

**République Algérienne Démocratique et Populaire Ministère de
l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique Université
Mouloud Mammeri - Tizi-Ouzou Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique**



Mémoire de fin d'Etudes

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

Thème

**Caractérisation mécanique d'un Composite
Unidirectionnel à matrice organique**

Mme. KACIMI.F

Mr. KACIMI.B

Mr.YAHIA.Mohamed

Mr.SI MOUSSI.Aghiles

Promotion 2018/2019

REMERCIEMENTS

On tien à remercié avant tout le bon dieu qui nous a donné le courage et la bonne volonté pendant tous nos curseur universitaire.

On tient à exprimer nos vifs remerciements et notre gratitude à notre promotrice « Mme ZAFODJOF » ainsi que « Mr ZAFODJOF » pour leurs précieuses conseils, leur encouragement et leur disponibilité.

Notre plus grand respect pour les membres de jury qui nous feront l'honneur de lire et de jugé ce mémoire.

Ainsi tous ce qui nous ont aidé de prêt ou de loin ainsi que nos familles et nos enseignants de Génie mécanique option construction mécanique. Sans oublier les ingénieurs de laboratoire de génie mécanique et de Hall technologie de Oued Aissi, on remercie aussi el bahja marines Ainsi que l'unité de recherche de boumerdes.

Mes reconnaissances à toutes personnes qui ont contribué, de près ou de loin à la réalisation de ce travail dans de bonnes conditions.

DÉDICACES

Du profond de mon cœur je dédie ce travail à tout ce qui me sont chers,

A mes chers parents, Aucun dédicace ne serait exprimer mon respect et l'amour éternelle et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être. je vous remercie pour tout le soutien et l'amour que vous me portez depuis mon enfance et je souhaite que votre bénédiction m'accompagne toujours. Que se modeste travaille soit le fruit de vos sacrifices. Quisse dieu, vous accorder de la santé, bonheur et longue vie.

A tous mes frères abdenour et toufik et leur femme tassadit et samira, ma fiancé ouahiba ainsi tout sa famille, mes sœurs nacera, saliha, nadia et son épouse abdenour, mes nièces et neveux (amir ,abdelah ,aya,tiziri,ania et lyna)

A ma grand-mère ouiza et à la mémoire de mes grands-parents à tous mes oncles et tantes.

A tous ceux qui m'ont soutenu durant mes études, mon binôme mohamed et mes colegues amar et saïd ainsi tout leur familles.

AGHILES

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail.

A mes parents, aucun hommage ne pourra être à la hauteur de l'amour dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur protège bonne santé et long vie.

A tous ceux que m'ont soutenu tout au long de ce projet, a mes frère et à mes sœur, mes belles sœur, A tout la famille, et mes amis. A ma future femme aussi.

A mon binôme aghiles et mes cher amar et said.

MOHAMED

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	
Introduction générale	1

Sommaire

Chapitre I : Généralité sur les composites et leurs endommagements

I. Introduction	3
I.1 Définition d'un matériau composite	3
I.2 Type des matériaux composite	4
I.3 Classification des matériaux composite	4
I.3.1 Classification suivant la forme des constituants	4
I.3.2 Classification suivant la nature des constituant.....	5
I.4 Constituant des matériaux composite	6
I.4.1 Les matrice	6
I.4.2 Les renforts.....	9
I.5 Charges et additifs	16
I.5.1 Les charges	16
I.5.2 Les additifs	17
I.6 Les composites Stratifiés	17
I.6.1 Stratifiés hybrides.....	18
I.7 Composite sandwich.....	18
I.8 Procédé de fabrication	19
I.8.1 Le moulage au contact	19
I.9 Avantages et inconvénients des matériaux composites	20
I.9.1 Avantage des matériaux composites	20
I.9.2 Inconvénients des matériaux composite.....	20
I.10 Domaine d'utilisation des composites	21
I.11 Définition d'endommagement	21
I.11.1 Les différents échèle d'observation.....	21
I.12 Mécanismes d'endommagement	22
I.12.1 Rupture de fibre.....	23
I.12.2 Rupture matricielle	23
I.12.3 Décohésion fibre/matrice	24
I.12.4 Endommagement des composites stratifiés.....	25
I.13 Conclusion	26

Chapitre II: Les interfaces dans les matériaux composites

II.	Introduction	27
II.1	Définition.....	27
II.2	L'interphase	28
II.3	La Zone interfaciale.....	28
II.4	Zone de contact: interface/interphase	29
II.4.1	Observation de l'interface	29
II.5	Comportement d'un composite unidirectionnel	30
II.5.1	Interface fibre/matrice très forte (interface liée)	30
II.5.2	Interface fibre matrice très faible (non liée).....	30
II.5.3	Interface fibre/matrice intermédiaire.....	31
II.6	Rôle des interfaces et des interphases.....	31
II.7	Caractéristiques des phases pour une liaison compatible.....	31
II.7.1	Surface du renfort.....	32
II.7.2	Propriétés de la matrice et de liant	32
II.7.3	Produit d'ensimage.....	33
II.7.4	Transfert de charge entre fibre et matrice	33
II.8	Comportement de l'interface	34
II.9	Interface fibre/matrice	35
II.9.1	Enchevêtrement moléculaire et interdiffusion:	35
II.9.2	Réaction chimique.....	35
II.9.3	Attraction électrostatique	36
II.9.4	Emboîtement mécanique	36
II.10	Mécanisme de dégradation de l'interface	37
II.11	Conclusion	38

Chapitre III: Essais mécaniques sur les composites

III.	Introduction	39
III.1	Techniques de mesure	39
III.2	Essais sur éprouvettes modèles	40
III.2.1	Essai de déchaussement (pull-out)	40
III.2.2	Essai de fragmentation	42
III.2.3	Essai d'indentation	45
III.2.4	Le test slice (compression).....	46
III.3	Essais sur produits finis	47
III.3.1	Essai statique	47
	L'expression de la déformation :.....	52
III.3.2	Essai dynamique.....	54
III.4	Conclusion	56

Chapitre IV: Partie expérimentale

IV.	Introduction	57
IV.1	Matériaux d'étude	57
IV.2	Préparation des échantillons	58
IV.3	Géométrie des éprouvettes de traction.....	59
IV.4	Essai de traction	60

IV.5	Machine de traction.....	60
IV.6	Résultats des essais de traction	61
IV.6.1	Interprétations des résultats	67
IV.6.2	Comparaison des résultats	70
IV.6.3	L'effet de l'anisotropie	71
IV.7	Essai de déchaussement (pull-out).....	72
IV.7.1	Préparations des échantillons (Lot B)	73
IV.8	Machine utilisée	74
IV.9	Résultats essais de déchaussement (pull-out)	75
IV.9.1	Interprétations des résultats	79
IV.10	Conclusion	80
Conclusion générale.....		81

Liste des figures

Figure I.1 : Constituant d'un matériau composite	3
Figure I.2 : Classification selon la forme des constituants	5
Figure I.3 : Différent famille de matrices	6
Figure I.4 : Les principaux matériaux de renfort	9
Figure I.5 : Fibre de verre (a), fibre d'aramide (b), fibre céramique (c), fibre naturelle (d), fibre de carbone (e).	10
Figure I.6 : Tissu fibre de carbone	10
Figure I.7 : Mat de verre	12
Figure I.8 : Mats a fibre courte (a) et a fibre continue (b)	13
Figure I.9 : Exemple de tissu et ruban	13
Figure I.10 : Chaîne et trame d'un tissu	13
Figure I.11 : Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus	14
Figure I.12 : Exemple de tresses	15
Figure I.13 : Tissage 3D tissage 4D	15
Figure I.14 : Nid d'abeille	16
Figure I.15 : (a) Charge minérale (b) additifs pour argile	16
Figure I.16 : Structure composite stratifiée	18
Figure I.17 : Structure composite sandwich	19
Figure I.18 : Principe de moulage au contact	20
Figure I.19 : Les différentes échelles d'observation	22
Figure I.20 : Type de rupture des composites	22
Figure I.21 : Rupture de fibre	23
Figure I.22 : Rupture transversal de la matrice	23
Figure I.23 : Rupture longitudinal de la matrice	24
Figure I.24 : Décohésion fibre/matrice	24
Figure I.25 : Délaminage d'un stratifiés	25
Figure I.26 : Structure d'un stratifié	25
Figure I.27 : Type de fissure	26
Figure II.1 : Concept d'interface	27
Figure II.2 : Concepts d'interphase (a) et d'interface (b)	28
Figure II.3 : Représentation schématique d'un composite unidirectionnel et de ses zones interfaciales.	29

Figure II.4 :L'interface dans les composite carbone/résine	30
Figure II.5 : Paramètres qui conditionnent les performances d'un composite.....	34
Figure II.6 : Enchevêtrement moléculaire (Kim et Mal, 1998).....	35
Figure II.7 : Réaction chimique entre les groupes A sur une surface et les groupes B sur l'autre surface [28]	36
Figure II.8 : Attraction électrostatique [28]	36
Figure II.9 : Emboîtement mécanique [29]	37
Figure III.1 : Schéma représentatif d'un essai de déchaussement.....	41
Figure III.2 : Courbe de déchaussement Force sur déplacement	41
Figure III.3: Exemple de microgoutte de résine déposée sur une fibre de lin :	42
Figure III.4 : a) Processus schématisé du test de fragmentation. b) Rupture par décohésion interfaciale induite par fragmentation.	43
Figure III.5 : Essai de fragmentation.....	44
Figure III.6: Schéma de l'essai d'indentation	45
Figure III.7: Principe de test slice (compression).....	47
Figure III.8 : Traction longitudinal	48
Figure III.9 : Traction transversale.....	48
Figure III.10 : Traction hors axes.....	49
Figure III.11 : Essai de compression.....	50
Figure III.12 : Flexion trois points	51
Figure III.13: Essai de flexion quatre points.	52
Figure III.14 : Configuration de flambement	53
Figure III.15 : Essai de Charpy	54
Figure IV.1 : Renfort unidirectionnel en carbone utilisé	57
Figure IV.2 : Moulage au contact, a)Dépôt de tissu, b) Imprégnation avec la résine.	58
Figure IV.3 : Découpage des éprouvettes	58
Figure IV.4 : Direction de découpe des éprouvettes par rapport à l'axe principale du renfort	59
Figure IV.5 : Eprouvettes avec talons	59
Figure IV.6 : Géométrie des éprouvettes.....	60
Figure IV.7 : a) Machine de traction ZWICK Z250, b) mors de traction utilisé	61
Figure IV.8 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (0°).	63
Figure IV.9 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (5°).	63
Figure IV.10 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (15°).	64
Figure IV.11 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (30°)	65

Figure IV.12 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (45°)	66
Figure IV.13 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (90°).....	66
Figure IV.14 : Eprouvette de composite A (0°) à la fin d'essai	67
Figure IV.15 : Eprouvette de composite A (5°) à la fin d'essai	68
Figure IV.16 : Eprouvette de composite A (15°) à la fin d'essai	68
Figure IV.17 : Eprouvette de composite A (30°) à la fin d'essai	69
Figure IV.18 : Eprouvette de composite A (45°) à la fin d'essai	69
Figure IV.19 : Eprouvette de composite A (90°) à la fin d'essai	69
Figure IV.20 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot(A).....	71
Figure IV.21 : Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture.	72
Figure IV.22 : Influence de l'anisotropie sur les modules d'élasticité.....	72
Figure IV.23 : Schéma d'une éprouvette de déchaussement.....	73
Figure IV.24 : Préparation des échantillons	74
Figure IV.25 : Echantillons final après durcissement	74
Figure IV.26 : a) Machine de traction Zwick Roell Z10,b) Mors de traction utilisé	75
Figure IV.27 :L'évolution contrainte/déformation de lot B/30(mm).	76
Figure IV.28: L'évolution contrainte/déformation de lot B/40(mm).	77
Figure IV.29: L'évolution contrainte/déformation de lot B/50(mm).	78
Figure IV.30 : L'évolution contrainte/déformation de lot B/60(mm).	78
Figure IV.31 : a) Eprouvette d'une mèche carbone, b) début d'endommagement et c) rupture total de la mèche.....	79
Figure IV.32 : Les différents endommagements des éprouvettes	80

Liste des tableaux

<i>Tableau I.1 : Propriétés des résines polyester</i>	<i>7</i>
<i>Tableau I.2 : Les caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide</i>	<i>8</i>
<i>Tableau IV.1 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (0°) en traction.....</i>	<i>62</i>
<i>Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (5°) en traction.....</i>	<i>63</i>
<i>Tableau IV.3 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (15°) en traction.....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau IV.4 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (30°) en traction.....</i>	<i>64</i>
<i>Tableau IV.5: Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (45°) en traction.....</i>	<i>65</i>
<i>Tableau IV.6 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (90°) en traction.....</i>	<i>66</i>
<i>Tableau IV.8 : Caractéristiques mécaniques de lot B/30(mm).</i>	<i>76</i>
<i>Tableau IV.9 : Caractéristiques mécaniques de lot B/40(mm).</i>	<i>76</i>
<i>Tableau IV.10 : Caractéristiques mécaniques de lot B/50(mm).</i>	<i>77</i>
<i>Tableau IV.11 : Caractéristiques mécaniques de lot B/60(mm).</i>	<i>78</i>

Liste des symboles

E : Module de Young. [MPa]

σ_{tr} : Contrainte de traction. [MPa]

E_{tr} : Module en traction. [MPa]

σ_e : Limite élastique. [MPa]

E_L : Module de Young longitudinal. [MPa]

E_T : Module de Young transversale. [MPa]

ν_{lt} : Coefficient de poisson.

σ_{xx} : Contrainte normale. [MPa]

F_{max} : Charge à la rupture. [N]

σ_{fl} : Contrainte normale en flexion. [MPa]

τ : Contrainte de cisaillement. [MPa]

F : Charge appliquée [N]

U : Energie absorbée par la rupture de l'éprouvette [J]

K : Résistance au choc Charpy [KJ/m²]

ϵ : Déformation relative.

Introduction générale

Les matériaux composites connaissent une utilisation grandissante dans de nombreux domaines. Le domaine des transports, en particulier celui des transports aéronautiques, montre un grand intérêt pour ce type de matériaux. Le contexte économique et environnemental impose aux acteurs de ce secteur un allègement des structures permettant des gains en termes de capacité de chargement et d'économie d'énergie. En effet, outre le coût croissant de l'énergie dû à la raréfaction des énergies fossiles, l'opinion publique se montre de plus en plus sensible aux impacts environnementaux des transports. Les leaders du transport aéronautique introduisent donc les matériaux composites proposant de bonnes caractéristiques mécaniques pour une masse réduite dans leurs appareils.

Dans ce contexte, l'étude et la maîtrise de l'élaboration des pièces composites fait l'objet d'intenses recherches car ces matériaux restent encore peu connus devant les matériaux plus classiques (métaux principalement). Pour des applications à hautes performances, les renforts à fibres continues (tissés), par exemple, sont très largement utilisés pour leur très bonne formabilité et la possibilité d'obtenir des pièces de forme complexe. Cette industrie ayant de très grandes exigences vis-à-vis de la durabilité des matériaux qu'elle utilise, de nombreuses études ont été entreprises dans le but de comprendre et de modéliser leur comportement et l'optimiser. Alors une caractérisation poussée et précise de leurs propriétés mécaniques est nécessaire. Les travaux ont mis en évidence que le comportement d'un composite dépend des propriétés de ses constituants de base (fibre, matrice) et de l'interface qui lie les fibres à la matrice, et de ce fait contrôlent les propriétés mécaniques du composite en service.

De nombreuses recherches portent sur la mise au point de traitements spécifiques permettant l'amélioration de l'adhésion interfaciale, souvent considérée comme le point faible et en même temps essentiel du composite. A l'heure actuelle, les composites à fibre de carbone (verre) présentent de rares carences d'adhésion interfaciale. Néanmoins, l'influence de l'interface se fait toujours sentir au niveau du comportement global du matériau. Il est donc nécessaire d'arriver à définir l'optimisation des propriétés interfaciales pour un couple fibre/matrice donné.

Le présent travail est axé sur l'élaboration et la caractérisation du comportement mécanique d'un renfort unidirectionnelle haute performance en fibre de carbone et matrice polyester thermodurcissable. Nous avons réalisé des essais de traction uniaxial. Les éprouvettes testées sont découpées à différents angles par rapport à la direction principale de

renfort (0° , 5° , 15° , 30° , 45° et 90°). Nous avons réalisé aussi un essai de déchaussement pour une mèche enchâssé dans un cylindre de résine avec la variation de longueur d'enchâssement. Les résultats et les mécanismes d'endommagement engendrés sont discutés et analysés.

Notre mémoire est scindé en deux parties, une partie théorique constituée au premier chapitre de brèves présentations des matériaux composites (constituants, architectures et procédés d'élaboration), ainsi que, les mécanismes d'endommagement des matériaux composites et le rôle prépondérant joué par l'interface dans la propagation de la fissure. Dans le second chapitre, nous rappelons quelques notions sur les interfaces et leurs comportements ; il comporte les différents modèles de l'interface et les mécanismes de dégradation. Des essais mécaniques sur éprouvettes modèles et produit finis sur des matériaux composites seront présentés au troisième chapitre. La deuxième partie est consacrée à une étude expérimentale, dans laquelle nous exposons la description des matériaux utilisés et la détermination de leur comportement et propriétés mécaniques (force de rupture, contrainte à la rupture, module d'élasticité...) par le biais des essais de traction hors axes et des essais pull-out (déchaussement). Les résultats obtenus et les mécanismes de rupture engendrés sont analysés et confrontés. Nous terminons cette étude par une conclusion générale.

I. Introduction

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Leur utilisation comme matériau de structure dans l'aéronautique, l'automobile, les constructions navales ou dans le bâtiment a nettement augmenté grâce à leurs excellentes propriétés spécifiques. Parmi ces avantages, on cite leur faible densité, leur haute résistance, haute rigidité et leur excellente durabilité.

I.1 Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes, généralement constitué d'un renfort et matrice. Le but recherché dans cette association est d'aboutir à un matériau dont les performances globales sont supérieures à celles des composants pris séparément [1], un agent de liaison qui s'appelle interface résulte de l'association intime de renfort/matrice qui assure la compatibilité renfort/matrice (Figure I.1).

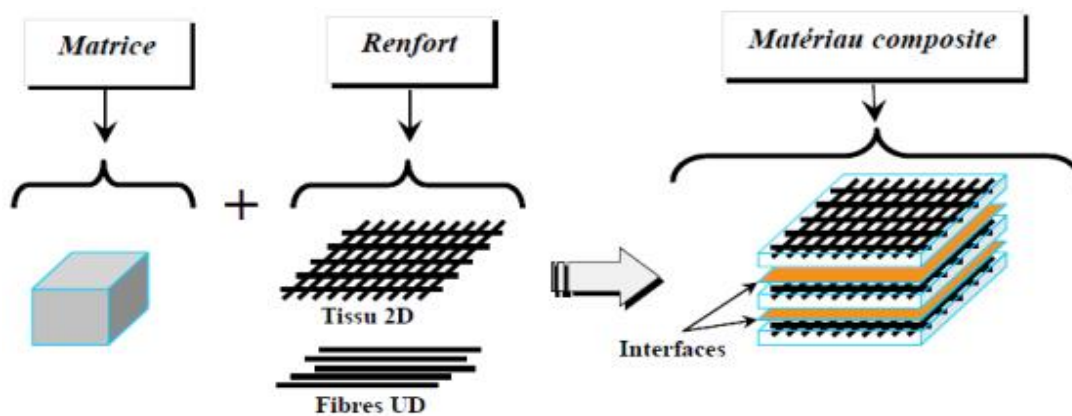


Figure I.1 : Constituant d'un matériau composite

I.2 Type des matériaux composite

On distingue deux type de matériaux composite: à haute performance (HP) et à grand diffusion (GD)

➤ Haute performance (HP)

Sont principalement utilisé dans l'aéronautique sont d'un cout élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Taux de renfort supérieur à 50%, et ce sont les renforts qui influent sur le cout. Les propriétés mécaniques sont largement supérieurs celles des métaux. Contrairement aux GD .mais ils ont un faible coefficient de sécurité $S < 1,6$ [2].

➤ Grand diffusion (GD)

Les GD représentent 95% des composites utilisés. Ce sont en général des plastiques armés ou des plastiques renforcés, le taux de renfort avoisinant 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'existe pas ou n'est pas maitrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases sont les fibres de verre/résines polyesters. Ils ont un coefficient de sécurité plus élever $S > 6$ [2].

I.3 Classification des matériaux composite

Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants.

I.3.1 Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres[1], comme défini dans (figure I.2).

➤ Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc.

➤ **Composites à particules**

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée. Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc.

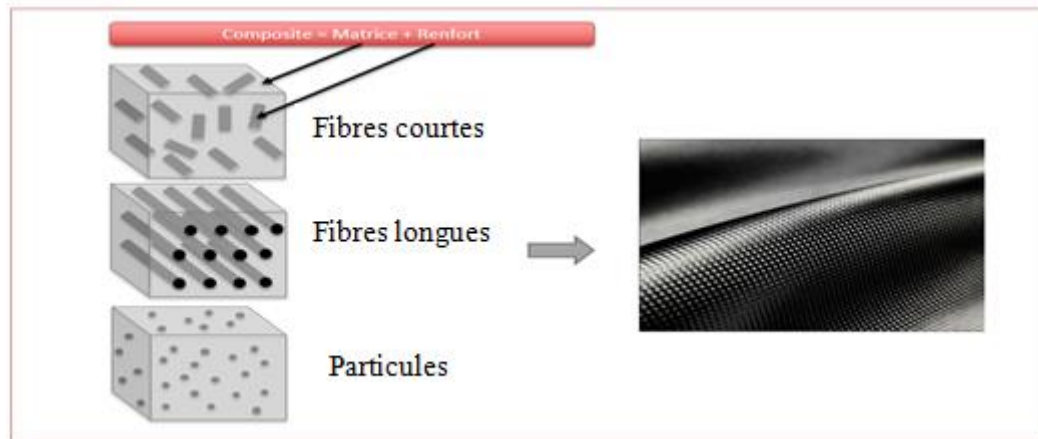


Figure I.2 : Classification selon la forme des constituants

I.3.2 Classification suivant la nature des constituant

Selon la nature de la matrice et de renfort on rencontre plusieurs combinaisons possibles :

I.3.2.1 Composites à matrice organique

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

- des fibres minérales : verre, carbone, etc.
- des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
- des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

I.3.2.2 Composites à matrice métallique

(Alliages légers et ultralégers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec :

- des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC),
- des fibres métalliques : bore,
- des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BorSiC).

I.3.2.3 Composites à matrice minérale

Composites à matrice minérale (céramique), avec :

- des fibres métalliques : bore,
- des particules métalliques : cermets,
- des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300 °C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà : jusqu'à 600 °C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000 °C pour une matrice céramique [1].

I.4 Constituant des matériaux composite

Le matériau composite est constitué de deux constituants de base, matrice et le renfort.

I.4.1 Les matrice

Cette phase est indispensable à la liaison des divers éléments constitutifs, Leur rôle est de lier les renforts, de répartir les charges (contraintes, résistance à la traction et rigidité) et d'assurer la protection chimique contre les agents agressifs extérieurs tels que (acides, humidité, corrosion...) et donne la forme au produit réalisé. Le choix de la matrice dépend de l'utilisation à laquelle est destinée le matériau composite [3]. Les différentes familles de matrice sont présentées dans l'organigramme (figure I.3).

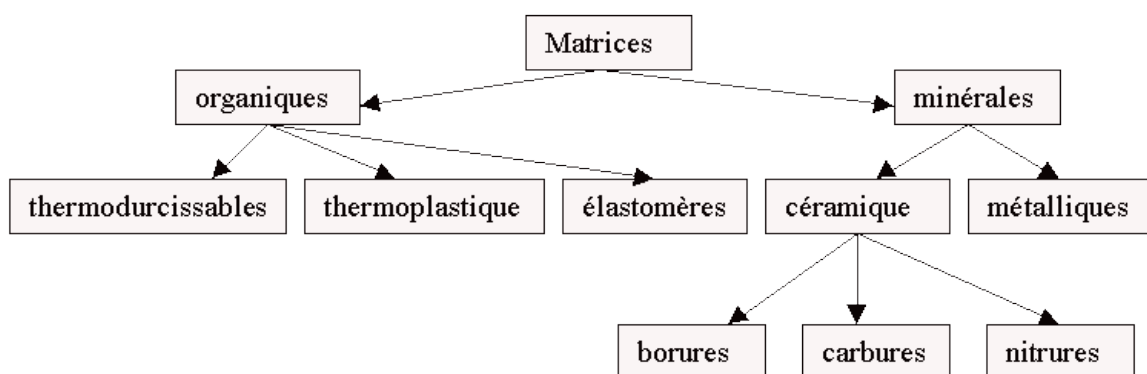


Figure I.3 : Différent famille de matrices

On utilise actuellement surtout des résines thermodurcissables (TD) que l'on associe à des fibres longues, mais l'emploi de polymères thermoplastiques (TP) renforcés de fibres courtes se développe fortement.

I.4.1.1 Les matrices thermodurcissables

Les matrices thermodurcissables sont les plus couramment utilisées pour la fabrication de pièces en matériaux composites.

Qui sont, en général, associées avec des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se pont (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée. La transformation est irréversible, on distingue deux types de matrices thermodurcissables [3] :

➤ **Les matrices polyesters (usage courant)**

Les matrices polyesters sont largement utilisées dans les applications composites. Ce sont des polycondensats de diacides saturés et insaturés avec des polyalcools de type glycol, dissous dans un monomère de réticulation (styrène ou méthacrylate de méthyle). Les propriétés des résines polyesters sont résumées dans (Tableau I.1).

