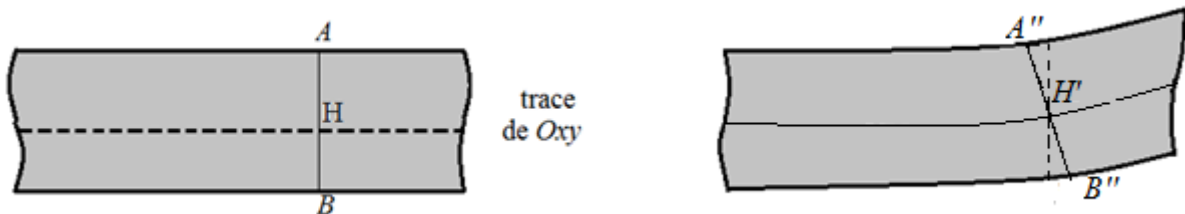
### h. Prise en compte du cisaillement transverse dans la théorie des stratifiés

la théorie classique des stratifiés, basée sur l'hypothèse de Kirchhoff, permet de décrire avec une bonne précision les champs des contraintes et déformations dans les matériaux composites stratifiés peu épais. Par contre dans le cas de la description du comportement mécanique en tenant compte du cisaillement transverse. [1]

#### ➤ Champ des déplacements

Le schéma utilisé et un schéma du premier degré de la forme générale, soit :

$$\begin{aligned} u(x, y, z, t) &= u_0(x, y, t) + z\varphi_x(x, y, t) \\ v(x, y, z, t) &= v_0(x, y, t) + z\varphi_y(x, y, t) \\ w(x, y, z, t) &= w_0(x, y, t) \end{aligned} \quad (\text{III.98})$$



**Figure III.7 :** Déformation dans le cas d'un schéma du premier degré avec cisaillement transverse

Avec :

$$\begin{aligned} u_0(x, y, t) &= u(x, y, 0, t) \\ v_0(x, y, t) &= v(x, y, 0, t) \\ w_0(x, y, t) &= w(x, y, 0, t) \end{aligned}$$

Nous avons montré que, dans un schéma de premier degré la déformation d'une normale  $AB$  du stratifié reste un segment de droite lors de la déformation. Toutefois, contrairement à la théorie classique, cette déformée ne reste pas normale à la déformée du plan moyen (figure III.7) dans le cas où l'on tient compte du cisaillement transverse.

### ➤ Champ des déformations

Le champ des déformations est réduit du champ des déplacements (III.99), s'écrit donc :

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_{xx} &= \frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u_0}{\partial x} + z \frac{\partial \varphi_x}{\partial x} \\
 \varepsilon_{yy} &= \frac{\partial v}{\partial y} = \frac{\partial v_0}{\partial y} + z \frac{\partial \varphi_y}{\partial y} \\
 \varepsilon_{zz} &= \frac{\partial w}{\partial z} = \frac{\partial w_0}{\partial z} = 0 \\
 \gamma_{yz} &= 2\varepsilon_{yz} = \frac{\partial v}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial y} = \varphi_y + \frac{\partial w_0}{\partial y} \\
 \gamma_{xz} &= 2\varepsilon_{xz} = \frac{\partial u}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial x} = \varphi_x + \frac{\partial w_0}{\partial x} \\
 \gamma_{xy} &= 2\varepsilon_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} = \left( \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x} \right) + z \left( \frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x} \right)
 \end{aligned} \tag{III.99}$$

Le tenseur des déformations en point M du stratifié est donc : d'après [17] et [18]

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{xz} \\ \varepsilon_{xy} & \varepsilon_{yy} & \varepsilon_{yz} \\ \varepsilon_{xz} & \varepsilon_{yz} & 0 \end{bmatrix} \tag{III.100}$$

Et la matrice des déformations comporte cinq composantes non nulles :

$$\varepsilon(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \tag{III.101}$$

Le champ des déformations peut être sous-divisé en deux champs :

- *Le champ des déformations en membrane-flexion :*

$$\varepsilon_{mf}(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \end{bmatrix} \tag{III.102}$$

$$\varepsilon_{mf}(M) = \varepsilon_m(M) + \varepsilon_f(M)$$

$$\varepsilon_{mf}(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \varepsilon_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} k_x \\ k_y \\ k_{xy} \end{bmatrix} \tag{III.103}$$

- *Le champ des déformations en cisaillement transverse :*

$$\gamma_c(M) = \begin{bmatrix} \gamma_{yz} \\ \gamma_{xz} \end{bmatrix} \tag{III.104}$$

Et  $\gamma_{yz}^0, \gamma_{xz}^0$  sont les déformations moyennes du stratifié.

Comme dans le cas de la théorie classique es stratifié, le champ e déformation en membrane-flexion est : [1]

$$\varepsilon_{mf}(M) = \varepsilon_m(M) + \varepsilon_f(M) \quad (\text{III.105})$$

$$\varepsilon_{mf}(M) = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.106})$$

Avec

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx}^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy}^0 = \frac{\partial v_0}{\partial y}, \quad \gamma_{xz}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}, \\ K_x &= \frac{\partial \varphi_x}{\partial x}, \quad K_y = \frac{\partial \varphi_y}{\partial y}, \quad K_{xy} = \frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x}, \end{aligned} \quad (\text{III.107})$$

### ➤ Champ des contraintes

les contraintes dans la couche  $k$  s'exprime suivant :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} & 0 & 0 \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} & 0 & 0 \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & R'_{44} & R'_{45} \\ 0 & 0 & 0 & R'_{45} & R'_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} \\ \varepsilon_{yy} \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.108})$$

Les contraintes en membrane dans la couche  $k$  s'exprime suivant : [2]

$$\begin{bmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{xy} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \end{bmatrix} + z \begin{bmatrix} Q'_{11} & Q'_{12} & Q'_{16} \\ Q'_{12} & Q'_{22} & Q'_{26} \\ Q'_{16} & Q'_{26} & Q'_{66} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} K_x \\ K_y \\ K_{xy} \end{bmatrix} \quad (\text{III.109})$$

Ou sous forme contractée :

$$\sigma_k(M) = Q'_k \varepsilon_m(x, y) + z Q'_k(x, y) \quad (\text{III.110})$$

Les contraintes en cisaillement transverse dans a couche  $k$  s'exprime suivant :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{yz} \\ \sigma_{xz} \end{bmatrix}_k = \begin{bmatrix} R'_{44} & R'_{45} \\ R'_{45} & R'_{55} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.111})$$

#### i. Équation du comportement d'un stratifié, tenant compte du cisaillement transverse

L'équation constitutive d'un stratifié, tenant compte du cisaillement transverse et d'après (III.110) et (III.111), la superposition de la relation(III.91) de la théorie classique des stratifiés, et de l'équation faisant intervenir les résultantes en cisaillement  $Q_x$  et  $Q_y$ . soit : [1]

$$Q(x, y) = \begin{bmatrix} Q_x \\ Q_y \end{bmatrix} = \sum_{k=1}^n \int_{h_{k-1}}^{h_k} \begin{bmatrix} \sigma_{xz} \\ \sigma_{yz} \end{bmatrix} dz \quad (\text{III.112})$$

Donc l'expression des résultantes en membrane s'écrit :

$$\begin{bmatrix} Q_y \\ Q_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} D_{44} & D_{45} \\ D_{45} & D_{55} \end{bmatrix}_k \begin{bmatrix} \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.113})$$

Avec :

$$D_{ij} = \sum_{k=1}^n (h_k - h_{k-1}) (R'_{ij}), \quad i,j=4,5 \quad (\text{III.114})$$

$F$  : est la matrice de rigidité en cisaillement transverse.

L'équation constitutive des stratifiés avec cisaillement transverse s'écrit en rassemblant les résultantes en membrane et les moments sous la forme :

$$\begin{bmatrix} N_x \\ N_y \\ N_{xy} \\ M_x \\ M_y \\ M_{xy} \\ Q_y \\ Q_x \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_{11} & A_{12} & A_{16} & B_{11} & B_{12} & B_{16} & 0 & 0 \\ A_{12} & A_{22} & A_{26} & B_{12} & B_{22} & B_{26} & 0 & 0 \\ A_{16} & A_{26} & A_{66} & B_{16} & B_{26} & B_{66} & 0 & 0 \\ B_{11} & B_{12} & B_{16} & C_{11} & C_{12} & C_{16} & 0 & 0 \\ B_{12} & B_{22} & B_{26} & C_{12} & C_{22} & C_{26} & 0 & 0 \\ B_{16} & B_{26} & B_{66} & C_{16} & C_{26} & C_{66} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{44} & D_{45} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & D_{45} & D_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx}^0 \\ \varepsilon_{yy}^0 \\ \gamma_{xy}^0 \\ k_x \\ k_y \\ k_{xy} \\ \gamma_{yz}^0 \\ \gamma_{xz}^0 \end{bmatrix} \quad (\text{III.115})$$

Avec :

$$\begin{aligned} \varepsilon_{xx}^0 &= \frac{\partial u_0}{\partial x}, \quad \varepsilon_{yy}^0 = \frac{\partial v_0}{\partial y}, \quad \gamma_{xz}^0 = \frac{\partial u_0}{\partial y} + \frac{\partial v_0}{\partial x}, \\ K_x &= \frac{\partial \varphi_x}{\partial x}, \quad K_y = \frac{\partial \varphi_y}{\partial y}, \quad K_{xy} = \frac{\partial \varphi_x}{\partial y} + \frac{\partial \varphi_y}{\partial x}, \\ \gamma_{yz}^0 &= \frac{\partial w_0}{\partial y} + \varphi_y, \quad \gamma_{xz}^0 = \frac{\partial w_0}{\partial x} + \varphi_x, \end{aligned} \quad (\text{III.116})$$

L'équation constitutive peut également être écrite sous forme contractée suivant :

$$\begin{bmatrix} N \\ M_f \\ Q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B & 0 \\ B & C & 0 \\ 0 & 0 & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_m \\ k \\ \gamma_c \end{bmatrix} \quad (\text{III.117})$$

### III.7. cisaillement interlaminaire

#### III.7.1. Essai de flexion avec appuis rapprochés

L'essai de flexion trois points avec appuis rapprochés est un essai mécanique très utilisé en contrôle qualité car il permet de tester des échantillons ayant été directement prélevés sur des pièces industrielles. Un rapport longueur entre appuis  $l$  et épaisseur  $h$  est généralement préconisé et une contrainte apparente de cisaillement interlaminaire  $\tau_{IL}$  peut être déterminée à l'aide de la relation suivante :

$$\tau_{IL} = \frac{3F}{4bh} \quad (\text{III.118})$$

avec,  $F$  l'effort maximal relevé au cours de l'essai, l'épaisseur  $h$  et la largeur  $b$  de l'éprouvette.

