

République Algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou



Faculté du génie de la construction
Département de génie mécanique



Mémoire de fin d'études

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

Thème

**Etude du comportement à l'arrachement de
l'interface fibre-matrice**

Proposé et dirigé par :

Mr. KACIMI B.

Mme. TEKLAL F.

Réalisé par :

Babou Aghiles

Promotion: 2019/2020

Remerciements

La réalisation de ce mémoire a été possible grâce au concours de plusieurs personnes à qui je voudrais témoigner toute ma reconnaissance.

Les premières personnes que je tiens à remercier sont mes encadreurs Mr. Kacimi Bachir et Mme. Teklal Fatiha pour l'orientation, la confiance, la patience qui a constitué un apport considérable sans lequel ce travail n'aurait pas pu être mené à bon port.

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

Je tiens à exprimer nos sincères remerciements à tous les professeurs qui m'ont enseigné et qui par leurs compétences j'ai soutenu dans la poursuite de mes études.

Je tiens à remercier également les ingénieurs de laboratoire de Hall technologie de Oued Aissi ainsi l'unité de recherche à Bomerdes.

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

DÉDICACES

Je dédie ce modeste travail à ma très chère et douce mère, mon très cher père, pour l'éducation qu'ils m'ont prodigué ; avec tous les moyens et aux prix de toutes les sacrifices qu'ils ont consentis pour moi. 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 ce modeste travail soit le fruit de vos sacrifices. Puisse dieu, vous accorde de la santé, bonheur et longue vie.

A mes chères frères et sœurs, et leurs enfants Yahya, Hadjar et la petite Sarah.

A tous mes amis, et toute la famille Babou.

Remerciements	
Dédicaces	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	

Sommaire

Introduction générale	1
<u>Chapitre I : Généralité sur les composites et leurs endommagements</u>	
I.1 Introduction	3
I.2 Définition.....	3
I.3 Les types des matériaux composites	3
I.4 Constituants d'un matériau composite	4
I.4.1 Matrices	4
I.4.1.a Les résines thermodurcissables.....	5
I.4.1.b Les résines thermoplastiques.....	6
I.4.2 Renforts	6
I.4.2.1Fibre de carbone	7
I.4.2.1.a Les avantages de la fibre de carbone	8
I.4.2.1.b Les inconvénients de la fibre de carbone	8
I.4.2.2 Fibre de verre	8
I.4.2.3 Forme de la fibre	9
a- Forme linéique.....	10
b- Forme surfacique.....	10
Les mats	10
Tissus et rubans	11
c- Forme multidirectionnelles.....	12

Tresses et préformes	12
Tissus multidirectionnels	12
Nid d'abeilles	13
I .5 Classification des matériaux composites	13
I .5.1 Classification suivant la forme des constituants.....	13
I .5.2 Classification suivant la nature des constituants	14
I .6 Les charges et les additifs.....	15
I .6.1 Les charges	15
I .6.2 Les additifs	16
I .7 Procédé d'élaboration.....	16
I .7.1 Moulage en contact	16
I .7.2 Moulage par projection simultanée	17
Le matériau composite stratifié	17
Architecture des matériaux composites	18
Les monocouches	18
Les sandwiches	19
I .10 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites.....	19
I .10.1 Les avantages	19
I .10.2 Les inconvénients	20
I .11 Domaine d'application	20
I .12 L'endommagement.....	21
I .12.1 Les différentes échelles	22
I .13 Caractéristiques de mécanisme d'endommagement.....	22
I .13.1 Rupture de Fibre.....	22
I .13.2 Fissuration matricielle	23

I .13.3 Délaminage.....	24
I .13.4 Décohésion fibre/matrice	24
I .14 Conclusion.....	25
<u>Chapitre II : Les interfaces dans les composites</u>	
Introduction.....	26
Définition	26
L'interphase	27
Zone interfaciale	27
Zone de contact interface/interphase	28
Observation de l'interface.....	28
Comportement d'un composite unidirectionnel.....	28
Interface fibre/matrice très forte (interface liée).....	29
Interface fibre matrice très faible (non liée)	29
Interface fibre/matrice intermédiaire	29
Rôle des interfaces et des interphases	29
Caractéristiques des phases pour une liaison compatible	30
Propriétés de la matrice ou du liant.....	30
Surface de renfort.....	30
II.9.3 L'ensimage.....	31
L'interface fibre/matrice	31
Enchevêtrement moléculaire et inter diffusion	32
Réactions chimiques	32
Emboitement mécanique.....	33
Attraction électrostatique	34
Mécanisme de dégradation de l'interface	34
Conclusion	35

Chapitre III : Essais mécaniques

Introduction.....	36
L'approche micromécanique	36
Techniques de mesure.....	36
Méthodes indirectes	36
Méthodes directes	37
Les essais micromécaniques directes	37
Essai de déchaussement (Pull Out).....	37
Essai de micro-indentation.....	39
Essai de fragmentation.....	41
Essai de compression	42
Les essais micromécaniques indirects.....	43
Essai de flexion.....	43
Essai de flexion trois points	43
Essai de flexion quatre points	44
Essai de flexion par flambement.....	44
Essai de traction	45
Traction longitudinale.....	45
Traction transverse.....	46
Essai de compression	47
Essai de fatigue	48
Les essais mécaniques à l'échelle mésoscopique.....	48
Conclusion	50

Chapitre IV : La partie expérimentale

Introduction.....	51
Matériaux d'étude	51
Préparation des échantillons.....	52
Géométries des éprouvettes de traction.....	53
Essai d'arrachement	54
Machine utilisée	55
Résultats des essais de d'arrachement	56
Résultat de lot C.....	56
Interprétation des résultats de lot C	58
IV.7.1.b Comparaison des résultats de lot C.....	60
Résultats de lot V	61
Interprétation des résultats de lot V	63
Comparaison des résultats de lot V	65
Comparaison des résultats de lot C et lot V	66
Influence de la longueur utile L_u	68
Conclusion	70
Conclusion générale	
Conclusion générale	71

Listes des figures

Figure I.1: Matériau composite	3
Figure I.2: Les différentes familles de la matrice.....	5
Figure I.3: Les différents types de renfort.....	6
Figure I.4: Fibre de carbone	7
Figure I.5: Tissu de verre	9
Figure I.6: Tissu mats.....	10
Figure I.7: Trame et chaîne d'un tissu.....	11
Figure I.8: Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus	11
Figure I.9: Tissage cylindrique et conique	12
Figure I.10: Tissus multidirectionnels.....	12
Figure I.11: Nid d'abeilles	13
Figure I.12: Les deux types de composite.....	14
Figure I.13: Moulage en contact	17
Figure I.14: Schéma d'un moulage par projection simultanée.....	17
Figure I.15: Composite stratifié	18
Figure I.16: Couche d'un composite.....	19
Figure I.17: a) composite sandwich à âme pleine, b) à nid d'abeille	19
Figure I.18: les domaines d'utilisation des matériaux composites.....	21
Figure I.19: Les différentes échelles de la microscopie	22
Figure I.20: Rupture de fibre.....	23
Figure I.21: Rupture longitudinale de la matrice.....	23
Figure I.22: Rupture transversale de la matrice	23
Figure I.23: Délaminage.....	24
Figure I.24: Décohésion fibre/matrice.....	24
Figure II.1: Interface fibre matrice	26
Figure II.2: Schéma d'une interphase	27
Figure II.3: Enchevêtrement moléculaire.....	32
Figure II.4: Réaction chimique entre deux groupes A et B dans deux surfaces séparées	33
Figure II.5: Emboîtement mécanique.....	33
Figure II.6: Attraction électrostatique	34
Figure III.1: Les principes de l'essai de pull out (a) et de déchaussement de microgoutte(b).....	38
Figure III.2: Courbe de déchaussement force en fonction de déplacement	38
Figure III.3: Principe de test d'indentation et courbe d'indentation f(h)	40
Figure III.4: Essai de fragmentation.....	41
Figure III.5: Schéma d'un essai de compression.....	42
Figure III.6: Flexion trois points	43

Figure III.7: Flexion à quatre points.....	44
Figure III.8: Schéma d'un essai de flexion par flambement	45
Figure III.9: Traction longitudinale.....	46
Figure III.10: Traction transverse.....	46
Figure III.11: Test de compression	47
Figure III.12: Montage spécifique pour la confection des éprouvettes	49
Figure III.13: Les éprouvettes après l'essai d'arrachement	49
Figure IV.1: Mèches en carbone	51
Figure IV.2: Mèches en verre.....	52
Figure IV.3: La balance et la cire utilisés.....	52
Figure IV.4: La préparation des échantillons	53
Figure IV.5: Les talons utilisés pour les éprouvettes	53
Figure IV.6: Géométrie d'éprouvette pour l'essai de traction.....	54
Figure IV.7: Schéma d'une éprouvette de déchaussement.....	54
Figure IV.8: a) Machine de traction Zwick Roel Z010,b) Mors de traction utilisé	55
Figure IV.9: Evolution forces/déplacements de lot C15	56
Figure IV.10: Evolution forces/déplacements de lot C25	57
Figure IV.11: Evolution forces/déplacements de lot C35	57
Figure IV.12: Evolution forces/déplacements de lot C45	58
Figure IV.13: Rupture totale de la mèche	59
Figure IV.14: Les différents endommagements des éprouvettes	60
Figure IV.15: Les courbes forces/déplacements de lot C.....	61
Figure IV.16: Evolution forces/déplacements de lot V15.....	62
Figure IV.17: Evolution forces/déplacements de V25	62
Figure IV.18: Evolution forces/déplacements de lot V35.....	63
Figure IV.19: Evolution forces/déplacements de lot V45.....	63
Figure IV.20: Rupture totale de la mèche	64
Figure IV.21: Les différents endommagements des éprouvettes	65
Figure IV.22: Les courbes forces/déplacements de lot V	65
Figure IV.23: Evolution forces/déplacement pour C15 et V15.....	66
Figure IV.24: Evolution forces/déplacement pour C25 et V25.....	66
Figure IV.25: Evolution forces/déplacement pour C35 et V35.....	67
Figure IV.26: Evolution forces/déplacement pour C45 et V45.....	67
Figure IV.27: Les niveaux d'effort entre lot C et lot V.....	68
Figure IV.28: Mode de rupture entre C25 et V25	68
Figure IV.29: Les courbes forces/déplacements de L'éprouvette V25 en variant la longueur utile	69
Figure IV.30: Les différents endommagements des éprouvettes pour les trois longueurs utiles	70

Liste des tableaux

Tableau I.1: Caractéristiques mécaniques de fibre de carbone [5]	7
Tableau I.2: Caractéristiques mécaniques de fibre de verre [8].....	9
Tableau IV.1: Les caractéristiques mécaniques de lot C en traction.....	56
Tableau IV.2: Les caractéristiques mécaniques de lot V en traction	61
Tableau IV.3: Caractéristiques mécaniques de l'éprouvette V25 en variant la longueur utile L_u	69

Liste des symboles

τ : Contrainte de cisaillement. [MPa]

σ_{fc} : La contrainte limite en traction. [MPa]

l_c : La longueur critique. [M]

ε : La déformation

σ : La contrainte normale. [MPa]

σ_{fl} : La contrainte de flexion. [MPa]

E_{fl} : Le module de flexion. [MPa]

E : Le module longitudinal. [MPa]

ϑ : Le coefficient de Poisson

σ_r : La contrainte à la rupture. [MPa]

F: Charge appliquée. [N]

F_{max} : Charge à la rupture. [N]

HR: Haute résistance

Introduction générale

Introduction générale

Il existe différentes familles de matériaux : les métaux, les plastiques, les composites, etc. Ces dernières années, les matériaux composites sont devenus très utilisables dans l'industrie. En particulier dans les domaines aérospatiaux et aéronautiques. Bien qu'ils sont également très utilisés dans le domaine du sport, secteur automobile, de domaine éoliens (principale consommateur actuel de fibres de carbons) et dans le domaine pétrolier (réalisations des risers composites). Le matériau composite est utilisé pour différentes raisons. Il permet une bonne conception, une résistance très forte à la corrosion en comparaison des matériaux métalliques et une réduction du nombre de pièces à assembler, et aussi aux bonnes propriétés mécaniques de ces matériaux, qui permettent un allégement des structures très recherché. Par rapport à leur nature, les matériaux composites ont une très grande adaptabilité à chaque domaine d'industrie.

Le comportement d'un composite dépend de ses deux constituants : fibre et matrice et l'interface qui lie entre eux. Ainsi, pour promouvoir une plus grande utilisation des matériaux composites, il est primordial de déterminer leurs comportements mécaniques et analyser les défauts dans ces matériaux. Pour cela, plusieurs méthodes de caractérisation ont été mises au point. Elles permettent le choix optimal du type de composite et mettent en évidence les paramètres prépondérants dans le comportement du matériau.

Dans notre étude, le travail est basé sur l'élaboration et l'étude du comportement à l'arrachement des interfaces fibre/matrice. Nous avons réalisé des essais d'arrachement pour des mèches en fibres de carbone et de verre, enchâssées dans des cylindres de résine tout en variant la longueur d'enchâssement et la longueur utile, à fin de voir leur influence sur le comportement et les propriétés obtenues.

Notre mémoire est scindé en deux parties. Une partie théorique consacrée à la recherche bibliographique et une partie expérimentale. La partie théorique constituée de trois chapitres. Dans le premier chapitre, nous présentons des généralités sur les matériaux composites (constituants de base, architectures et procédés d'élaboration) ainsi que l'étude sur les mécanismes d'endommagement des composites. Le second chapitre concerne la notion interface, son rôle et les mécanismes de dégradation. A travers le troisième chapitre nous expliquons les essais mécaniques qui nous permettent de déterminer les propriétés mécaniques dans chaque type de composites. La deuxième partie est une étude expérimentale, dans la quelle nous exposons la description des matériaux utilisés et le

procédé d'élaboration des échantillons. Des essais d'arrachement à l'échelle mésoscopique sur une mèche dont une extrémité est enrobée et centrée dans un cylindre de résine et l'autre extrémité est libre sont effectués et analysés. Nous terminerons cette étude par une conclusion générale qui débouchera sur des recommandations futures de ce thème de travail.

Chapitre I
Généralités sur les composites et
l'endommagement

I.1 Introduction

Le développement des nouveaux matériaux est soumis aux besoins des utilisateurs. Ceux-ci veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont le plus souvent à amener à optimiser les solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent complètement repenser le problème et envisager de nouveaux matériaux. En effet, on ne découvre plus de nouveaux matériaux, mais on crée plutôt des nouvelles associations de matériaux. L'un des résultats de ces associations est l'aboutissement à un matériau composite.

I.2 Définition

Un matériau composite est l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux de natures différentes. Leur association est complémentaire et permet d'aboutir à un matériau dont les performances recherchées seront supérieures à celles des composants pris séparément. Un matériau composite est constitué dans le cas le plus général d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue. La phase discontinue, appelée renfort ou matériau renforçant, est plus dure avec des propriétés mécaniques supérieures à celles de la phase continue, appelée matrice [1].