AVANTAGES	INCONVENIENTS
-Bon accrochage sur la fibre de verre - Facilité de mise en œuvre -Assez bonne tenue chimique - Prix faible	- Retrait important (6 à 7% en volume) - Inflammable - Durée de conservation limitée - Temps de travail limité

Tableau I.1 : Propriétés des résines polyester

Le durcissement d'une résine polyester est appelé polymérisation ou réticulation. La polymérisation est une réaction chimique nécessitant l'utilisation d'un accélérateur et d'un catalyseur dans la résine. L'accélérateur est généralement un sel de cobalt (Octoate ou naphthéate) et le catalyseur un peroxyde organique (ex : peroxyde méthyl éthyl cétone (PMEC)).

➤ Les matrices époxydes

Les matrices époxydes sont utilisées dans la fabrication de composites hautes performances. Le polymère présente des groupements fonctionnels époxydes qui génèrent la réticulation par le biais d'une réaction chimique de polyaddition et l'utilisation d'un durcisseur de type amine [3].

I.4.1.2 Les matrices thermoplastiques

La famille des résines thermoplastiques (on parle de "plastiques") est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grande diffusion et plastiques techniques (ou techno polymères).

Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, etc. Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons : le polychlorure de vinyle (PVC), le polyéthylène, le polypropylène, le polystyrène, le polyamide, le polycarbonate, etc.

L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication (injection, extrusion). Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Nous donnons ci-après quelques caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide (Tableau I.2).

	Polypropylène	Polyamide
Masse volumique (kg/m ³)	900	1 140
Contrainte à la rupture (MPa)	20–35	60–85
Module d'élasticité (GPa)	1,1–1,4	1,2–2,5
sous charge (°C)	50–60	65–100

Tableau I.2 : Les caractéristiques pour le polypropylène et le polyamide

Les divers thermoplastiques peuvent être renforcés par des fibres et font partie alors des matériaux composites. Cependant, dans le domaine des composites, les résines thermoplastiques ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures de produits solides [1].

I.4.2 Les renforts

Les renforts représentent la principale composante porteuse des matériaux composites, en lui apportant ses hautes performances (rigidité, résistance à la rupture, etc.)

Les qualités recherchées pour le renfort sont surtout des caractéristiques mécaniques élevées, une masse volumique faible, une bonne compatibilité avec la résine ainsi qu'une facilité de mise en œuvre et un faible coût. La concentration du renfort est un paramètre déterminant pour les propriétés du matériau composite.

Elle est mesurée par la fraction volumique ou par la fraction massique du renfort, et elle est généralement comprise entre 0,3 et 0,7. Les renforts se présentent sous forme de fibres [4]. Les différentes familles de renfort sont présentées dans l'organigramme (figure I.4).

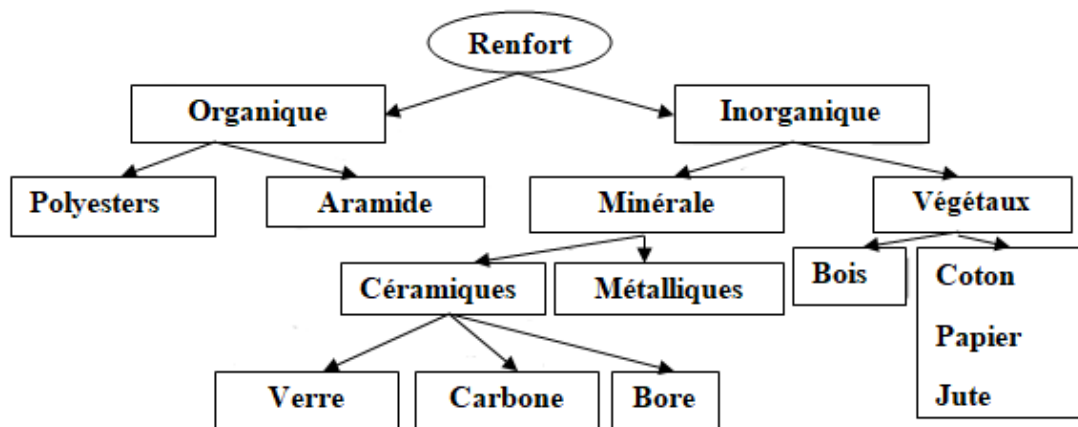


Figure I.4 : Les principaux matériaux de renfort

I.4.2.1 Les fibres

Qui se présentent sous forme de centaines ou de milliers de filaments de diamètre compris entre 5 à 15 μm (figure I.5). Parmi les fibres les plus utilisées sont :

- Fibre de carbone ;
- Fibre de verre ;
- Fibre d'aramide ;
- Fibre naturelle ;
- Fibre céramique.

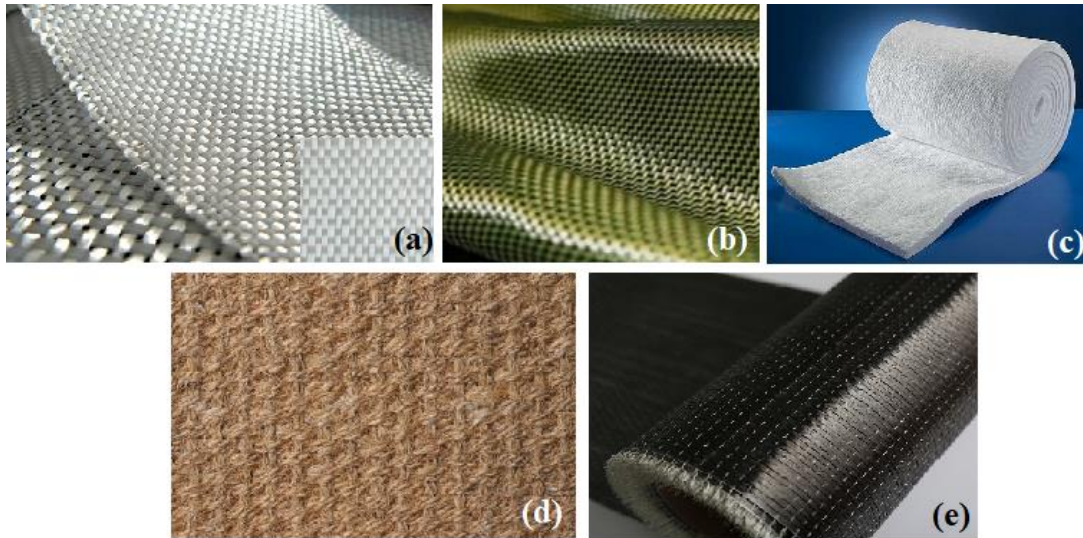


Figure I.5 : *Fibre de verre (a), fibre d'aramide (b), fibre céramique (c), fibre naturelle (d), fibre de carbone (e).*

Dans notre travail on s'intéresse sur les fibres de carbone.

I.4.2.1.1 Fibre de carbone

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile) Selon la température de combustion [5].

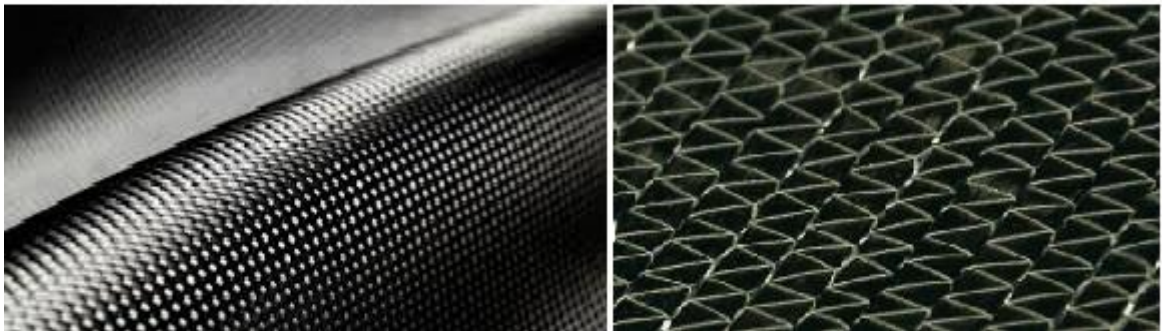


Figure I.6 : *Tissu fibre de carbone*

On distingue deux types de fibres :

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

Les propriétés des différentes fibres de carbone sont données par le tableau I.3

Type de fibres	Densité	Module en traction GPA	Résistance à la rupture MPa	Allongement %	Coefficient de dilatation 10-6/°C
Fibre de carbone HR	1.76	230	3290	1,4	3
Fibre de carbone HM	1.81	399	2450	0,5	-0,5

Tableau I.3 : *Propriétés mécaniques des différentes fibres de carbone*

- **Les avantages et les inconvénients des fibres de carbone [6]**

- **Les avantages**

- Excellentes propriétés mécanique (ténacité, élasticité et module de Young) ;
- très bonne tenue en température ;
- Dilatation thermique nulle ;
- Bonne conductibilité thermique et électrique ;
- Magnétisme et perméabilité aux rayons X ;
- Bonne tenue à l'humidité ;
- Usinabilité aisée ;
- Faible densité.

- **Les inconvénients de la fibre de carbone :**

- Prix très élevé ;
- Précautions à prendre dans la mise en œuvre (fibres cassantes) ;
- Tenue limitée aux chocs et à l'abrasion ;
- Mauvais comportement chimique avec l'oxygène (à partir de 400°C), avec les acides Oxydants à chaud et avec les métaux (corrosion galvanique) ;
- Adhésion difficile avec les résines.

I.4.2.2 Architecture des fibres

Les fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

- Linéiques (fils, mèches, ... etc.) ;
- Tissus surfaciques (tissus simples, mats,... etc.) ;
- Multidirectionnelles (tresses, tissus complexes, ...etc.).

Il existe également des fibres courtes de 1 à 2 mm qui sont dispersées dans la matrice, ou encore des fils coupés de 15 à 50 mm de longueur. Leur utilisation est encore limitée en raison des difficultés de fabrication [7].

I.4.2.2.1 Forme linéique

A cause de leur faible diamètre ($\varnothing=10\mu\text{m}$) elles sont assemblées pour être utilisées sous forme différentes :

- Fils coupés (15 à 50) mm de longueur;
- Fils courtes (1 à 2) mm de longueur;
- Mèches : ensembles des fibres discontinues;
- Stratifils : assemblage des fils de base sous torsion.

I.4.2.2.2 Forme surfacique

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser des formes surfaciques suivantes [8].

a. Les mats

Ce sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle (figure I.7). 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.7 : Mat de verre

Il existe deux types de mat : mats à fibre continue et mats à fibre courtes (figure I.8).

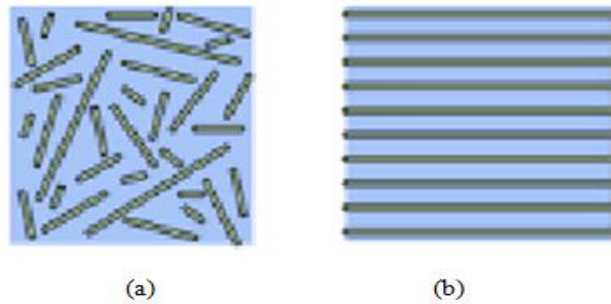


Figure I.8 : Mats a fibre courte (a) et a fibre continue (b)

a. Les tissus et rubans

Un tissu (ou ruban) est un ensemble surfacique de fils (figure I.9), de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser.

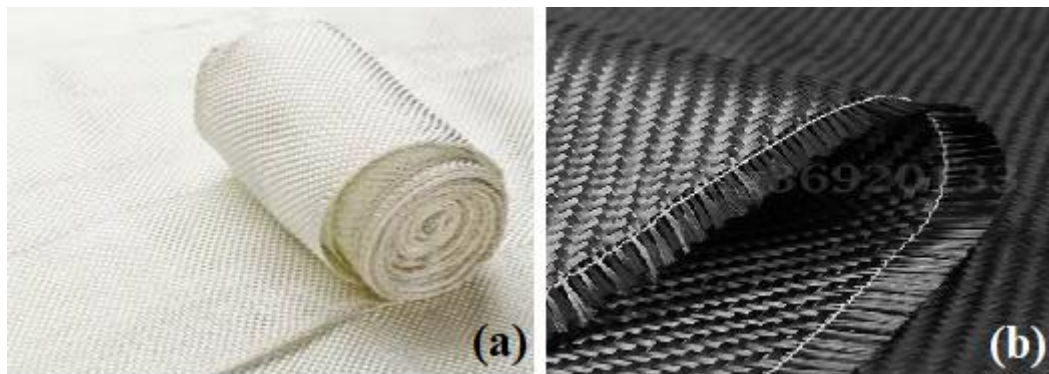


Figure I.9 : Exemple de tissu et ruban

Il est constitué:

- d'une chaîne, ensemble de fils parallèles répartis dans un plan suivant la longueur du Tissu ;
- d'une trame, ensemble de fils s'entrecroisant avec les fils de chaîne.



Figure I.10 : Chaîne et trame d'un tissu

Selon le schéma d'entrecroisement des fils de chaîne et les fils de trame, que l'on nomme l'armure du tissu, on distingue plusieurs types de tissage :

- armure toile ou taffetas ;
- armure satin ;
- armure sergé ;
- armure à haut module ;
- armure unidirectionnelle.

La (figure I.11) présente les principaux types d'armure utilisés pour le tissage des tissus.

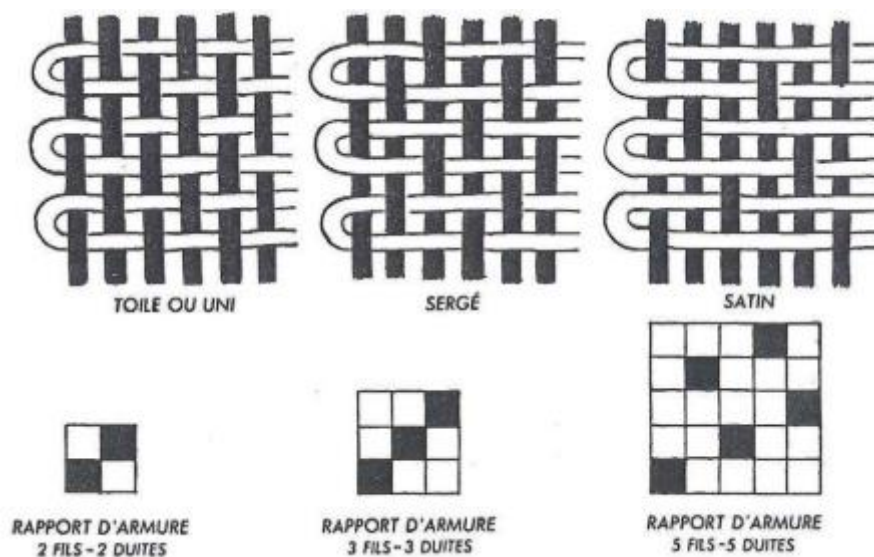


Figure I.11 : Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus

Forme multidirectionnelle

a. Tresses et préformes

Il s'agit d'un tissage cylindrique ou conique des mèches, permettant de réaliser des Pièces 3D (figure I.12).

Ces renforts sont notamment utilisés pour satisfaire aux besoins de la construction aéronautique (tuyères...) ou de l'armement [9].



Figure I.12 : Exemple de tresses

b. Tissus multidirectionnels

Les fibres sont tissées dans plusieurs directions (figure I.13). Ceci permet d'obtenir un tissu très dense et épais mais par conséquent peu souple [10].

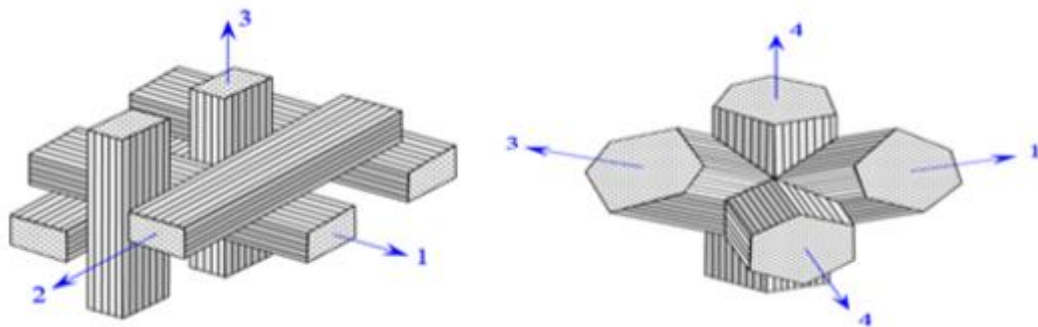


Figure I.13 : Tissage 3D tissage 4D

c. Nid d'abeilles

Les structures en nid d'abeilles comparables aux alvéoles d'abeille (figure I.14), servent à renforcer la résistance d'un élément tout en garantissant une légèreté maximale utilisée dans les structure sandwich.

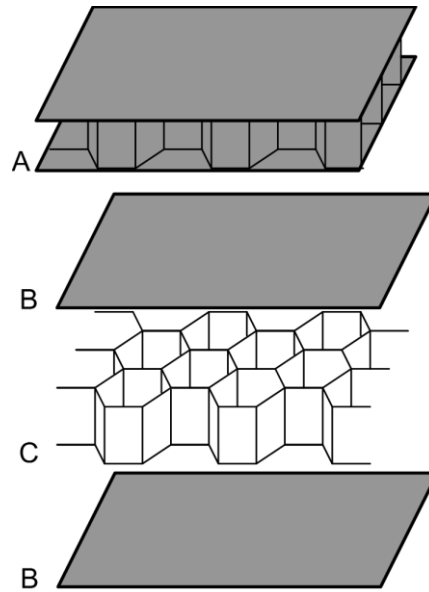


Figure I.14 : *Nid d'abeille*

I.5 Charges et additifs

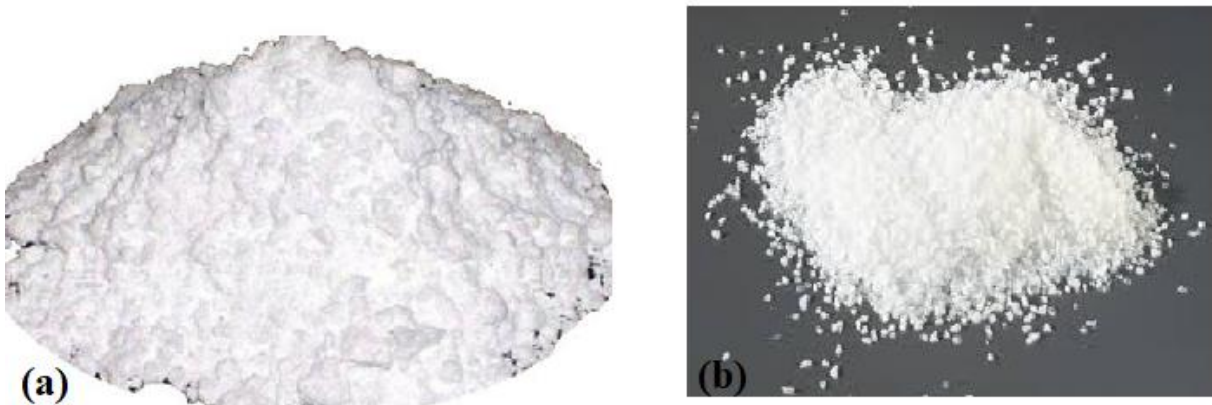


Figure I.15 : (a) *Charge minérale* (b) *additifs pour argile*

I.5.1 Les charges

Les charges dans un matériau composite peuvent se représenter sous forme de fines particules.

Elles ont pour but de modifier les caractéristiques du produit : dureté superficielle, résistance à la contrainte en flexion ou en choc ou encore diminution du pouvoir calorifique, amélioration du comportement au feu et souvent baisse de prix de revient. D'autres adjuvants primordiaux sont, dans le cas des matrices. On a deux types de charges [6].

I.5.1.1 Les charges renforçant

L'objet de l'incorporation de charges renforçantes est d'améliorer les caractéristiques mécaniques de la résine.

I.5.1.2 Les charges non renforçantes

Les charges non renforçantes ont pour but soit la diminution du coût des résines tout en conservant leurs performances, soit l'amélioration de certaines propriétés des résines.

I.5.2 Les additifs

Des additifs, de type colorant ou agent de démoulage sont largement utilisés lors de la conception des structures constituées de matériaux composites [11].

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

- lubrifiants et agents de démoulage,
- pigments et colorants,
- agents anti-retrait,
- agents anti-ultraviolets.

I.6 Les composites Stratifiés

Les stratifiés sont constitués de couches successives de renforts (fils, stratifils, mats, etc.) imprégnés de résine (Figure I.16), orientées de façon quelconque les uns par rapport aux autres.

Les avantages des stratifiés résident dans la possibilité d'adopter et de contrôler meilleurs conditions.

Suivant l'orientation des renforts et leur nature, plusieurs types de stratifiés peuvent être dégagés [8].

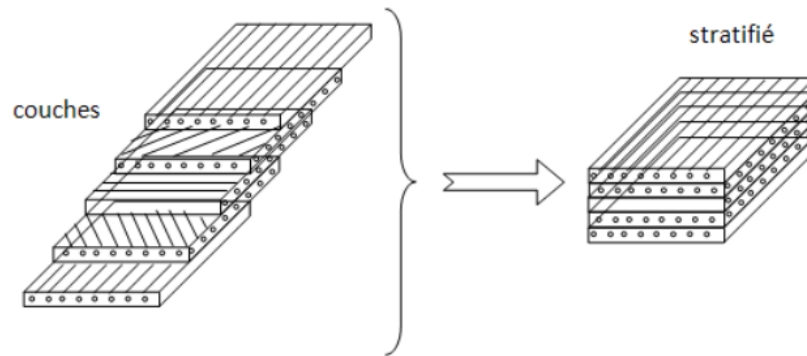


Figure I.16 : *Structure composite stratifiée*

Les couches sont également nommées plis. Les structures stratifiées réalisées à partir de matériaux composites sont constituées d'empilements de nappes unidirectionnelles ou bidirectionnelles.

Ces nappes sont formées de renforts en fibres longues liées par la résine. Le rôle du renfort est d'assurer la fonction de résistance mécanique aux efforts. La résine assure quant à elle la cohésion entre les renforts de manière à répartir les sollicitations mécaniques.

Les pièces structurelles sont réalisées par empilement de nappes en optimisant les directions des renforts en fonction des charges qu'elles doivent subir [11].

I.6.1 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 et on distingue :

- **Hybrides intercouches:** constitués d'une suite de couches, chacune de nature différente ;
- **Hybrides intracouches:** constitués par une séquence de couches identiques. Chaque couche étant constituée de renforts différents [8].

I.7 Composite sandwich

Une structure sandwich résulte de l'assemblage par collage ou par soudure de deux revêtements ou peaux minces sur une âme ou cœur plus léger (figure I.17) qui maintient leur écartement [12].

Les âmes peuvent être pleines (bois, mousse, etc.) ou creuses (alliages métalliques légers, papiers, etc.). Les peaux sont de stratifiés ou des feuilles d'alliages légers.

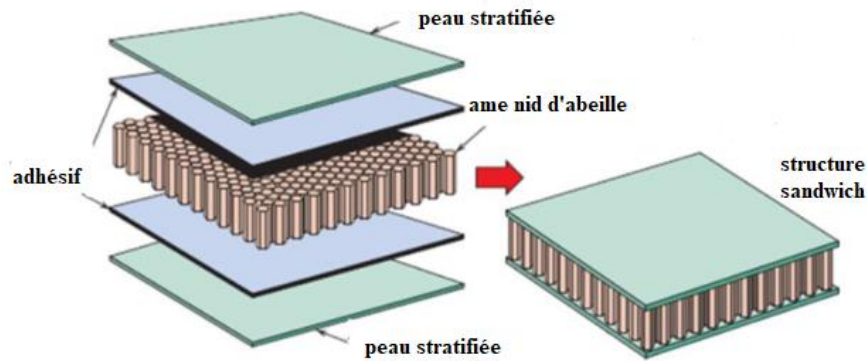


Figure I.17 : Structure composite sandwich

Ces structures ont une grande rigidité en flexion et torsion. L'âme de la structure sandwich résiste principalement aux contraintes de cisaillement et de compression hors plan, les peaux inférieures et supérieures supportent quant à elles les efforts dans leur plan. Les technologies de mise en œuvre

Les techniques de fabrication jouent un rôle dans les composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le résultat final.

I.8 Procédé de fabrication

Les procédés les plus importants sont:

- Moulage au contact ;
- Moulage par projection simultanée ;
- Moulage par injection de résine ;
- Moulage sous vide ;
- Moulage en continu ;
- Moulage par enroulement filamentaire (ou bobinage)

Dans notre travail on s'intéresse sur le moulage au contact.

I.8.1 Le moulage au contact

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression (figure I.18). 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].

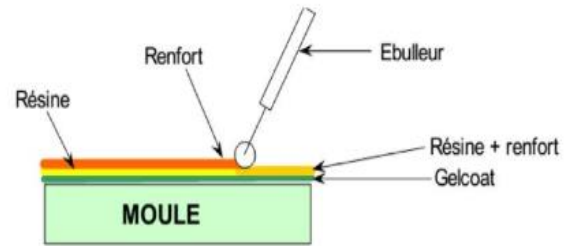


Figure I.18 : Principe de moulage au contact

Cas d'utilisation

- procédé pour petites séries : de 1 à 1000 pièces /ans;
- pièces de grandes à très grandes dimensions;
- revêtement sur supports divers.