### III.7.2. les paramètres influents sur la contrainte de cisaillement interlaminaire

#### a. Influence des défauts

Utilisé lors de contrôles qualité, l'essai de flexion trois points avec appuis rapprochés contribue à identifier la présence de défauts. Si l'on effectue une comparaison par rapport à une référence saine, la présence de défauts se traduit par une baisse de la contrainte apparente de cisaillement interlaminaire. Greszczuck [16] propose une relation (III.119) qui permet d'estimer cette baisse de  $\tau_{IL}$  à partir d'un taux de vide  $T_v$  du composite et de son taux de fibres  $V_f$  en volume.

$$\frac{\tau_{IL}}{\tau_{IL T_v}} = 1 - \frac{\pi}{4} \left( \frac{6T_v}{\pi(1-V_f)} \right)^{2/3} \quad (\text{III.119})$$

#### b. Influence de la compliance de l'éprouvette

D'un point de vue mécanique, la répartition des contraintes de traction, compression et cisaillement au sein de l'éprouvette de flexion trois points est liée à sa souplesse globale qui fait intervenir ses propriétés matérielles et géométriques. Cette souplesse peut être estimée à l'aide de l'expression de la compliance de l'éprouvette (III.120) Les paramètres qui influencent sur cette compliance sont : les modules d'élasticité des plis rentrant dans la composition du composite, la géométrie de l'éprouvette (épaisseur  $h$ , largeur  $b$ ) et la distance entre les appuis  $l$ . [19]

$$C = \frac{L^3}{48\langle EI \rangle} + \frac{kL}{4\langle Gs \rangle} \quad (\text{III.120})$$

Avec :  $L$  : Longueur entre appuis ,

$\langle EI \rangle$  : Rigidité équivalente en flexion ,

$\langle Gs \rangle$  : Rigidité équivalente en cisaillement,

$k$  : Coefficient de section réduite. ( $k=6/5$  pour une poutre réduite).

Et la relation entre la contrainte de cisaillement interlaminaire et la compliance est :

$$\tau_{IL} = 70 - 23C \quad (\text{III.121})$$

**III.8. conclusion**

La caractérisation d'un matériau composite doit tenir compte de toutes les conditions et considérations afin de mieux définir désormais, son rôle et ses performances. On réalisera des essais mécaniques destinés. Pour l'étude du son comportement et pouvoir ainsi établir ces propriétés, d'autres paramètres peuvent intervenir comme l'endommagement de ces constituants de base. Dans cet intérêt une étude statique et physico-chimique (calcination) par le biais des essais de la flexion trois points fera l'objet du quatrième chapitre.

## IV.1. Introduction

L'utilisation des composites stratifiés est liée aujourd'hui à une meilleure connaissance du comportement mécanique de différents constituants. Cependant, cet aspect de leur comportement sous sollicitation diverses est encore mal compris, c'est dans ce contexte que nous tentons d'apporter notre contribution.

Notre étude est basée sur la caractérisation de deux stratifiés en flexion trois points, en tenant compte de l'effet de l'éclatement.

## IV.2. présentation de matériau

Dans cette étude, nous avons utilisé deux composites stratifiés constitués de 04 couches de fibres de verre sous forme de mats et de tissus (450 g/m<sup>2</sup> et 800 g/m<sup>2</sup>), (voir tableau IV.1).


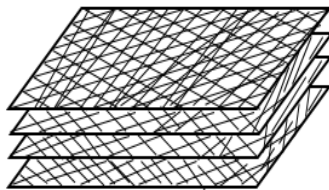

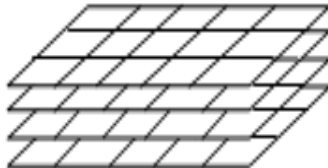
Matériau	Résine	Renfort	Empilement
1	Polyester	Mat de verre (450 g/m <sup>2</sup> ) 	(450+450+450+450) 
2	Polyester	Tissu de verre (800 g/m <sup>2</sup> ) 	(800+800+800+800) 

Tableau IV.1 : présentation des matériaux utilisés.

### IV.2.1. Élaboration de matériau

Les plaques de stratifiés ayant servi au découpage des éprouvettes sont obtenues par le procédé de moulage au contact (figure.IV.1). Le procédé est manuel, il consiste à nettoyer d'abord le moule avec de la cire qui sert d'un agent de démoulage, puis passer une fine couche de résine et nous procédons à la disposition des couches successives de renfort imprégnées de la résine, au moyen d'un pinceau et d'un d'ébulleur qui sert d'un compacteur et chasseur des bulles d'air.

L'ensemble est maintenu dans cet état et à température ambiante pendant la polymérisation et jusqu' à la fin de la gélification qui dure à peu près une demi-journée. À la fin de la polymérisation nous procédons au démoulage.



**Figure IV.1 :** Moulage au contact.

#### **IV.2.2. Découpage et géométrie des éprouvettes**

Les éprouvettes sont découpées à l'aide d'une scie à disque diamanté (figure IV.2) sous un jet d'eau pour éviter l'échauffement des bords.



**Figure IV.2 :** Scie à disque diamanté.

Les dimensions des éprouvettes utilisées (figure IV.3) pour les essais de flexion trois points ont été choisies selon la norme NF EN ISO 178, ASTM D 790 [43] c'est à dire :

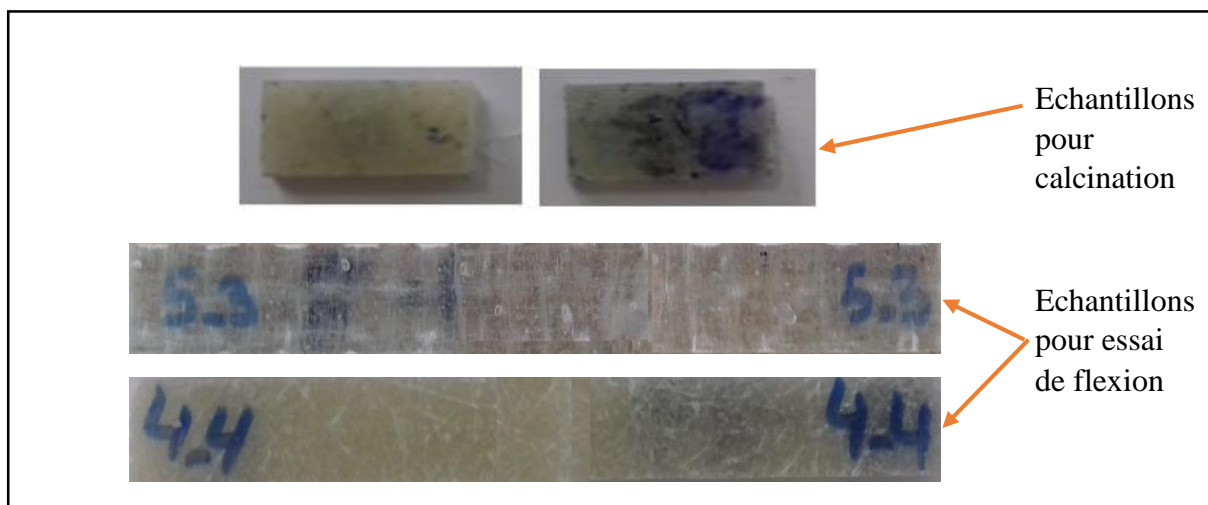
$l = 120 \text{ mm}$

b est fonction de h :  $10 < b \leq 15 \text{ mm}$  si  $h \leq 5 \text{ mm}$

$$\left\{ \begin{array}{l} l : \text{longueur de l'éprouvette.} \\ b : \text{largeur de l'éprouve} \\ h : \text{épaisseur de l'éprouvette.} \end{array} \right.$$

Les dimensions utilisées dans les calculs, sont les valeurs moyennes :

$$\left\{ \begin{array}{l} h_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N h_i \\ b_m = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N b_i \end{array} \right. \quad \text{Avec : } N=4$$



**Figure IV. 3:** Géométrie des éprouvettes de flexion et calcination.

### IV.3. Déroulement des essais

Afin de déterminer les caractéristiques de nos matériaux, plusieurs essais ont été effectués :

- **Essai physico-chimique** : calcination.
- **Essai statique** : flexion trois points à différents élancements.

#### IV.3.1. Essai physico-chimique (calcination)

Cet essai permet de déterminer, pour un matériau composite le taux massique de fibres et celui de la résine et permet aussi de voir l'architecture des fibres dans le matériau utilisé.