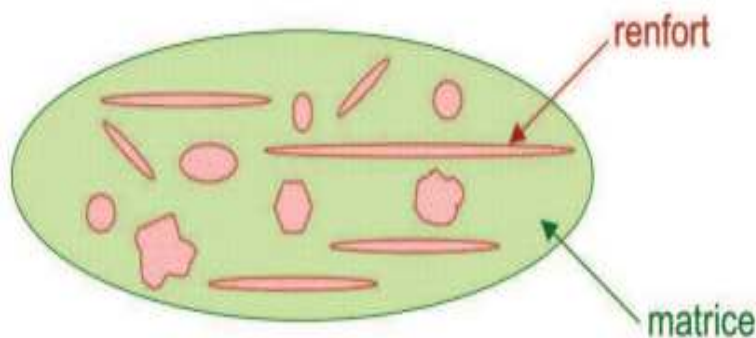


Figure I.1 : Matériau composite

I.3 Types de matériaux composites

Les matériaux composites sont classés en deux grandes classes : composites à grande diffusion et composites hautes performances.

I.3.1 Composites à grande diffusion

Ils occupent une portion de 95% des composites utilisées. Ce sont en général des plastiques armés ou de plastiques renforcés, le taux de renfort est de 30%. Dans 90% des cas, l'anisotropie n'est pas maîtrisée car les renforts sont des fibres courtes. Les principaux constituants de bases sont les résines polyesters avec des fibres de verre. Dans ce cas le renfort et la matrice sont des couts voisins [2].

I.3.2 Composites haute performance

Ils sont principalement utilisés dans l'aéronautique et sont d'un cout élevé. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%et ce sont les renforts qi influent sur le cout. Les propriétés mécaniques (résistance mécanique et rigidité) sont largement supérieures à celles des métaux, contrairement aux composites à grande diffusion. Des méthodes de calculs de structures et d'homogénéisations ont été développées pour les composites hautes performances [2].

I.4Les constituants d'un matériau composite

Le matériau composite est constitué de deux constituants essentiels : matrice et fibre

I.4.1 La matrice

La matrice est un liant qui maintient en place la dispersion des fibres, les protègephysiquement et chimiquement et assure, en plus, la liaison mécanique entre les éléments derenfort.

La matrice est généralement homogène et isotrope : on distingue les matrices céramiques, les matrices métalliques, les matrices minérales et les matrices organiques.

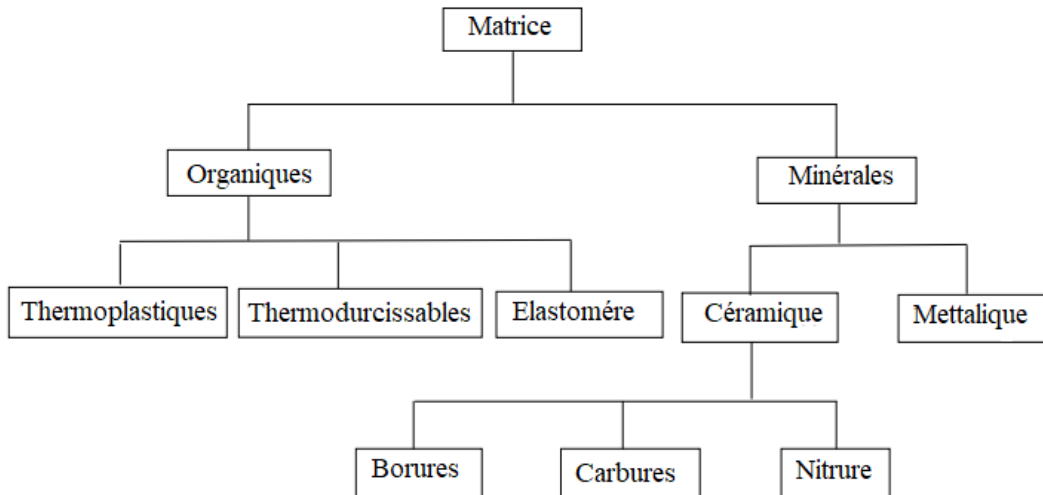


Figure I.2 : Les différentes familles de la matrice

Les résines les plus utilisées dans les matériaux composites sont les résines thermodurcissables et les résines thermoplastiques.

I.4.1.a Résines thermodurcissables

Les résines thermodurcissables ont des propriétés mécaniques élevées (traitement thermique ou physico-chimique). Ces résines ont donc la particularité de ne pouvoir être mises en forme qu'une seule fois. Les principales résines thermodurcissables utilisées dans la mise en œuvre des matériaux composites sont par ordre décroissant en tonnage : les résines polyesters insaturées, les résines de condensation, les résines époxydes [3].

Les résines époxydes ne représentent cependant que 5 % du marché composite, à cause de leur prix élevé (de l'ordre de cinq fois plus que celui des résines polyesters) [1]. Du fait de leurs bonnes caractéristiques mécaniques, les résines époxydes, généralement utilisées sans charges, sont les matrices des composites à hautes performances (constructions aéronautiques, espace, missiles, etc.).

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes :

- Masse volumique 1100 à 1500 kg/m³ ;
- Module d'élasticité en traction 3 à 5 GPa ;
- Contrainte à la rupture en traction 60 à 80 MPa ;
- Contrainte à la rupture en flexion 100 à 150 MPa ;
- Allongement à la rupture 2 à 5 % ;

- Résistance au cisaillement 30 à 50 MPa ;
- Température de fléchissement sous charge 290 °C ;

I.4.2.b Résines thermoplastiques

Ce sont des polymères pouvant être alternativement ramollis par chauffage et durcis par refroidissement dans un intervalle de température spécifique du polymère étudié. Les résines thermoplastiques présentent l'aptitude à l'état ramolli, de se mouler aisément par plasticité [4].

I.4.2 Le renfort

Le renfort est généralement composé de matériau plus dur que la résine, son rôle principal est d'assurer au matériau une grande résistance surtout à la traction, et qui se présente, généralement sous formes des fibres :

- Fibres longues unidirectionnelles (Carbone, verre) ;
- Fibres longues tissées ;
- Fibres courtes réparties aléatoirement ;

La figure I.3 présente les différents types de renfort.

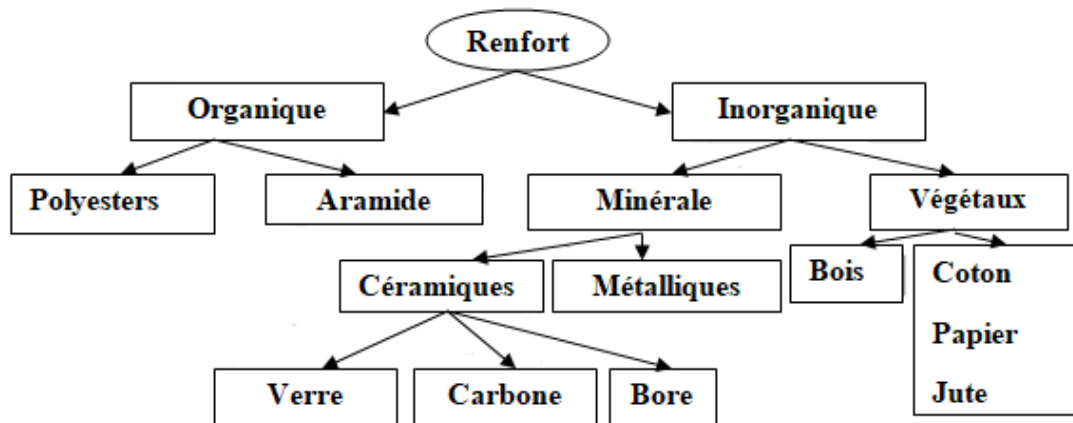


Figure I.3 : Les différents types de renfort

I.4.2.1 Fibre de carbone

La fibre de carbone se compose de fibre extrêmement fine, d'environ cinq à dix micromètres de diamètre, et est composé principalement d'atomes de carbone. Ceux-ci sont agglomérés dans des cristaux microscopiques qui sont alignés plus ou moins parallèlement à l'axe long de la fibre.



Figure I.4 : Fibre de carbone

Les fibres de carbone sont principalement utilisées pour servir de renfort dans les matériaux composites. Elles permettent d'obtenir des pièces de structure qui ont des bonnes propriétés mécaniques comme : la rigidité et la résistance à la fissuration...etc.

Les caractéristiques mécaniques de fibre de carbone sont présentées dans le tableau suivant (tableau I.1) :

Caractéristique	Fibres HR	Fibres HM	Fibres IM
Résistance en traction (MPa)	3400-4500	2000-2500	4800
Module en traction (GPa)	230-250	390-450	296
Allongement à la rupture (%)	1.4-1.8	0.5-0.6	2
Résistance en compression (MPa)	2200-2800	1300-1700	–

Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques de fibre de carbone [5]

Les fibres de carbone contiennent des avantages et des inconvénients [6] :

I.4.2.1.a Les avantages des fibres de carbone

- Excellentes propriétés mécaniques (ténacité, élasticité et module de Young) ;
- très bonne tenue en température ;
- Dilatation thermique nulle ;
- Bonne conductibilité thermique et électrique ;
- Magnétisme et perméabilité au rayon X ;
- Bonne tenue à l'humidité ;
- Usinabilité aisée ;
- Faible densité (<2) ;

I.4.2.1.b Les inconvénients des fibres 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 Fibre de verre

La fibre de verre est un filament de verre (figure I.5). Par extension, les matériaux composites renforcés de cette fibre sont aussi appelés fibre de verre. Bien que pas aussi forte ou aussi rigide que la fibre de carbone, elle est beaucoup moins chère et moins cassante pendant son utilisation. Les fibres de verre constituent avec les verres creux, les verres plats et les verres cellulaires. Elles sont les fibres les plus couramment utilisées dans le renforcement de nombreux produits polymères.



Figure I.5 :Tissu de verre

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].

Les caractéristiques mécaniques de fibre de verre sont présentées dans le tableau suivant (tableau I.4) :

Caractéristiques	Type E	Type D	Type C	Type R	Type S
Résistance en traction (MPa)	3500	2450	2800	4650	4650
Module en traction (GPa)	73,5	52,5	70	86,5	86,5
Allongement à la Rupture (%)	4,5	4,5	4	5,3	5,3

Tableau I.2 :Caractéristiques mécaniques de fibre de verre [8]

I.4.2.3 La forme de la fibre

Les fibres se présentent sous diverses formes commerciales :

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

a. Formes linéiques

Les fibres ont un diamètre de quelques microns (diamètre très petit). Alors, elles sont réunies en fils ou en mèches de différentes formes :

- Fils de base : ensemble de filaments élémentaires ;
- Fils retors : ensemble de fils simples retordus simples ;
- Mèches : ensemble de fibres élémentaires discontinues ;
- Stratifils : ensemble de fils de base continus ;

b. Formes surfaciques

Les fils peuvent être utilisés pour réaliser les formes surfaciques suivantes :

b.1 Les mats

Ce sont des nappes de fils continus ou discontinus, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle (figure I.6). Ils sont maintenus ensemble par un liant soluble ou non dans les résines. L'absence d'orientation préférentielle des fibres conduit à une isotropie des propriétés mécaniques du mat dans son plan. Il existe deux types de mat : mat à fibres courtes et à fibres continues.



Figure I.6 : Mat en verre

b.2 Tissus et rubans

Le tissu est une surface souple et résistante constituée par un assemblage régulier de fils entrelacés, tissés ou à mailles. Il est constitué d'une chaîne et une trame (figure I.7).

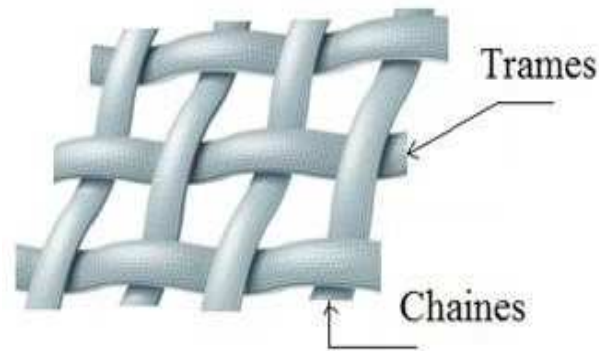
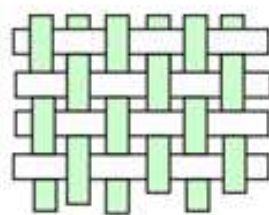


Figure I.7 : Trame et chaîne d'un tissu

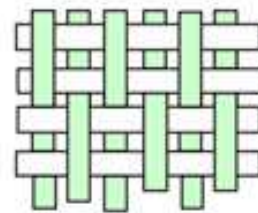
Selon le schéma d'entrecroisement des fils de chaîne et les fils de trame, que l'on nomme l'armure du tissu, on distingue plusieurs types de tissage :

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

La figure I.8 présente les principaux types d'armure utilisés pour le tissage des tissus.



a) Taffetas



b) Serge



Figure I.8 : Les principaux types d'armures utilisées pour le tissage des tissus

c. Formes multidirectionnelles

c.1 Tresses et préformes

Ce sont des tissages cylindriques ou coniques qui permettent de réaliser des pièces de révolution très résistantes ayant un diamètre variable le long de l'axe. Par ce procédé, divers tissus peuvent être obtenus en forme de "chaussettes" coniques, ogivales ou hémisphériques, utilisées pour satisfaire aux besoins de la construction aéronautique (cône de rentrée, tuyères, etc.).