I.9 Avantages et inconvénients des matériaux composites

I.9.1 Avantage des matériaux composites

- Gain de masse;
- Mise en forme de pièces complexes (principe du moulage) et réduction du nombre d'interfaces (boulonnage, rivetage et soudure sur structures métalliques);
- Grande résistance à la fatigue - Faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf en cas de contact entre de l'aluminium et des fibres de carbone);
- Insensibles aux produits chimiques "mécaniques " comme les graisses, huiles, liquides hydrauliques, peintures, solvants, pétrole.

I.9.2 Inconvénients des matériaux composite

- Vieillissement sous l'action de l'eau et de la température;
- Attention aux décapants de peinture qui attaquent les résines époxydes;
- Tenue à l'impact moyenne par rapport aux métalliques;
- Meilleure tenue au feu que les alliages légers mais émission de fumées parfois toxiques pour certaines matrices;
- Coût parfois prohibitifs (temps et coût études et mise en œuvre), le gain en coût est surtout valable pour des grandes séries.

I.10 Domaine d'utilisation des composites

Les matériaux composites sont utilisés dans plusieurs domaines tel-que : l'aéronautique, l'automobile, le ferroviaire, la construction civile, la construction industrielle, le secteur médical, les équipements de sports et loisirs, la construction nautique et la construction électrique etc.

L'utilisation des matériaux composite dans ses divers domaines engendre des sollicitations quelconques qui provoquent des endommagements qui se développent à l'échelle microscopique lorsque la contrainte atteint la limite de rupture l'un des trois constituants (fibre, matrice et interface).

I.11 Définition d'endommagement

L'endommagement désigne le phénomène de création de nouvelle surface ou sien de matériau sous l'effet d'une sollicitation [13].

Définit l'endommagement comme une augmentation de la taille ou du nombre de fissure. Ceci engendre une diminution des caractéristiques mécanique de système qui mène à sa ruine.

I.11.1 Les différents échèle d'observation

Plusieurs types d'endommagement au sein d'une structure stratifiée, unidirectionnelle ou tissés qui se révèlent à différentes échelles d'observation (figure I.19). Les plus significatifs sont les suivants [14] :

- 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 et de la 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 intra laminaires mais également la rupture de fibres qui intervient au stade ultime de la ruine du matériau, qui sont parallèles à la direction des fibres.

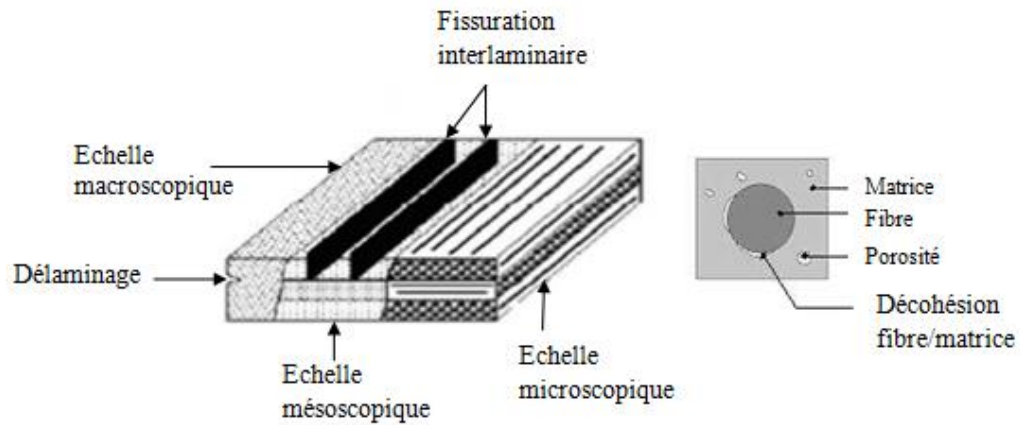


Figure I.19 : Les différentes échelles d'observation

I.12 Mécanismes d'endommagement

La rupture finale d'un composite unidirectionnel est le résultat de l'accumulation de divers mécanismes élémentaires [15] :

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

Généralement, un mécanisme n'est pas isolé, mais divers mécanismes coexistent. Ces mécanismes se développent suivant la nature des matériaux et les conditions de sollicitations mécaniques imposées (figure I.20).

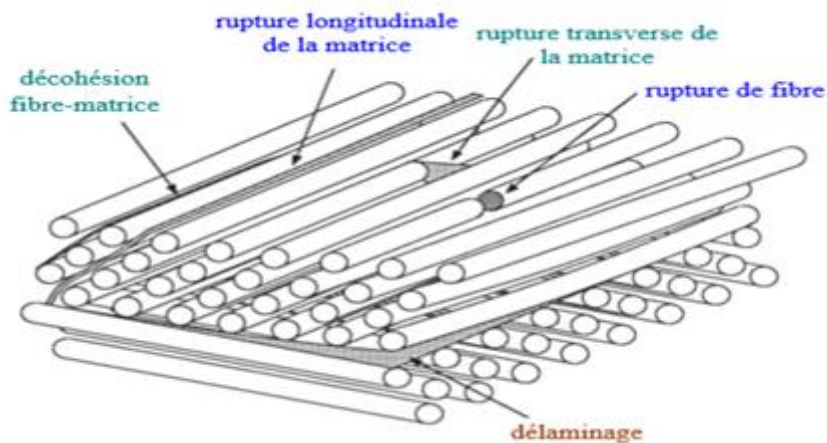


Figure I.20 : Type de rupture des composites

I.12.1 Rupture de fibre

Ci des cassures de fibres peuvent survenir dans le prolongement des décohésions fibres matrice la rupture des fibres intervient (figure I.21), par définition du renfort, a un stade avancé de l'endommagement de la structure et de manière brutale (comportement fragile).

La rupture des fibres intervient lorsque la contrainte de traction σ_t dans une fibre atteint la contrainte à la rupture σ_r de la fibre.

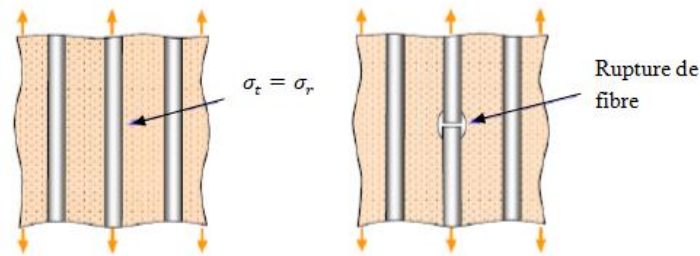


Figure I.21 : Rupture de fibre

Elles interviennent essentiellement au sein des plis les moins désorientés par rapport à la direction de la sollicitation pour lesquels les fibres reprennent le plus d'efforts.

I.12.2 Rupture matricielle

Ce mécanisme intervient en premier lieu du fait d'une faible déformation à la rupture de la matrice fragile et constitue l'un de leurs mécanismes de dégradation prépondérant (figure I.22).

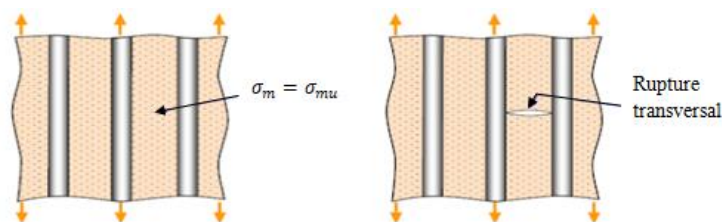


Figure I.22 : Rupture transversal de la matrice

Les fissures matricielles s'initient généralement aux zones de concentration des contraintes telles que les hétérogénéités du matériau (figure I.23).

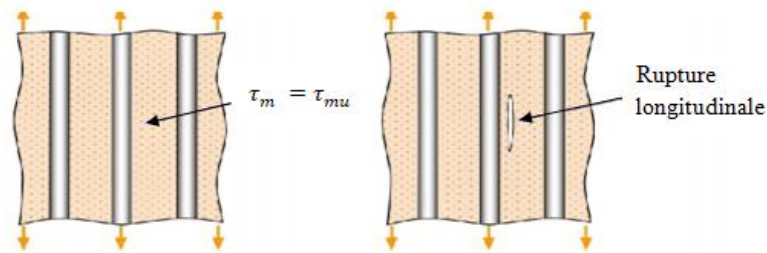


Figure I.23 : Rupture longitudinale de la matrice

Elles se propagent ensuite suivant l'orientation du chargement, notamment perpendiculairement à l'axe de traction ou parallèlement à la sollicitation dans le cas d'un cisaillement. On notera que certains auteurs distinguent la fissuration matricielle suivant sa localisation inter et intra torons.

I.12.3 Décohésion fibre/matrice

Pour les résines plastiques présentant une importante déformation à rupture, l'interface fibre/matrice constitue le point plus faible à l'intérieur des plis (figure I.24). Ces ruptures d'adhérence, généralement induites par des contraintes de cisaillement locales, se propagent le long des fibres jusqu'à former des fissures transverses (traversant l'intégralité d'un pli) dans le cas des stratifiés unidirectionnels ou longitudinales dans le plan des plis dans le cas de composites tissés.

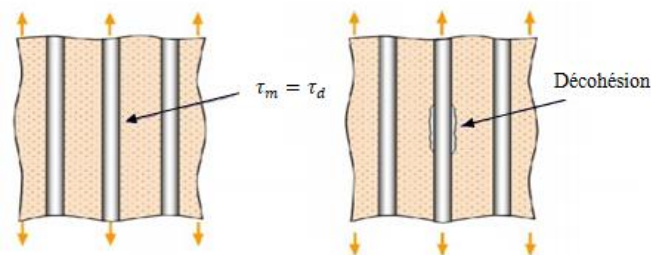


Figure I.24 : Décohésion fibre/matrice

I.12.3.1 Délaminage

Si les trois mécanismes présentés ci-avant peuvent être considérés comme diffus au sein du pli, le délaminage ou décohésion inter-plis correspondant en revanche à une dégradation d'ordre macroscopique dans la mesure où il est visible à l'œil nu (figure I.25).

Ce décollement s'amorce généralement dans les zones de forts gradients de contrainte comme les bords libres de la structure ou près des défauts macroscopiques pour progresser

ensuite en séparant les couches constituent évidemment des facteurs aggravants pour ce phénomène. Notons que dans le cas de structure impacté, le délaminage est fortement couplé avec la fissuration matricielle.

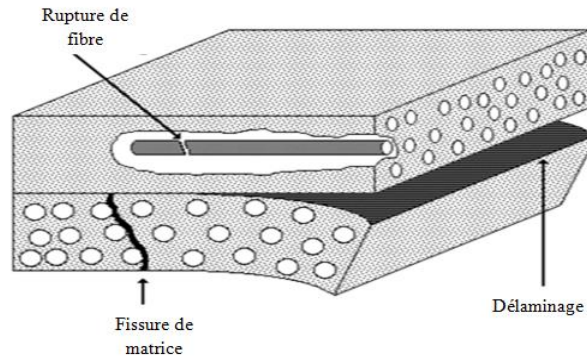


Figure I.25 : Délaminage d'un stratifiés

I.12.4 Endommagement des composites stratifiés

I.12.4.1 Les fissurations

Les matériaux composites stratifiés constitués des couches superposées renforcées de fibres unidirectionnels (figure I.26), de tissus ou de mats peuvent présenter différents type de fissuration (interlaminaire, intralaminaire, ou translaminaire) (figure I.27) [16]. Ces termes définissent les plans dans lesquels peuvent se développer les fissures dans les matériaux composites.

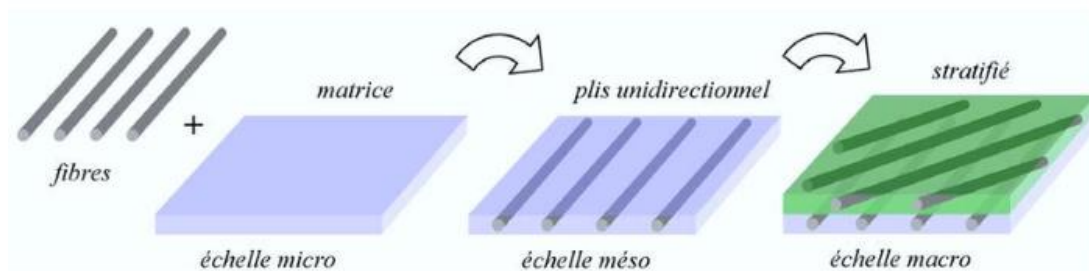


Figure I.26 : Structure d'un stratifié

- **Fissure interlaminaire** : développement de la fissure selon un plan parallèle aux couches de renforts, et entre deux couches. On le rencontre lors d'essai en mode I ou II aussi en flexion entre appuis rapprochés.
- **Fissure intralaminaire** : développement de la fissure selon un plan perpendiculaire ou parallèle aux couches de renforts et à l'intérieure des couches. On le rencontre lors d'essai de cisaillement ou traction transverse sur matériau unidirectionnel.
- **Fissure translaminaire** : développement de la fissure selon un plan perpendiculaire aux couches et aux renforts. Exemple : essai de traction ou compression uniaxial dans le sens des fibres.

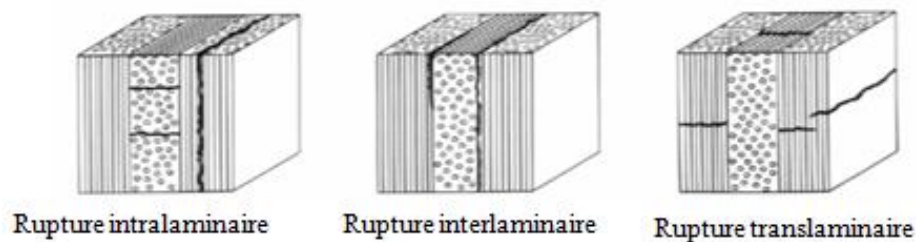


Figure I.27 : Type de fissure

I.13 Conclusion

Les matériaux composites sont largement utilisés dans des domaines très divers (techniques, économiques et chimiques....), ils remplacent presque tous les matériaux classiques, à cet effet la connaissance de leur comportement mécanique est plus que nécessaire qui dépendent fortement des caractéristiques de la zone interfaciale. Il apparaît donc important d'étudier cette entité qu'est l'interface dans le chapitre II.

II. Introduction

Dans ce chapitre nous nous intéressons sur les interfaces qui se trouvent entre les deux phases matrice/fibre au moment d'élaboration, qui dure pendant toute la vie du matériau. Le rôle essentiel de l'interface dans un matériau composite est de transmettre les chargements de la matrice vers le renfort, et d'assurer la non-décohésion fibre/matrice lors d'un chargement. Et pour cela on cherche souvent à améliorer cette interface pour avoir une bonne adhérence fibre/matrice. L'élaborateur se procure la meilleure fibre et la meilleure matrice, Person ne lui garantit que la meilleure interface résultera automatiquement de leur association nous nous intéressons dans ce chapitre à l'interface fibre/matrice dans les composites.

II.1 Définition de l'interface

L'interface est un terme utilisé dans le domaine des matériaux composites, pour décrire la surface ou la zone qui sépare la fibre et la matrice (discontinuité macroscopique) (figure II.1). C'est dans cette zone que s'effectue précisément le transfert de charge de la matrice vers le renfort (ou vice versa) et elle est également le siège de concentration de contraintes résiduelles lors de la préparation du composite [17].

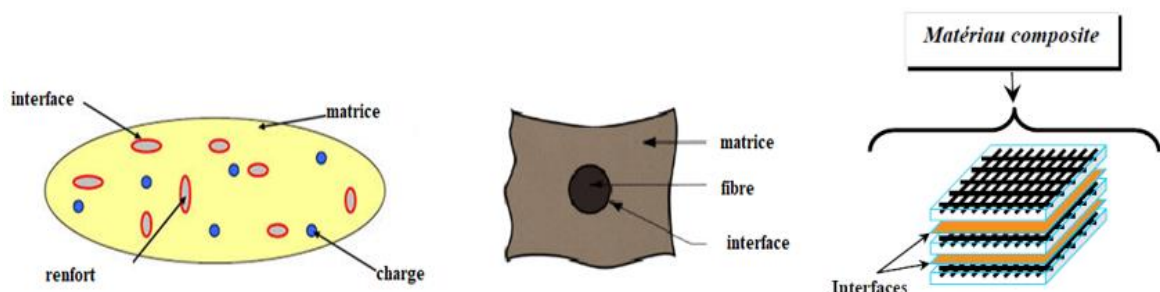


Figure II.1 : Concept d'interface

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

- Les interfaces générées par le procédé de mise en œuvre de matériaux. L'interface inter plis, définie par la superposition des plis et intra plis ou inter mèche au niveau d'un pli.
- Les interfaces liées à la structure elle-même de composite créée par l'association des constituants de base (renfort/matrice) [18].

II.2 L'interphase

L'interphase est un milieu continu qui peut être une zone de réaction chimique formée par les constituants du composite lors de son élaboration, ou une fine couche introduite volontairement dans le but de protéger la fibre ou de contrôler la liaison interfaciale [19].

Elle joue un rôle fondamental dans le comportement mécanique des composites car elle est le siège des mécanismes d'interaction entre les fibres et la matrice. Elle permet d'optimiser les phénomènes de déviation de fissures, de transfert de charge fibre/matrice et parfois même de ralentir l'accès de l'oxygène jusqu'à la fibre.

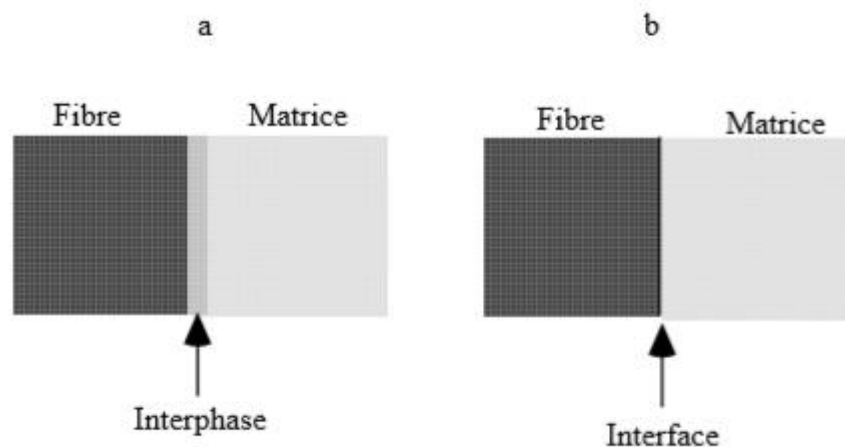


Figure II.2 : Concepts d'interphase (a) et d'interface (b)

II.3 La Zone interfaciale

Les composites à fibres sont généralement composés de deux matériaux aux propriétés mécaniques différentes et de deux interfaces: fibre/ensimage et résine/ensimage. L'ensimage est une opération de lubrification réalisée en sortie de filière sur les fils de base.

Le filament est revêtu d'une pellicule d'ensimage constituée, en général, d'une dispersion aqueuse de divers composés chimiques présentant chacun une fonction bien définie. Cet ensimage est ensuite enlevé et remplacé par l'ensimage définitif à base de silane pour accrochage.

Il forme donc une interface qui constitue et assure la continuité. Elle peut être considérée comme un troisième constituant avec des propriétés mécaniques particulières, si son épaisseur n'est pas négligeable [20].

La contrainte appliquée sur la matrice est transmise à la fibre par l'intermédiaire de l'interface. Ses propriétés ont donc une influence importante sur les propriétés du composite. L'interface joue un rôle primordial dans la résistance à la propagation des fissures.

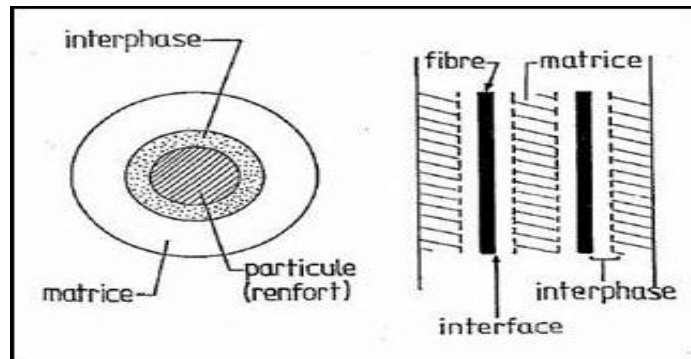


Figure II.3 : Représentation schématique d'un composite unidirectionnel et de ses zones interfaciales.

II.4 Zone de contact: interface/interphase

L'interface se formant au cours du procédé même d'élaboration du composite, et le contrôle de ce procédé est d'importance majeure pour l'industriel; (contamination des surfaces, phénomènes de diffusion, gradients thermiques, etc.), sont autant de paramètres qui influent sur la constitution de l'interface. Celle-ci peut être le lieu où se concentrent les défauts de toutes sortes constituant ce que Bikerman [21] a appelé couches limites faibles ; (porosité et humidité, couches de réaction formées de produits fragiles, gradients de contrainte ou de composition, modifications de texture cristalline, etc.)

Toute une théorie de l'adhésion fibre/matrice a pu être élaborée par Bikerman à partir d'une classification des principaux défauts susceptibles d'être rencontrés. Bien que la caractérisation de l'interphase apparaisse délicate, la prise en compte de cette région s'avère indispensable pour une meilleure compréhension du comportement des composites, plusieurs propriétés du matériau composite lui sont attribuées.

II.4.1 Observation de l'interface

Les observations directes ou la mise en évidence d'une région douée de caractéristiques spécifiques sont possibles dans un petit nombre de cas.

On observe ainsi facilement en microscopie optique la couche de carbone pyrolytique qui protège la fibre de carbure de silicium dans les composites à matrice de titane (figure II.4a). De même, lorsque la matrice polymère est susceptible de cristalliser, une organisation

dite transcristalline se développe à partir des fibres jouant le rôle de germes, aisément identifiable en lumière polarisée. À une échelle encore plus réduite (figure II.4b), on observe en microscopie à haute résolution la zone de contact entre la surface relativement bien ordonnée des fibres de carbone et la matrice amorphe de résine [22].

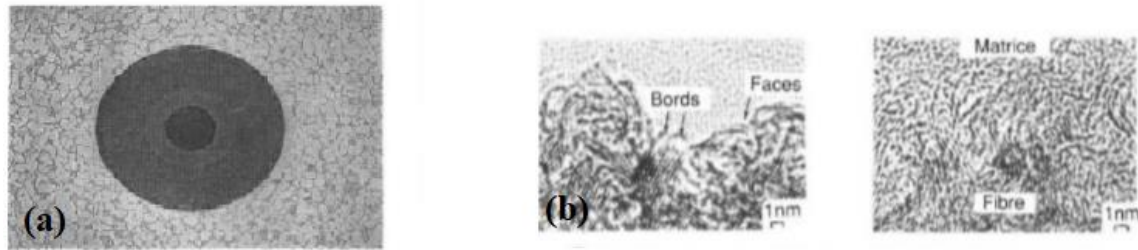


Figure II.4 :L'interface dans les composite carbone/résine

II.5 Comportement d'un composite unidirectionnel

Dans un composite unidirectionnelle sollicitée parallèlement aux fibres, le comportement à rupture peut être imaginé comme étant constitué des séquences suivantes :

-Cas des fibres et matrice subissent la même déformation :

Le composite possède donc un comportement linéaire élastique jusqu'à l'apparition d'une première fissure matricielle. Cette fissure se propage et s'approche d'une fibre, ensuite on peut distinguer les cas suivants [23] :

II.5.1 Interface fibre/matrice très forte (interface liée)

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

II.5.2 Interface fibre matrice très faible (non liée)

Dans le cas des liaisons fibre/matrice faibles, les modèles supposent que les fibres et la matrice ne sont pas ou plus physiquement liées sur une certaine distance, et le déplacement relatif entre les deux se fait avec un frottement interfacial constant.

Dans le cas des composites à matrice céramique, l'intensité de cette contrainte résulte de la superposition de plusieurs phénomènes intervenant à l'interface fibre/matrice.

II.5.3 Interface fibre/matrice intermédiaire

Dans le cas d'une force de liaison fibre/matrice intermédiaire, le composite présente un comportement dit pseudo-ductile, provenant de la multifissuration progressive de la matrice et du transfert des efforts des zones rompues vers les zones plus rigides. La rigidité du matériau diminue alors progressivement au cours de la sollicitation. Ce type de comportement permet au composite d'avoir une contrainte à la rupture plus élevée que dans les deux cas précédents. Ce dernier cas est bien entendu celui souhaité pour un composite optimal [23].

II.6 Rôle des interfaces et des interphases

Il est reconnu que le comportement mécanique des composites à matrice céramique à renforts fibreux dépend fortement de la liaison entre fibre et matrice, qui s'est établie entre les constituants lors de l'élaboration du composite. Les CMC ont un comportement fragile si cette liaison est forte (i.e. proche de celui de la matrice monolithique) et, non fragile si cette liaison est suffisamment faible. Cette liaison est constituée d'une ou plusieurs interphases et interfaces. L'Interphase est une zone concentrique à la fibre, d'épaisseur fine (en général quelques 10 ou 100 nm) et de nature chimique définie (formée par un ou plusieurs constituants élémentaires du composite lors de son élaboration). Elle peut être également une fine couche introduite volontairement dans le but de protéger la fibre ou de contrôler la liaison interfaciale, ou bien encore de contribuer à améliorer la compatibilité chimique fibre/matrice. Les interfaces désignent les surfaces séparant les interphases entre elles ou une interphase de la fibre ou de la matrice [24]. Dans le but de :

- Assurer la compatibilité entre le renfort et la matrice ;
- Transfer des charges de la matrice vers le renfort ;
- Assurer la continuité physique d'un constituant à Travers tous le matériau ;
- La déviation des fissures matricielles.