##### IV.3.1.1. Le matériels utilisés

- Un four dont la température est réglé à  $660^{\circ}\text{C}$  (figure IV.4.a)
- Creuset pour mettre les enchantions dedans (figure IV.4.b)
- Une balance électronique de précision  $10^{-5}$  (figure IV.4.c)

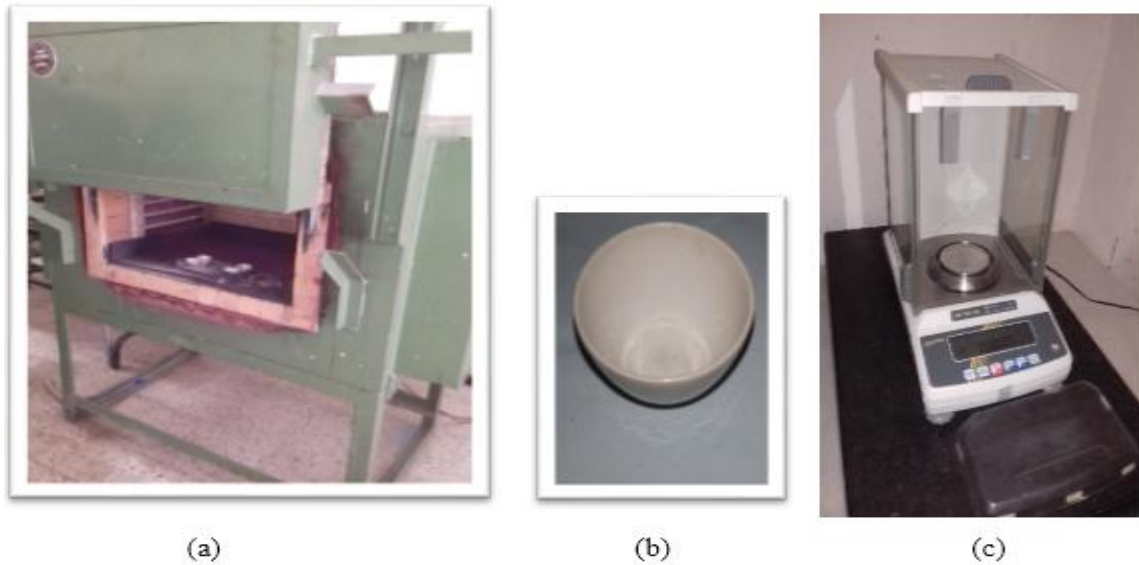


Figure IV.4 : Matériel utilisé.

#### IV.3.1.2. Déroulement de l'essai de calcination

Nous avons effectué un essai de perte au feu pour notre matériau (fibres de verre et matrice polyester). Les échantillons sont pesés à sec et placés dans des creusets préalablement pesés, le tout est placé dans un four dans lequel la température évolue de 25°C à 1100°C. L'essai est réalisé à 660°C, température pour laquelle la résine est entièrement calcinée (environ 25 mn). Après sortie du four, nous laissons l'ensemble refroidir pendant 10 min. Les creusets et les fibres de verre sont pesés. Le taux massique des fibres et de la matrice est calculé par la formule (IV.1).

$$M_f(\%) = \left( \frac{M_{cc} - M_c}{M_e} \right) \cdot 100 \quad (IV.1)$$

$$M_m(\%) = 1 - M_f(\%)$$

Avec :

$M_e$ : Masse de l'échantillon avant calcination.

$M_{cc}$ : Masse du creuset et des cendres.

$M_c$ : Masse du creuset.

$M_f$  le taux massique des fibres et  $M_m$  le taux massique de la matrice.

La figure IV.5 nous montre l'état de l'échantillon avant calcination.



**Figure IV.5 :** Échantillons avant calcination.

Après calcination, il restera juste les fibres et cendre du gel-coat comme le montre la figure IV.6



Tissus 800 g/m<sup>2</sup>

Mats 450 g/m<sup>2</sup>

**Figure IV.6 :** Échantillon après calcination.

Les résultats de cet essai sont donnés par le tableau suivant :

	Pesée à vide (g) A	Pesée avec échantillon (g) B	Poids de l'échantillon (g) B-A	Pesée après Calcination (g) C	Poids des fibres (g) C-A	Fraction massique des fibres(%)	Moyenne (Mf %)
<b>Creuset 1</b>	14.75224	16.28512	1.53288	15.25027	0,49803	32.49	31,15
<b>Creuset 2</b>	17.42754	19.11189	1.68435	17.92955	0,50201	29.81	
<b>Creuset 3</b>	17.47224	19.03495	1.56271	18.46162	0,98938	63.31	63,16
<b>Creuset 4</b>	18.87576	20.36820	1.49244	19.81625	0.94049	63.01	

**Tableau IV.2:** Résultats de l'essai de perte au feu.

## IV.4. Essai de flexion trois points

### IV.4.1. Machine de flexion utilisée

Les essais de flexion sont réalisés sur une machine universelle de type IBERTEST (figure V.7) qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion, avec bien sûr changement de mors qui se montent et démontent facilement, elle est dotée d'une cellule de charge d'une capacité de 200 MPa, accompagnée par des vitesses de chargement qui varient de 10 à 500 mm/min contrôlées automatiquement. Elle est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fin, misent en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment supérieur sur laquelle se trouvent les capteurs servant à mesurer la force appliquée sur l'éprouvette ainsi que le déplacement au cours de l'essai qui seront projetées directement sur l'écran d'un ordinateur lié à la machine. Sur chacune des traverses se trouve des mors permettant de fixer l'éprouvette.

Nous avons effectués des essais de flexion à une vitesse de : 10 mm/mn en fonction de l'épaisseur de l'éprouvette  $h$ , et à une température ambiante.



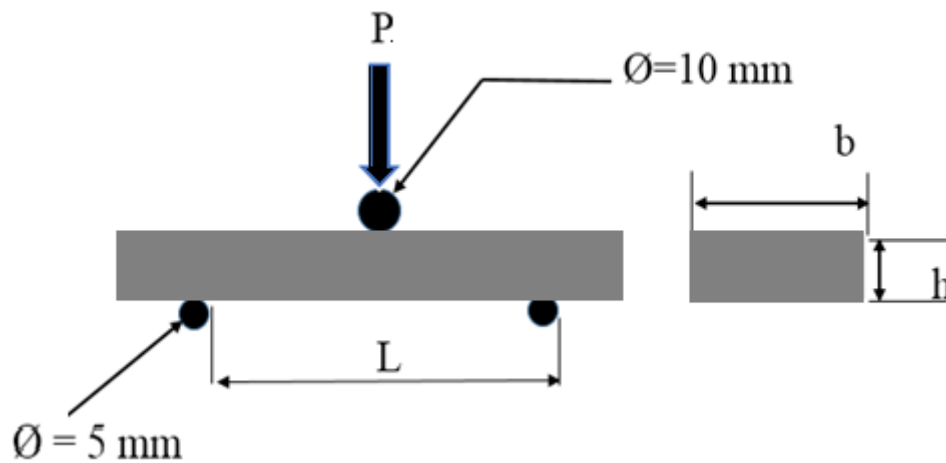
Figure IV.7 : Machine de flexion et de traction IBERTEST.

### IV.4.2. Géométrie de l'essai

Les essais de flexion trois points (figure IV.8) sont réalisés suivant les recommandations de la norme française **NFT57-104** et **105**.

Le principe de cet essai consiste à déformer une éprouvette parallélépipédique reposant sur deux appuis de rayon 2,5 mm, par l'intermédiaire d'une panne de rayon 5 mm située à une distance égale  $L/2$  et se déplaçant à vitesse constante, dans le but de caractériser les propriétés

mécaniques des matériaux telles que le module de Young et la résistance en flexion, la flèche maximale... On enregistre la courbe force-flèche.



**Figure IV.8 :** Géométrie de l'essai statique de flexion trois points

L'essai de flexion trois points sollicite de façon symétrique, une face de l'éprouvette soumise à une contrainte de traction et l'autre face à une contrainte de compression. Il existe aussi une troisième contrainte de cisaillement, sa valeur maximale est située au niveau de la ligne neutre, et qu'en fonction de la géométrie de l'éprouvette d'essai, il y a compétition entre une rupture en flexion et une rupture en cisaillement.

Le rapport  $L/h$  contrôlant la contribution respective de la flexion et du cisaillement, la rupture se produira soit par flexion soit par cisaillement selon ce rapport. Pour un rapport  $L/h \geq 16$  donne flexion pure (**Norme NFT 57-105**) et pour un rapport  $L/h \leq 5$  cisaillement pure (**Norme NFT 57-104**). En pratique, pour des valeurs suffisamment grandes ( $L/h$ ) l'effet du cisaillement peut être négligé.

Afin de déterminer les caractéristiques mécaniques de matériau de référence lot 1 et lot 2, nous avons recours à l'essai de flexion trois points. Trente éprouvettes ont été testées.

Nous nous intéressons à la détermination des propriétés mécaniques usuelles telles que la contrainte normale de flexion  $\sigma$ , La déformation  $\epsilon$ , le module de flexion  $E$  et la contrainte de cisaillement  $\tau$ .

Pour déterminer les contraintes et les déformations, nous avons utilisé les formules suivantes données par la théorie des poutres :

- La contrainte normale de flexion : 
$$\sigma = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (\text{IV.2})$$

- La déformation en surface : 
$$\epsilon = \frac{6hY}{L^2} \quad (\text{IV.3})$$

- Le module de flexion : 
$$E_{APP} = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{dP}{dY} \quad (IV.4)$$

- La contrainte de cisaillement : 
$$\tau = \frac{3P}{4bh} \quad (IV.5)$$

Avec : h : Épaisseur de l'éprouvette (mm).

b : Largeur de l'éprouvette (mm).

$\sigma$  : Contrainte normale (MPa).

$\varepsilon$  : Déformation relative.

Y : flèche (mm) mesurée au cours de l'essai pour chaque charge F(N).

L : longueur entre appuis (mm).

#### IV.5. Les résultats de l'essai de flexion trois points

Afin d'obtenir les caractéristiques mécaniques des éprouvettes de lot 1 et lot 2. Nous avons effectué des essais de flexion trois points avec des élancements différents (40, 50, 64, 80, 100).

Nous allons présenter les différents résultats expérimentaux. Les valeurs de propriétés mécaniques obtenues en fonction de la variation de l'élancement sont résumées dans les tableaux IV.3, IV.4, IV.5, IV.6 et IV.7 et représentés par les courbes force/déplacement dans les courbes IV.9 jusque a IV.26.