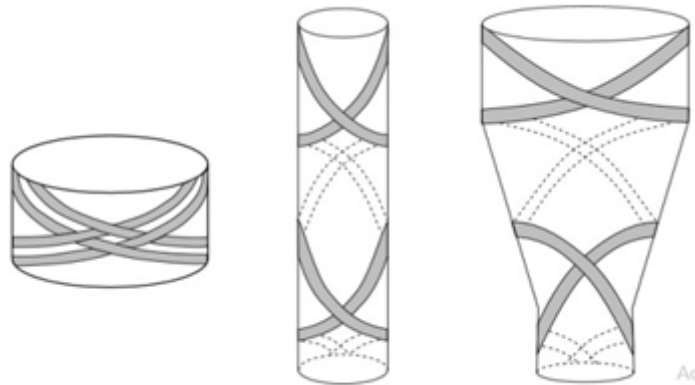
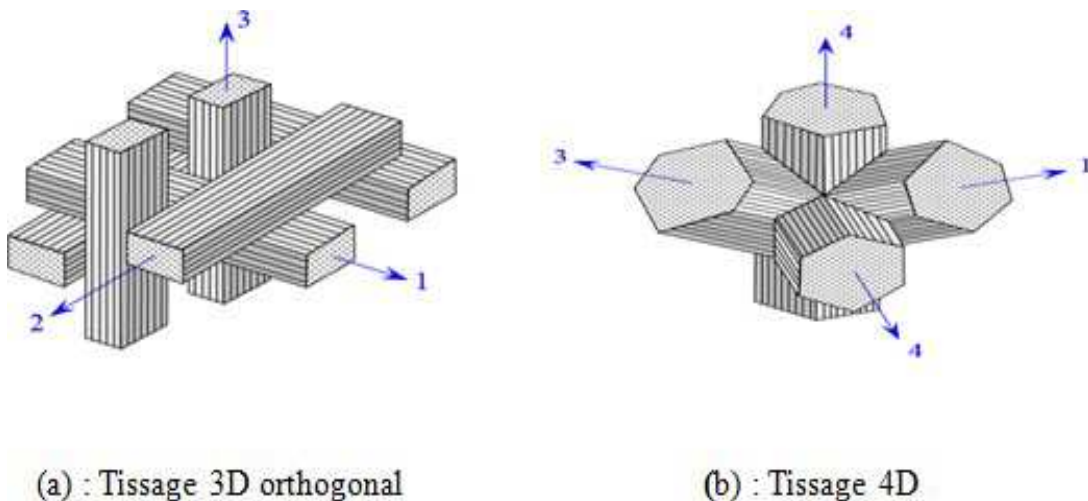


Figure I.9 : Tissage cylindrique et conique

c.2 Tissus multidirectionnels

Les fibres sont tissées dans plusieurs directions. La structure la plus simple est celle du tissage 3D, où les fils sont disposés suivant 3 directions orthogonales. Dans un tissage 4D, les fils sont disposés suivant 4 directions. Ceci permet d'obtenir un tissu très dense et épais mais par conséquent peu souple [9]. La figure I.10 présente des tissages 3D et tissages 4D.



(a) : Tissage 3D orthogonal

(b) : Tissage 4D

Figure I.10: Tissus multidirectionnels

c.3 Nid d'abeilles

Ces structures sont composées d'une peau-âme et matériau de couplage (figure I.11). Elles sont utilisées dans les structures sandwich.

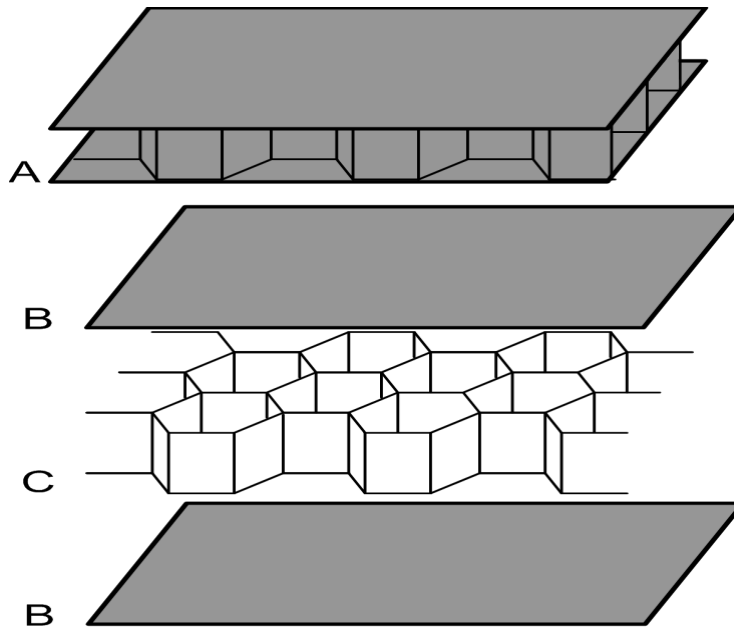


Figure I.11 : Nid d'abeilles

I.5 Classification des matériaux composites

On peut classer les matériaux composites selon la nature et la forme des constituants.

I.5.1 Classification suivant la forme des constituants

I.5.1.a Les composites à fibres

Constitués de fibres continues ou discontinues. Leur orientation permet de moduler les propriétés mécaniques du matériau et d'obtenir des matériaux isotropes ou anisotropes [10].

I.5.1.b Les composites à particule

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux [10]. Elles sont considérées comme une charge pour réduire le coût du matériau, sans affecter les autres caractéristiques mécaniques.

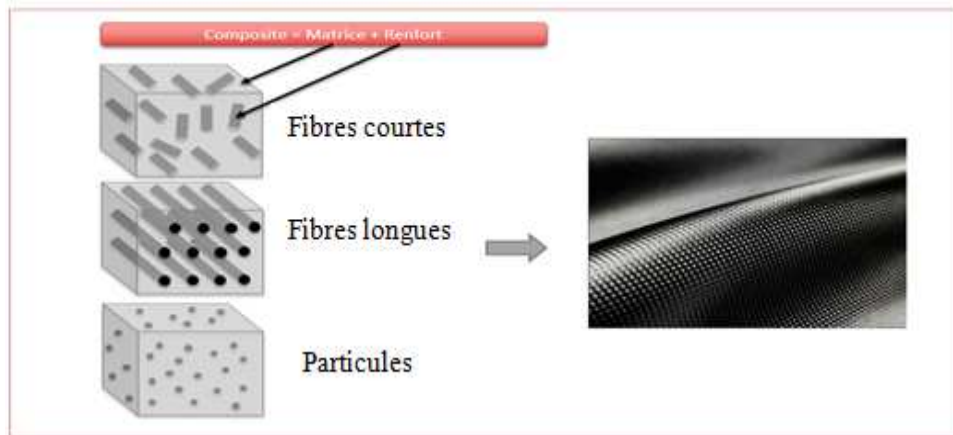


Figure I.12 : Classification suivant la forme des constituants

I.5.2 Classification suivant la nature des constituants

Dans ce cas, les matériaux composites sont classés en trois catégories : les composites à matrices organiques, les composites à matrices métalliques et les composites à matrices minérales.

I.5.2.1 Les composites à matrices organiques

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.5.2.2 Les composites à matrices métalliques

(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.5.2.3 Les composites à matrices minérales

Composites à matrice minérale (céramique), avec :

- des fibres métalliques : bore,

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

Au moment de l'utilisation, chacune de ces trois catégories a un domaine de température qu'elles ne doivent pas le dépasser. Par exemple, les composites à matrices organiques, la température limite est entre 200 à 300°C, 600°C pour les composites à matrices métalliques et 1000°C pour les composites à matrices organiques.

Remarque

- Entre le renfort et la matrice, existe une zone de liaison appelée interface.
- Des additifs, en particulier des produits chimiques, rentrent dans la composition du composite pour former des interphasesEtc. Cependant ils n'interviennent pratiquement jamais dans le calcul de structure composite.
- Un matériau composite est la plupart du temps hétérogène et anisotrope.

I.6 Les charges et les additifs

I.6.1 Les charges

Les charges sont des renforcements des matériaux composites par un matériau en forme de fines particules. Elles sont utilisées dans les composites de grande diffusion. Ainsi, elles ont pour rôle de modifier les caractéristiques des matériaux et permettent un abaissement de prix de revient.

On distingue deux types de charges : charges renforçantes et charges non renforçantes.

I.6.1.a Charges renforçantes

L'objectif de cette charge est d'améliorer les propriétés mécaniques, la rigidité mécanique ainsi la tenue aux agents chimiques.

I.6.1.b Charges non renforçantes

Généralement, ce type de charge est ajouté à fin de réduire le cout de résine.

I.6.2 Les additifs

Les additifs sont ajoutés à la résine à fin d'améliorer les propriétés mécaniques, l'aspect et la durabilité du produit à fabriquer. Ils s'ajoutent à faibles quantités, et interviennent comme :

- Des agents anti-UV ;
- Des agents anti-retraits ;
- Des accélérateurs de polymérisation ;
- Des lubrifiants et agents de démoulage ;
- Des catalyseurs ;

I.7 Procédés d'élaboration

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

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mis en forme à la géométrie de la pièce.
- Durcissement du système :
 - » Soit par polycondensation et réticulation pour les matrices Thermodurcissables.
 - » Soit par simple refroidissement pour les matières thermoplastiques.

Le moulage reste le procédé le plus utilisé dans l'élaboration de matériaux composites comme : moulage par injection de résine, moulage en continue, moulage par projection simultanée, moulage en contacte.....etc.

I.7.1 Moulage en contact

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule (figure I.13) et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

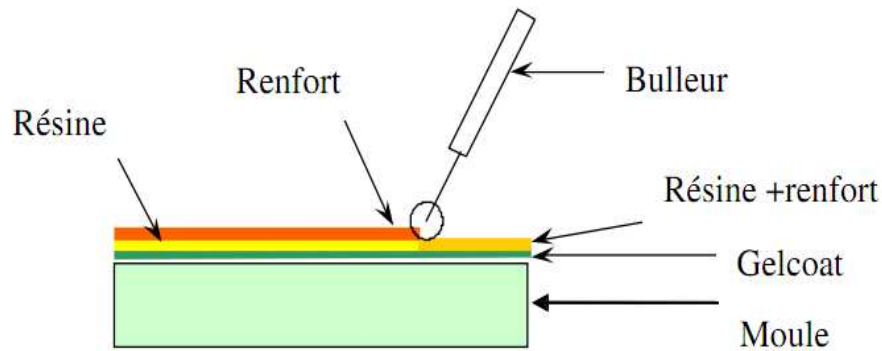


Figure I.13 : Moulage en contact

I.7.2 Moulage par projection simultanée

Le procédé consiste à projeter simultanément sur le moule les fibres de verre coupées et la résine nécessaire à leur imprégnation (figure I.14). Après projection sur le moule, un travail manuel de roulage et de débullage est nécessaire pour bien plaquer ou compacter le mélange verre-résine sur le moule et éliminer au maximum les bulles générées par le système de projection.

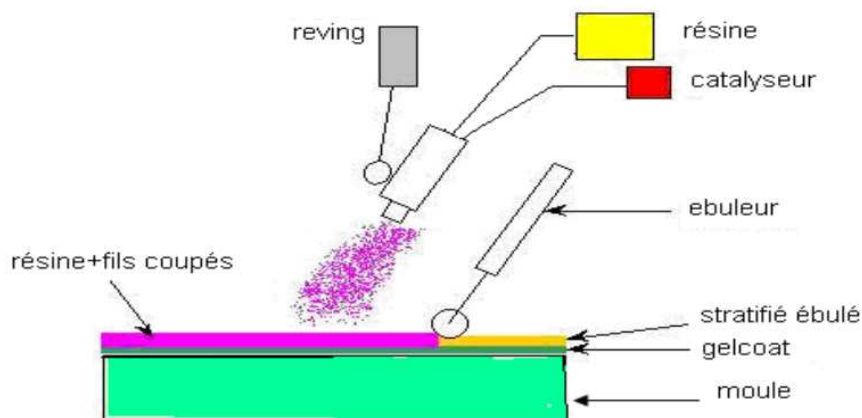


Figure I.14 : Schéma d'un moulage par projection simultanée

I.8 Le matériau composite stratifié

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacune une orientation propre par rapport à un référentiel (figure I.15) commun aux couches et désigné comme le référentiel de stratifié.

Les propriétés mécaniques spécifiques dépendent de choix d'empilement.

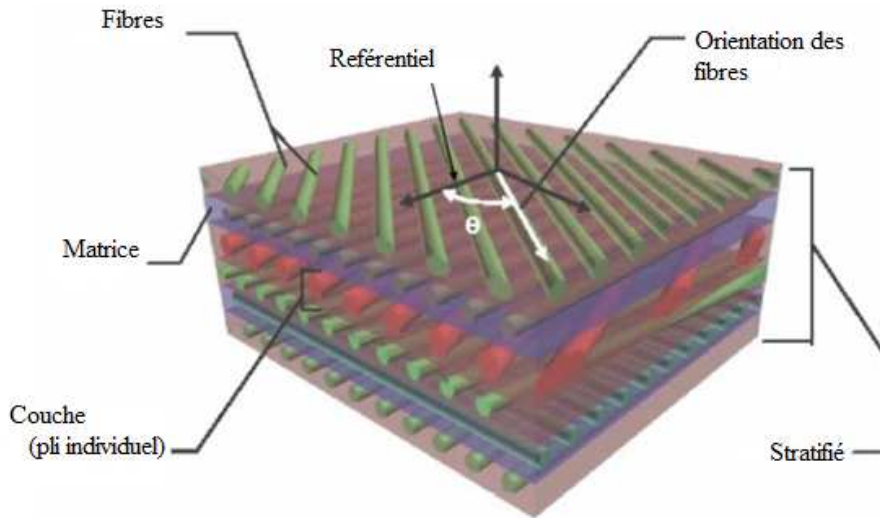


Figure I.15: Composite stratifié.

On peut avoir des stratifiés de type :

- Equilibré : stratifié comportant autant de couches orientées suivant la direction $+\theta$ que des couches orientées suivant la direction $-\theta$.
- Symétrique : stratifié comportant des couches disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
- Orthogonal : stratifié comportant autant de couches à 0° que des couches à 90° .

I.9 Architecture des matériaux composites

I.9.1 Les monocouches

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres continue, à fibres courtes, fibres tissés et mat.

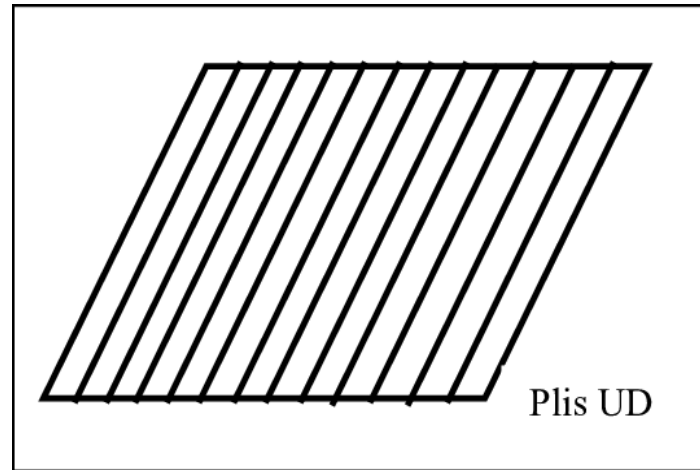


Figure I.16 : Couche d'un composite

I.9.2 Les sandwichs

Un matériau sandwich est une classe spéciale de matériaux composites qui est fabriquée en assemblant deux peaux semelles externes minces mais rigides à une âme (ou cœur) interne légère mais épaisse. Il possède une grande rigidité en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

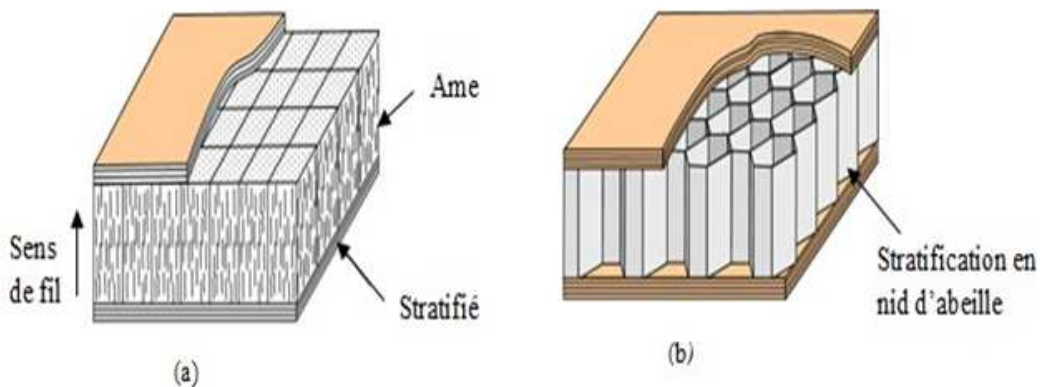


Figure I.17 : a) composite sandwich à âme pleine, b) à nid d'abeille

I.10 Les avantages et les inconvénients des matériaux composites

I.10.1 Les avantages

L'avantage principal des matériaux composites est leur aptitude à être conçus à la carte. Ainsi, on peut concevoir des matériaux avec une forte anisotropie. Cet avantage permet de concevoir la pièce en tenant compte des sollicitations mécaniques qu'elle va subir.