II.7 Caractéristiques des phases pour une liaison compatible

Lorsque leur qualité propre n'est pas en jeu, les phases ne vont former un ensemble harmonieux et donner le matériau attendu que si l'interface résultante de leur association remplit pour sa part les fonctions attendues. un préalable est donc de s'assurer que les surfaces

qui se trouvent en contact présentent les qualités requises, en s'intéressant aux caractéristiques qui vont se trouver a priori concernées:

- Les caractéristiques de surface pour les charges ou le renfort;
- L'ensemble de leurs propriétés pour la matrice ou le liant.

Ces caractéristiques sont les seules à pouvoir être mesurées avant la réalisation du matériau et elles sont donc souvent employées pour le contrôle [25].

II.7.1 Surface du renfort

Toutes les techniques d'investigation des propriétés des surfaces solides peuvent être mises à contribution :

- Mesures de rugosité et d'aire spécifique ;
- Microscopies optique et électronique ;
- Dosage fonctionnel des groupements présents en surface ou analyse des produits absorbés et qui risquent de se localiser à l'interface ultérieurement (vapeur d'eau, oxygène, etc.) ;
- Technique spectroscopique pour analyser la composition des couches superficielles ;
- Techniques thermodynamiques pour déterminer les énergies disponibles pour l'interaction avec la matrice : mesures d'angle de mouillage, enthalpies d'absorption, chromatographie en phase inverse, etc.

Ces techniques sont largement utilisées pour comparer entre eux des traitements de surface [25].

II.7.2 Propriétés de la matrice et de liant

Formant la phase continue du composite, ce sont leurs propriétés en masse qui sont importantes [25] :

- Module d'élasticité et résistance, résistance à la propagation des fissures, durée de vie de matériau, tenue à l'environnement au sens large (les matériaux polymères doivent résister à l'humidité, surtout dans le cas où les fibres y sont sensibles ;
- L'innocuité de la matrice vis-à-vis du renfort ou de la charge est essentielle lorsque une attaque ou une corrosion de ceux-ci sont à craindre au cours d'élaboration à haute température).

II.7.3 Produit d'ensimage

La phase d'ensimage est une opération qui consiste à déposer en sortie de filière, sur les fils de base, une dispersion aqueuse de composés chimiques dans le but d'assurer :

- Cohésion entre filaments,
- Protection contre l'abrasion,
- Raideur,
- Liaison verre / résine,
- Imprégnation par la résine à la mise en œuvre,
- Elimination des charges électrostatiques.

Jouant le rôle d'une interface entre les fibres et la résine d'un matériau composite. Elle a aussi pour objet un procédé de fabrication d'un matériau composite comportant des fibres ensimées ainsi que le matériau obtenu.

Ces matériaux composites peuvent être simples ou complexes et sont en particulier utilisés dans le domaine de l'automobile, de l'aéronautique, du spatial, de la navigation, etc. ; dans le domaine de l'aéronautique et du spatial, ils sont plus spécialement utilisés pour la fabrication des propulseurs, des planchers et bord d'attaque des avions.

Le type d'ensimage est fonction à la fois du procédé de transformation et de la nature chimique des résines. En pratique, c'est un ensemble relativement complexe essentiellement constitué des éléments suivants, chacun ayant une fonction bien spécifique et une nature chimique particulier [26]:

- Liant (3% à 15%) ;
- Lubrifiant (0,05 à 2%) ;
- Agent de pontage (0,1 à 0,5%) ;
- Agent antistatique.

II.7.4 Transfert de charge entre fibre et matrice

L'interface est l'endroit où se produit un mécanisme important, tel que le transfert de charge entre fibre et matrice au sein d'un matériau composite [27]. Ce transfert de charge dépend entièrement de la réponse mécanique de la zone de contact entre la fibre et la matrice, c'est-à-dire l'interface ou l'interphase. Lorsque les composites sont soumis à diverses conditions de chargement, l'efficacité du transfert de charge à travers l'interface joue un rôle important dans les performances globales du composite [28]. C'est cette transmission de charge qui permet au composite de remplir sa fonction mécanique. Les processus de transfert

de charge peuvent être décrits avec des modèles micromécaniques simplifiés en considérant, par exemple, un RVE (élément de volume représentatif) constitué d'une fibre encastrée dans un cylindre matriciel auquel une contrainte de traction est appliquée. Le profil de la contrainte de traction dans la fibre et celui du cisaillement à l'interface peuvent être déterminé théoriquement à partir des équations d'équilibre élastique. À partir de ces données, il est possible d'évaluer la courbe contrainte-déformation du composite.

II.8 Comportement de l'interface

Les caractéristiques de l'interface sont fonction de plusieurs paramètres:

- Les propriétés physicochimiques des constituants (fibres et matrice),
- La microstructure de l'interface (interphase et rugosité),
- Les contraintes thermiques résiduelles, la méthode d'élaboration du composite, etc.

Il est donc évident que la qualité des liaisons interfaciales (faibles ou fortes) et la résistance au frottement sont des paramètres déterminant le comportement du composite (figure II.5).

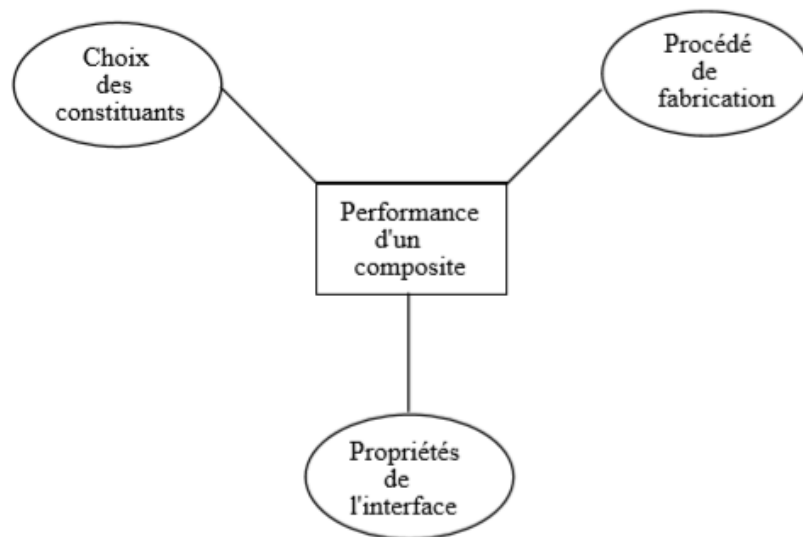


Figure II.5 : Paramètres qui conditionnent les performances d'un composite

En effet, il est reconnu que le comportement mécanique des matériaux composites dépend fortement de la liaison fibre/matrice qui s'établit entre les constituants lors de l'élaboration du composite. Cette liaison est constituée d'une ou plusieurs interphases et interfaces [29].

II.9 Interface fibre/matrice

La liaison entre fibre et matrice dépend généralement de l'arrangement atomique et moléculaire ainsi que des compositions chimiques de la fibre et de la matrice. Cependant, les propriétés morphologiques et la capacité de diffusion de chaque matériau sont aussi à prendre en compte dans la compréhension des phénomènes interfaciaux. Plusieurs facteurs peuvent donc influencer l'interface et le transfert de charge entre fibre et matrice. Généralement, il s'agit de la contribution de plusieurs facteurs.

Afin d'améliorer l'adhésion fibre/matrice, la fibre est traitée chimiquement ou physiquement. Dans le cas des fibres de verre ou de carbone, la fibre est revêtue d'une substance chimique dite ensimage qui dépend du type de la fibre et de la matrice. Cependant, ces ensimages sont optimisés pour les thermodurcissables et peu pour les thermoplastiques.

Les phénomènes mis en jeu au niveau de l'interface peuvent être décrit par différents mécanismes.

II.9.1 Enchevêtrement moléculaire et interdiffusion:

Une interdiffusion peut avoir lieu entre des atomes ou des molécules au niveau de l'interface (figure II.6). Les chaînes de polymère de chaque composant s'enchevêtrent et se mêlent ensemble formant une zone intermédiaire de nature particulière. Les liaisons entre les chaînes, la longueur des chaînes, ainsi que le nombre de liaisons mis en jeu au niveau de l'interface déterminent la force d'adhésion fibre/matrice [30].

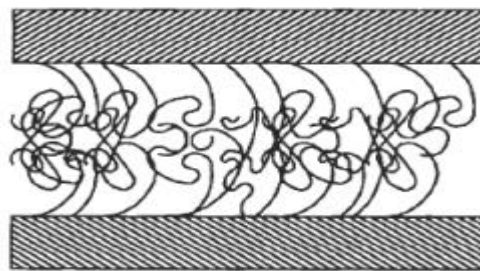


Figure II.6 : Enchevêtrement moléculaire (Kim et Mal, 1998)

II.9.2 Réaction chimique

Cette liaison a lieu lorsque des groupes chimiques d'une surface A réagissent avec des groupes compatibles d'une surface adjacente B (Figure II.7). La force de la liaison dépend étroitement du type de la liaison ainsi que du nombre de liaisons par unité de surface. Par

exemple, le traitement d'oxydation des fibres de carbone est largement connu et favorise une meilleure interface avec différents types de polymères [31]. Le cas le plus classique est la liaison fibre de verre/TD. Les fibres de verre sont revêtues de silanols qui réagissent dans un premier temps avec la surface de la fibre et puis avec le polymère thermodurcissable au moment de l'imprégnation [32].

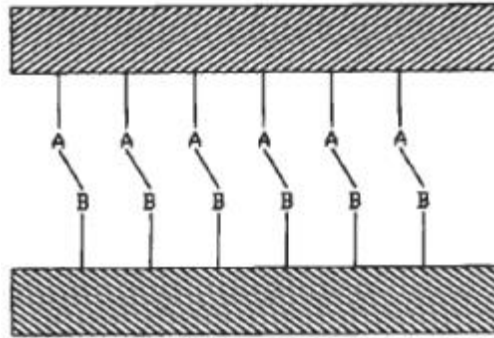


Figure II.7 : Réaction chimique entre les groupes A sur une surface et les groupes B sur l'autre surface [28]

II.9.3 Attraction électrostatique

Ce type de liaison peut se produire lorsqu'il y a une différence de charge électrostatique entre les constituants au niveau de l'interface (Figure II.8). La force de liaison dépend dans ce cas de la densité surfacique de charge. Cette force est généralement faible et participe peu à la liaison finale fibre/matrice.

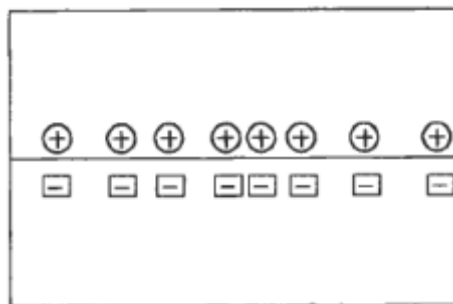


Figure II.8 : Attraction électrostatique [28]

II.9.4 Emboîtement mécanique

Un verrouillage mécanique intervient lorsque les surfaces sont intimement en contact en épousant les géométries adjacentes. L'existence ou la formation d'ondulations ou d'aspérités

au niveau de la surface peut permettre une meilleure adhésion fibre/matrice. Les différentes modifications de la morphologie de surface donnent lieu des sites d'ancrage (Figure II.9).

Les fibres naturelles ont généralement des surfaces rugueuses et des liaisons mécaniques peuvent avoir lieu. La résistance au cisaillement longitudinal peut être importante selon le degré de rugosité.

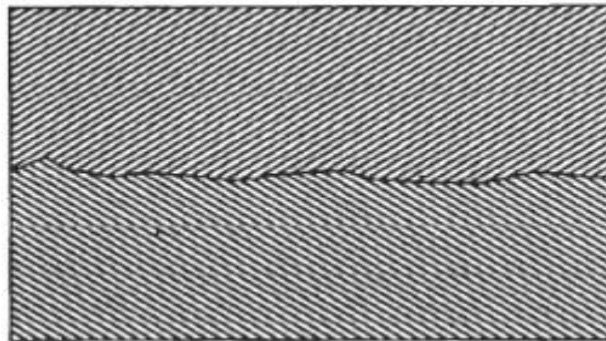


Figure II.9 : *Emboîtement mécanique [29]*

II.10 Mécanisme de dégradation de l'interface

Parmi les différents types de mécanisme de dégradation, des études académiques sont envisageable lorsque la durabilité est gouvernée par des phénomènes chimiques intervenant sur la matrice. des études d'hydrolyse réalisées sur matrices pures conduisent à des résultats pouvant être extrapolés à l'échelle de matériau composite et servir de critère de choix des matériaux. Dans les composite où la matrice ne subit à priori pas d'hydrolyse, deux mécanismes de dégradation sont susceptibles de jouer un rôle à long terme : les gonflements différentiels et l'interaction de l'eau avec les zones interfaciales.

Dans les conditions relativement douces d'exposition, la diffusion de l'eau est faible et les contrainte induites par le gonflement différentiel sont en deçà des seuils d'endommagement la cause majeure du vieillissement devient alors la dégradation des zones interfaciale.

Lorsque la durabilité est gouverné par la tenue de l'interphase. la détermination de constant de temps, caractéristique de la dégradation de l'interphase relève d'une approche empirique qui ignore les propriétés spécifiques de ce composant, en particulier son caractère hybride inorganique/organique(I/O) et les mécanisme physico-chimique de dégradation qui en résultent. les dimensions de cette phase, ainsi que la nécessité de réaliser une approche insitu en rendent en effet la caractérisation expérimentale délicate. D'autre part, la diversité des composants (comonomères du mélange réactif pouvant conduire à différentes chimies de

polymérisation, ensimage des fibres dont la composition exacte est maintenue secrète, diamètre des fibres) conduisent à des interphases présentant des propriétés et donc une résistance hydrolytique différentes.

II.11 Conclusion

Les propriétés mécaniques des matériaux composites dépend de la nature et structure d'interface et d'interphase qui existe entre la fibre et la matrice, cette interface joue sur les performances de ces matériaux, son rôle est d'assurer une liaison intime fibre/matrice et la déviation des fissure matricielle. Pour connaître mieux les propriétés et les caractéristiques mécaniques qui se présentent comme un paramètre très important dans l'étude des matériaux, on présentera les essais mécaniques dans le chapitre trois.

III.Introduction

La connaissance des caractéristiques fonctionnelles d'un matériau composite et sa structure permettent de comprendre, voire de prédire son comportement en service. Afin de caractériser son comportement dans des conditions bien précises, nous avons recours à un certain nombre d'essais. Les essais mécaniques traditionnels en traction, flexion, cisaillement ou compression sont plus souvent utilisés pour qualifier succinctement l'interface fibre/matrice de « faible » ou « forte », « bonne » ou « mauvaise ». En effet, le niveau d'adhésion fibre/ matrice influe dans une certaine mesure sur les lois de comportement des composites.

III.1 Techniques de mesure

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

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

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

➤ **Méthodes directes** :

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

- Le test déchaussement " Pull-out" (traction sur une seule fibre afin de l'extraire de sa gaine matricielle) ;
- les tests d'indentation : l'indentation classique et le "push-out" et le "push-back" (Enfoncement d'une fibre afin de la faire glisser dans la matrice) ;

- Le test de fragmentation sur un composite monofilamentaire (le composite modèle est sollicité en traction) ;
- Le test “slice” (compression d’un composite modèle entre deux plaques : inférieur rigide et supérieur ductile).

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

III.2 Essais sur éprouvettes modèles

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

III.2.1 Essai de déchaussement (pull-out)

Il existe différents essais micromécaniques (fragmentation, pull-out, déchaussement de microgoutte...) pour évaluer la résistance au cisaillement de l’interface fibre/matrice.

Un des essais les plus utilisé est le déchaussement. Cette manipulation consiste à déposer une goutte de résine autour d’une fibre puis à positionner le tout au niveau d’un mors mobile sur une machine de traction (figure III.1). Enfin la fibre est soumise à un effort de traction jusqu’au déchaussement de la goutte de résine pour caractériser l’évolution de l’interface [33], cette approche basé sur un critère de contrainte pour une configuration géométrique se rapprochant au mieux de la configuration réelle du test.

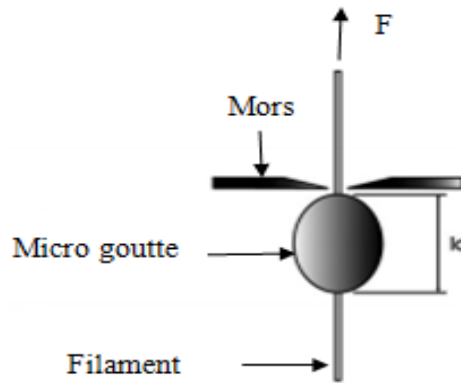


Figure III.1 : Schéma représentatif d'un essai de déchaussement

Cet essai présente l'avantage de permettre le contrôle de la longueur de goutte enchâssée et d'étudier le mouillage (angle de contact). Une machine de traction (MTS Synergie) équipée d'un capteur 2N est utilisée. Le support papier est découpé puis la fibre est fixée au mors supérieur. Ensuite la fibre est sollicitée en traction à 0.1 mm/min alors que la goutte est bloquée par deux couteaux contrôlés par des vis micrométriques. Des contraintes de cisaillement sont ainsi générées à l'interface fibre/matrice. La force et le déplacement sont enregistrés, et permettent d'identifier la force nécessaire au déchaussement de la goutte ainsi que les forces de friction. Lors de l'essai, sont enregistrés la force ainsi que le déplacement de la traverse (Figure III.2).

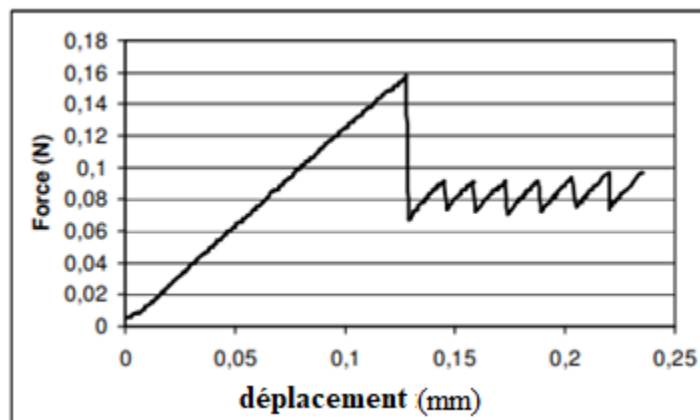


Figure III.2 : Courbe de déchaussement Force sur déplacement

On observe un comportement linéaire jusqu'à la force maximale. L'énergie stockée est libérée ensuite par fissuration rapide de l'interface. Ensuite la microgoutte glisse (figure III.3b) le long de la fibre avec une force de friction oscillant autour d'une valeur presque constante.

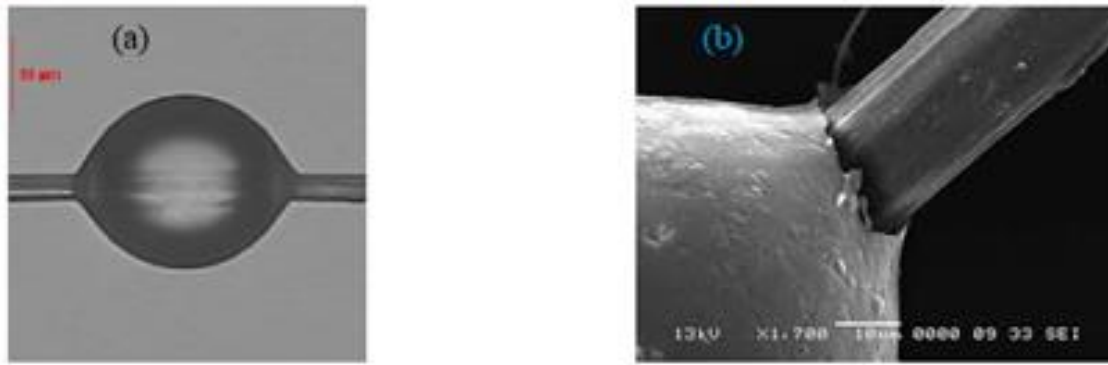


Figure III.3: Exemple de microgoutte de résine déposée sur une fibre de lin :
(a) avant déchaussement, (b) après déchaussement.

Remarque

L'analyse des résultats fait appel à différentes équations de micro mécanique. Le modèle le plus connu est la celui de la contrainte apparente de cisaillement τ_{app} basée sur l'hypothèse d'une répartition uniforme des contraintes interfaciales développé par [34] déterminé selon (l'équation III.1):

$$\tau_{app} = \frac{F_{max}}{2\pi r_f l_e} \quad \text{III.1}$$

Ou : r_f rayon de fibre

l_e Longueur enchâssée de la fibre

F_{max} Force maximal

L'avantage de cette formule est sa simplicité qui permet d'obtenir rapidement des résultats plausibles proches de ceux obtenus par des analyses plus raffinées.

III.2.2 Essai de fragmentation

Conformément à la méthode développée par Kelly et Tyson [35], l'essai est réalisé sur une éprouvette en forme haltère dans laquelle est encapsulée une fibre unique. Pour évaluer la résistance interfaciale « IFSS », on applique à l'échantillon un chargement de traction uniforme. La fibre subit une succession de ruptures à chaque fois que sa résistance en traction est atteinte. Le processus se poursuit jusqu'à ce que les fragments de fibres atteignent une longueur critique l_c (Figure III.4 : a).

Cette saturation intervient lorsque la sollicitation en traction ne peut plus générer un transfert de chargement en cisaillement suffisant pour rompre la fibre et la déchausser de la matrice (Figure III.4 : b) [36].

L'évaluation de la résistance inter-faciale « IFSS » est obtenu partir des mesures la contrainte maximale et de l_c .

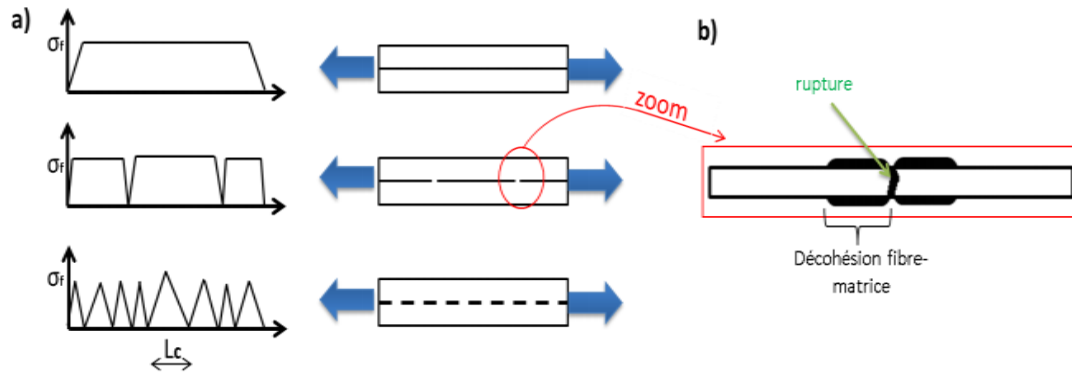


Figure III.4 : a) Processus schématisé du test de fragmentation. b) Rupture par décohesion interfaciale induite par fragmentation.

Ce test est efficace pour la détermination de la résistance de cisaillement de l'interface fibre/matrice surtout quand celle-ci est forte [37], et la relation donnée par l'équation(III.2).

$$\tau_i = \frac{\sigma_{fr}(l_c)d}{l_c} \quad \text{III.2}$$

La mesure de résistance interfaciale peut alors être faussée. De plus, cet essai est plus adapté pour les composites à matrice fortement déformable, excluant ainsi une grande majorité des systèmes à résine thermodure.

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

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

- Mesuré directement en utilisant une fibre de longueur l_c qui est très délicate ;
- Déterminé par extrapolation à $l=l_c$ des mesures obtenues pour différentes longueurs ;
- Approximée à partir de la distribution de résistance pour une longueur l donnée en appliquant la loi statique de Weibull.

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

- Déterminé à partir de la distribution des longueurs en utilisant une loi de Weibull
- Calculé approximativement en utilisant (équation III.3)

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

III.3

Avec L longueur de l'éprouvette ;

N nombre de rupture de la fibre.

On peut obtenir N et L par :

- Par émission acoustique (une rupture= un événement acoustique d'où N) ;
- Par microscopie a transmission en lumière polarisée (observation à travers une matrice transparent d'où N et L)

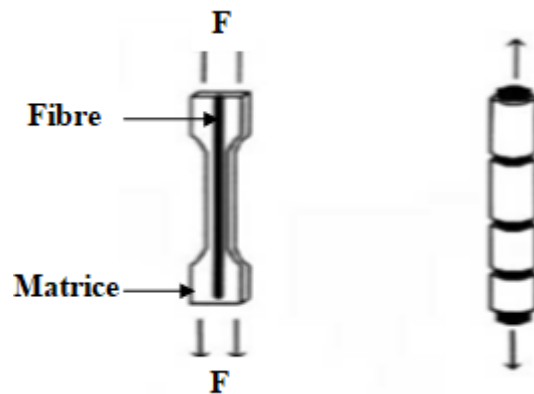


Figure III.5 : Essai de fragmentation.