##### a) Pour L=40 mm

	éprouvette	h (mm)	b (mm)	$\sigma_r$ (MPa)	$\varepsilon_r$ (%)	$\sigma_e$ (MPa)	$\varepsilon_e$ (%)	$\tau$ (Mpa)	$E_{app}$ (GPa)
<b>Lot 1</b>	1	4,51	14,74	157,465	0,044	156,248	0,043	8,877	3,614
	2	4,24	14,72	152,122	0,038	137,885	0,032	8,062	4,009
	3	4,51	14,53	143,627	0,039	115,816	0,028	8,097	3,711
<b>Lot 2</b>	1	3,41	14,66	295,797	0,031	272,315	0,032	12,649	9,633
	2	3,36	14,81	165,47	0,034	157,764	0,021	6,96	8,717
	3	3,39	14,9	349,194	0,037	239,12	0,021	10,218	10,198

**Tableau IV.3** : les caractéristiques mécaniques du « lot 1 » et « lot 2 » pour L=40 mm

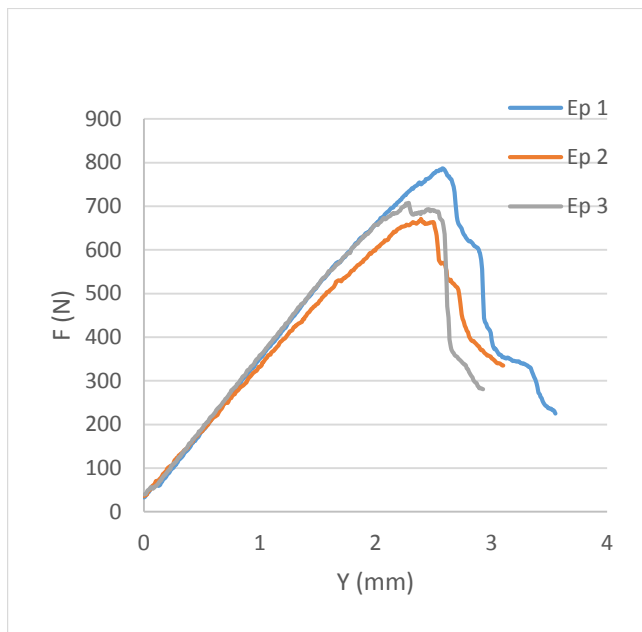


Figure IV.9 : Évolution de force/flèche de Lot 1 pour L=40mm.

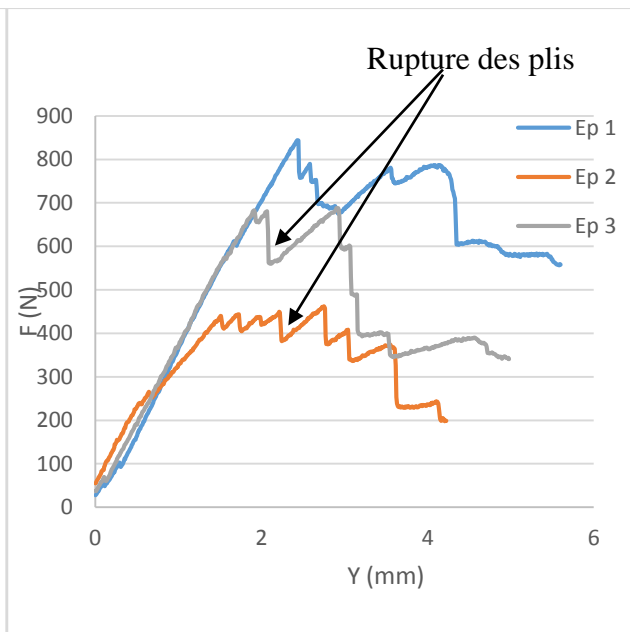


Figure IV.10 : Évolution de force/flèche de Lot 2 pour L=40mm.

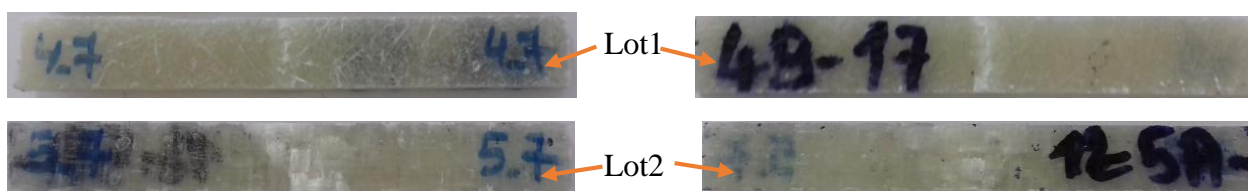


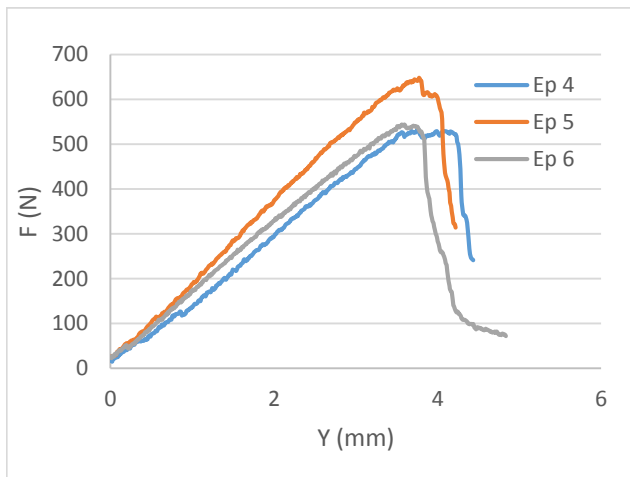
Figure IV.11: Faces en compression de lot 1 et lot 2 avec L=40mm

Figure IV.12 : Faces en traction de lot 1 et lot 2 avec L=40mm

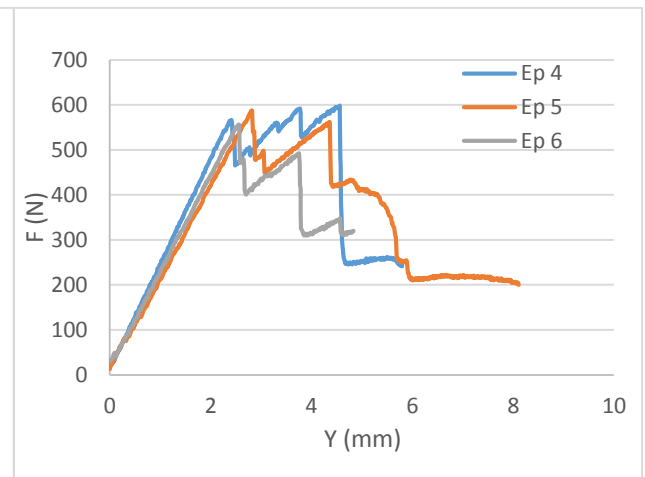
b) Pour L=50mm

	éprouvette	h (mm)	b (mm)	$\sigma_r$ (MPa)	$\epsilon_r$ (%)	$\sigma_e$ (MPa)	$\epsilon_e$ (%)	$\tau$ (Mpa)	$E_{app}$ (GPa)
<b>Lot 1</b>	4	4,24	14,73	151,579	0,038	149,136	0,036	6,427	4,119
	5	4,55	14,9	157,546	0,041	148,044	0,037	7,168	4,116
	6	4,3	14,6	151,684	0,037	145,406	0,035	6,5	4,333
<b>Lot2</b>	4	3,45	14,72	239,561	0,029	172,916	0,014	8,269	12,666
	5	3,39	14,69	260,308	0,022	160,55	0,0138	8,855	11,576
	6	3,37	15,03	244,47	0,02	243,146	0,02	8,241	12,114

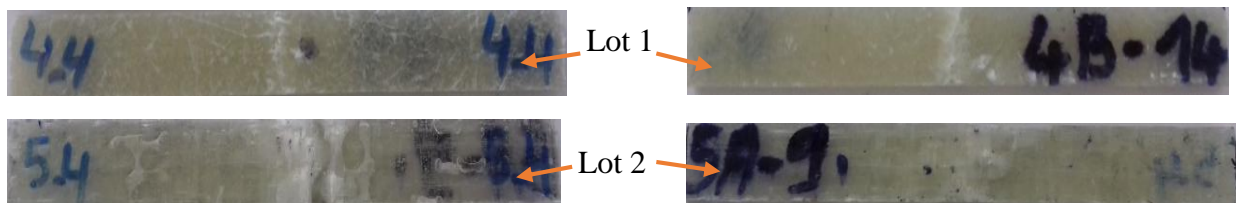
Tableau IV.4 : les caractéristiques mécaniques du « lot1 » et « lot 2 » pour L= 50mm.