D'autre part, on distingue d'autres avantages comme :

- Caractéristiques mécaniques très élevées ;
- Faible densité (et donc facilité de transport, manutention, pose) ;
- Excellent isolant thermique ;
- Isolant thermique (de 30 à 20 KV/mm) ;
- Faible dilatation ;
- Excellente résistance aux agressions extérieures (corrosion chimique, rayonnement IR ou UV, et même aux graffitis) ;

I.10.2 Les inconvénients

L'un des rares inconvénients est la difficulté de réparation, bien qu'il existe des possibilités, par stratification ou par collage. Alors les inconvénients des matériaux composites sont :

- Ils sont beaucoup sensibles à tous les impacts. Une petite faille peut engendrer de grosses déformations ;
- La détection de ces problèmes est difficile, ce qui entraîne une rigueur extrême dans leur assemblage ;
- La mise en œuvre des réparations est beaucoup plus complexe ;

I.11 Domaine d'application

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en terme de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi le grand avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application. Cependant, ils restent très chers à fabriquer, d'où leurs domaines d'applications :

- électricité et électronique ;
- bâtiments et travaux publics ;

-transports routiers, ferroviaires, maritimes aériens et spatiaux (notamment militaire) ;

-santé ;

-sports et loisirs ;

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



Figure I.18 : les domaines d'utilisation des matériaux composites

I.12 L'endommagement

C'est l'apparition dans un matériau de dommages causés par l'usure, Une attaque physique ou chimique. Il conduit à une dégradation de ses capacités physiques pouvant conduire à la rupture.

On distingue différents types d'endommagement comme : rupture de fibre, fissuration matricielle qui se propagent soit longitudinale ou transversale, délaminage et décohésion fibre/matrice.

I.12.1 Différentes échelles

Du côté que leur structure n'est pas homogène, il n'existe pas de mécanisme unique mais plusieurs types de dégradation. Ces derniers apparaissent à différentes échelles, alors on distingue :

- A l'échelle microscopique apparaissent des ruptures d'adhésion entre les fibres et la matrice (décohésion fibres /matrice).
- A l'échelle mésoscopique, ou échelle de pli, on observe des fissures intralaminaires transverses (perpendiculaires à la direction de sollicitation) ou longitudinales (dans la direction de l'application de l'effort).
- A l'échelle macroscopique, on observe le phénomène de délaminage qui correspond à une séparation locale entre deux couches lié à une concentration importante de contraintes de cisaillement amorcé au bord de la structure.

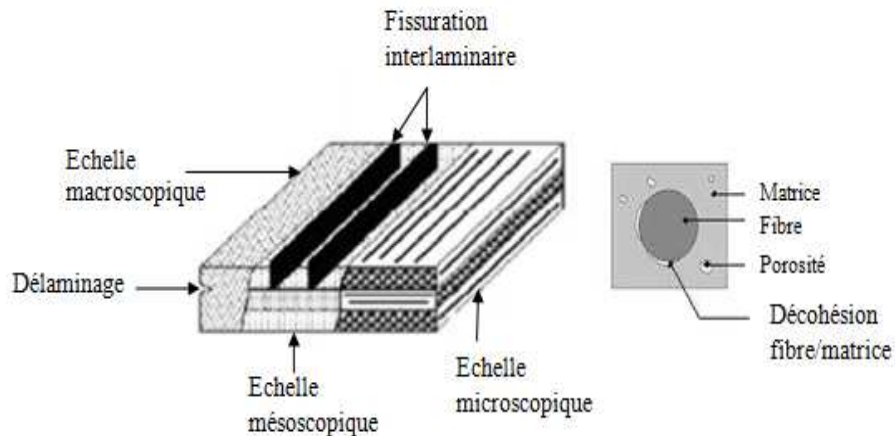


Figure I.19 : Les différentes échelles de la microscopie

I.13 Caractéristiques des mécanismes d'endommagement

I.13.1 Rupture de fibre

Généralement, ce processus d'endommagement est étudié sur des composites unidirectionnels soumis à une traction uni axiale suivant l'axe des fibres. Il conduit à la rupture d'un composite unidirectionnel dépend de la statistique de rupture de fibre. La rupture de fibre intervient lorsque la contrainte de traction σ_t dans une fibre atteint la contrainte σ_r à la rupture de la fibre.

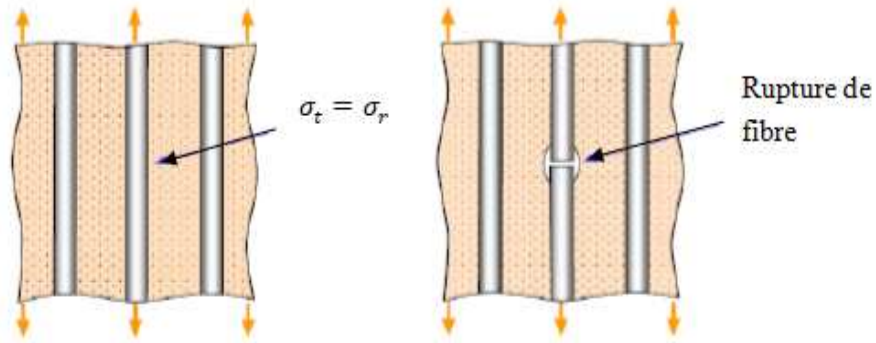


Figure I.20 : Rupture de fibre

I.13.2 Fissuration matricielle

La direction et le mode d'endommagement dépendent de l'orientation et de la proportion des renforts. Les microfissures se produisent dans la matrice par une fissuration transverse (intra laminaire) et une fissuration longitudinale. Elles se propagent suivant l'orientation du chargement, perpendiculaire à l'axe de traction ou à la sollicitation dans le cas d'un cisaillement.

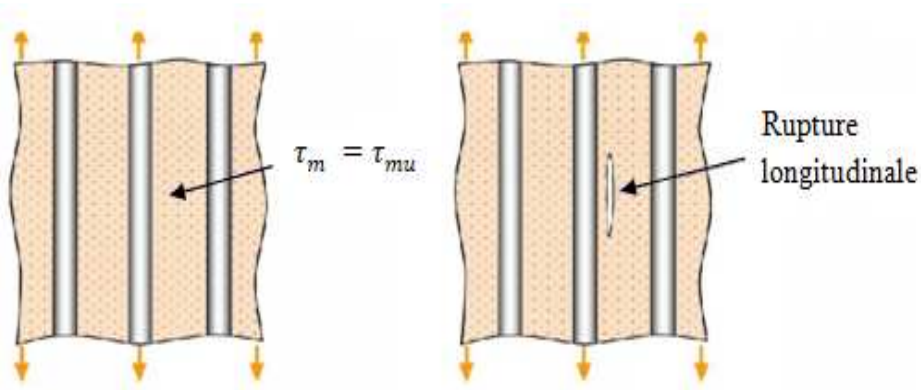


Figure I.21: Rupture longitudinale de la matrice

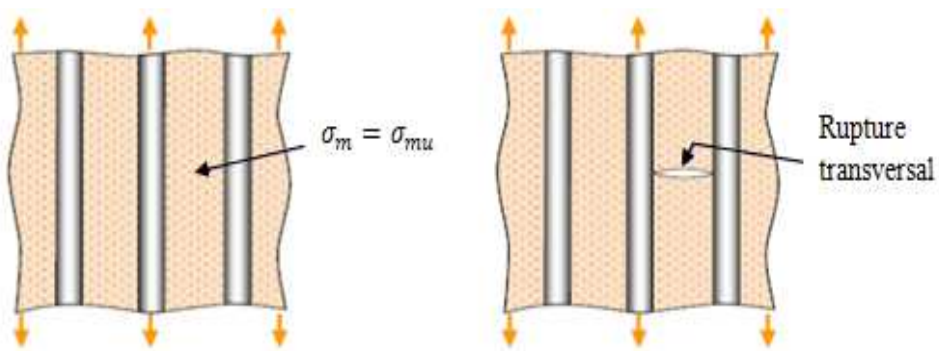


Figure I.22: Rupture transversale de la matrice

I.13.3 Délaminage

La délamination est la propriété à se cisailier dans son épaisseur longitudinalement. C'est un endommagement inter laminaire qui conduit à une décohésion entre deux plis d'orientations différentes.

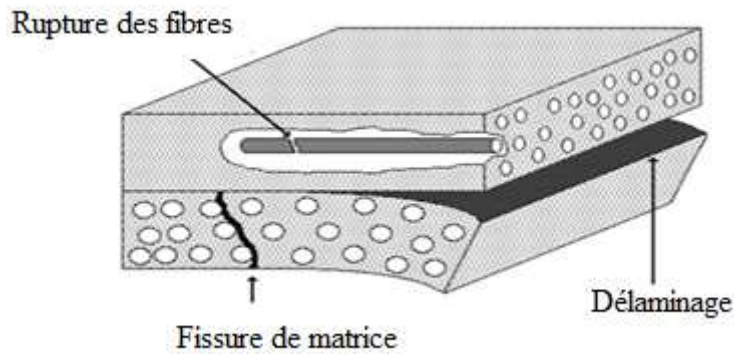


Figure I.23 : Délaminage

I.13.4 Décohésion fibre/matrice

L'interface fibre/matrice constitue le point le plus faible à l'intérieur des plis. La décohésion de l'interface intervient dans le cas de cisaillement, en se propageant le long de fibre et former des fissures transverses ou longitudinales.

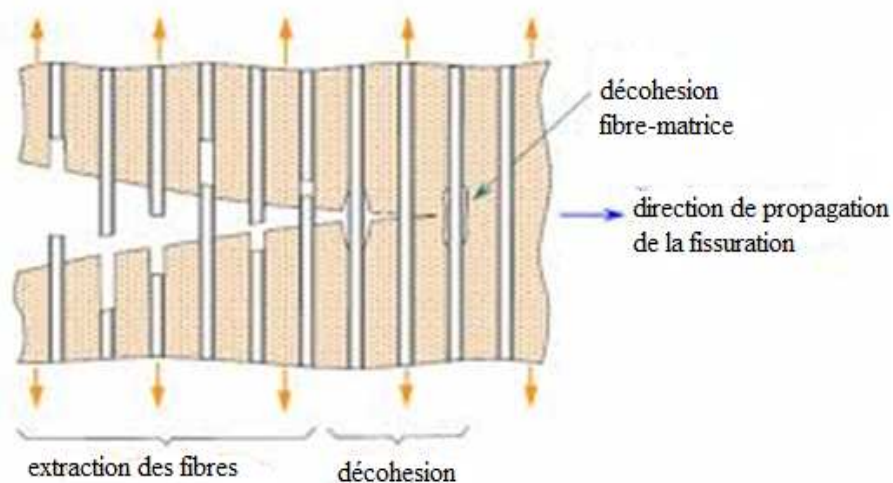


Figure I.24 : Décohésion fibre/matrice

I.14 Conclusion

Ce chapitre a fait l'objet de généralités sur les matériaux composites, leurs propriétés mécaniques, leurs domaines d'application, ainsi quelques notions sur l'endommagement et les différentes échelles d'observation. On remarque que les matériaux composites sont aujourd'hui largement utilisés dans des domaines très divers, grâce à leurs propriétés mécaniques qui dépendent fortement des caractéristiques de la zone interfaciale. Dans le chapitre II, nous allons étudier la notion « interface » pour mieux connaître le comportement mécanique de ces matériaux.

Chapitre II

Les interfaces dans les matériaux composites

II.1 Introduction

Les matériaux composites présentent de nombreuses interfaces de natures variées. L'interface est considéré comme le troisième constituant des composites avec la fibre et la matrice vu son rôle mécanique très important dans les phénomènes de renforcement et de rupture (transfert de charge). Le problème qui se pose c'est que la notion interface est floue. Pour cela, beaucoup de recherches sont effectuées pour l'amélioration de l'interface à fin d'obtenir une bonne adhérence fibre/matrice.

II.2 Définition

L'interface est un maillon très important dans le domaine des matériaux composites. Elle est la surface de jonction qui sépare la fibre et la matrice. C'est l'élément qui conditionne le degré de synergie de fibre/matrice qui s'établit entre les constituants lors de l'élaboration de composite, elle est également le siège de concentration de contraintes résiduelles.

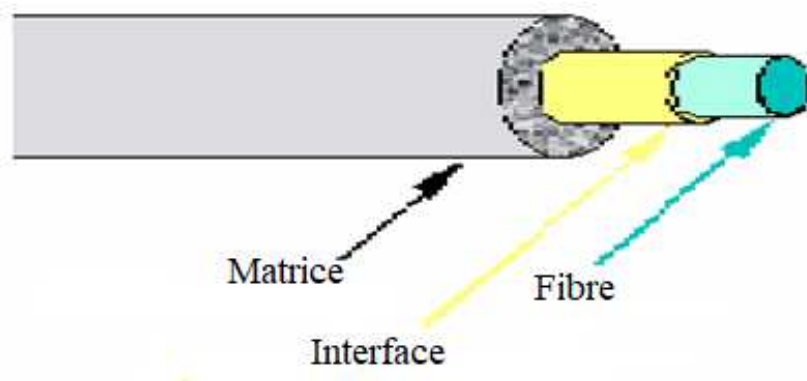


Figure II.1 : Interface fibre/matrice

A l'échelle macroscopique, l'interface est une surface sans épaisseur, peut être classé en deux groupes :

- Les interfaces générées par le procédé de mise en œuvre du matériau.

L'interface inter plis, défini par la superposition des plis et intra plis ou inter mèches au niveau d'un pli.