La longueur de fragment critique a été discutée en détail dans [38]. Considérons une seule fibre intégrée dans un matériau matriciel (figure III.5), lorsque l'éprouvette est ensuite soumise à la tension axiale. Si le système est allongé, la contrainte est transférable à la fibre en une fois la distance x de l'extrémité de la fibre est donnée par:

$$\sigma_x = \frac{4\tau}{d} x \quad \text{III.4}$$

Lorsque l'échantillon est encore allongé, la contrainte de traction de la fibre σ_x , augmente jusqu'à ce qu'il atteigne la résistance ultime de la fibre σ_f . Si la valeur de x à ce particulier point est conçu en tant que x_0 , les relations suivantes résultent

$$\sigma_f = \frac{4\tau}{d} x_0 \quad \text{III.5}$$

III.2.3 Essai d'indentation

L'essai d'indentation instrumenté est un essai micromécanique permettant de sonder les propriétés mécaniques de l'interface fibre/matrice, le coefficient de frottement et la contrainte radiale résiduel, d'après J.Ye, A.K.KAW [39]. Sa mise en œuvre est généralement simple, rapide et souvent non destructive. L'essai trouve naturellement une place de choix dans l'étude multi échelle de la mécanique des matériaux. Les phénomènes mis en jeu lors d'un tel essai sont cependant complexes et nécessitent une certaine connaissance préalable des matériaux étudié. Les recherches liées à l'indentation relèvent ainsi beaucoup de la compréhension des mécanismes internes au matériau et de leur contribution lors d'un essai. La modélisation analytique et numérique de l'essai est alors des outils incontournables pour la compréhension de l'indentation.

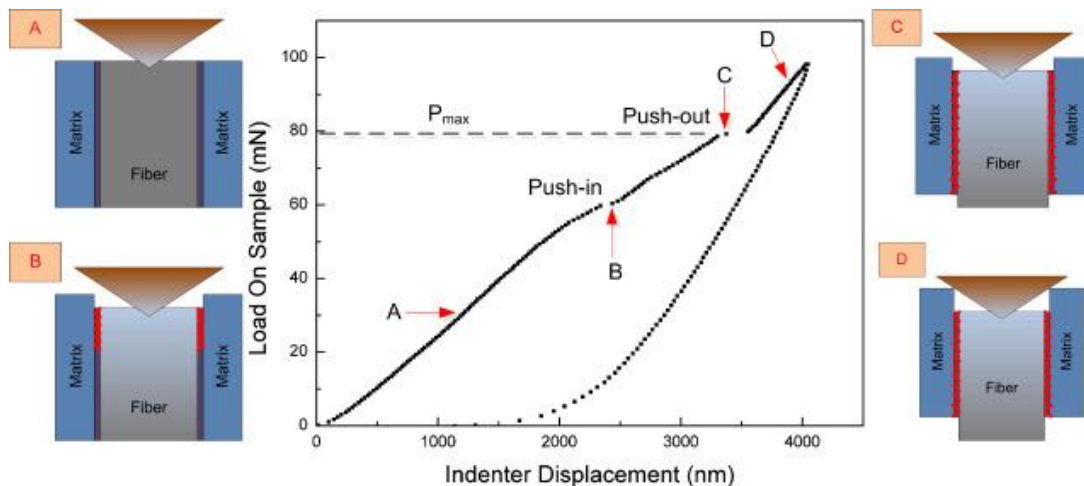


Figure III.6: Schéma de l'essai d'indentation

Cette méthode est actuellement dotée d'un processus de prise de mesure et d'acquisition de donnée totalement automatisé [40]. elle nécessite le polissage d'échantillons de composite présentant des fibres perpendiculaire à la surface, et consiste à enfoncer, à l'aide d'un indenteur sur l'extrémité d'une fibre jusqu'à décohésion de la fibre de sa gain de matrice (figure III.6), pour pouvoir accéder à une caractéristique de l'interface fibre /matrice. l'accostage finale de l'indenteur dans la matrice environnante constituant un critère d'arrêt de l'essai.

Ce teste est le plus proche de la réalité par ce que nous utilisons un produit finis qui intègre les paramètres de fabrication de matériaux.

III.2.3.1 L'indenteur

Le choix de l'indenteur est la première étape d'un tel essai. Celui-ci conditionne la mécanique de l'essai et par conséquent les grandeurs exploitables ainsi que les diverses méthodes et modèles adaptés pour les déterminer. Ce choix est double : celui du matériau constitutif de l'indenteur et celui de sa forme.

III.2.3.2 La géométrie de l'indenteur

La géométrie de l'indenteur conditionne la forme du contact. Deux grandes familles d'indenteurs sont présentes :

- les indenteurs auto similaires dont la forme est un cône au sens large ;
- La seconde famille comprend tous les autres indenteurs dont la forme ne peut être assimilée à un cône.

III.2.4 Le test slice (compression)

La méthode de compression enfin, a été développée par MOONEY & Mc GARRY [41] puis BROUTMAN [42]. Cette méthode consiste à solliciter en compression des éprouvettes parallélépipédiques ou en forme d'haltères afin de déterminer la contrainte de compression pour laquelle un début de décohésion est détecté. Ce test sollicite à la fois les fibres et la matrice et interposer entre la surface du composite et les éléments de la machine de compression, une plaque métallique généralement en aluminium. La géométrie de l'échantillon ou la différence de coefficients de Poissons entre fibre et matrice et leurs rigidités, engendrent des contraintes de cisaillement ou de traction à l'interface. La décohésion aux interfaces est détectée soit au niveau de l'étranglement [43] soit au niveau des extrémités de la fibre et se propage sur une longueur critique L_c à vitesse constante qui croît ensuite brusquement et s'amorce pendant le chargement. Si les fibres sont plus rigides que la matrice, la déformation de cette dernière est plus grande pendant le déplacement imposé de la traverse. Les fibres débordent de la matrice et laissent des empreintes sur la plaque métallique supposée parfaitement plastique [44]. La profondeur de ces empreintes correspond au déplacement maximal des fibres pendant le chargement du composite, leur déplacement résiduel est mesuré directement sur le composite. La détection de la décohésion est assurée optiquement au moyen d'une lampe (dans le cas des résines transparentes) ou par émission acoustique. Cette technique est actuellement pratiquement abandonnée en raison notamment des difficultés liées à la fabrication des éprouvettes et à l'application des critères

d'endommagement en raison des effets de concentration de contraintes difficilement contrôlables, et ce, en dépit de l'aide apportée par l'émission acoustique en matière de détection des décohésions. La mesure indirecte du déplacement des fibres rend ces essais difficiles à interpréter.

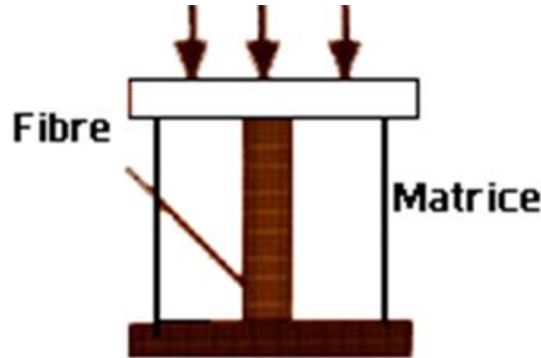


Figure III.7: Principe de test slice (compression).

Il est important de noter que dans toutes les méthodes faisant appel à des composites modèles mono filamentaires (compression, pull-out, fragmentation), la fibre se trouve dans un état de contrainte totalement irréaliste, par rapport à celui régnant in situ dans un composite réel. Cet inconvénient majeur est évité dans le cas de la micro indentation.

III.3 Essais sur produits finis

III.3.1 Essai statique

Les essais statiques sont des essais effectués sur des éprouvettes normalisées de matière. Il s'agit d'appliquer une contrainte constante jusqu'à ce qu'il y ait rupture de l'éprouvette. Ils permettent de mesurer la résistance mécanique d'un matériau, d'étudier son comportement à l'aide de différents indicateurs comme l'allongement, le module de Young, etc...[45].

III.3.1.1 Traction longitudinale

La traction est parmi les essais les plus utilisés afin de déterminer les propriétés mécaniques de matériaux (la limite élastique σ_e , la contrainte à la rupture σ_r , le module de Young E , la contrainte maximale de traction σ_{tr}). Il consiste de mettre un modèle en traction jusqu'à la rupture comme indiqué dans la (figure III.8).

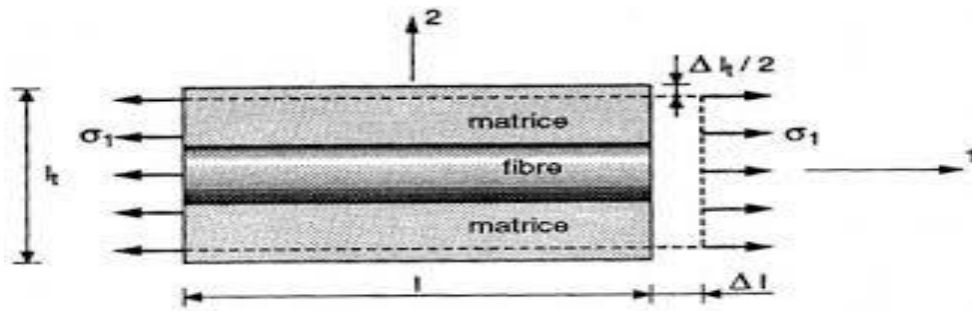


Figure III.8 : Traction longitudinale

La contrainte σ_1 est la charge appliquée F_1 sur la section droite S_1 de matériaux. La contrainte normale

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{S_1} \quad \text{III.6}$$

La déformation

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad \text{III.7}$$

Le module longitudinal

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad \text{III.8}$$

III.3.1.2 Traction transversale

Toutes les fibres sont à 90° . L'effort F est appliqué suivant le sens de trame (direction transverse aux fibres) (figure III.9).

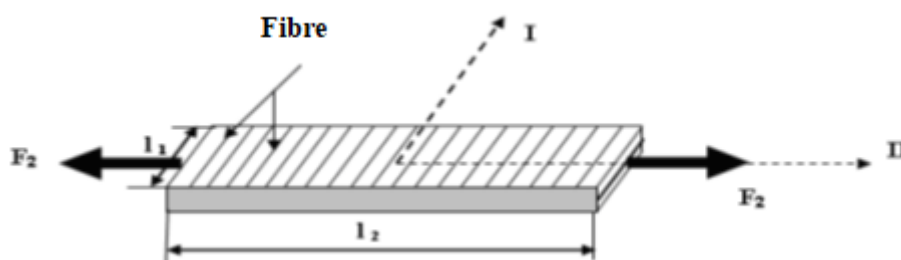


Figure III.9 : Traction transversale

La contrainte normale est :

$$\sigma = \frac{f}{s} \quad \text{III.9}$$

Avec :

s : Section droite du matériau sur laquelle s'exerce la charge

Le module de Yong et le coefficient de Poisson sont :

$$E = \frac{\delta}{\varepsilon} \quad \text{III.10}$$

$$\vartheta = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad \text{III.11}$$

III.3.1.3 Traction hors axes (essai de traction à 45°)

L'essai de traction hors axes usuellement utilise pour mesurer le module de cisaillement, est un essai effectuée à 45° de la direction des fibres [46]. La charge F est exercée suivant la direction x sur la section du matériau (figure III.10).

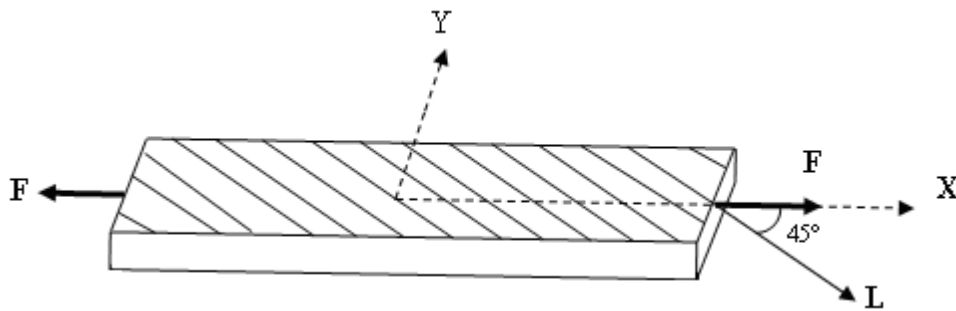


Figure III.10 : Traction hors axes

L'effort F est appliqué à un angle de 45° par rapport aux fibres (les fibres sont inclinées de 45°), cet essai est utilisé pour mesurer le module de cisaillement 45°.

La contrainte normale σ_{xx} est donnée par :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S} \quad \text{III.12}$$

Le module de Young dans la direction x s'exprime par :

$$E_{45} = E_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad \text{III.13}$$

Le module de cisaillement longitudinal G_{LT} est donné par :

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{1}{E_{45}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} + 2 \frac{\vartheta}{E_L} \quad \text{III.14}$$

Remarque

Il est nécessaire de bien veiller à ce que, lors d'un essai de traction longitudinale, la direction de la charge appliquée coïncide réellement avec la direction des fibres. Un désalignement, même faible, peut entraîner, dans le cas d'un composite unidirectionnel, des valeurs mesurées nettement plus faibles que les valeurs réelles du module d'Young

longitudinal. Ce problème n'est pas aussi critique dans le cas d'un essai de traction transversale [46].

III.3.1.4 Essai de compression

Un essai de compression mesure la résistance à la compression d'un matériau sur une machine d'essais mécaniques suivant un protocole normalisé. Les essais de compression se font souvent sur le même appareil que l'essai de traction mais en appliquant la charge en compression au lieu de l'appliquer en traction (figure III.11).

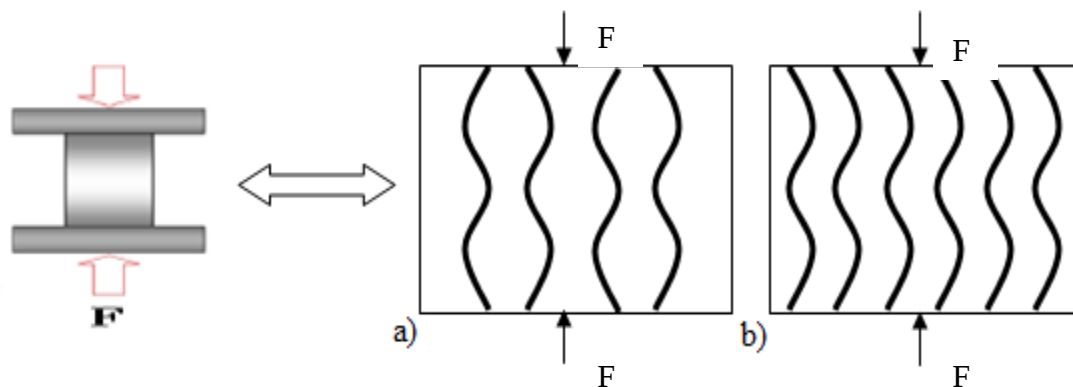


Figure III.11 : Essai de compression

Cet essai détermine la contrainte à la rupture en compression qui est définie par la formule (III.15) :

$$\sigma_r = \frac{F}{l.h} \quad \text{III.15}$$

Avec :

- F charges à la rupture ;
- l Longueur de l'éprouvette ;
- h épaisseur de l'éprouvette.

ROSEN, est le premier à avoir associé la contrainte à la rupture en compression du composite aux propriétés élastiques de la résine, il met en jeu deux mécanismes d'endommagements par micro flambage des fibres de renforcement.

- a) mode en extension, taux de fibres faible ;
- b) mode en cisaillement, taux de fibres élevé.

III.3.1.5 Essai de flexion

L'essai de flexion d'une poutre est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion. Il y a plusieurs types, on cite : l'essai de flexion trois points, l'essai de flexion quatre points, l'essai de flexion par flambement...

Cet essai est très souvent pratiqué pour mesurer des caractéristiques telles que le module d'Young et la résistance en flexion, la flèche maximale... Il nécessite des charges plus faibles que la traction et les mesures de flèches posent moins de problèmes que les mesures d'allongement. Deux configurations peuvent être retenues pour les essais : la flexion trois points et la flexion quatre points, ce dernier cas permettant de bénéficier d'une zone centrale dans laquelle le «moment de flexion» est uniforme [47].

III.3.1.6 Essai de flexion trois point

La flexion provoque une distribution de contraintes présentant à la fois un gradient et une répartition de contraintes de traction et de compression de part et d'autre de la fibre neutre. L'essai de flexion détermine l'aptitude à la déformation d'un matériau sur deux appuis avec une application de l'effort à mi-distance.

On impose à une éprouvette normalisée une déformation, ou flèche, à vitesse de déformation constante, et on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.

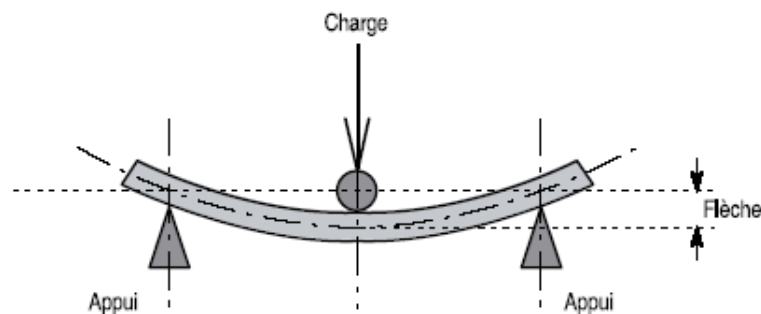


Figure III.12 : Flexion trois points

Cet essai permet de connaître :

- Le comportement mécanique du matériau ;
- Les propriétés du matériau ;
- Les valeurs des caractéristiques du matériau.

La variation de la contrainte normale σ_f est donnée par la relation :

$$\sigma_f = \pm \frac{3FL}{2bh^3} \quad \text{III.16}$$

Et la contrainte de cisaillement inter laminaire τ est donnée par la relation :

$$\tau = \frac{3F}{4bh} \quad \text{III.17}$$

Pour la raison de symétrie, les réactions aux appuis sont :

$$R_A = R_B = \frac{F}{2} \quad \text{III.18}$$

La flèche est maximale au centre de la poutre, c'est-à-dire pour la valeur $x = L/2$:

$$f_{\max} = \frac{F.L.3}{48.E.I} \quad \text{III.19}$$

L'expression de la déformation :

$$\epsilon_{\max} = \frac{6f.h}{L^2} \quad \text{III.20}$$

III.3.1.7 Essai de flexion quatre points

L'essai de flexion a quatre points consiste à exercer entre les appuis deux points d'applications de la charge, distants de L , ou l'effort tranchant est nul dans la zone des contraintes maximales.

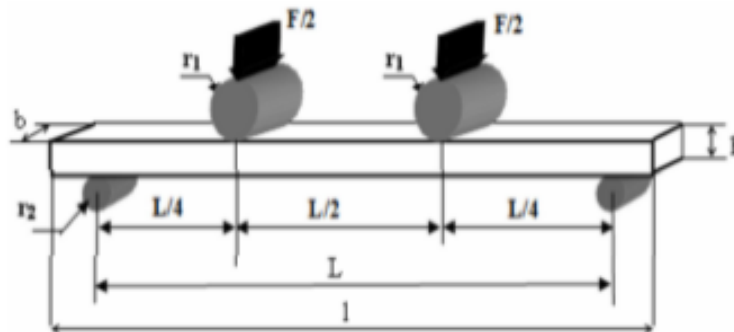


Figure III.13: Essai de flexion quatre points.

La contrainte de flexion s'exprime :

$$\sigma_{fl} = \frac{3FL}{4bh^2} \quad \text{III.21}$$

Le module de flexion :

$$E_{fl} = \frac{11L^3F}{64bh^3f} \quad \text{III.22}$$

III.3.1.8 Essai de flexion par flambement

Lorsqu'on exerce un effort de compression sur une poutre bi-articulée a fort élancement, la ruine de la structure ne se produit pas par rupture en compression comme le prédit la résistance des matériaux, mais par un phénomène de courbure de grande amplitude appelée flambement (figure III.14).

$$P_c = \frac{E.I.\pi^2}{L^2}$$

III.23

E : module de Young dans la direction X ;

I : moment d'inertie par rapport à l'axe Z ;

L : longueur initiale de la poutre.

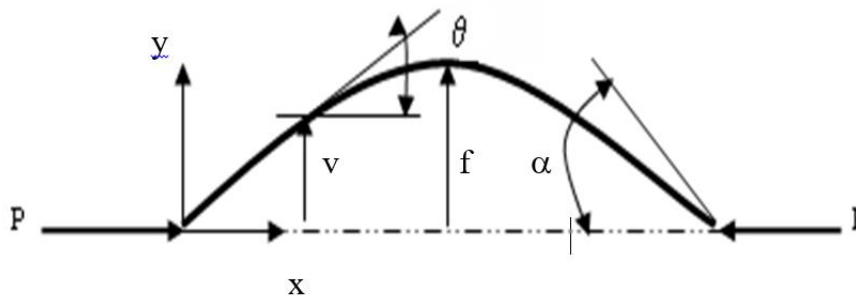


Figure III.14 : Configuration de flambement

Dans cette configuration, la force appliquée crée, au centre de la poutre, un moment fléchissant d'autant plus important que la courbure est grande. On est en présence d'un phénomène d'instabilité. Le seuil est caractérisé par la charge critique d'Euler.

III.3.1.9 Essai de cisaillement

Les essais de cisaillement utilisés pour l'étude des matériaux composites permettent de connaître le comportement au cisaillement (contrainte et module de cisaillement) soit selon une sollicitation dans le plan des couches (cisaillement interlaminaire), soit selon une sollicitation perpendiculaire aux couches [48].

Ces essais sont très souvent difficiles à mettre en œuvre, portant sont très importants pour l'étude d'un matériau composite. Plusieurs méthodes d'essais existent et chacune présente quelques inconvénients.

III.3.2 Essai dynamique

III.3.2.1 Essais Charpy / Izod

Dans ce type d'essai, l'éprouvette entaillée est encastrée à une extrémité tandis que l'extrémité libre est sollicitée en flexion par un pendule. L'essai Charpy est utilisé à partir des normes établies sur des matériaux métalliques, notamment pour dimensionner les éprouvettes.

Il permet de générer des impacts de très faible énergie (inférieure à 10 J). L'énergie absorbée par l'éprouvette lors du choc est fournie par la masse du pendule mis en mouvement. Il en résulte que la vitesse du pendule n'est pas rigoureusement constante pendant la durée de l'essai. Il consiste, souvent, à rompre par l'intermédiaire d'un percuteur en mouvement pendulaire, une éprouvette à section rectangulaire entaillée, sollicitée en flexion trois points. L'impact se produit au centre de la face opposée à la fissure. L'énergie potentielle perdue par ce marteau est considérée comme l'énergie nécessaire à la rupture de l'éprouvette.

Les autres essais se distinguent essentiellement par le mode de sollicitation et de fixation de l'éprouvette.

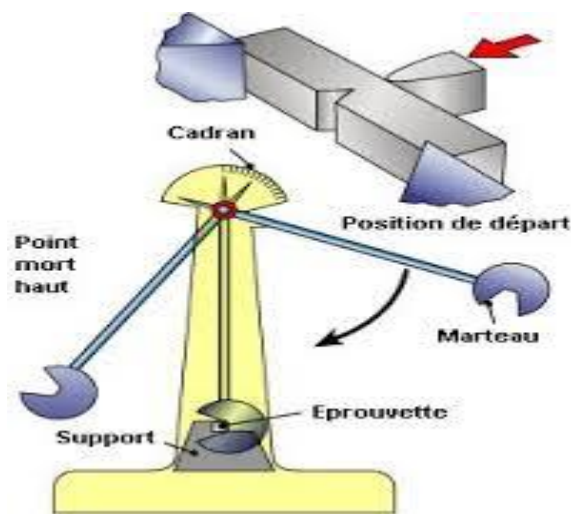


Figure III.15 : Essai de Charpy

L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis. On détermine l'énergie E_R absorbée dont on déduit la résilience. La résilience est l'énergie exprimée en joules par cm^2 nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette [49].

$$\text{Résilience (K)} = \frac{U}{S} = \frac{\text{joule}}{\text{cm}^2} \quad \text{III.24}$$

Avec : U : énergie absorbée par la rupture ;

S : section au droit de l'entaille.

III.3.2.2 Fatigue et endurance

La notion de fatigue ou d'endommagement en fatigue désigne la modification du comportement d'un matériau, suite à l'application répétée d'une sollicitation mécanique cyclique ; conduisant à une rupture prématurée de la pièce pour des amplitudes souvent bien inférieures aux caractéristiques observées en monotone [50]. L'endurance est la capacité du matériau à résister au phénomène de fatigue. Les paramètres caractéristiques d'un cycle de fatigue à déformation (ε) ou contrainte (σ) sinusoïdale imposée sont :

- l'amplitude maximale de la contrainte (déformation) atteinte au cours d'un cycle, notée σ_a , (ε_a) la valeur moyenne de la contrainte (déformation) σ_m , (ε_m) ;
- le rapport des contraintes maximale et minimale, et le paramètre R.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad \text{III.25}$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad \text{III.26}$$

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad \text{III.27}$$

Ces paramètres sont aussi valables en déformation imposée en remplaçant le terme σ par ε ; un cycle sinusoïdal de fatigue est alors entièrement décrit par les trois paramètres $\sigma_{\max}$ ($\varepsilon_{\max}$), R et f (fréquences de l'essai) [Béatrice LARGE-TOUMI].

On est parfois conduit à distinguer la composante alternative de la composante statique ; Ainsi, selon les valeurs relatives de ces composantes, et les valeurs de rapport R on distingue plusieurs types d'essais sous sollicitations :

- | | | |
|----------------------------|---------------------------|--------------|
| - alternée symétrique : | $\sigma_m = 0$ | $R = -1$ |
| - alternée dissymétrique : | $0 < \sigma_m < \sigma_a$ | $-1 < R < 0$ |
| - répétée | $\sigma_m = \sigma_a$ | $R = 0$ |
| - ondulée | $\sigma_m > \sigma_a$ | $0 < R < 1$ |

Remarque

Pour $R=1$, on n'est plus dans la fatigue dynamique mais dans la fatigue statique (fluage, relaxation). Pour des conditions d'essai données (et en particulier pour un niveau $\varepsilon_{\max}$, ou

$\sigma_{\max}$ de sollicitations), on définit la durée de vie du matériau comme le nombre de cycles que le matériau peut supporter avant de rompre. La nature hétérogène des matériaux composites et les différents paramètres microstructuraux ont une grande influence sur le comportement à la rupture du composite. L'endommagement de ces matériaux est un phénomène complexe qui se manifeste selon différents mécanismes ; La rupture des fibres, la rupture de la matrice et la décohésion de l'interface. L'accumulation de ces mécanismes qui coexistent généralement conduisent à la rupture finale du composite.