**Figure IV.13 :** Évolution de force/flèche de Lot 1 pour L=50mm



**Figure IV.14 :** Évolution de force/flèche de lot 2 pour L=50mm



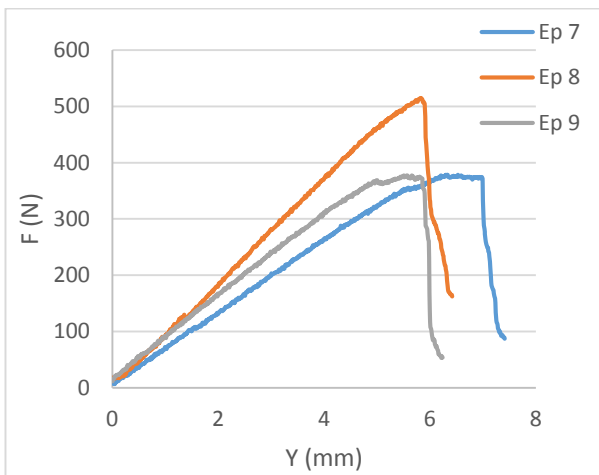
**Figure IV.15 :** Faces de compression de lot 1 et Lot 2 avec L=50 mm

**Figure IV.16 :** Faces traction de lot 1 et lot 2 avec L=50mm

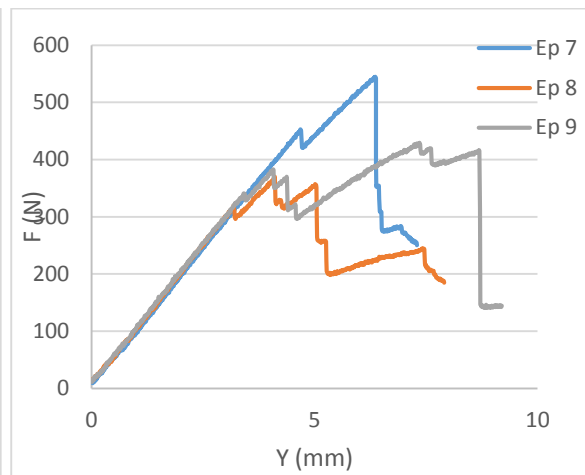
**c) Pour L=64 mm**

	éprouvette	h (mm)	b (mm)	$\sigma_r$ (MPa)	$\xi_r$ (%)	$\sigma_e$ (MPa)	$\xi_e$ (%)	$\tau$ (Mpa)	$E_{app}$ (GPa)
<b>Lot 1</b>	7	4,212	14,667	139,609	0,039	121,785	0,031	4,594	3,933
	8	4,51	14,57	166,87	0,038	155,401	0,035	5,879	4,540
	9	4,232	14,727	137,441	0,034	133,485	0,031	4,544	4,585
<b>Lot2</b>	7	3,4	14,77	305,348	0,031	229,167	0,021	8,135	10,950
	8	3,342	14,92	212,253	0,02	146,177	0,012	5,542	11,885
	9	3,31	15,058	248,517	0,035	194,2	0,016	6,445	12,121

**Tableau IV.5 :** les caractéristiques mécaniques du « lot 1 » et « lot 2 » pour L=64mm.



**Figure IV.17 :** Évolution de force/flèche de Lot 1 pour L=64mm.



**Figure IV.18 :** Évolution de force/flèche de lot 2 pour L=64mm.



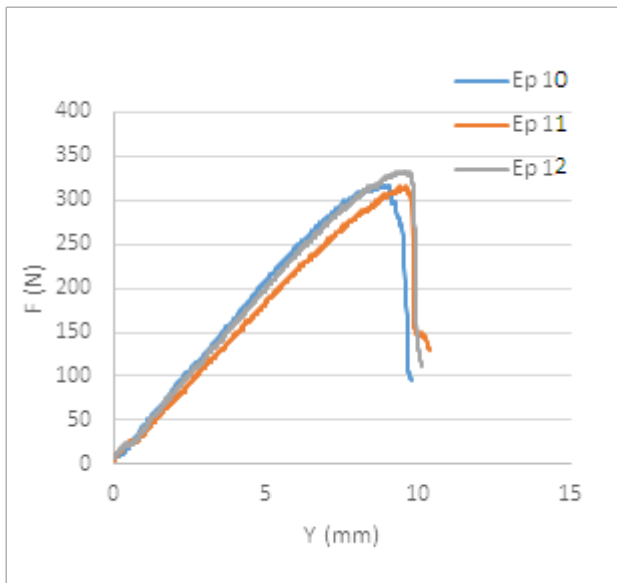
**Figure IV.19 :** Faces de compression de Lot 1 et lot 2 avec L=64 mm.

**Figure IV.20 :** Faces de traction de lot 1 et lot 2 avec L=64 mm.

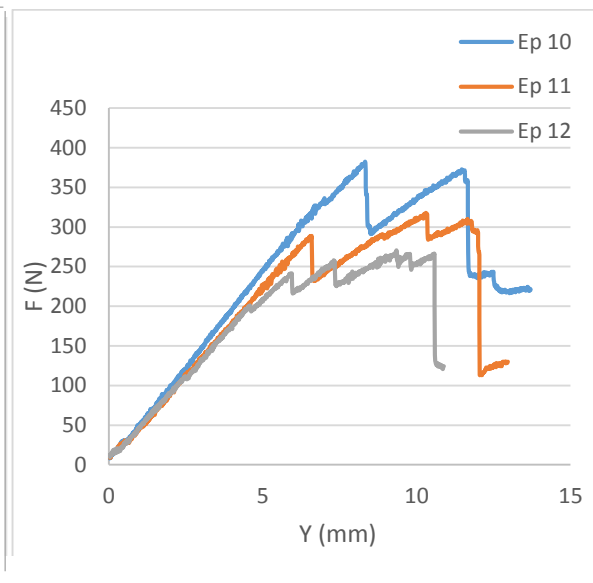
**d) Pour L=80 mm**

	éprouvette	h (mm)	b (mm)	$\sigma_r$ (MPa)	$\epsilon_r$ (%)	$\sigma_e$ (MPa)	$\epsilon_e$ (%)	$\tau$ (Mpa)	$E_{app}$ (GPa)
<b>Lot 1</b>	10	4,582	14,945	121,833	0,038	104,814	0,029	3,489	3,685
	11	4,205	14,702	145,834	0,037	125,316	0,03	3,833	4,285
	12	4,45	14,907	135,588	0,04	114,152	0,031	3,771	3,887
<b>Lot2</b>	10	3,31	14,86	281,378	0,025	239,972	0,021	5,83	11,401
	11	3,32	14,79	232,025	0,031	165,407	0,015	4,837	10,405
	12	3,23	14,71	210,56	0,028	175,787	0,018	4,272	10,845

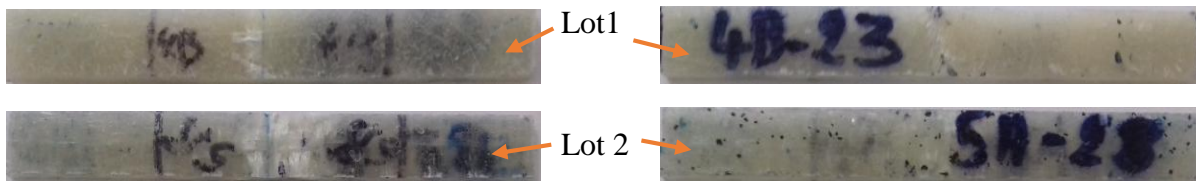
**Tableau IV.6 :** les caractéristiques mécaniques du «lot 1» et « lot 2» pour L=80m



**Figure IV.21:** Évolution de force/flèche de Lot 1 pour L =80mm.



**Figure IV.22 :** Évolution de force/flèche de Lot 2 pour L=80mm.



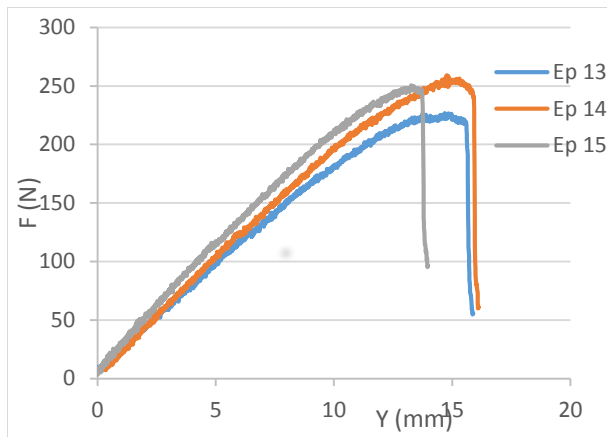
**Figure IV.23 :** Faces en compression de lot 1 et lot 2 avec L=80mm.

**Figure IV.24 :** Faces en traction de lot 1 et lot 2 avec L=80mm.

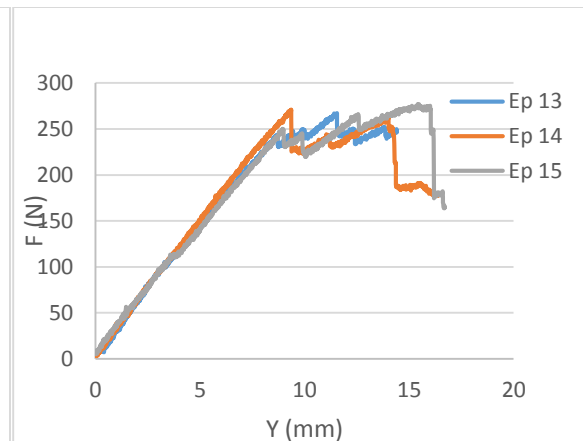
**e) pour L=100mm**

	éprouvette	h (mm)	b (mm)	$\sigma_r$ (MPa)	$\epsilon_r$ (%)	$\sigma_e$ (MPa)	$\epsilon_e$ (%)	$\tau$ (Mpa)	$E_{app}$ (GPa)
<b>Lot 1</b>	13	4,22	14,85	128,681	0,039	89,542	0,0216	2,715	4,324
	14	4,3	14,68	127,116	0,032	92,409	0,022	2,733	4,359
	15	4,45	14,97	126,459	0,036	105,766	0,0262	2,814	4,196
<b>Lot2</b>	13	3,30	14,79	247,258	0,022	198,519	0,015	4,105	13,640
	14	3,39	14,84	235,44	0,015	200,147	0,015	4,01	12,972
	15	3,84	14,68	180,581	0,018	166,953	0,018	3,474	9,022

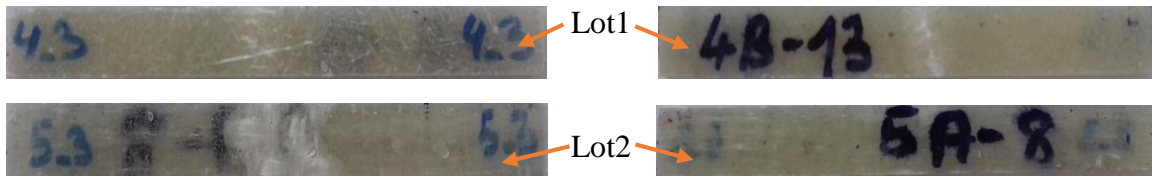
**Tableau IV.7 :** les caractéristiques mécaniques du «lot 1» et « lot 2» pour L=100mm.