- Les interfaces liées à la structure elle-même du composite, créées par l'association des composants de bases (matrice/renfort).

II.3 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. Cette notion apparaît pour désigner la zone interfaciale tridimensionnelle, et optimiser les phénomènes de déviations de fissures. L'interphase désigne donc l'aspect macroscopique et structural de l'interface.

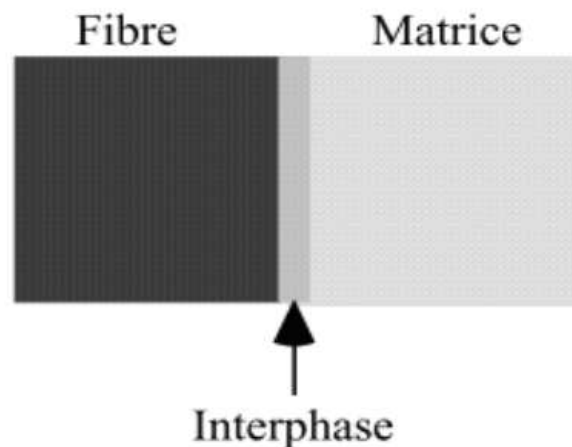


Figure II.2 : Schéma d'une interphase

II.4 Zone inter faciale

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.

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.

II.5 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 se de toutes sortes constituant ce que Bi Kerman [11] 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.5.1 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. On note le rayon central de carbone et la couche extérieur de carbone pyrolytique servant d'interface avec matrice.

À une échelle encore plus réduite, on observe en microscopie à haute résolution la zone de contact entre la surface relativement bien ordonnée des fibres de carbone et la matrice amorcée de résine [12].

II.6 Comportement d'un composite unidirectionnel

Le composite unidirectionnel est supposé se comporte comme un matériau dont les propriétés mécaniques varient d'une direction à une autre mais semblable le long de ce matériau. 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 [13] :

II.6.1 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.6.2 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 inter facial 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.6.3 Interface fibre/matrice intermédiaire

Dans le cas d'une force de liaison fibre/matrice intermédiaire, la composite présente un comportement dit pseudo-ductile, provenant de la multi fissuration 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 [13].

II.7 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 constituant 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 inter faciale, 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 [14]. 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 tout le matériau ;
- La déviation des fissures matricielles ;

II.8 Caractéristiques des phases pour une liaison compatible

II.8.1 Propriétés de la matrice ou du liant

Formant la phase continue du composite, ce sont leur propriétés en masse qui important : module d'élasticité et résistance, résistance à la propagation des fissures, durée de vie de matériau, tenue à l'environnement au sens large. Sans invoquer l'existence des réactions, l'interaction entraîne des modifications de structure et que l'état de contrainte locale modifie notablement la réponse de matériau.

II.8.2 Surface de 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 produit absorbés et qui risquent de se localisé 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 [15].

II.8.3 L'ensimage

L'ensimage est une opération qui désigne les traitements de surface appliqués aux fibres de renfort d'un matériau composite, en sortie de filière (ensimage textile) et sur les tissus (ensimage plastique), désigné à faciliter les opérations ultérieures de transformation ou mis en œuvre. On distingue deux types d'ensimage : ensimage textile, ensimage plastique.

L'ensimage textile appliqué sur les filaments, consiste à déposer un agent de liaison assurant la cohésion des filaments entre eux, diminuant l'abrasion et facilitant les manipulations ultérieures (tissage) et éviter la formation de charges électrostatiques. Il est surtout utilisé pour les fibres de verre et de céramique, avec une quantité importante (5 à 10%). Généralement, il est incompatible avec le système de résine d'imprégnation.

L'ensimage plastique appliqué sur les tissus, consiste à déposer un agent de pontage à fin d'assurer une liaison physico-chimique entre les fibres et la résine et protéger la fibre de son environnement.

II.9 L'interface fibre/matrice

Les composites fibres de Carbone/matrice présentent une interface plus forte que leurs homologues renforcés fibre de verre. Ce renfort de l'interface est notamment lié à un phénomène physique appelé transcrillation. A la différence des composites à matrice thermodurcissable, pour lequel l'adhésion fibre/matrice est assurée à l'aide d'interactions chimiques, pour les composites à matrice thermoplastique, l'interface fibre/matrice met en jeu des interactions complexes, qui entraînent des changements microstructuraux. 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 : enchevêtrement moléculaire et inter diffusion, réactions chimiques, attraction électrostatique et emboîtement mécanique.

II.9.1 Enchevêtrement moléculaire et inter diffusion

Un inter diffusion peut avoir lieu entre des atomes ou des molécules au niveau de l'interface (figure II.3). 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 [16].

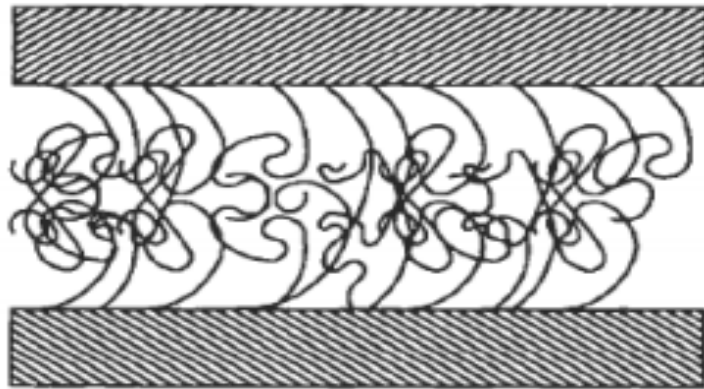


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..3 :Enchevêtrement moléculaire

II.9.2 Réactions chimiques

Cette liaison a lieu lorsque des groupes chimiques d'une surface A réagissent avec des groupes compatibles d'une surface adjacente B (Figure II.4). La force de la liaison dépend étroitement du type de la liaison ainsi que du nombre de liaisons par unité de surface [17].

Par exemple, le traitement d'oxydation des fibres de carbone est largement connu et favorise une meilleure interface avec différents types de polymères [18]. 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 [19].

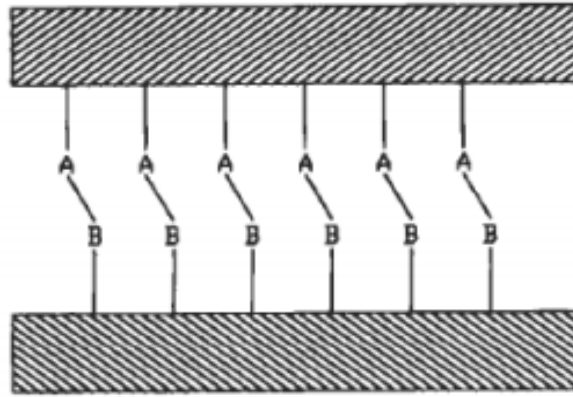


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..4 : Réaction chimique entre deux groupes A et B dans deux surfaces séparées

II.9.3 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 [20]. Les différentes modifications de la morphologie de surface donnent lieu des sites d'ancrage (Figure II.5).

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.

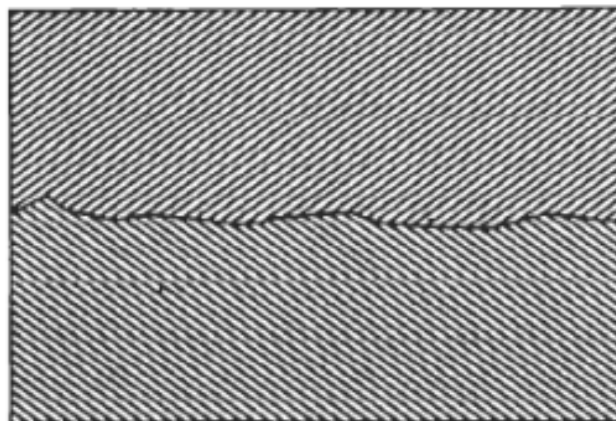


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..5 : Emboîtement mécanique

II.9.4 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.6). 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 [19].

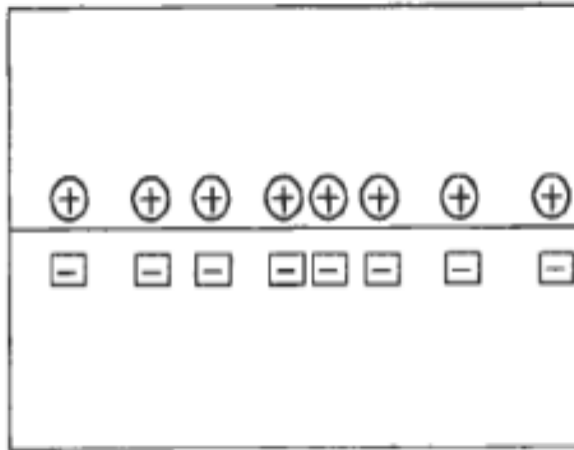


Figure Erreur ! Il n'y a pas de texte répondant à ce style dans ce document..6 : Attraction électrostatique

II.10 Mécanisme de dégradation de l'interface

Parmi les différents types de mécanisme de dégradation, des études académiques sont envisageables 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 composites où la matrice ne subit a 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 contraintes induites par le gonflement différentiel sont en deçà des seuils d'endommagement. La cause majeure du vieillissement devient alors la dégradation des zones interfaciales.

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 mécanismes physico-chimique de dégradation qui en résultent. Les dimensions de cette phase, ainsi que la nécessité de réaliser une approche institut 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

Pour des raisons de fiabilité, il est nécessaire de connaître l'état de l'endommagement d'une structure travaillante en matériaux composites.

Les propriétés mécaniques de ces matériaux dépendent de la nature de l'interface et l'interphase et leurs structures. Alors, en conséquence de sécurité, l'interface joue un rôle important dans les performances des composites. Elle assure une liaison intime fibre /matrice et la déviation des fissures matricielles. Il est donc nécessaire de caractériser le comportement mécanique d'un matériau composite. Pour cela, on présentera les essais mécaniques dans le chapitre III.

Chapitre III
Essais mécaniques

III.1 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. Beaucoup d'essais mécaniques ont été faits à fin de qualifier l'interface comme les essais de traction, flexion.....etc. Car à chaque conception d'une nouvelle structure, il est nécessaire de connaître le comportement mécanique des matériaux et leurs propriétés mécaniques.

III.2 L'approche micromécanique

En générale, l'approche micromécanique consiste à déterminer la contrainte et la déformation de chacun des constituants de matériau composite : le renfort et la matrice. Ainsi, elle sert à décrire le comportement global du matériau hétérogène à partir du comportement de chacun de ces constituants [21].

III.3 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 groupes :

III.3.1 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.

III.3.2 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 mono filamentaire (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.4 Les essais micromécaniques directes

III.4.1 Essai de déchaussement (Pull Out)

Le test de déchaussement ou test de la goutte, est la méthode la plus utilisée. Cet essai s'agit de solliciter une fibre unitaire entourée de résine polymère. Une goutte ellipsoïde de résine est déposée concentriquement autour de la surface d'une fibre unitaire.

L'essai de déchaussement consiste à appliquer un effort de traction sur une fibre en utilisant la résine, et à mesurer la force nécessaire pour extraire cette fibre de sa gaine de matrice. La contrainte de traction est soumise directement à l'interface qui devient une contrainte de cisaillement. Cette contrainte est supposée uniforme sur toute la longueur de la fibre en contact avec la résine. Quand la force de cisaillement atteint sa valeur limite, le déchaussement se produit et la goutte peut être déplacée sur la longueur de la fibre [22].

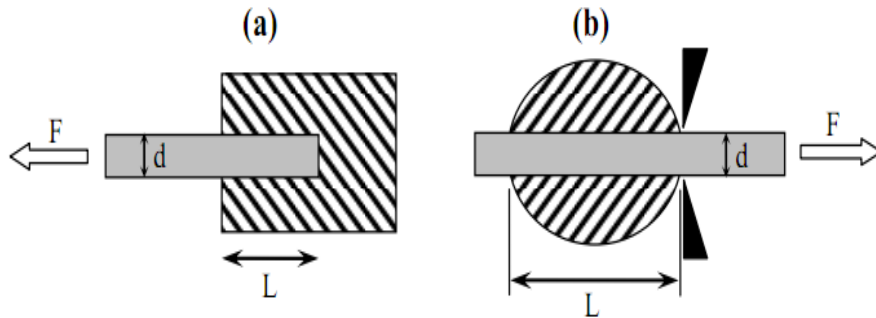


Figure III.1 : Les principes de l'essai de pull out (a) et de déchaussement de microgoutte(b).

Ce test nécessite la fabrication d'un composite modèle qui est constitué d'une fibre enchâssée dans une matrice, où une partie de la fibre est à l'extérieur de la matrice. Les deux extrémités de la fibre sont enchâssées dans des blocs du même matériau que la matrice, avec la partie médiane de la fibre qui est libre. Alors, la fibre est extraite de la matrice à l'aide d'une machine de traction et la force est mesurée en fonction de déplacement.

La figure II.2 présente la courbe de la force en fonction de déplacement. Alors, on observe un comportement linéaire qui correspond à une sollicitation élastique de l'ensemble (fibre, matrice et l'interface). Ensuite, la pente de la courbe diminue et il aura un amorçage de fissure. Puis, cette pente continue sa diminution jusqu'à la force maximale. Toute la partie entourée de la matrice se déchausse et la microgoutte se glisse le long de la fibre.

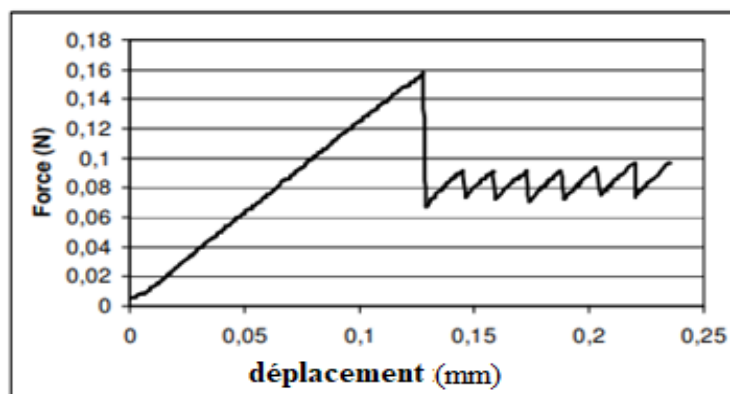


Figure III.2 : Courbe de déchaussement force en fonction de déplacement

La qualité de l'interface est évaluée en utilisant la résistance interfaciale (IFSS). Celle-ci est calculée à partir de la charge maximale de déchaussement F_{max} et la contrainte de cisaillement τ (l'équation III.1).

$$\tau = IFSS = \frac{F}{\pi DL} \quad (III. 1)$$

Où :

D : c'est le diamètre de la fibre.

L : C'est la longueur de contact fibre/matrice.