III.4 Conclusion

Les méthodes de caractérisation mécaniques des interfaces et de leur capacité à transférer une charge sont donc nombreuses et encore en cours de développement pour certaines d'entre elles.

Afin de mieux définir son rôle et performance on réalisera des essais mécaniques destinés, non seulement à mesurer les propriétés mécaniques, mais aussi à déterminer les caractéristiques locales des interfaces.

IV. Introduction

Le travail présenté dans cette partie est l'élaboration et la caractérisation du comportement mécanique d'un renfort unidirectionnelle haute performance en fibre de carbone et matrice polyester thermodurcissable. Nous avons réalisé des essais de traction uniaxial. Les éprouvettes testées sont découpées à différents angles par rapport à la direction principale de renfort (0° , 5° , 15° , 30° , 45° et 90°). Nous avons réalisé aussi un essai de déchaussement pour une mèche enchâssé dans un cylindre de résine avec la variation de longueur d'enchâssement. Les résultats et les mécanismes d'endommagement engendrés sont discutés et analysés.

IV.1 Matériaux d'étude

Le renfort textile utilisé dans cette étude, est principalement destinés à la fabrication de composite haute performance. Il s'agit d'un renfort unidirectionnel en fibres de carbone (figure IV.1) de masse surfacique de 160g/m^2 et de $0,16\text{mm}$ d'épaisseur, avec une répartition de 7,6 mèches/cm pour les chaines qui constituent une proportion de 97% dans le renfort. Un matériau composite à base de ce renfort a été élaboré en utilisant une matrice en polyester insaturée (Polylite®440-800) par moulage au contact. Il est constitué de 6 plis du renfort UD sous forme de plaque d'épaisseur moyenne de $2,10\text{ mm}$.

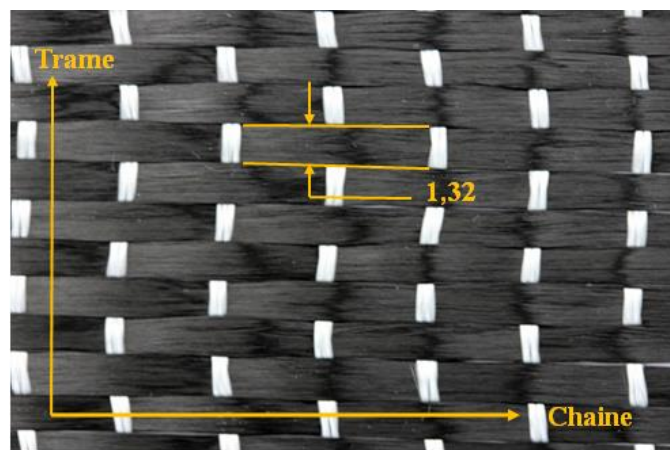


Figure IV.1 : Renfort unidirectionnel en carbone utilisé

IV.2 Préparation des échantillons

Les plaques de stratifiés ayant servi au découpage des éprouvettes sont obtenues par le procédé de moulage au contact. Le procédé est manuel, il consiste à nettoyer d'abord le moule avec 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 (figure IV.2a) (mélangée à 1,5% du durcisseur) au moyen d'un pinceau et d'un ébulleur qui sert d'un compacteur et chasseur des bulles d'air (figure IV.2b).

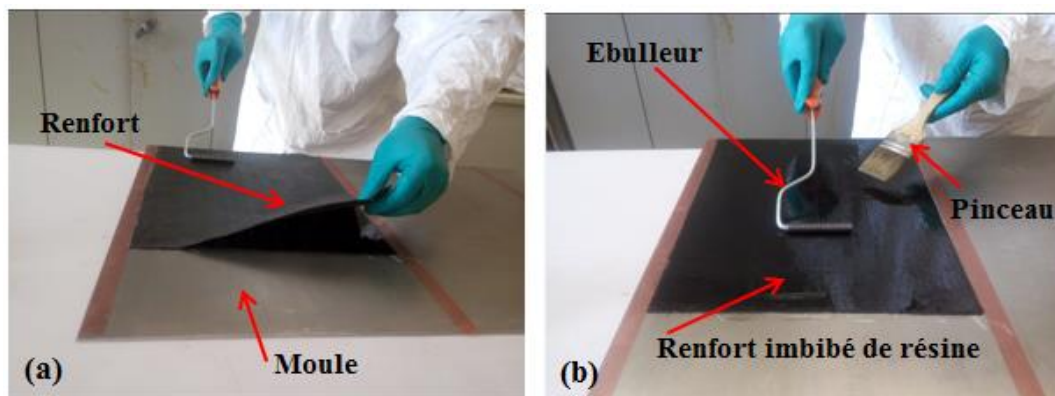


Figure IV.2 : Moulage au contact, a) Dépôt de tissu, b) Imprégnation avec la résine.

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. A la fin de la polymérisation, nous procédons au démoulage. Les éprouvettes soumises aux essais de traction uniaxial sont découpées dans les plaques de dimensions (500x500) mm² à l'aide d'une scie à disque diamanté sous un jet d'eau (figure IV.3). Les éprouvettes sont découpées à différentes directions définies relativement à l'axe principal de renfort unidirectionnel (figure IV.4). On note ces lots d'éprouvettes suivant l'angle de découpe comme suit : A (0°), A(5°), A(15°), A(30°), A(45°) et A(90°).



Figure IV.3 : Découpage des éprouvettes

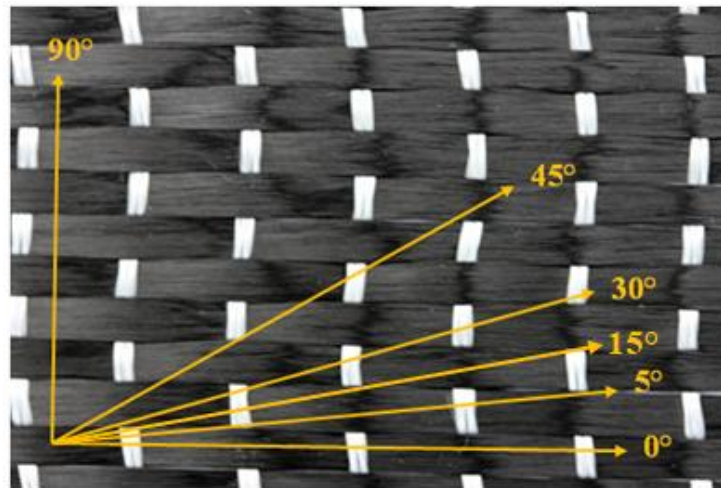


Figure IV.4 : Direction de découpe des éprouvettes par rapport à l'axe principale du renfort

Les éprouvettes de traction ont été réalisées en utilisant des talons qui sont découpés à base d'une tôle mince en aluminium. Ils ont une longueur de 50 mm, une largeur de 25 mm et une épaisseur moyenne de 1,5mm (figure IV.5). Les talons ont été rayés pour se maintenir dans les mors et éviter le glissement de l'éprouvette au cours de l'essai.



Figure IV.5 : Eprouvettes avec talons

IV.3 Géométrie des éprouvettes de traction

Les études et les normes concernant l'éprouvette de traction (ASTM-D3039) recommandent en générale d'utiliser une éprouvette plate dont la longueur et la section utile est ordre de grandeur (10 fois) supérieure à la largeur.

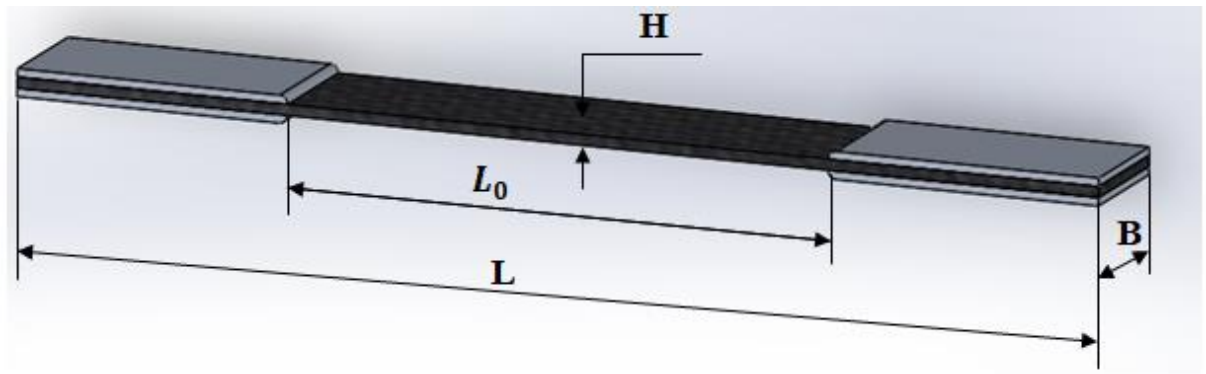


Figure IV.6 : Géométrie des éprouvettes

Avec :

- $L=250\text{mm}$: longueur de l'éprouvette ;
- $H=2,10\text{mm}$: épaisseur moyenne de l'éprouvette ;
- $B=25\text{ mm}$: largeur de l'éprouvette ;
- $L_0=150\text{mm}$: longueur utile de l'éprouvette.

IV.4 Essai de traction

Nous sommes intéressés à la détermination du comportement et des caractéristiques mécaniques de notre matériau comme la force maximale (F_{max}), la contrainte maximale (σ_{max}) , le module de Young(E), la déformation a la rupture (ϵ) ainsi que l'allongement à la rupture (ΔL), tout en variant l'angle de découpe de l'échantillon par rapport à la direction principale du renfort.

IV.5 Machine de traction

Les essais de traction sont réalisés sur une machine de traction marque ZWICK Z250, C'est une machine universelle 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 250 KN, accompagnée par des vitesses de chargement qui varient de 1 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, mis 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.

Pour notre étude, nous avons effectué des essais de traction à une même vitesse qui est de 2mm/min et à une température de 25°C pour tous les lots.

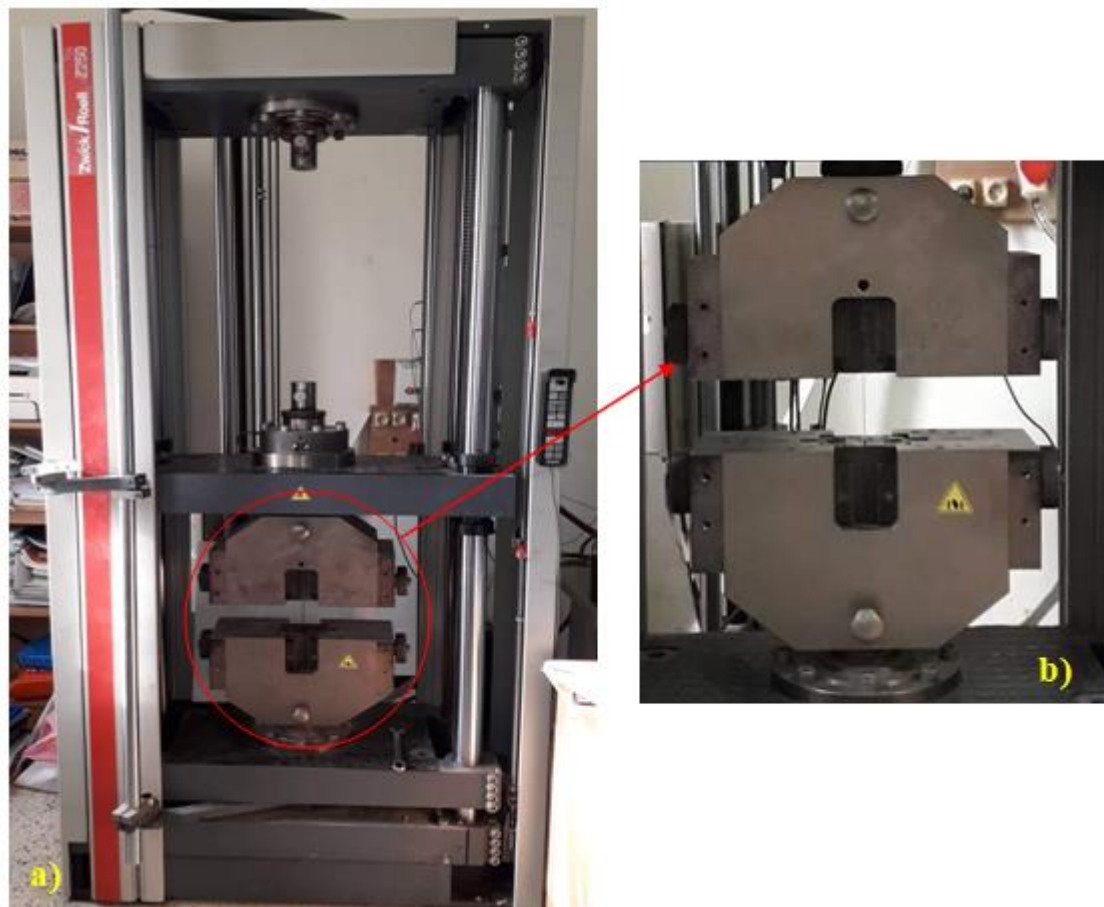


Figure IV.7 : a) Machine de traction ZWICK Z250, b) mors de traction utilisé

IV.6 Résultats des essais de traction

Nous avons effectué des essais de traction sur des éprouvettes (composites stratifiés) en tenant compte la variation d'orientation des fibres.

Pour une représentation plus cohérente des résultats des essais, nous avons utilisé les formules suivantes :

$$\sigma = \frac{F}{S} \quad \text{IV.1}$$

$$\varepsilon = \frac{\Delta_L}{L_0} \quad \text{IV.2}$$

Avec :

σ : La contrainte normale (MPa);

ε : La déformation relative ;

F : La charge appliqué (N) ;

S : La surface de l'éprouvette sollicitée (mm²);

Δ_L : L'allongement à la rupture (mm);

L_0 : La longueur utile de l'éprouvette (mm).

Les caractéristiques mécaniques des essais seront présentées dans les tableaux qui suivent et leur comportement mécanique par les courbes d'évolution contraintes en fonction des déformations.

❖ Résultat du lot (A/0°)

Lot A (0°)	H (mm)	B (mm)	Δ_L (mm)	$F_{\max}$ (N)	ε_r	σ_r (MPa)	E(MPa)
A1/0°	2,33	25,31	5,23	41544	0,035	714	21508
A2/0°	2,06	25,42	4,05	42344	0,027	715	22371
A3/0°	2,33	25,33	4,49	37876	0,030	773	25581
Moyenne	2,24 ± 0,16	25,35 ± 0,06	4,27 ± 0,31	40588 ± 2382	0,030 ± 0,004	734 ± 33	23153 ± 2146

Tableau IV.1 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (0°) en traction.

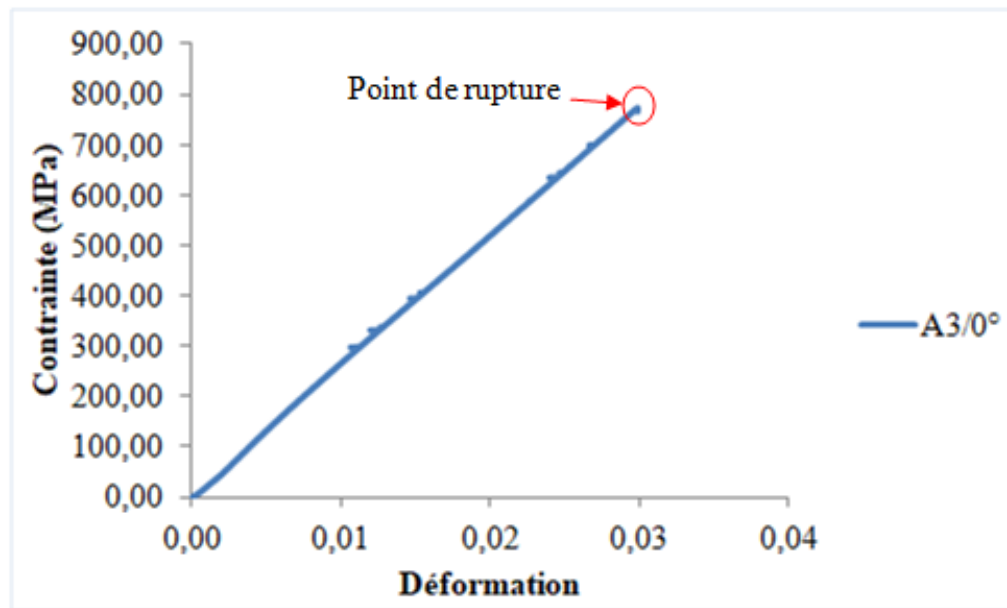


Figure IV.8 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (0°).

❖ Résultats du lot (A/5°)

Lot A (5°)	H (mm)	B (mm)	Δ_L (mm)	$F_{\max}$ (N)	ϵ_r	σ_r (MPa)	E(MPa)
A1/5°	2,60	25,46	2,36	16261	0,016	246	17967
A2/5°	2,10	25,43	2,88	17549	0,019	329	18136
A3/5°	2,56	25,43	2,79	19396	0,019	298	16890
	2, 33	25,44	2,68	17735	0,018	291	17664
	±	±	±	±	±	±	±
Moyenne	0,3	0,02	0,28	1576	0,002	42	675

Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (5°) en traction.

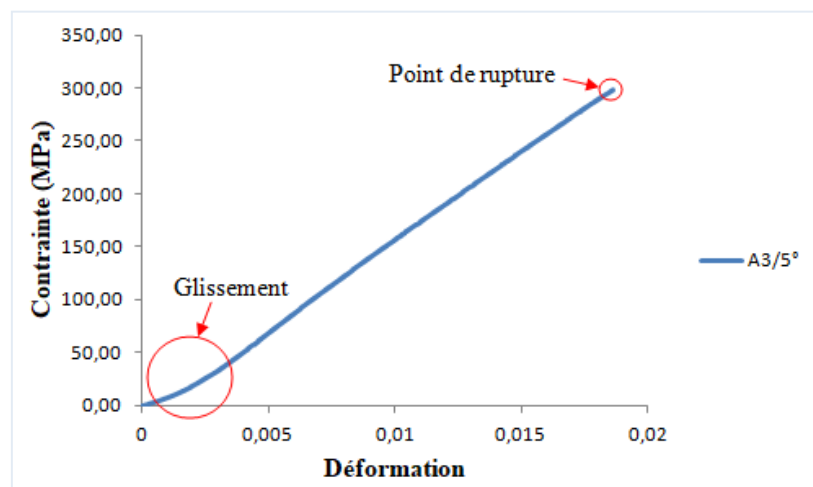


Figure IV.9 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (5°).

❖ Résultats du lot (A/15°)

Lot A (15°)	H (mm)	B (mm)	ΔL (mm)	$F_{\max}$ (N)	ϵ_r	σ_r (MPa)	E(MPa)
A1/15°	2,23	25,43	3,80	3413	0,025	60	7149
A2/15°	2,13	25,33	4,93	3592	0,033	66	7749
A3/15°	2,20	25,33	3,6	3195	0,024	57	7583
Moyenne	2,19 $\pm$ 0,05	25,36 $\pm$ 0,06	4,11 $\pm$ 0,72	3400 $\pm$ 199	0,027 $\pm$ 0,005	61 $\pm$ 4	7494 $\pm$ 310

Tableau IV.3 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (15°) en traction.

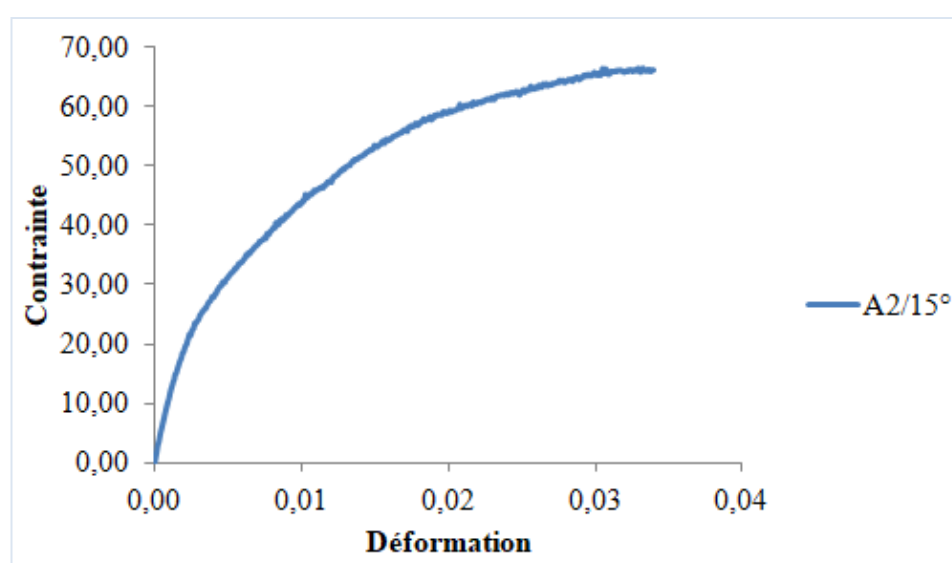


Figure IV.10 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (15°).

❖ Résultats du lot (A/30°)

Lot A (30°)	H (mm)	B (mm)	Δl (mm)	$F_{\max}$ (N)	ϵ_r	σ_r (MPa)	E(MPa)
A1/30°	2,3	25,2	2,78	1626	0,018	28	2621
A2/30°	2,2	25,1	2,64	1573	0,017	28	2647
A3/30°	2	25,2	1,21	1107	0,008	22	2109
Moyenne	2,16 $\pm$ 0,15	25,16 $\pm$ 0,06	2,21 $\pm$ 0,1	1435 $\pm$ 37	0,014 $\pm$ 0,005	26 $\pm$ 3	2459 $\pm$ 303

Tableau IV.4 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (30°) en traction.

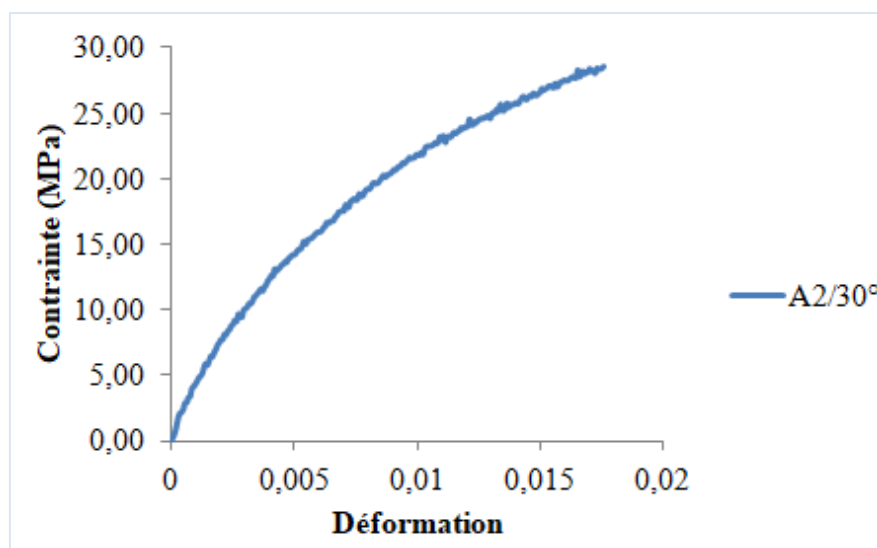


Figure IV.11 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (30°)

❖ Résultats du lot (A/45°)

Lot A (45°)	H (mm)	B (mm)	ΔL (mm)	$F_{\max}$ (N)	ϵ_r	σ_r (MPa)	E(MPa)
A1/45°	2,13	25,51	1,62	1064	0,011	20	2317
A2/45°	2,11	25,53	1,03	950	0,007	18	2488
A3/45°	2,00	25,29	1,27	1055	0,008	21	2194
	2,08	25,44	1,3	1023	0,009	19	2333
	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$	$\pm$
Moyenne	0,07	0,13	0,294	64	0,002	2	147

Tableau IV.5: Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (45°) en traction.

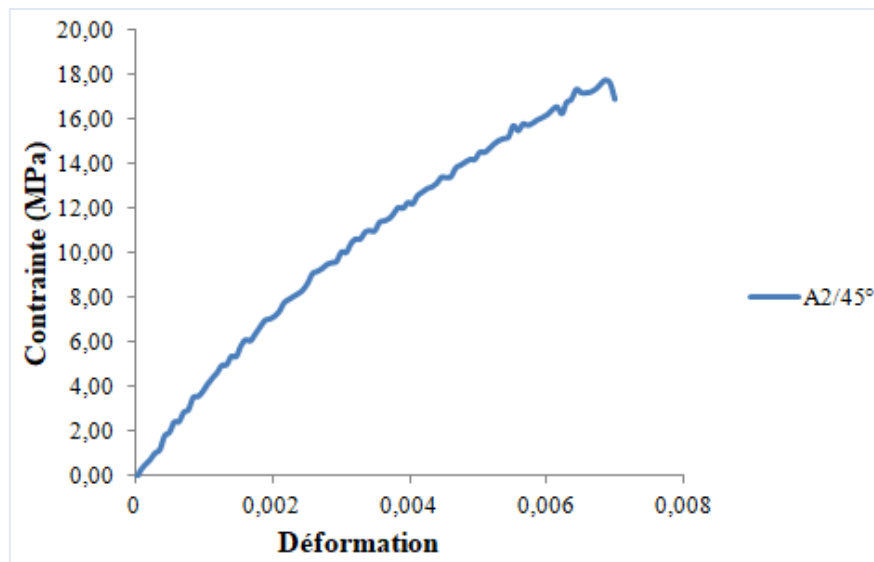


Figure IV.12 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (45°)

❖ Résultats de Lot (A/90°)

lot A	H (mm)	b (mm)	Δl (mm)	$F_{\max}$ (N)	ϵ_r	σ_r (MPa)	E(MPa)
A1/90°	2,36	25,43	0,83	418	0,005	8	1387
A2/90°	2,46	25,56	0,97	459	0,006	8	1491
A3/90°	2,4	25,53	0,63	374	0,004	6	1412
Moyenne	2,40	25,50	0,81	417	0,005	7	1430
	$\pm$ 0,05	$\pm$ 0,06	$\pm$ 0,17	$\pm$ 42	$\pm$ 0,001	$\pm$ 1	$\pm$ 54

Tableau IV.6 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot A (90°) en traction.