**Figure IV.25 :** Évolution de force/flèche de Lot 1 pour  $L=100\text{mm}$ .



**Figure IV.26 :** Évolution de force/flèche de Lot 2 pour  $L=100\text{mm}$ .



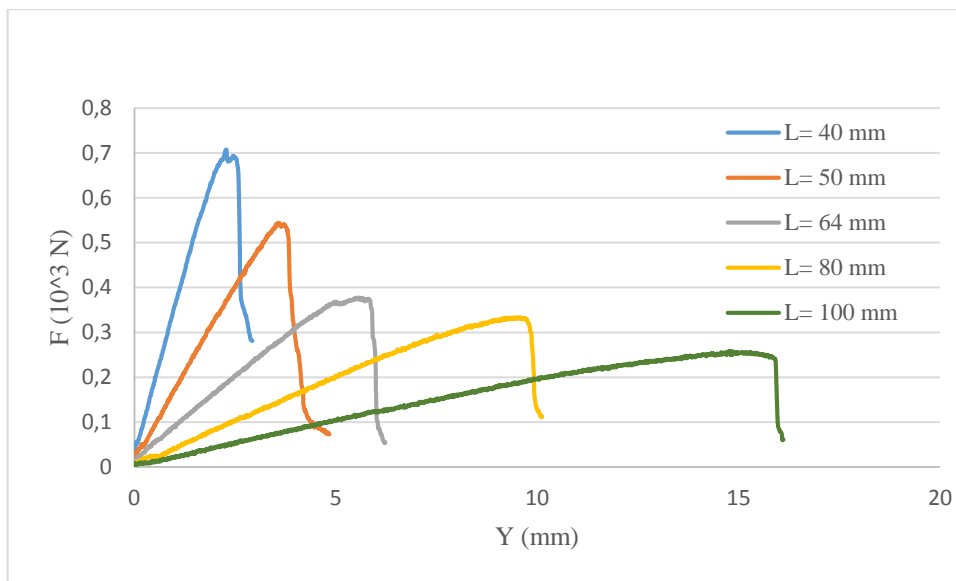
**Figure IV.27 :** Faces en compression de lot 1 et lot 2 avec  $L=100\text{mm}$ .

**Figure IV.28 :** Faces en traction de lot 1 et lot 2 avec  $L=100\text{mm}$ .

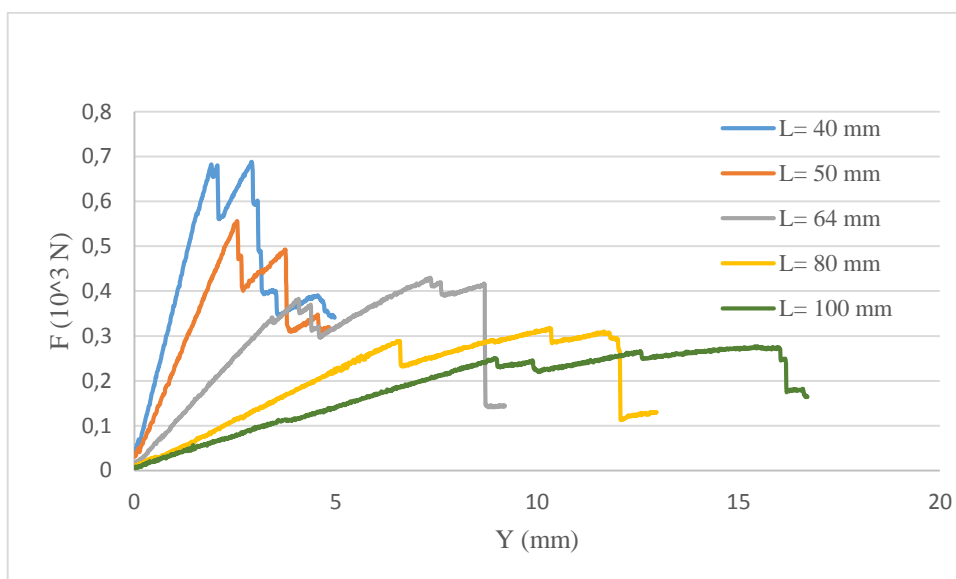
Selon les résultats obtenus, nous avons remarqué que toutes les éprouvettes présentent un comportement similaire pour le même lot, avec une dispersion des caractéristiques mécaniques, ceci est dû principalement à la présence de défauts (bulles d'air) et au procédé d'obtention des matériaux (moulage au contact).

Nous relevons selon les courbes contrainte /déformation que la majorité des lots présentent un comportement semi-fragile.

- Le mécanisme de rupture de nos éprouvettes diffère selon le type du pli. Le mode de rupture s'effectue toujours sur la face en traction pour le lot 1, et en compression pour lot 2.



**Figure IV.29** : Courbe force/flèche pour le lot 1 avec différents élancements.



**Figure IV.30** : Courbe force/flèche pour le lot 2 avec différents élancements.

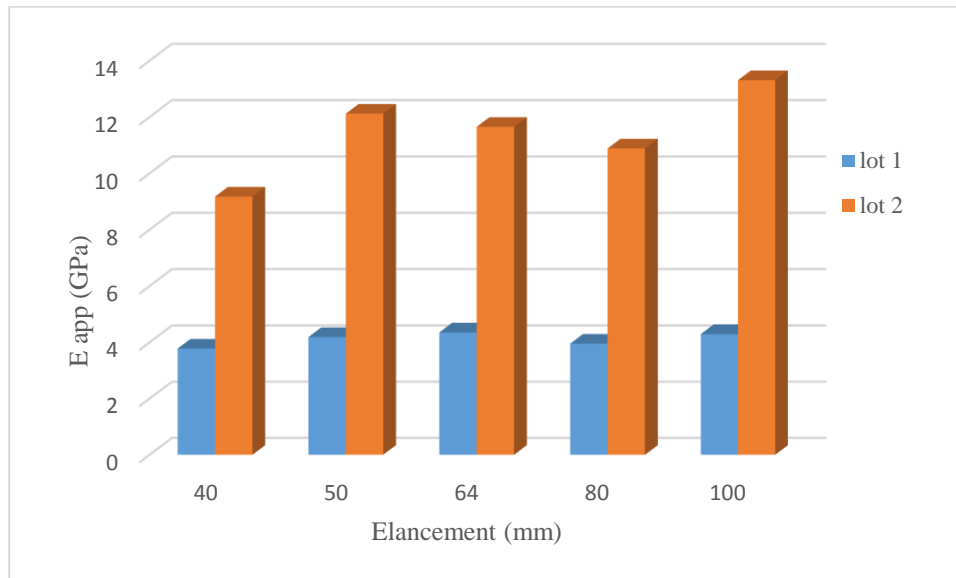
- Pour le lot 2 nous avons entendu des craques, qui correspondent en premier au délaminage entre plis.

#### IV.5.1 Analyse et interprétation des résultats

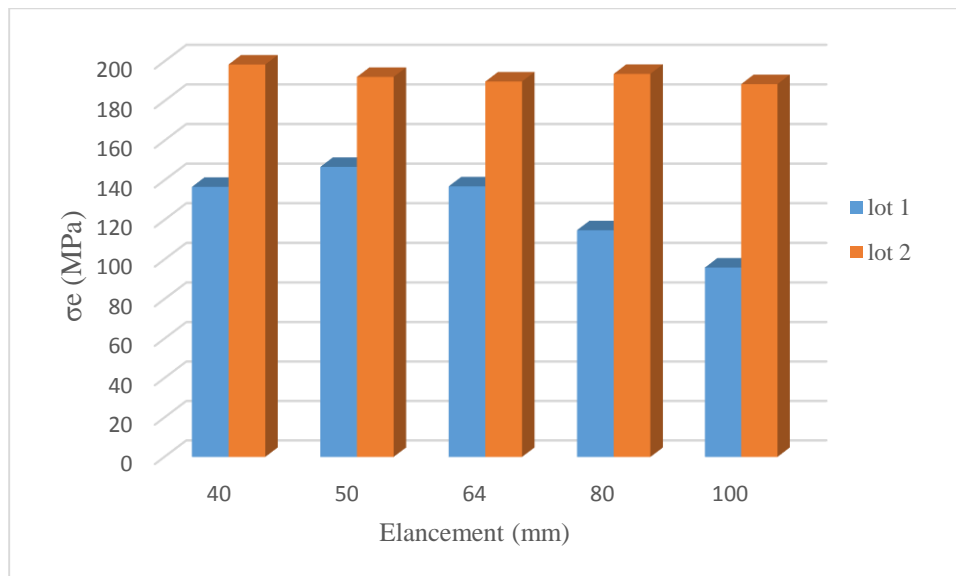
Afin de caractériser l'effet de la distance entre les appuis et l'effet de type de plis, une étude comparative des propriétés d'usage est menée.