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.4.2 Essai de micro-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 [23]. C'est un essai qui consiste à appliquer une charge à la surface d'un matériau à l'aide d'un indenteur qui peut prendre différentes formes géométriques suivant la méthode d'essai. Pendant l'indentation le matériau sous l'indenteur se déforme de manière élasto-plastique, la déformation, plus au moins prononcée suivant le matériau, pouvant s'accompagner ou non d'une fissuration. Après le retrait de l'indenteur, on observe une empreinte résiduelle que l'on peut mesurer et étudier. L'essai d'indentation est essentiellement utilisé pour caractériser la dureté d'un matériau. Dans cet essai, on doit respecter deux conditions :

- Coupe bien perpendiculaire aux fibres ;
- Nécessite d'un appareillage spécifique ;

Cette technique permet d'étudier les propriétés mécaniques des matériaux à différentes échelles. Un matériau homogène peut être testé indifféremment en nano, micro ou macro indentation ; au contraire, pour des matériaux hétérogènes, la réponse à l'indentation dépendra du volume plastifié sous l'indenteur [24].

Cette méthode est actuellement dotée d'un processus de prise de mesure et d'acquisition de donnée totalement automatisé [25]. 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 décohérence de la fibre de sa gain de matrice (figure III.3), 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.

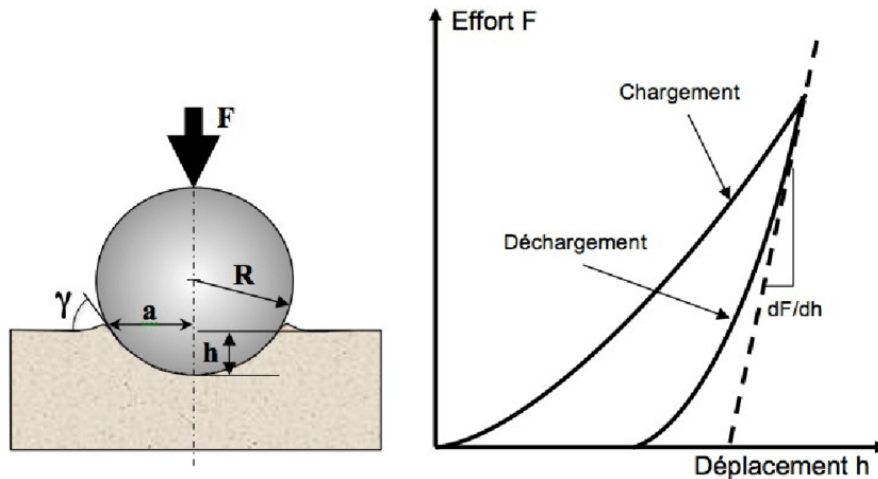


Figure III.3 : Principe de test d'indentation et courbe d'indentation $f(h)$.

L'essai d'indentation a été largement utilisé et étudié en raison de la facilité qu'il procure pour estimer les propriétés mécaniques des matériaux à partir de la courbe force-déplacement sur de petits volumes de matière. Les principales propriétés qu'il permet d'obtenir sont le module de Young et la dureté, mais le coefficient d'érouissage, la limite d'élasticité et la ténacité à la rupture peuvent également être calculés à partir des courbes force-déplacement enregistrées.

III.4.2.1 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.4.2.2 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.4.3 Essai de fragmentation

Le test de fragmentation est l'un des essais les plus couramment utilisés pour la détermination de la résistance inter faciale. Cet essai consiste en l'application de contrainte axiale croissante à un échantillon contenant une seule fibre noyée dans une matrice polymère. La matrice doit être transparente et doit avoir une déformation à la rupture au moins trois fois plus importante que celles des fibres. La charge est transférée de la matrice vers la fibre par cisaillement au niveau de l'interface. Quand la contrainte atteint la contrainte limite de traction de la fibre, celle-ci se rompt. Ce processus continue jusqu'à saturation et obtention de fragments de fibres.

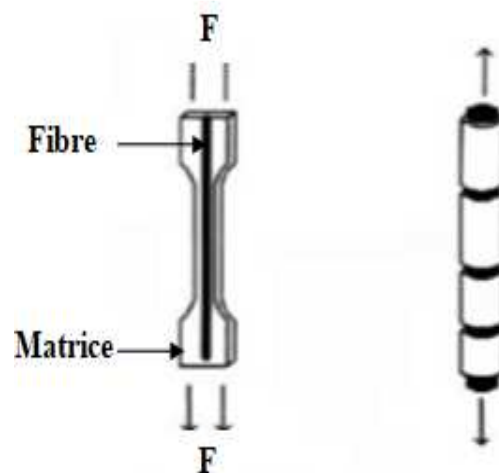


Figure III.4 : Essai de fragmentation

Le degré de transfert de charge pour chaque système fibre/matrice peut être évalué en terme de la résistance inter faciale (τ) :

$$\tau = \frac{\sigma_{fc}(l_c)D}{2 l_c} \quad (III.2)$$

Où :

D :diamètre de la fibre ;

σ_{fc} : La contrainte limite en traction ;

l_c : La longueur critique;

III.4.4 Essai de compression

L'essai de compression consiste à appliquer un effort de compression à une vitesse constante sur un barreau parallélépipédique disposé verticalement (figure III.5). Il détermine la contrainte à la rupture en compression. Pour cet essai, la résistance du matériau composite unidirectionnel dépend du multiple facteur tel que : la fibre, la matrice et la résistance interfaciale. 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 [26] soit au niveau des extrémités de la fibre et se propage sur une longueur critique L_c à vitesse constante qui croit 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 [27].

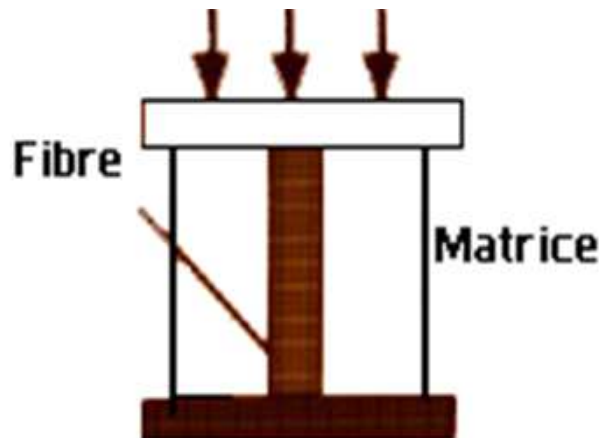


Figure III.5 : Schéma d'un essai de compression

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.

III.5 Les essais indirects

III.5.1 Essai de flexion

La flexion est la déformation d'un objet sous l'action d'une charge. Dans le cas d'une poutre, c'est un essai mécanique utilisé pour tester la résistance en flexion et elle tend à rapprocher ses deux extrémités. Il existe plusieurs types, on distingue : la flexion trois points, la flexion quatre points et la flexion par flambement.

III.5.1.1 Essai de flexion trois points

La flexion trois points est un essai mécanique classique. C'est un essai beaucoup utilisé à fin de déterminer la rigidité et la résistance en flexion des matériaux composites. Il consiste à déformer une éprouvette parallépipédique reposant sur deux appuis simples. Cette éprouvette est soumise à une charge concentrée appliquée au milieu de la poutre (figure III.6). Cet essai permet de connaître :

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

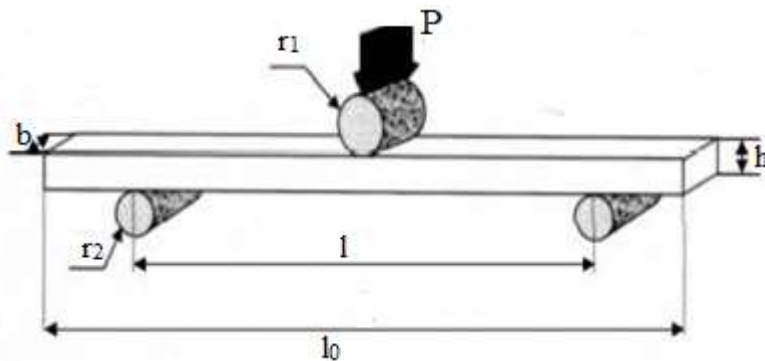


Figure III.6 : Flexion trois points

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

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

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

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

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

$$\mathbf{RA} = \mathbf{RB} = \frac{F}{2} \quad (\text{III.5})$$

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

$$f_{\max} = \frac{F.L^3}{48.E.I} \quad (\text{III.6})$$

L'expression de la déformation :

$$\epsilon_{\max} = \frac{6f.h}{L^2} \quad (\text{III.7})$$

III.5.1.2 Essai de flexion quatre points

L'essai de flexion à quatre points consiste à exercer entre les appuis deux points d'application de la charge, distance de L (figure III.7) où l'effort tranchant est nulle dans la zone des contraintes maximales. Ainsi, le moment fléchissant est constant.

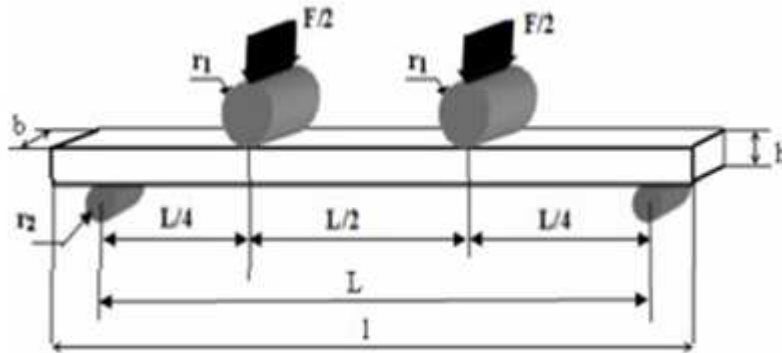


Figure III.7 : Flexion à quatre points

La contrainte de flexion s'exprime :

$$\sigma_{fl} = \frac{3FL}{4bh^2} \quad (\text{III.8})$$

Le module de flexion :

$$E_{fl} = \frac{11L^3F}{64bh^3f} \quad (\text{III.9})$$

III.5.1.3 Essai de flexion par flambement

Le flambement est un phénomène d'instabilité d'une structure élastique qui s'applique généralement sur des poutres élancées. Dans cet essai, les poutres sont soumises à un effort de compression, se fléchissent et se déforment perpendiculairement à l'axe de compression (figure III.8).

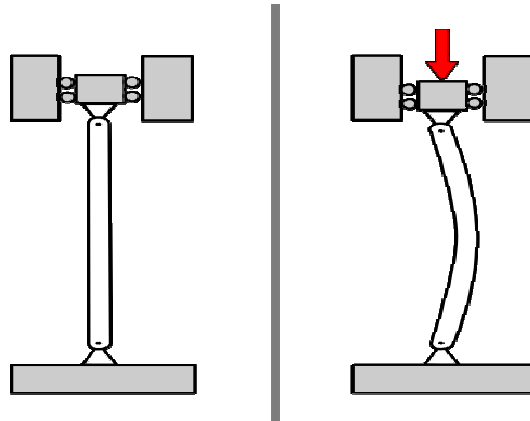


Figure III.8 : Schéma d'un essai de flexion par flambement

L'essai de flambement permet de contourner les problèmes de concentrations de contraintes de contact générées par les appuis en flexion à trois ou quatre points.

III.5.2 Essai de traction

L'essai de traction est un essai qui permet de déterminer le comportement élastique d'un matériau et mesurer le degré de résistance de sa rupture. Cette expérience consiste à placer une petite barre du matériau à étudier entre les mâchoires d'une machine de traction qui tire sur la barre jusqu'à sa rupture. Cet essai donne plusieurs valeurs importants comme : module de Young et l'allongement....Etc.

L'essai de traction est effectué en utilisant des éprouvettes normalisées, elles sont soumises à une extension progressives dans le sens de :

- Longueur des fibres (traction longitudinale) ;
- Perpendiculaire aux fibres (traction transversale) ;

III.5.2.1 Traction longitudinale

Dans ce cas, la charge F_1 est exercée suivant deux directions : suivant la direction des fibres ou suivant la direction de chaîne. La figure III.9 présente la charge F_1 qui s'exerce sur la section droite S_1 du matériau.

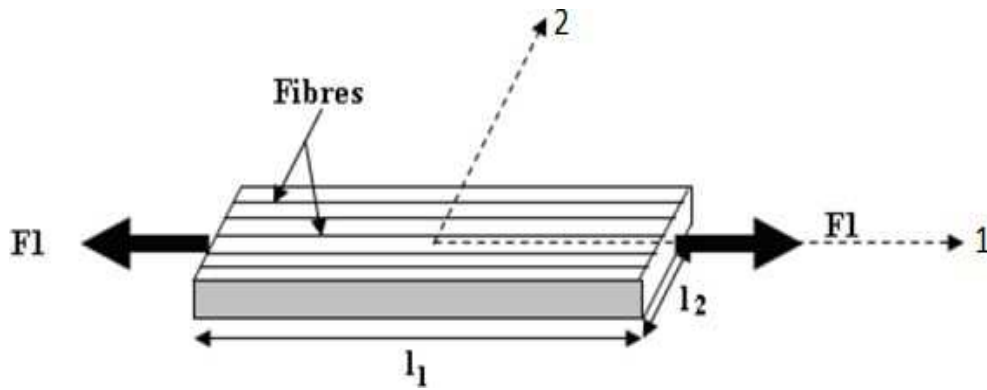


Figure III.9 : Traction longitudinale

La contrainte normale est donnée par l'équation suivante :

$$\sigma_1 = \frac{F_1}{S_1} \quad (\text{III. 10})$$

L'équation de déformation :

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} \quad (\text{III. 11})$$

Le module longitudinal :

$$E = \frac{\sigma}{\varepsilon} \quad (\text{III. 12})$$

III.5.2.2 Traction transverse

Dans ce cas, l'effort F est appliqué perpendiculairement (transverse) aux fibres sur la section du matériau.

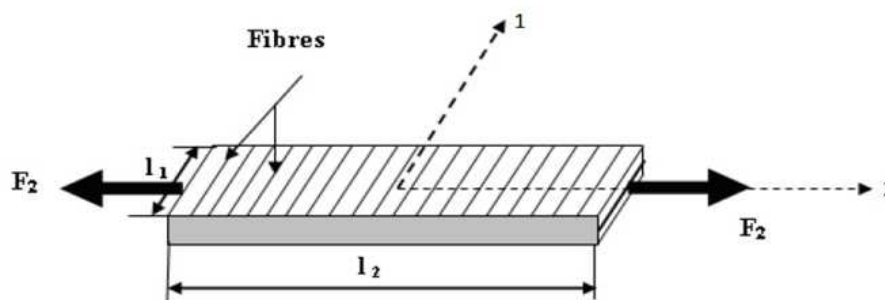


Figure III.10 : Traction transverse

La contrainte normale est :

$$\sigma = \frac{f}{s} \quad (\text{III.13})$$

Avec :

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

Le module de Yong et le coefficient de Poisson sont :

$$E = \frac{\delta}{\varepsilon} \quad (\text{III.14})$$

$$\nu = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2} \quad (\text{III.15})$$

III.5.3 Essai de compression

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique, placé entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées (figure III.11). Cet essai 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.