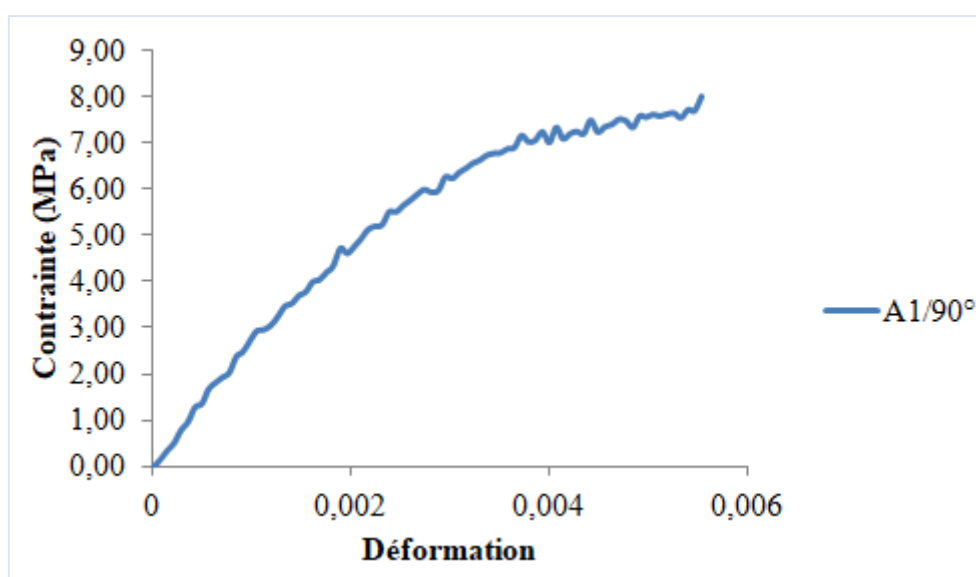


Figure IV.13 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot A (90°).

IV.6.1 Interprétations des résultats

D'après la figure IV.8, nous relevons que la courbe du comportement à rupture en traction obtenue pour le composite A (0°), nous permettent de distinguer; une zone linéaire correspondant au comportement élastique de composite jusqu'au point de rupture qui se situe à un seuil de contrainte de 774 MPa et une déformation de 3%. L'analyse visuelle de l'éprouvette endommagée, nous montre de rupture de fibres et de la matrice, de délaminage inter mèche comme indiquer sur la figure IV.14.

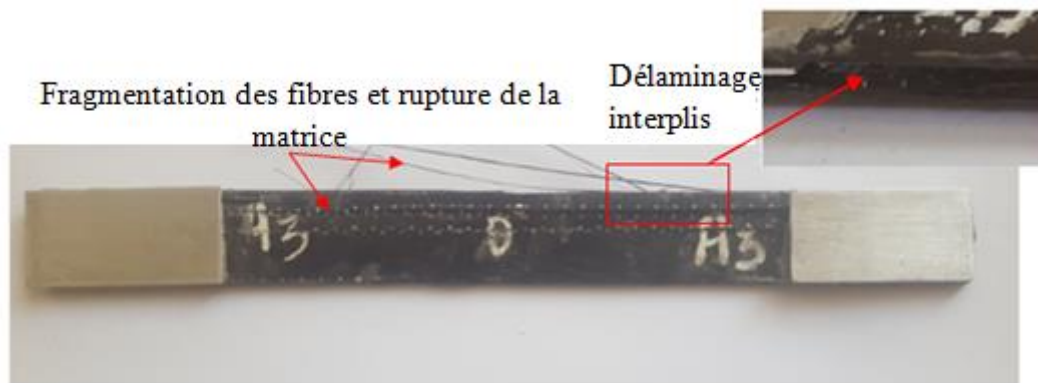


Figure IV.14 : *Eprouvette de composite A (0°) à la fin d'essai*

D'après la figure IV.9, nous relevons que la courbe du comportement à rupture en traction obtenue pour le composite A (5°), nous permettent de distinguer deux zones; une zone non linéaire au début de chargement du matériau correspondant à un glissement de l'éprouvette au niveau des mors de la machine, puis une zone linéaire associée au comportement élastique du matériau avec augmentation du l'effort jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette à valeur de contrainte à rupture de 298 MPa et un allongement de 1,9%.

L'analyse visuelle de l'éprouvette endommagée, nous montre la rupture de fibres et de la matrice, de délaminage inter plis comme indiquer sur la figure IV.15. On note ici que la rupture suit la direction des mèches.

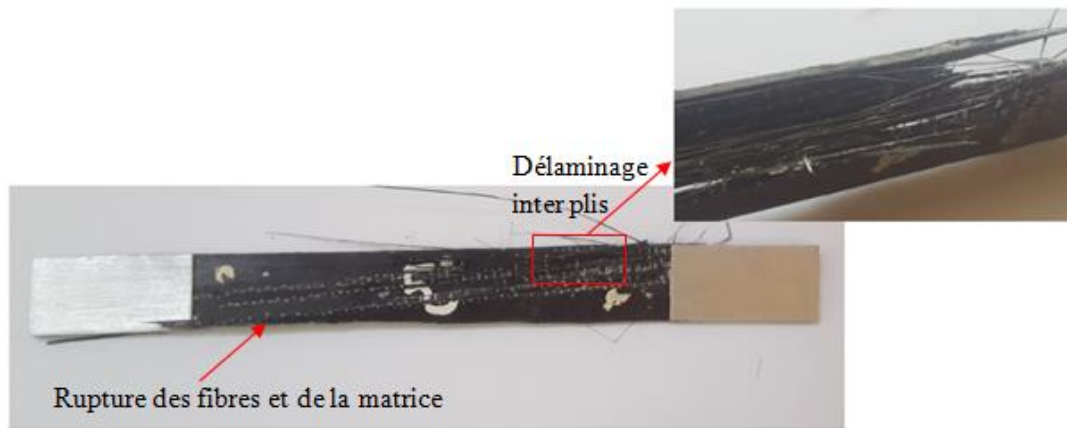


Figure IV.15 : *Eprouvette de composite A (5°) à la fin d'essai*

Par contre la courbe d'évolution contraintes/déformations du composite A (15°) (figure IV.10), nous relevons une zone à faible linéarité due au comportement élastique de matériau, puis une zone non linéaire associée à l'apparition de premiers endommagements de la matrice et des fibres jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette suivant la direction de l'orientation des fibres (figure IV.16).



Figure IV.16 : *Eprouvette de composite A (15°) à la fin d'essai*

D'après les figures IV.10, IV.11 et IV.12 nous relevons que les courbes d'évolution contrainte déformation des matériaux A (30°), A (45°) et A (90°), présentent une zone de comportement élastique linéaire du matériau au début de chargement suivi d'une phase de comportement non linéaire correspondant à l'endommagement successif du matériau. D'après les photographies des figures IV.17, IV.18 et IV.19, la rupture suit toujours la direction de l'orientation des mèches.

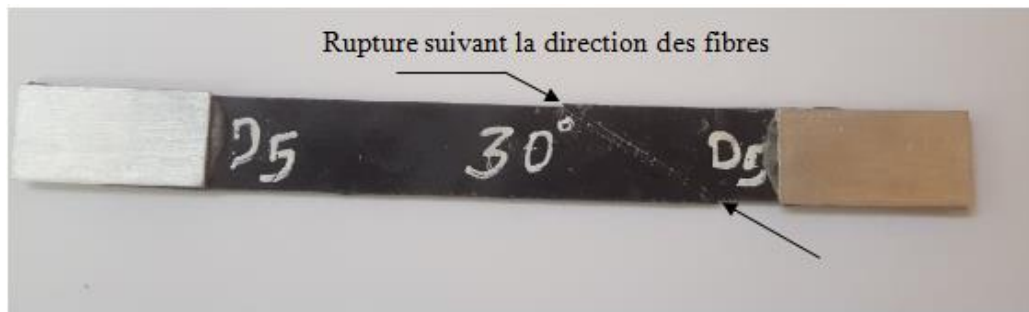


Figure IV.17 : *Eprouvette de composite A (30°) à la fin d'essai*

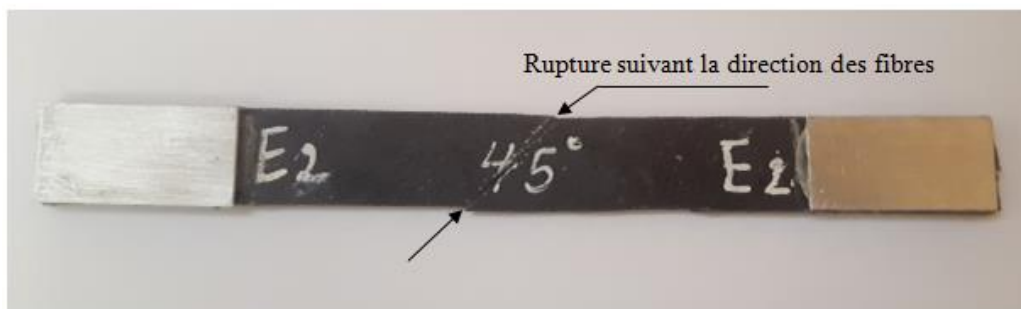


Figure IV.18 : *Eprouvette de composite A (45°) à la fin d'essai*

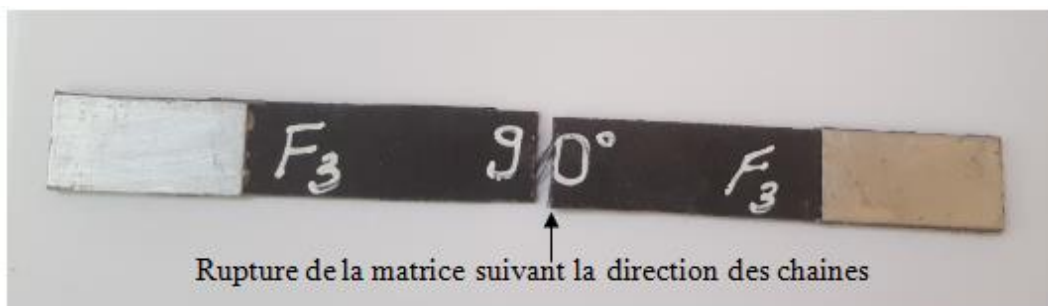


Figure IV.19 : *Eprouvette de composite A (90°) à la fin d'essai*

D'après les résultats des tableaux VI.1, VI.2,..., VI.5 et VI.6, toutes les éprouvettes testées présentent un comportement similaire pour le même lot avec une légère dispersion de la contrainte à rupture, ceci est dû principalement à l'existence de défauts (bulles d'air) qui influencent la résistance à la rupture. Les modules de Young sont obtenus par la courbe de tendance de régression linéaire de la partie élastique. Le module de Young est maximal pour le stratifié avec une orientation des fibres suivant la direction principale du renfort A (0°), et il diminue lorsqu'on s'éloigne de cet axe pour atteindre son minimum pour une orientation des fibres à $\theta=90^\circ$.

Les ruptures de fibres interviennent en général en phase finale de la rupture macroscopique. Il s'agit là du mode d'endommagement le plus dangereux pour la structure.

La résistance de la fibre étant très élevée, sa rupture est donc le résultat d'une forte sollicitation dans l'axe de la fibre. Le processus d'endommagement conduisant à la rupture d'un composite unidirectionnel dépend de la statistique de rupture de la fibre. Le processus se déroulerait en trois étapes distinctes. La première étape correspond à l'initiation de l'endommagement par ruptures isolées des fibres les plus faibles, à un certain niveau de contrainte. La seconde étape est caractérisée par l'accumulation de ruptures aléatoires dans le composite à laquelle s'ajoute la croissance de l'endommagement autour des ruptures isolées, par rupture des premières fibres voisines sous l'effet de charge. Avec l'augmentation de la contrainte axiale, la probabilité de rompre de nouvelles fibres est en effet de plus en plus importante.

Au cours des essais de traction, on entend des craques avant la rupture totale de l'échantillon, qui correspondent à l'endommagement successif dans le matériau. Nous obtenons des ruptures en traction (Mode I) pour le matériau A (90°), correspondant à une rupture plate. Pour les autres lots la rupture suit la direction des fibres dans le renfort.

IV.6.2 Comparaison des résultats

La figure IV.20 donne une comparaison des comportements des différents matériaux testés en traction en fonction de l'orientation du renfort dans le matériau. La comparaison des valeurs des contraintes à rupture moyennes et des modules de Young mesurées pour le lot (A) montre une diminution significative à partir d'un angle de découpe des éprouvettes de 5° par rapport à l'axe principale du renfort. Cet angle peut être pris comme seuil de dimensionnement de pièces en service pour les composites contenant plusieurs plis disposés dans la même direction.

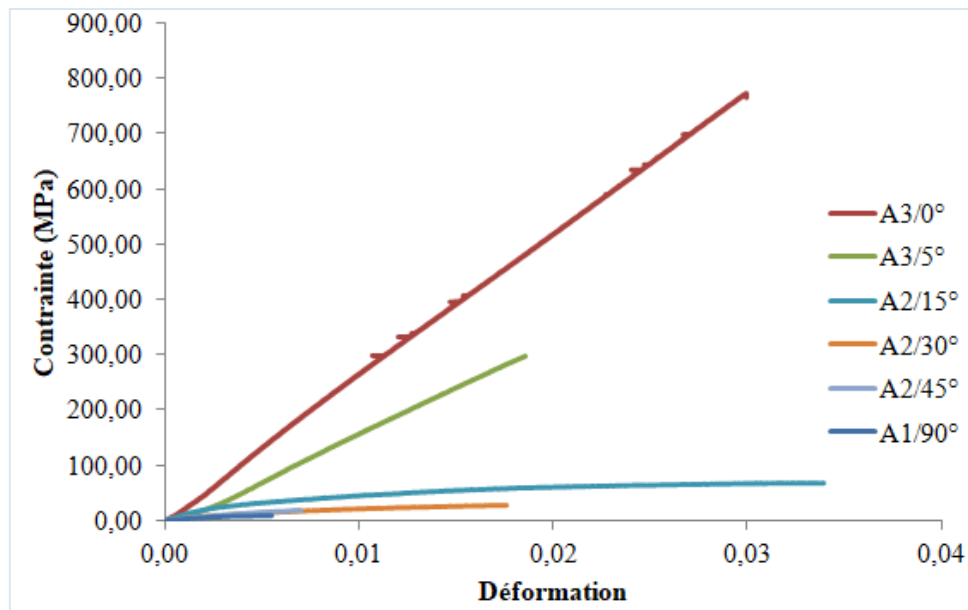


Figure IV.20 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot(A)

IV.6.3 L'effet de l'anisotropie

Comme le montre les figure IV.21 et IV.22 la contrainte à rupture et le module de Young respectivement, diminuent en fonction de l'augmentation de l'angle de découpe des éprouvettes par rapport à l'axe principale du renfort UD. Ce qui montre que la résistance à la rupture et la rigidité sont dépendantes de la direction de sollicitations. Cette chute de caractéristiques mécaniques est beaucoup plus prononcée à partir d'un angle de 5°. Un rapport du composite UD (0°) et UD (90°) est de 105 fois plus pour la contrainte à rupture et de 16 fois plus pour le module de Young. Cela est dû à la structure du renfort (tissu UD carbone), dans la direction des fibres UD (0°) c'est le renfort qui est sollicité, par contre dans la direction transverse UD (90°) c'est la matrice qui est sollicitée et le renfort ne travaille pas selon cette direction.

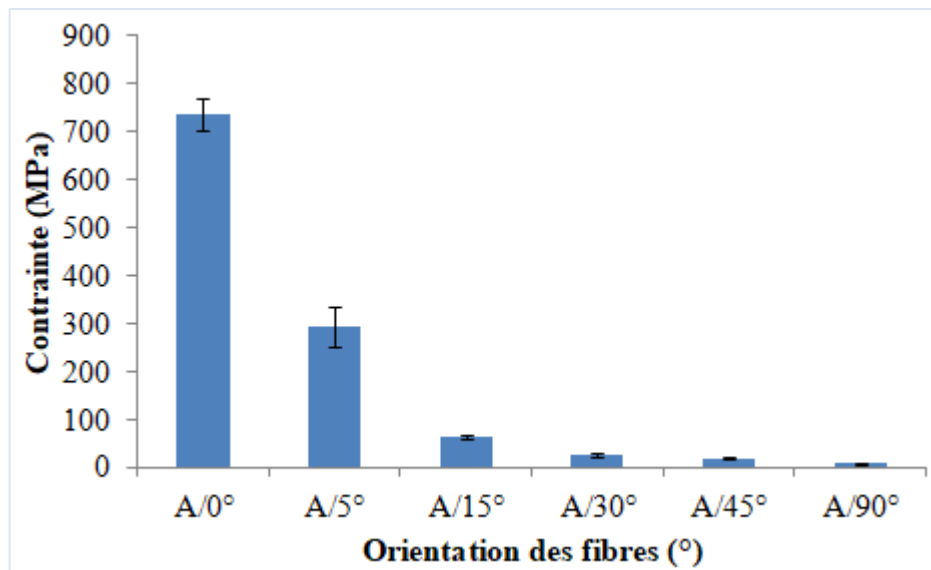


Figure IV.21 : *Influence de l'anisotropie sur les contraintes à la rupture.*

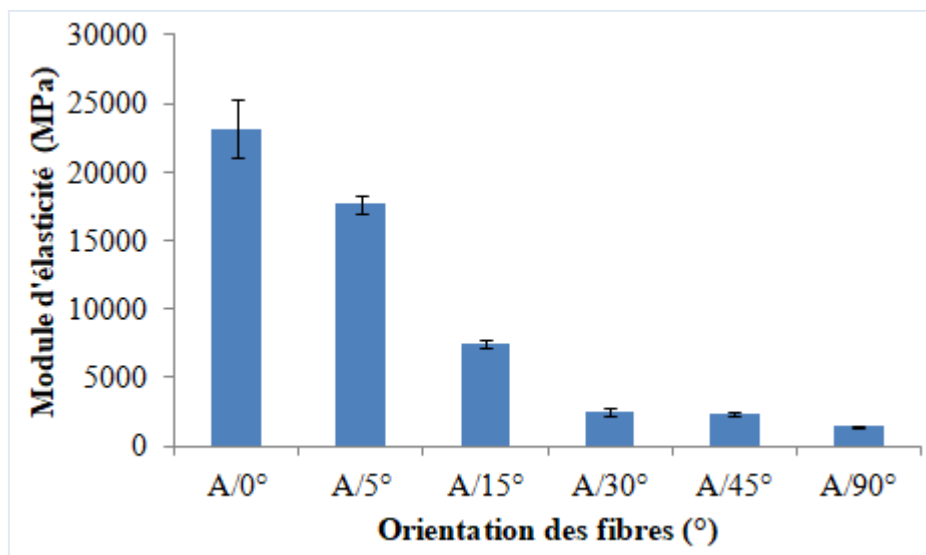


Figure IV.22 : *Influence de l'anisotropie sur les modules d'élasticité.*

IV.7 Essai de déchaussement (pull-out)

L'essai de déchaussement (pull-out) est un essai de caractérisation micromécanique de l'adhésion interfaciale fibre/matrice mais en l'absence des moyens d'essai, nous avons réalisé des expériences à l'échelle mésoscopique.

Le principe de cet essai consiste à soumettre une mèche de carbone, dont une partie est enchâssée dans un cylindre de résine à une longueur (L_e), soumis à une force de traction

uniaxiale (figure IV.23), jusqu'à provoquer la décohésion à l'interface puis l'extraction complète de la fibre.

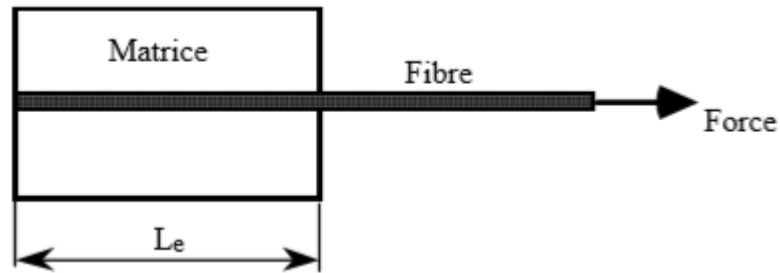


Figure IV.23 : Schéma d'une éprouvette de déchaussement

Le comportement mécanique d'un fil multi-filamentaire enrobé dans une matrice polymérique est particulièrement difficile à caractériser car, à la complexité du comportement mécanique propre du fil multi-filamentaire, viennent s'ajouter les interactions entre fil multi-filamentaire et matrice ainsi que les propriétés mécaniques de la matrice. En effet, les forces de liaison d'origine chimique et mécanique entre fil et matrice, la rupture progressive de ces liaisons mais aussi des filaments et des mèches, le glissement et le frottement des filaments et des mèches au contact de la matrice ainsi que les déformations et les endommagements de la matrice elle-même sont autant de facteurs importants qui impactent le comportement mécanique.

IV.7.1 Préparations des échantillons (Lot B)

Afin de réaliser cette essai de déchaussement, nous nous sommes orientés vers la fabrication des éprouvettes cylindriques. Ce procédé de fabrication a permis, d'une part, de faire varier à volonté la longueur de la mèche enchâssée dans la résine de 30, 40, 50 et 60 mm, d'autre part, de garantir une rectitude du mèche dans l'éprouvette nécessaire pour obtenir des bonnes conditions d'étude à l'arrachement. Pour le moulage des éprouvettes, un tube PVC de diamètre externe 40 mm et de diamètre interne 34 mm a été utilisé. Le tube a été fixé sur un dispositif en bois figure IV.24 à l'aide d'une colle pour assurer l'étanchéité. Une cire a été utilisée comme agent de démoulage, appliqué sur la surface interne du tube. La mèche a été maintenue centrée sur l'axe de l'éprouvette grâce au dispositif à bois spécifiquement conçu pour la confection permettant la fixation centrée de la mèche du renfort. Une fois tout est réglé et bien centré, on prépare la résine avec 1,5% de durcisseur et on l'injecte pour remplir les tubes PVC. 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 journée. A la fin de la polymérisation nous procédons au démoulage. On obtient ainsi des éprouvettes prêtes pour les essais de déchaussement de mèche dans un cylindre de résine qui sont montrées dans la figure IV.25.

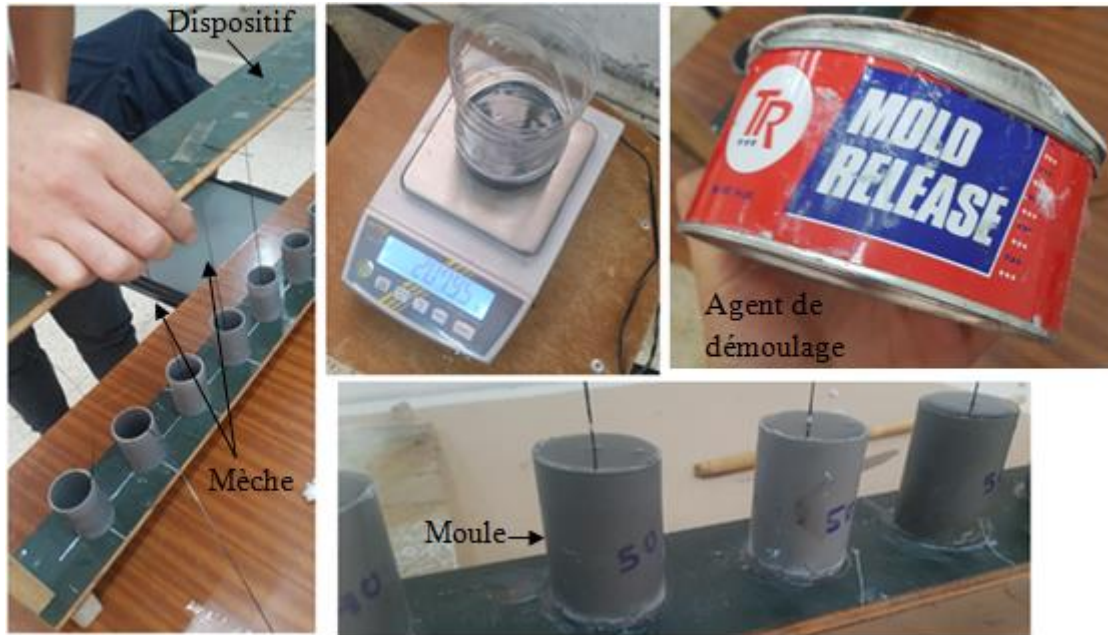


Figure IV.24 : Préparation des échantillons



Figure IV.25 : Echantillons final après durcissement

IV.8 Machine utilisée

Les Essais de déchaussement sont réalisés sur une machine de traction de marque Zwick Roell Z10. C'est une machine universelle 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 10 KN, accompagnée par des vitesses de chargement qui varient de 0,01 à 500 mm/min contrôlées automatiquement. Pour nos essais, nous avons utilisé une vitesse de sollicitation de 0,1 mm/min.