**a. Influence de la distance entre les appuis et le type de plis:**

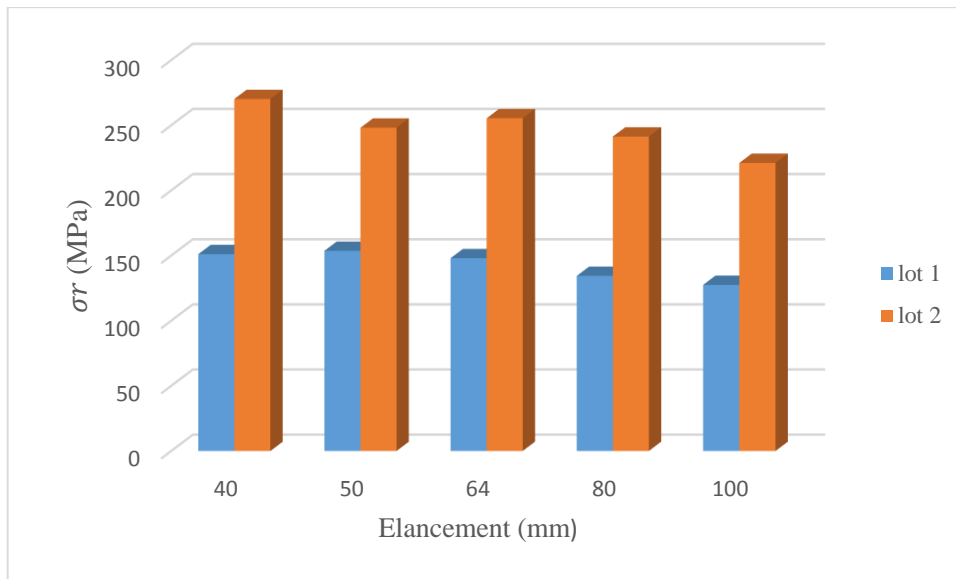
Les figures suivantes représentent des comparaisons des propriétés mécaniques en fonction de l'élanement.



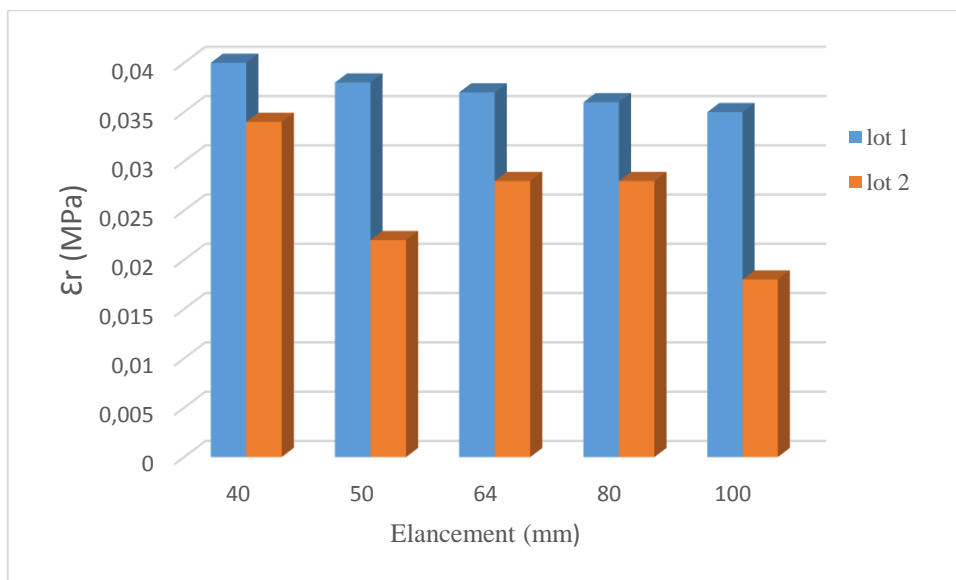
**Figure IV.31 :** Résultats de  $E$  apparent obtenus pour lot 1 et lot 2.



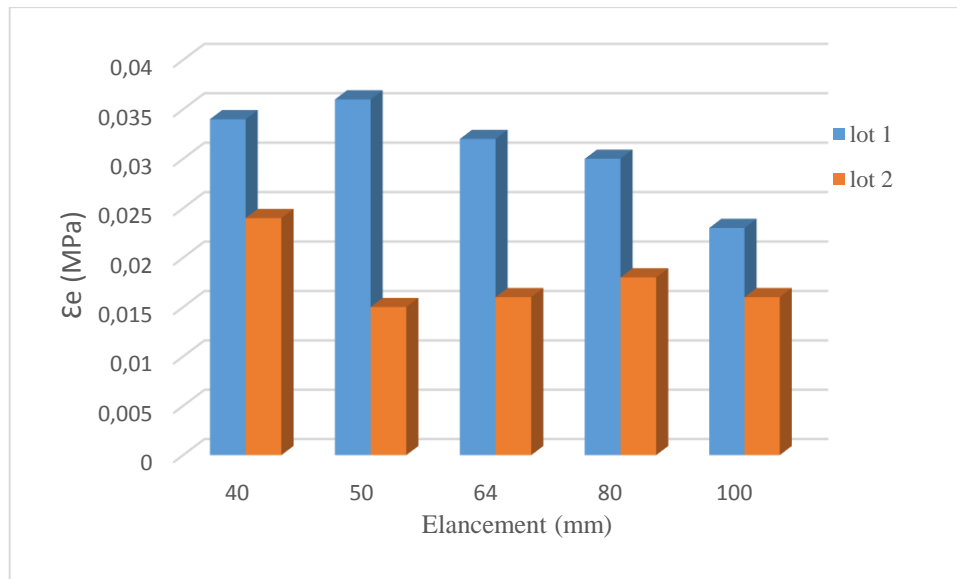
**Figure IV.32 :** Résultats de  $\sigma_e$  pour le lot 1 et lot 2 avec différents élanements.



**Figure IV.33 :** Résultats de  $\sigma_r$  pour le lot 1 et lot 2 avec différents élancements.



**Figure IV.34 :** Résultats de  $\epsilon_r$  pour le lot 1 et lot 2 avec différents élancements.



**Figure IV.35 :** Résultats de  $\epsilon_e$  pour le lot 1 et lot 2 avec différents élancements.

La première constatation, le comportement de nos deux matériaux n'est pas le même et les contraintes du lot 2 sont nettement supérieures à ceux de lot 1. Cette différence peut être expliquée par le taux de fibre ; le lot 1 contient 31,15 % en fibres et lot 2 est de 63,16 %.

On sait que l'introduction des charges dans une matrice augmente la résistance mécanique du matériau, une augmentation de la fraction volumique des fibres augmente le module d'élasticité selon la loi de mélange et le module. Néanmoins l'inverse est à signaler concernant la déformation à rupture.

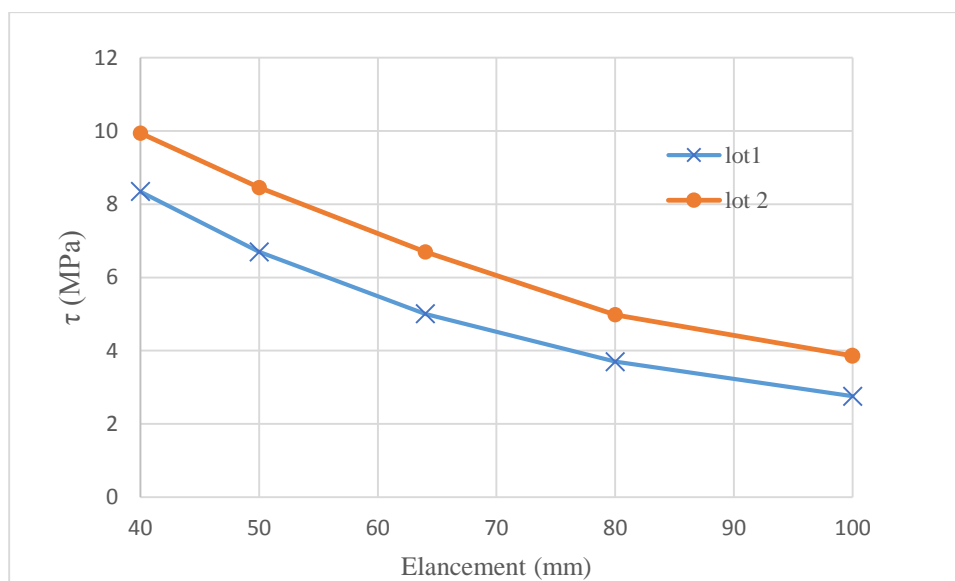
En particulier, les propriétés mécaniques sont influencées par la variation de l'élancement.

#### **b. Influence de l'élancement sur la contrainte de cisaillement**

Afin de savoir l'influence de l'élancement sur la contrainte de cisaillement, on a pris en considération la moyenne des contraintes pour chaque élancement dans chaque lot et les représentées dans le tableau IV.8 :

	L (mm)	40	50	64	80	100
$\tau$ (Mpa)	<b>Lot 1</b>	8,345	6,698	5,005	3,698	2,754
	<b>Lot 2</b>	9,94	8,455	6,70	4,98	3,86