L'essai de compression est surtout utilisé à fin de déterminer la contrainte de rupture des matériaux fragiles (comme les céramiques) qui sont difficiles à usiner pour un essai de traction. Si le matériau étudié est ductile, la rupture ne peut pas être atteinte avec ce test.

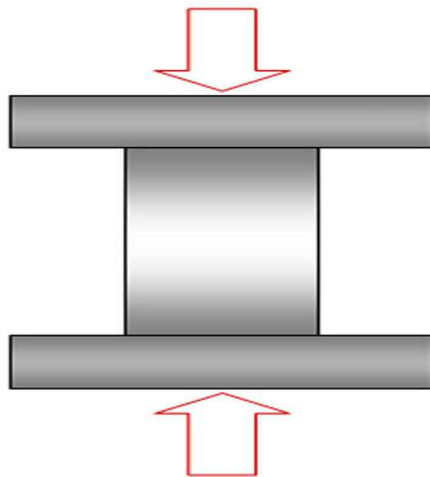


Figure III.11 : Test de compression

La contrainte à la rupture en compression est définie par la formule suivante :

$$\sigma_r = \frac{F}{l \cdot h} \quad (\text{III.16})$$

Avec :

- l Longueur de l'éprouvette ;
- h L'épaisseur de l'éprouvette ;

III.5.4 Fatigue

L'essai de la fatigue est un essai qui consiste à étudier le comportement sous sollicitation cyclique des matériaux et à déterminer sa résistance. Ce processus sert à modifier les propriétés locales d'un matériau et entraîne la rupture de la structure. Les étapes principales de la fatigue sont : l'amorçage des fissures, la propagation des fissures et la rupture finale.

Les paramètres qui sont utilisés à fin de prédire le comportement en fatigue ainsi le nombre de cycles à rupture d'une structure sont : l'amplitude de cette sollicitation (chargement ou déformation imposée) σ_a , sa valeur moyenne σ_m [28] et le paramètre **R**.

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{\max} - \sigma_{\min}}{2} \quad (\text{III.17})$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{\max} + \sigma_{\min}}{2} \quad (\text{III.18})$$

$$R = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_{\min}} \quad (\text{III.19})$$

III.6 Les essais mécaniques sur l'échelle mésoscopique

L'échelle mésoscopique est une échelle intermédiaire entre l'échelle microscopique et macroscopique.

On prend l'exemple, l'essai d'arrachement effectué par Hana Al jewifi [29]. Dans cet essai, elle a utilisé des fils de filament en verre et une matrice cimentaire. Les éprouvettes sont constituées d'un fil multi filamentaire dont une extrémité (l'extrémité enrobée) est centrée dans un cylindre de mortier. L'autre extrémité (l'extrémité libre) est collée entre deux plaques d'époxy pour permettre une mise en place facile dans la machine d'essai utilisée. 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 fendu sur toute sa longueur pour faciliter le démoulage. Un mastic siliconé a été appliqué sur la fente pour assurer l'étanchéité avant le coulage du mortier ainsi que sur la zone d'appui du tube. Une graisse légère a été utilisée comme agent de démoulage, appliqué sur la surface interne du tube. Le fil multi-filamentaire a été maintenu centré sur l'axe de l'éprouvette grâce à un montage à bois spécifiquement conçu pour la confection permettant la fixation centrée du fil [29].

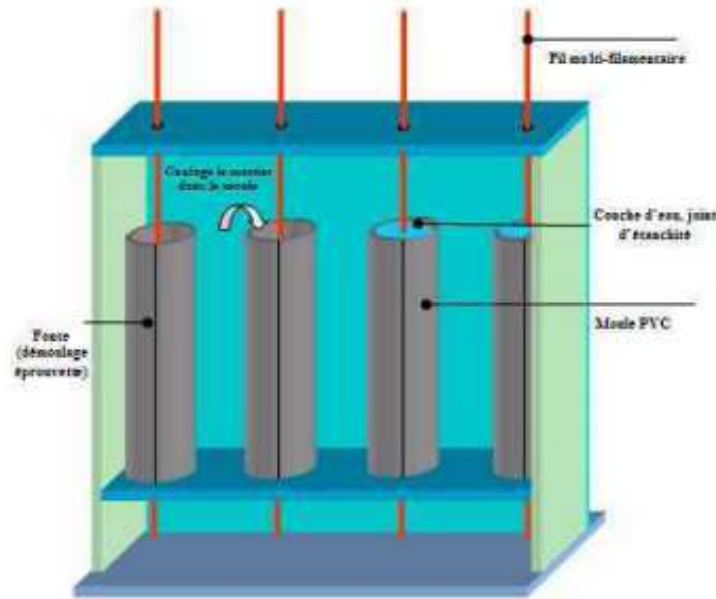


Figure III.12 : Montage spécifique pour la confection des éprouvettes

Dans cet essai, un déplacement est imposé à l'extrémité libre d'un fil, l'autre extrémité est enrobée dans une matrice cimentaire sur une longueur L_e et l'effort de traction imposé au fil est mesuré. Une augmentation monotone du déplacement conduit à la rupture progressive de la liaison fil/matrice, sous forme de ruptures locales des liaisons filaments/matrice et de ruptures de certains filaments le long de l'interface fil/matrice.

La figure III.13 présente les éprouvettes obtenues pour l'essai d'arrachement.

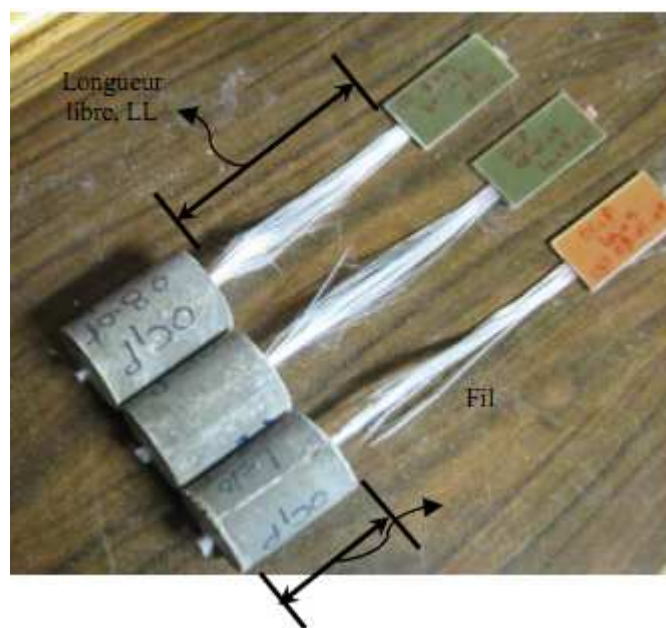


Figure III.13 : Les éprouvettes après l'essai d'arrachement

On constate que l'influence de la longueur enrobée sur le comportement mécanique est forte, lorsque L_e augmente, la charge augmente. Il existe une valeur seuil de L_e dans laquelle les paramètres mécaniques descriptifs du comportement à l'arrachement deviennent invariants.

III.7 Conclusion

Pour mieux définir le rôle et la performance d'un matériau composite, ses méthodes de caractérisation qui sont nombreuses, doivent tenir en compte toutes les conditions. Alors on va réaliser des essais mécaniques destinés, non seulement à mesurer les propriétés mécaniques, mais aussi à déterminer les caractéristiques des matrices, des renforts et de l'interface.

Chapitre IV

La partie expérimentale

IV.1 Introduction

Le travail présenté dans cette partie est l'élaboration et la caractérisation du comportement mécanique à l'arrachement d'une mèche de fibre de carbone ou de verre enrobée et centrée dans un cylindre de résine en polyester. Nous avons effectué des essais d'arrachement à l'échelle mésoscopique en utilisant un diamètre des cylindres de 28 mm en variant la longueur enchâssée (15mm, 25mm, 35mm, 45mm) et la longueur utile (5cm, 10cm, 15cm).

IV.2 Matériaux d'étude

Deux renforts sont utilisés dans cette étude. Le premier s'agit d'un renfort unidirectionnel de fibre de carbone (figure IV.1) de masse surfacique de 160g/m^2 et de 0,16mm d'épaisseur, avec une répartition de 7,6 mèches/cm pour les chaînes qui constituent une proportion de 97% dans le renfort.

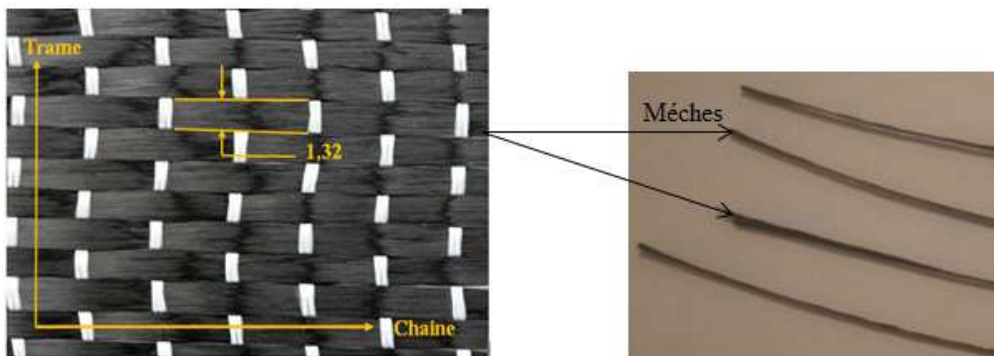


Figure IV.1: Mèches en carbone

Le deuxième renfort est en fibre de verre de type E (figure IV.2). Il est sous forme de tissu. Le tissu a les propriétés suivantes : un poids de 800g/m^2 , pas d'espacement entre les chaînes, par contre, un vide de 1,80mm sépare les trames.

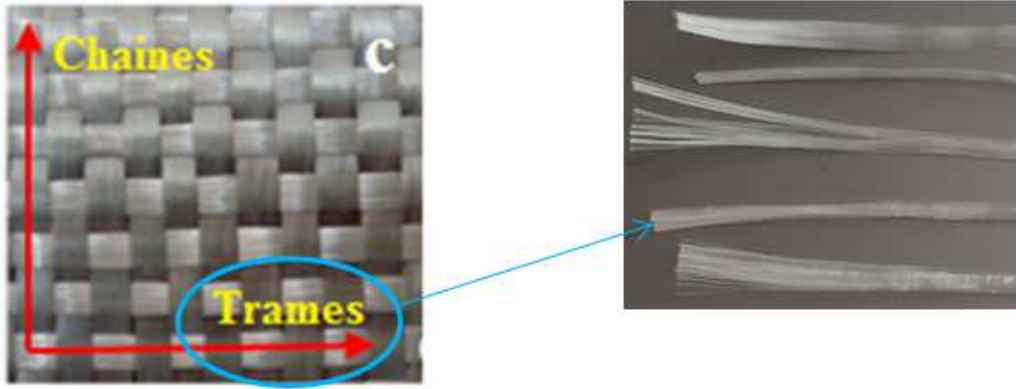


Figure IV.2: Mèches en verre

IV.3 Préparation des échantillons

Pour le moulage des éprouvettes, nous avons utilisé un tube PVC de diamètre externe 32 mm et diamètre interne de 28 mm. Nous avons fixé le tube sur un dispositif en bois (figure IV.4) à l'aide d'une colle pour assurer l'étanchéité. Nous avons utilisé une cire (figure IV.3) 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, nous avons mélangé une quantité de la résine avec 1,5% de durcisseur à l'aide d'une balance (figure IV.3) qui pèse le mélange (résine-durcisseur) et nous l'avons injecté pour remplir les tubes PVC. On maintient les cylindres dans cet état dans une température ambiante pendant 24 heures, ensuite ils sont démoulés.

On obtient ainsi des éprouvettes pour les essais de déchaussement de mèche dans un cylindre de résine.



Figure IV.3: La balance et la cire utilisés

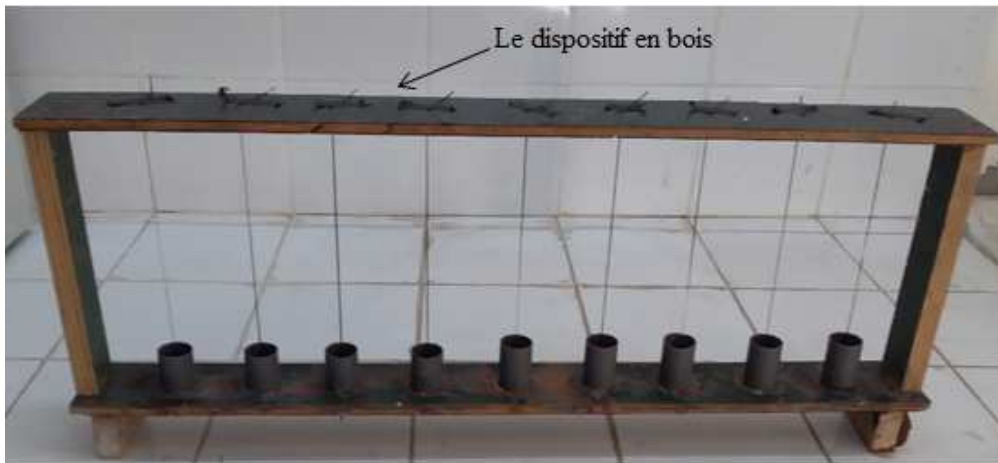


Figure IV.4: La préparation des échantillons

Pour la fixation de l'éprouvette pendant l'essai d'arrachement, nous avons collés des talons d'aluminium dans la partie libre de la mèche, nous obtenons ainsi les différentes éprouvettes montrées sur la figure IV.5. Les talons ont une longueur de 25 mm, une largeur de 15mm et une épaisseur de 1.5 mm.

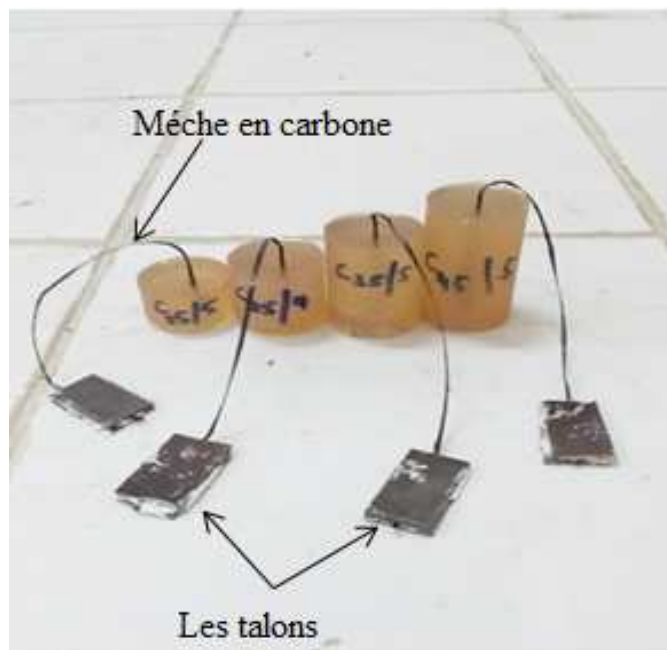


Figure IV.5: Eprouvettes obtenues en mèche de carbone.