Figure IV.26 : a) Machine de traction Zwick Roell Z10, b) Mors de traction utilisé

IV.9 Résultats essais de déchaussement (pull-out)

Les caractéristiques mécaniques obtenues pour les tests de déchaussement sont données dans les tableaux qui suivent. Le comportement de chaque lot d'éprouvettes en fonction de la longueur d'enchâssement (30, 40, 50 et 60 mm) est donné sous forme de courbes contraintes en fonction de déformation.

❖ Résultats du lot B/30(mm)

Lot(B)	L_0 (mm)	b (mm)	h (mm)	Δ_l (mm)	$F_{\max}$ (N)
B1/30	50	1,32	0,16	0,23	100
B2/30	50	1,32	0,16	0,29	93
B3/30	50	1,32	0,16	0,34	124
Moyenne	50	1,32	0,16	0,29 $\pm$ 0,05	106 $\pm$ 16

Tableau IV.7 : Caractéristiques mécaniques de lot B/30(mm).

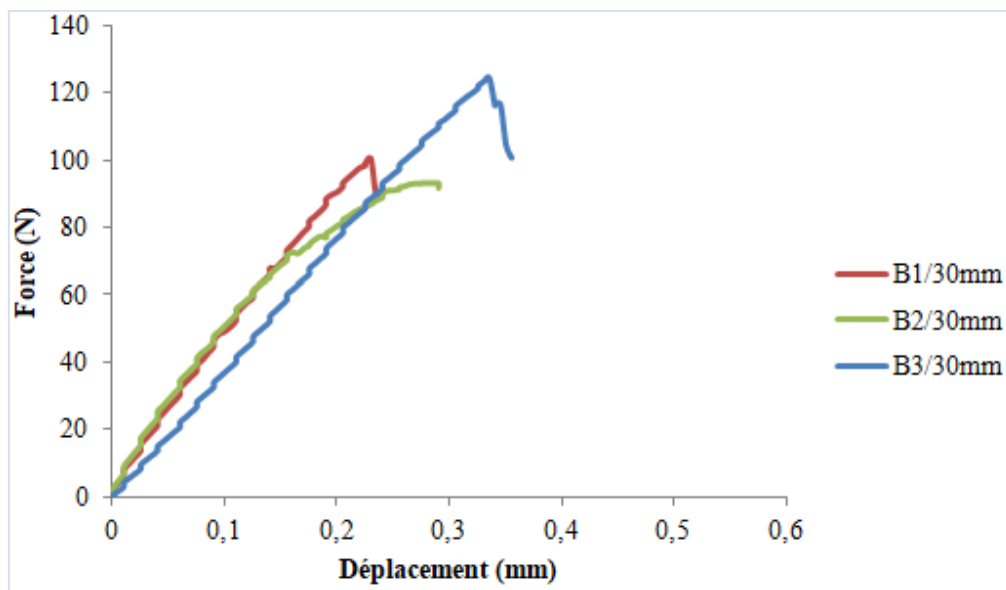


Figure IV.27 : L'évolution Force/Déplacement de lot B/30(mm).

❖ Résultats du lot B/40(mm)

Lot(B)	L_0 (mm)	b (mm)	h (mm)	Δ_l (mm)	$F_{\max}$ (N)
B1/40	50	1,32	0,16	0,51	133
B2/40	50	1,32	0,16	0,49	87
B3/40	50	1,32	0,16	0,32	64
Moyenne	50	1,32	0,16	0,44 $\pm$ 0,104	95 $\pm$ 35

Tableau IV.8 : Caractéristiques mécaniques de lot B/40(mm).

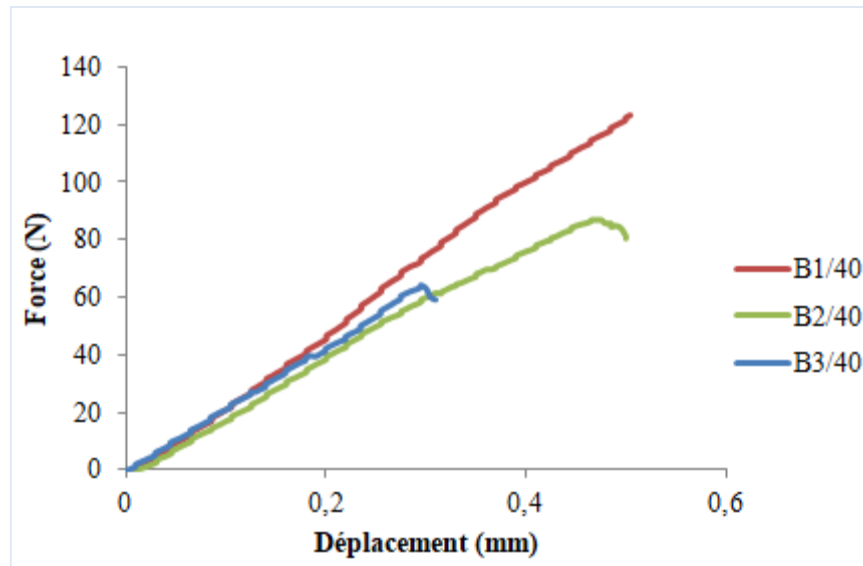


Figure IV.28: L'évolution Force/Déplacement de lot B/40(mm).

❖ Résultats de lot B/50(mm)

Lot(B)	L ₀ (mm)	b (mm)	h (mm)	Δ_l (mm)	F _{max} (N)
B1/50	50	1,32	0,16	0,35	137
B2/50	50	1,32	0,16	0,33	106
B3/50	50	1,32	0,16	0,34	97
Moyenne	50	1,32	0,16	0,34 ± 0,012	113 ± 21

Tableau IV.9 : Caractéristiques mécaniques de lot B/50(mm).

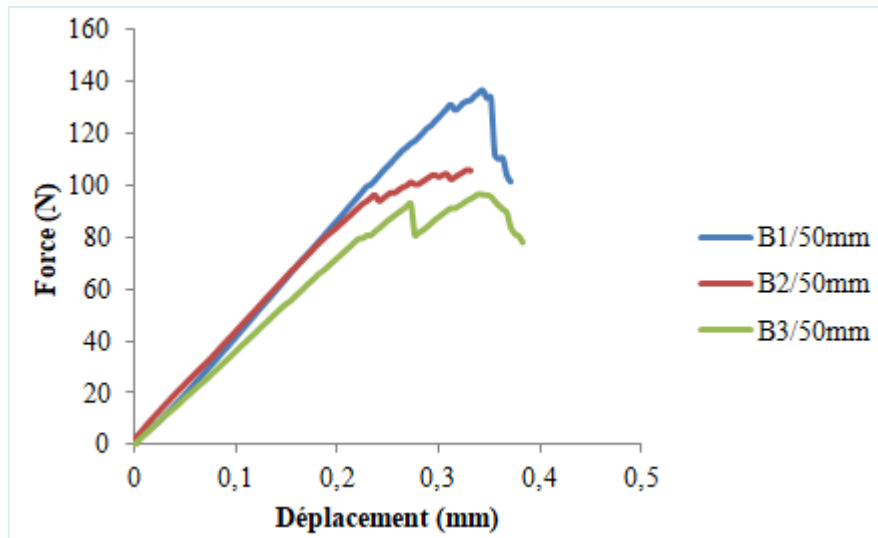


Figure IV.29: L'évolution Force/Déplacement de lot B/50(mm).

❖ Résultats de lot B/60(mm)

Lot(B)	L0 (mm)	b (mm)	h (mm)	Δ_l (mm)	$F_{\max}$ (N)
B1/60	50	1,32	0,16	0,30	163
B2/60	50	1,32	0,16	0,33	144
B3/60	50	1,32	0,16	0,36	110
Moyenne	50	1,32	0,16	0,33 $\pm$ 0,026	139 $\pm$ 27

Tableau IV.10 : Caractéristiques mécaniques de lot B/60(mm).

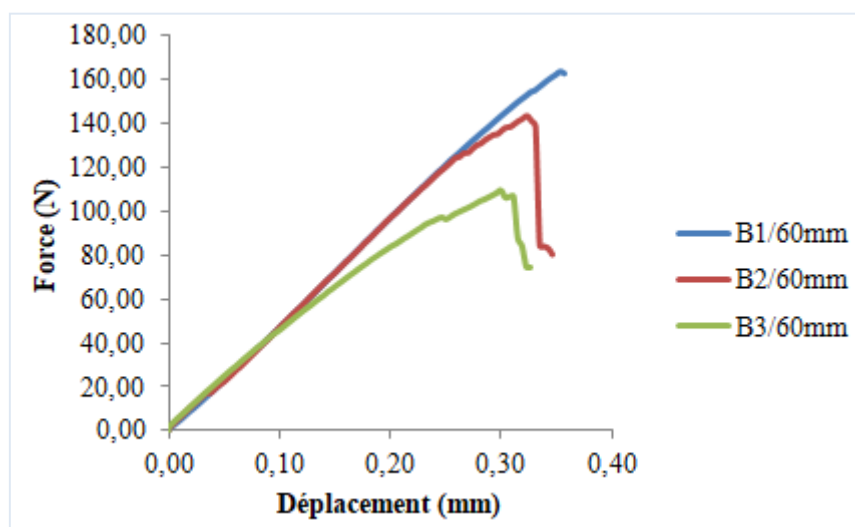


Figure IV.30 : L'évolution Force/Déplacement de lot B/60(mm).

IV.9.1 Interprétations des résultats

D'après les figures IV.27, IV.28, IV.29 et IV.30, nous relevons les courbes de comportement à l'arrachement de la mèche, nous permettent de distinguer deux zones, une zone linéaire correspondant au comportement élastique de la mèche suivi d'une chute brutale de l'effort qui correspond à la rupture totale des filaments dans la mèche. Ce phénomène correspond à la mise en tension progressive des filaments lors de l'allongement initial de la mèche (à cause des différentes longueurs initiales des filaments constituant la mèche). Une fois l'ensemble des filaments tendus, le comportement entre dans une phase élastique linéaire pendant laquelle la charge augmente de manière monotone. Cette phase se poursuit jusqu'à atteindre approximativement 60 à 90% de l'effort maximum appliqué, suivant les éprouvettes. Les liens fibre-matrice commencent alors à rompre (figure IV.31).

Pour des longueurs enrobées inférieures au seuil, l'augmentation de F_{max} lorsque L_e augmente peut s'expliquer par le nombre croissant de filaments ancrés lorsque L_e augmente. Lorsque L_e est très faible, seuls les filaments situés immédiatement en périphérie de la mèche sont en contact avec la matrice et la résistance à l'arrachement n'est donc qu'une fraction réduite de la résistance à la traction de la mèche (qui correspond à une sollicitation de l'ensemble des filaments). Lorsque L_e augmente, de nouveaux filaments vont se trouver également en contact avec la matrice (la position des filaments dans la section de la mèche varie le long de la mèche et des filaments situés au cœur de la mèche dans une section peuvent se retrouver en périphérie de la mèche dans une autre section). Ce phénomène est influencé par la manière dont la matrice pénètre la mèche.

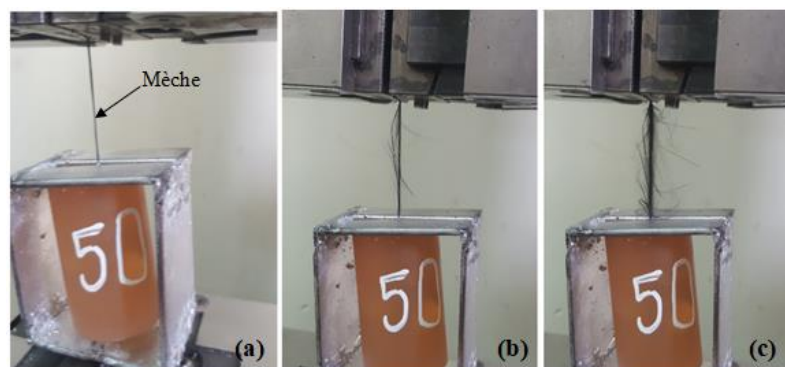


Figure IV.31 : a) *Eprouvette d'une mèche carbone*, b) *début d'endommagement* et c) *rupture total de la mèche*

La rupture du lien fibre-matrice correspond soit à la rupture de la fibre en traction, soit à la rupture de l'adhérence fibre-matrice puis au glissement du filament. Lorsque l'effort

s'approche de la charge de rupture on observe une chute brutale suivi d'une rupture totale des fibres dans la mèche (figure IV.32).

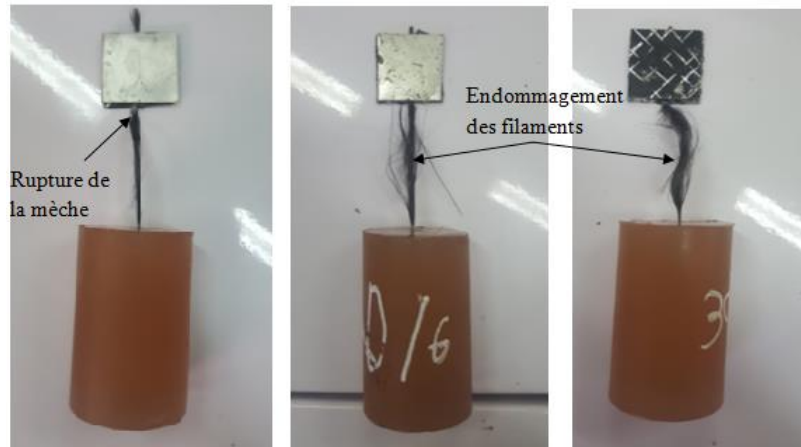


Figure IV.32 : Les différents endommagements des éprouvettes

Toutes les éprouvettes présentent un comportement similaire pour le même lot avec une dispersion de la force à rupture, ceci est dû principalement à l'existence de défauts (défauts de fabrication) qui influencent considérablement la résistance à la rupture.

Les résultats d'essais présentés dans les tableaux IV.8, IV9, IV10 et IV.11, ont permis de montrer que la variation de longueur enchâssé qu'on a fait n'a pas vraiment d'effet sur l'essai d'arrachement pour ce type d'essai effectuer.

IV.10 Conclusion

- Le matériau composite élaboré avec les fibres de carbone présente des caractéristiques mécaniques très intéressante dans la direction des mèches principales de renfort d'où le nom de composite UD haute performance.
- Le comportement en traction de composite d'un renfort UD à fibres de carbone a été caractérisé expérimentalement. Une influence notable est observée lors la variation de l'angle de découpage des éprouvettes (diminution de la contrainte à rupture et diminution de module de Young).
- Les essais effectués présentent parfois une dispersion des caractéristiques intrinsèques des matériaux qui est une caractéristique des matériaux hétérogènes. Elles sont dues au mode d'élaboration des éprouvettes et à l'architecture du renfort UD utilisé.
- Pour les essais d'arrachement, nous avons constaté que la rupture des filaments commence à être perceptible dès que l'effort de traction atteint sa valeur maximale. Le mécanisme de rupture est caractérisé par des ruptures de blocs entiers de filaments aux différents endroits de la mèche en commençant principalement par la périphérie vers

le cœur de la mèche, mais des ruptures de filaments individuels et des ruptures de blocs de filaments au cœur de la mèche sont aussi observés à différentes phases de l'essai.

Conclusion générale

Cette étude s'inscrivait dans le cadre de définir une approche de la caractérisation de matériaux composites à fibres de carbone haute performance par des essais statiques. La présente étude a concerné en premier lieu, la mise au point d'une méthodologie de caractérisation en traction d'un matériau composite à base de ce renfort et à matrice polyester qui a été élaboré par moulage au contact. Des essais de traction du composite ont été menés suivant les différents angles d'orientation des fibres par rapport à la direction principale du renfort UD, ainsi que des essais de déchaussement sont réalisés par application d'un effort de traction direct à l'extrémité d'une mèche dont l'autre extrémité était enchâssée dans un cylindre de résine avec différentes longueurs d'enchâssement.

Le matériau composite élaboré avec les fibres de carbone présente des caractéristiques mécaniques très intéressantes dans la direction principale de renfort. Au cours des essais de traction des composites, on entend des craques avant la rupture totale de l'échantillon, qui correspondent à la rupture de la matrice, au délaminage inter pli et la rupture des fibres.

Le mécanisme de rupture pour les essais d'arrachement est caractérisé par des ruptures de blocs entiers de filaments aux différents endroits de la mèche en commençant principalement par la périphérie vers le cœur de la mèche. Il est vraie que plusieurs paramètres ne sont pas pris en considération dans ces essais, mais cette technique permet de déterminer la qualité de l'interface et reste un moyen économique avant de passer à la réalisation des produits finis.

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

Pour poursuivre cette étude, une caractérisation de ces composites peut être complétée par le biais des essais de fatigue en utilisant différentes séquences d'empilement.

Il est intéressant de faire des essais de déchaussement en variant le diamètre du cylindre, la longueur d'enchâssement et le types de fibres.

L'étude de l'effet de vieillissement, revêt un caractère d'importance capitale pour les essais d'arrachement.

Bibliographies

[1] J .M .Berthelot

Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures .4^{ème} édition,
Ed TEC&DOC, Lavoisier, 2005.

[2] Pierre JACQUINET

Utilisation des matériaux composites,
Edition HERMES, Paris 1991

[3] Miren EGANA

Introduction aux matériaux composite sur abaqus analyse d'une planche de kitesurf .ingénieur en conception mécanique et energetique, mecanique.thèse doctorat INSA Toulouse 2006,2011.

[4] Christophe TEPHANY

Analyse de la déformabilité de renforts composites à base de fibres naturelles. Thèse doctorat, université d'Orléans, 2014.

[5] Stephan VACHER

Capteur fibre optique pour le contrôle de l'élaboration et la caractérisation mécanique des matériaux composites, thèse doctorat.

[6] Maurice REYNE

Technologie des composites. Edition HERMES. Paris 1990.

[7] CARMA Marine

Glossaire des matériaux composites Centre d'animation régional en matériaux avancés, actualisation octobre 2006.

[8] Jean-Marie BERTHELOT

Des matériaux
3^{ème} édition, école polytechnique de Montréal,200

[9] Telmar A

Etude de déformabilité de tresse en cours préformage pour la fabrication de composite par le procédé RTM. Thèse doctorat 2012.

[10] : P-E. BOURBAR, L. CARISSON, J-P. MERCIER et J-A-E. MANSON

« Matériaux composite à matrice organique », Presses polytechniques et universitaires ROMANDES.

[11] Laurent Gornet

Généralités sur les matériaux composites .École Centrale de Nantes, 2008.

[12] Daniel GAY

Matériaux composites, 4ème édition revue et augmentée, Editions Hermès, 1997. Technique and non destructive acoustique émission, Composites Science and Technologie, Vol. 66, pp. 2686–2699.

[13] D.Krajcinovic

Damage mechanics accomplishments,trends and needs.international journal of solids andstructures,37 :267-277,2000

[14] D.Rouby

Comportement des composite a fibre longues et matrice flexible et tenace.
Micromécanique des composites 1999.

[15] Jone martin Herrera Romerez

Les mécanismes des fatigues dans les fibres thermo plastique. Thèse doctorat 2004

[16] John-Marie BERTHELOT

Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures 4ème édition, Ed Tec&Doc, Lavoisier, 2005.

[17] AHLSTROM C. (1991).

Interface fibre de verre/matrice polyepoxy. Introduction d'une interphase à propriétés contrôlées. Thèse de Doctorat de l'INSA de Lyon, 1991, 296 p.

[18] Béatrice LARGE-TOUMI

Etude du comportement en fatigue de composite carbone époxyde : rôle de l'interface
thèse de doctorat école centrale de LYON (1994).

[19] Ali KALOUF

Etude du comportement des interfaces et des interphases dans les composites a fibres et a matrice céramique. Thèse de doctorat école doctorale matériaux de LYON (2006).

[20] BORHANE Kechou

Corrélation entre propriétés diélectriques et mécanique des composites a matrice époxyde renforcé par les fibres de verre E, Thèse de doctorat (2003), école centrale de LYON.

[21] Bekerman J.J.

The science of adhesive joints
2^{ème} édition, 258 p.,Academic Press,Inc.,New York&London (1968)

[22] GUIGON.M

Phénomènes interfaciaux dans un composite carbone-époxy.étude par microscopie électronique par transmission. P.131-143,PARIS(1988)

[23] Rapaud, O.

Nouvelles interphases pour matériaux composites céramiques: revêtement multicouches nanoséquences (PyC/TiC) n., Thèse de Doctorat, Université Lyon 1, 2002, France

[24] Bertrand, S., Pailler, R., and Lamon, J.

SiC/SiC minicomposites with nanoscale multilayered fiber coatings. Composites Science and Technology, 2001.Vol. 61, p. 363-367

[25] Jean-Paul FAVRE

Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites

[26] CHRETIEN G

Matériaux composites à matrice organique, Tech. Et Doc. Lavoisier, 1986.

[27] Zhandarov S., Edith Mäder,

«Characterization of fiber/matrix interface strength: applicability of different tests, approaches and parameters Serge» Composites Science and Technology 2005; 65: 149–160.

[28] Kim, J.K., Mai, Y.W

Engineered Interfaces in Fiber Reinforced Composites. Elsevier Science. 1998.

[29] Cox H.L.

“The elasticity and strength of paper and other fibrous materials”. British journal of applied physics, 12, 72–79, 1952.

[30] Park J.M., Quang S.T., Hwang B.S., Lawrence K.D.V., (2006),

Interfacial evaluation of modified Jute and Hemp fibres/polypropylene (PP)-maleic anhydride polypropylene copolymers (PP-MAPP) composites using micromechanical

[31] Chen X., Farber M., Gao Y., Kulaots I, Suuberg E. M., Hurt R. H., (2003a),

Mechanisms of surfactant adsorption on non-polar, air-oxidized and ozone-treated carbon surfaces Original Research Article Carbon, Vol. 41, Issue 8, pp. 1489-1500.

[32] Bourban P.E., Carlsson L., Mercier J.P., Manson J.A.E.,

(2004), Matériaux composites à matrice organique, Presses polytechniques et universitaire romandes.

[33] YOUNG Kuk Choi

Réalisation et caractérisation de composite hybride. Verre/époxy/NiTi adaptatifs
Ecole centrale de LYON. juin 2002

[34] MILLER.B

Composite. Science et technologie 1987.28P-17.32

[35] T.ISHIKAWA and T.W.CHOU

Stiffness and strength behaviour of woven fabric composites. J.Master novembre 1982

[36] A.Bergeret and P.Krawczak.

Liaison renfort/matrice : Définition et caractérisation, plastique et composites. Tech.
L'ingénieur, no N° AM 5305,2006.

[37] Claud Bothias et Coll

Matériaux composites. Dunod, Paris 2005

[38] Ohswa,T.NAKAYAMA,A,Miwa,and Hasegawa,A.

Temperature dependence of critical fibre length for glass fibre reinforced
thermosetting resins,journal of applied polymer science,22,32.03-3212/1978

[39] J.Ye, A.K.KAW

Determination of mechanical properties of fibre-matrix interface from push-out test
mechanical engineering,university of south florida 1999.

[40] CALDWELL (B.L),BA B.BINGTON (D.A) et JOHNSON.(C.F)

Interfacial bond strength determination in manufactured composites,congres Interfacial
phenomena in composite :Materials (IPCM 89),Ed.J.Butterworths Publ.london 1989.

[41] Mooney R.D., Mc GARRY F.J.

14th Annual Technical Conference Reinforced Plastics Div., The Society of the Plastics
industry (SPI) (1959) Session 12-E

[42] Broutman L.J.

« Measurement of the fiber-polymer matrix interfacial strength, in Interfaces in
composites», ASTM STP 452, ASTM, American society for Testing and Materials,
(USA). Philadelphia (1969) pp 27-41.

[43] S.J. Park, M.K. Seo

Modeling of Fiber–Matrix Interface in Composite Materials, Interfaces Science and
Technology, Vol. 18, 2011, P. 739-776.

[44] Brandon, D.G. & Fuller, E.R.Jr.

New Technique for Measuring Debond Strength and Interfacial Shear Resistance in Fiber-Reinforced Ceramic Matrix Composites (Abstract), Ceram. Eng. Sci. Proc., 1989, Vol. 10, N°7-8, p. 871.

[45] virginie MAS LEROUX

Modèles et procédures statiques normalisées de calcul de la fiabilité des matériaux, leur évolution et leur limite. 22/06/2009.

[46] Cheng, W.L., S. Langlie, and S. Itoh

Hight velocity impact of thick composites. International journal of impact engineering, 2003, 29: p. 167-184.

[47] Hadrien Bidouard

Etude de l'effet de surcharges sur la tenue en fatigue à grand durée de vie d'un acier ferrito Bainitique sous chargement d'amplitude variable. Thèse doctorat, l'école nationale supérieure d'arte et métiers 2009

[48] F.BALLUFIER et A.LEMASCON

Analyse de défaillance pièces plastique élastomères au composite, Guide pratique. Centre Technique des industries Mécanique 1999.

[49] W. WARDLE

"Impact damage tolerance of composites reinforced with Kevlar aramid fibers"
Progress in Science an Engineering of Composites ICCM IV, Tokyo, 1982.

[50] Guide d'achat

Mesures mécaniques des appareils de mesure de dureté 2004.
[Endurance et fatigue] Béatrice LARGE-TOUMI