**Tableau IV.8 :** Les résultats de  $\tau$  pour différents élancements.

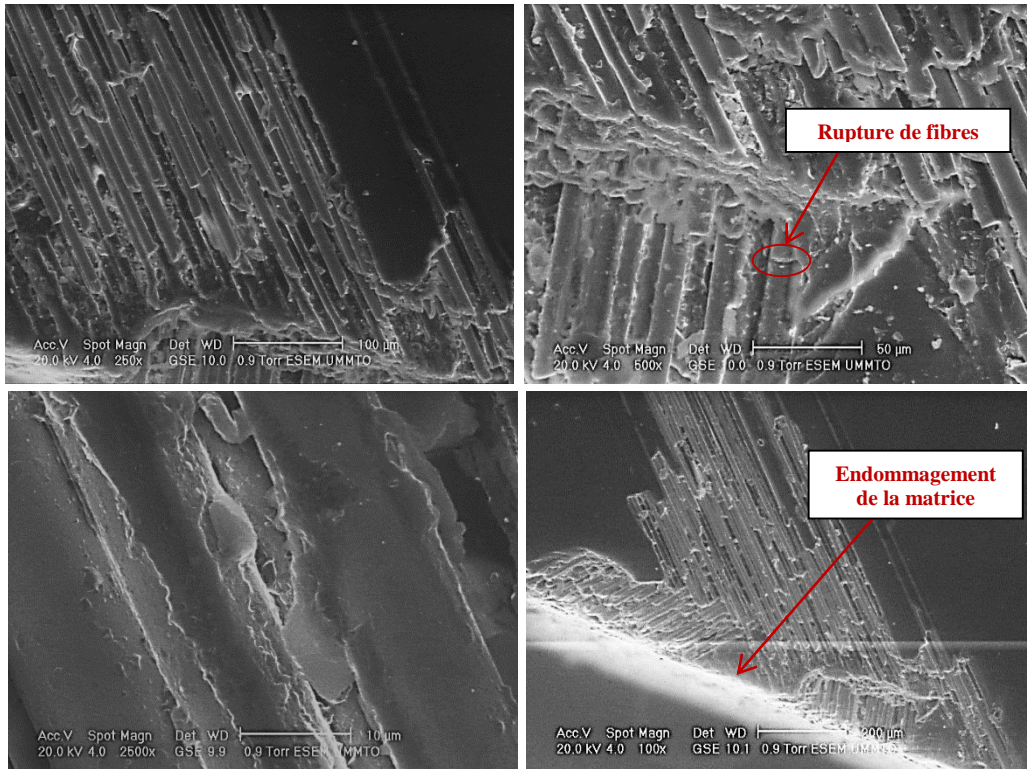


**Figure IV.36 :** Évolution de la contrainte du cisaillement en fonction de l'écartement pour les deux lots.

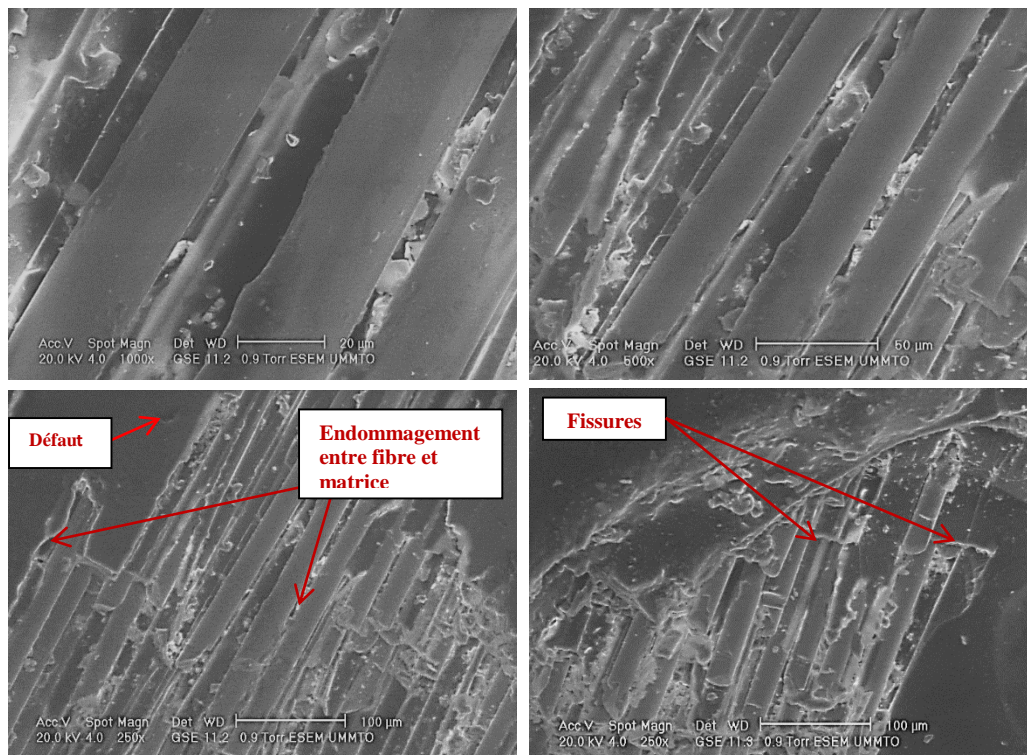
Nous constatons selon la figure (IV.36) une diminution de la contrainte de cisaillement avec la variation de l'écartement ce qui montre que le cisaillement est inversement proportionnel à la distance entre appuis, plus que la valeur de  $L/h$  grande le cisaillement peut être négligé.

#### **IV.6. Observation de facies de rupture au microscope électronique à balayage MEB**

Afin de bien comprendre les mécanismes d'endommagement et les différenciés, les facies de rupture d'éprouvettes sollicitées en flexion pour les deux composites ont été analysés au microscope électronique à balayage. Deux lots d'éprouvettes de composite sollicitées en flexion ont été observés. Les images des figures (IV.37) et (IV.38) sont prises avec différent agrandissement pour les éprouvettes qui n'ont pas cassé au cours des essais de flexion sur la zone la plus endommagée. Nous observons plusieurs types d'endommagement pour les deux types. Il s'agit principalement de mécanismes de microfissuration de la matrice, de décohésion de l'interface et de rupture de fibres.



**Figure IV.37 :** Observation du faciès de rupture d'un composite renforcé par fibres de verre en mats.



**Figure IV.38 :** Observation du faciès de rupture d'un composite renforcé par fibres de verre en tissu.

D'après les micrographies obtenues on constate pour les deux matériaux la rupture de la matrice par fissuration. À l'interface entre les fibres et la matrice, il y a formation de microvides et déchaussement de fibres.

#### **IV.7. Conclusion**

- L'essai physico-chimique permet de savoir le taux de renfort.
- L'essai de flexion nous a permis de déterminer les caractéristiques mécaniques intrinsèques de nos matériaux et de mettre en évidence l'effet de type des renforts (mats et tissus).
- L'essai de flexion permet de savoir le comportement pour différents élancements.
- Les essais effectués présentent parfois des dispersions des caractéristiques intrinsèques des matériaux. Elles sont dues au mode d'élaboration des éprouvettes et à l'architecture des types de renfort utilisés pour les différentes stratifications.

## Conclusion générale

Cette étude nous a permis à mieux connaître les propriétés des composites verre/polyester instauré par des analyses physico chimiques (calcination) et l'essai de flexion trois points.

Le dépouillement des résultats des essais nous a permis d'accéder aux caractéristiques intrinsèques des matériaux tels que le module de Young E, la contrainte à la rupture, la contrainte élastique ainsi que la flèche correspondante respectivement.

L'analyse de l'ensemble des résultats obtenus montre que le composite en service dépend de plusieurs paramètres tels que la géométrie des fibres (mats, tissus) et le taux.

Dans cette étude un intérêt a été porté sur l'effet de l'empilement et la distance entre appuis sur les propriétés mécaniques du stratifié et leurs évolutions.

Il est indispensable de prévoir les valeurs des caractéristiques mécanique pour l'architecture de renfort utilisé afin d'éviter l'endommagement de la structure en service avant toute utilisation.

Notre étude expérimentale n'est qu'une première approche et il conviendrait de développer un programme plus complet. Néanmoins elle montre que l'essai de flexion trois points et les essais permettent bien d'identifier les mécanismes de rupture pouvant se produire dans des structures en service.

Pour poursuivre cette étude, il sera intéressant de déterminer les lois de comportement de stratifié étudié, afin de valider les résultats expérimentaux et théoriques.

## Références bibliographiques

**[1] HAMMAL.L et BOURBIA.N ; thèse ingénieur**

Étude du comportement mécanique d'un stratifié, université de mouloud Mammeri deTizi-Ouzou. Promotion 2009.

**[2] Mr BAYARASSOU Mokhtar ; Magister en génie mécanique**

Développement d'un logiciel de calcul d'homogénéisation des plaques stratifiés composites, université de Batna. 2008.

**[3] Miren Egaña**

Introduction aux matériaux composites sur Abaqus analyse d'une planche de kitesurf. Ingénieur en Conception Mécanique et Énergétique, Mécanique. Thèse, INSA Toulouse 2006-2011.

**[4] Jean-Marie Berthelot**

Mécanique des Matériaux et Structures Composites. Les Clousures, Chemin des Horts 05290 Vallouise Septembre 2013

**[5] F. DAL MASO et J. MÉZIÈRE**

Calcul des propriétés élastiques des tissus utilisés dans les matériaux composites, Copyright C 1998, Institut français du pétrole.

**[6] ROKBI MANSOUR**

Étude de comportement mécanique du stratifié Polyester-fibre de verre. Thèse doctorat et science, université Ferhat Abbas – Sétif (2012).

**[7] Glossaire des matériaux composites**

C.A.R.M.A. centre d'animation régional en matériaux avancés 2006

**[8] matériaux composites.** Claude Bathias et coll. L'Usine nouvelle. Série : mécanique et matériaux. DUNOD

**[9] technique de l'ingénieur**

**[10] Bénédicte BONNET**

Comportement au choc des matériaux composites pour applications automobiles. Thèse Doctorat, École Nationale Supérieure des Mines de Paris (2005).

**[11] A.ZAIDI**

Mémoire de magister « Étude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement) », 2014.

**[12] Hamadache Hassiba**

Mémoire Magister ; <<Étude du comportement d'un composite verre/polyester en milieu acide et base>>;2012.

**[13] Marie-Barbara Heman**

Contribution à l'étude des interphases et de leur comportement au vieillissement hygrothermique dans les systèmes à matrice thermodurcissable renforcés de fibres de verre. Physique [physics]. Université du Sud Toulon Var, 2008. Français.

**[14] Thanh Nguyen.Hoi**

Vieillessement artificiel et vieillissement naturel en ambiance tropicale de composites modèles époxy/verre : approche nanoscopique de l'étude des interphases. Autre. Université de Toulon, 2013. Français.

**[15] Laurent Gornet.** Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. 2008.

<cel- 00470296v1>

**[16] L.B. Greszczuck,** « Effects of voids on strength properties of filamentary composites ». *22nd Annual Meeting of the Reinforced Plastics Division, Society of The Plastics Industry,* Washington DC, 1967.

**[17] E.Reissner.** «the effect of transverse shear deformation on the bending of elastic plates». *Journal of applied Mechanics,* 12,pp.69-77(1945).

**[18] R.D.Mandlin.** «influence of rotatory inertia and shear on flexural motions of isotropics, elastic plates». *Journal of applied mechanics,* 18,app.336-343.

**[19] HAL Id: hal-00390482**

<https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00390482>. Submitted on 11 Jun 2009.