IV.4 Géométries des éprouvettes d'arrachement

Les dimensions choisies pour les éprouvettes sont montrées sur la figure IV.6.

$$L_{tot} = L_e + L_u + L_t$$

Avec :

L_{tot} : la longueur totale de l'éprouvette

L_e : la longueur enchâssée de l'éprouvette

L_u : la longueur utile de l'éprouvette

L_t : longueur de talon

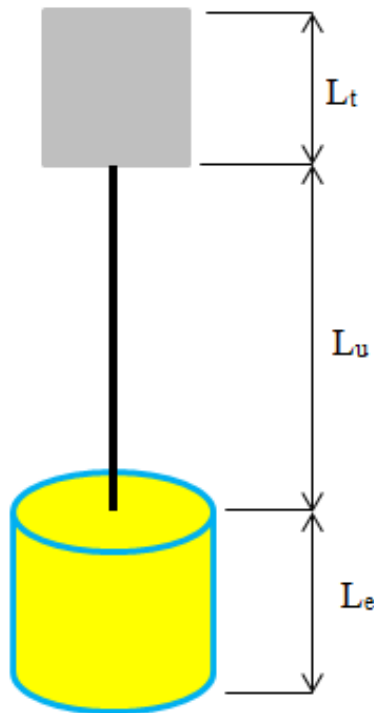


Figure IV.6: Géométrie de l'éprouvette pour l'essai d'arrachement.

IV.5 Essai d'arrachement

L'essai d'arrachement 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 ou de verre, dont une partie est enchâssée dans un cylindre de résine à une longueur (L_e), soumis à une force de traction uni axiale (figure IV.7), jusqu'à provoquer la décohésion à l'interface puis l'extraction complète de la fibre.

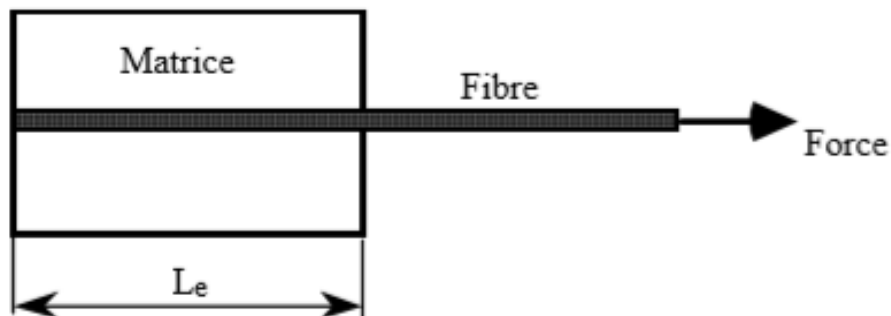


Figure IV.7: Schéma d'une éprouvette de déchaussement

IV.6 Machine utilisée

Les essais d'arrachement sont réalisés sur une machine de traction marque ZwickRoel Z010 (figure IV.8), c'est une machine d'essais mécaniques qui permet de réaliser divers essais mécaniques comme la traction, la flexion et la compression.

Elle est équipée d'un capteur de force fixé sur la traverse mobile, capteur de déplacement, de deux mors mobiles qui fixent l'éprouvette pour réaliser l'essai de traction et d'un enregistreur graphique (ordinateur). La traverse mobile est entraînée par deux vis latérales qui sont actionnées par un motoréducteur à courant continu. La vitesse du mors mobile varie de 1 à 500 mm/min avec une cellule de charge de 10 KN. Pour la réalisation des essais d'arrachement, nous avons conçu et réalisé un dispositif pour maintenir le cylindre dans les mors de la machine pendant l'essai.

Dans notre étude, les essais d'arrachement sont réalisés à une vitesse constante de 2 mm/min.



Figure IV.8: a) Machine de traction Zwick Roel Z010, b) Mors de traction utilisé

IV.7 Résultats des essais d'arrachement

Nous avons effectué des essais d'arrachement sur des éprouvettes en variant la longueur enchâssée (tableau IV.1 et IV.2) et la longueur utile (tableau IV.3). Nous avons testé cinq éprouvettes pour chaque lot. On distingue le nom de chaque lot par la lettre C pour la mèche de carbone et la lettre V pour la mèche de verre. Les tableaux qui suivent présentent les caractéristiques mécaniques obtenues par les essais d'arrachement ainsi que les courbes d'évolution force en fonction de déplacement.

IV.7.1 Résultat de lot C

Lot C	L_e (mm)	L_u (mm)	F_{\max} (N)	Δl (mm)
C15	15	100	60,15 \pm 5,94	0,99 \pm 0,12
C25	25	100	68,69 \pm 9,23	0,98 \pm 0,1
C35	35	100	56,39 \pm 10,49	0,965 \pm 0,09
C45	45	100	59,92 \pm 9,29	0,73 \pm 0,13

Tableau IV.1: Les caractéristiques mécaniques de lot C.

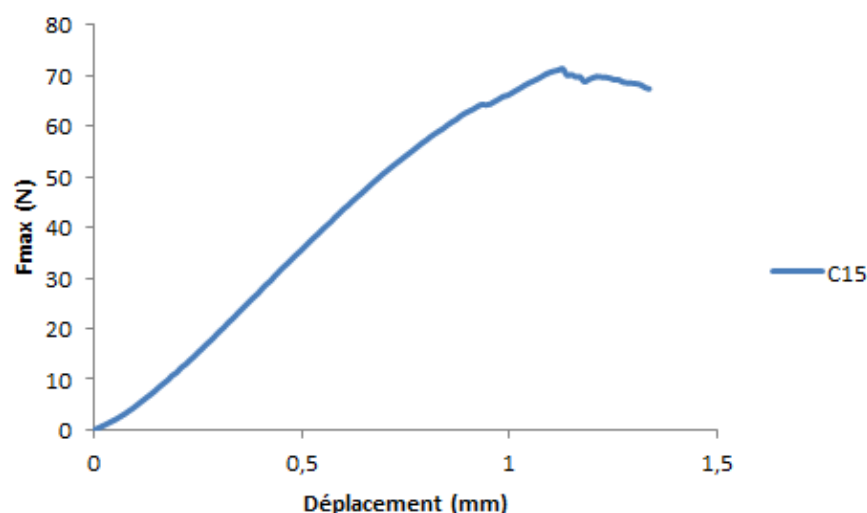


Figure IV.9: Evolution forces/déplacements de lot C15

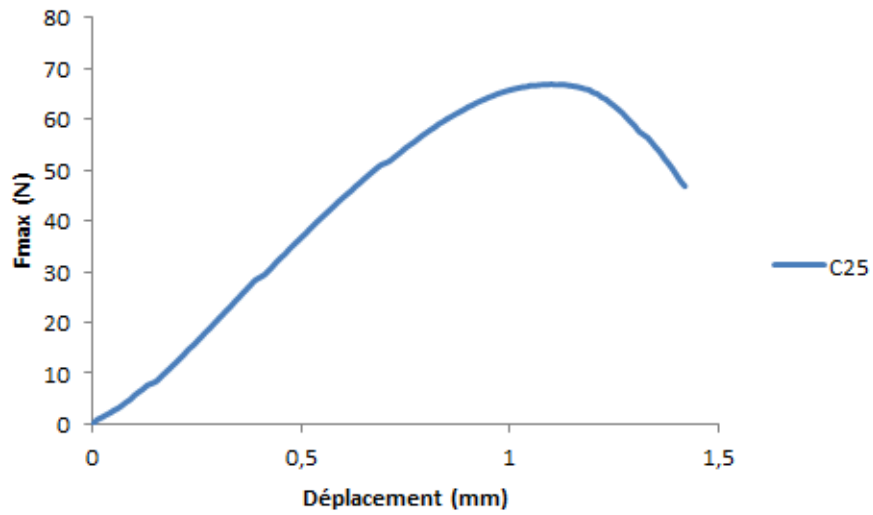


Figure IV.10: Evolution forces/déplacements de lot C25

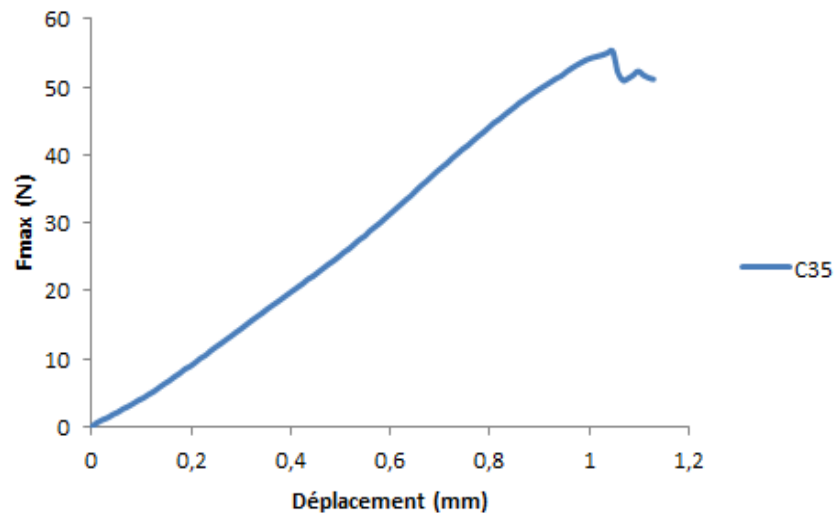


Figure IV.11: Evolution forces/déplacements de lot C35

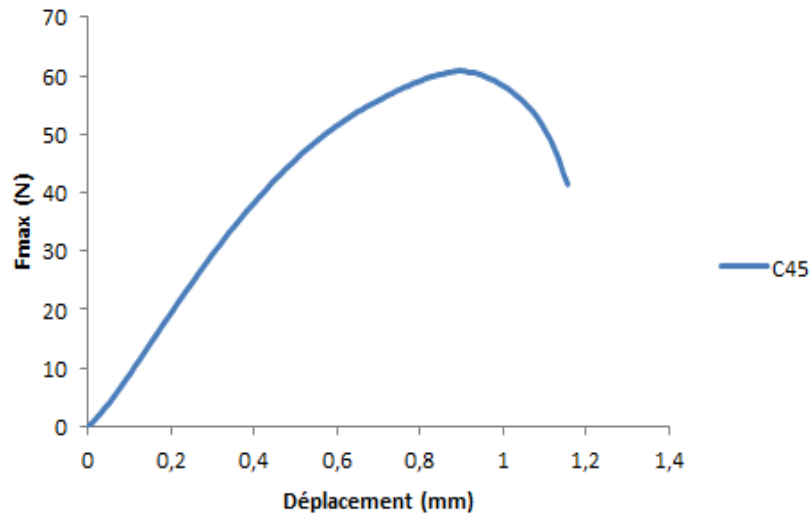


Figure IV.12: Evolution forces/déplacements de lot C45

IV.7.1.a Interprétation des résultats de lot C

D'après les figures IV.9, IV.10, IV.11 et IV.12, les courbes force-déplacement obtenues nous permettent de distinguer deux zones : une zone qui correspond 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.

Au début de la mise en charge, la courbe force-déplacement montre une courbure positive du phénomène d'activation lors des essais d'arrachement sur fils multifilamentaires. Ce phénomène correspond à la mise en tension progressive des filaments lors de l'allongement initial du fil (à cause des différences dans les longueurs initiales des différents filaments qui constituent le fil). Une fois l'ensemble des filaments tendus, le comportement entre dans une phase élastique linéaire qui se poursuit jusqu'à atteindre approximativement 60 à 90 % de l'effort maximum appliqué, suivant les éprouvettes. Les liens fibre/matrice commence à rompre (figure IV.13).

La figure IV.13 nous montre la rupture finale des filaments de la mèche. Le déchaussement de la mèche n'a pas été obtenu par contre des glissements de filaments dans la mèche peuvent se produire pendant l'essai.

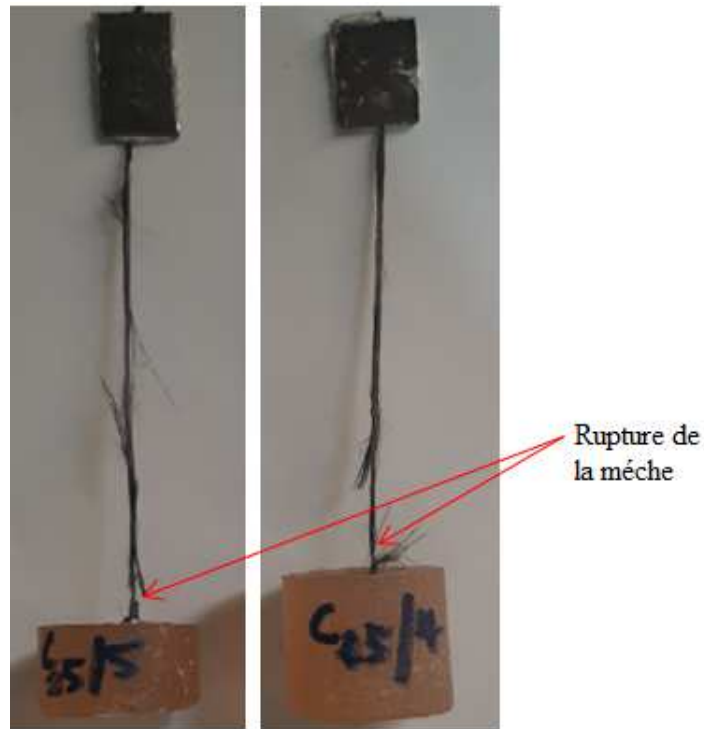


Figure IV.13: Rupture totale de la mèche

Une augmentation monotone du déplacement conduit à la rupture progressive de la liaison fil/matrice, sous forme de ruptures locales des liaisons filaments/matrice et rupture de certains filaments le long de l'interface fil/matrice (figure IV.14). Lorsque l'effort s'approche de la charge de la rupture, les liaisons filaments-matrice deviennent de plus en plus nombreuses, ce qui conduit dans un premier temps à une diminution progressive de la pente de la courbe force-déplacement, puis à l'atteinte de l'effort maximum F_{\max} .

Ensuite, l'effort chute rapidement avec une pente de la courbe force-déplacement constante, cette chute se poursuit jusqu'à atteindre un effort seuil. Dans cette phase, toutes les liaisons filaments-matrice sont rompues. L'effort mesuré correspond au frottement résiduel des filaments entre eux et sur la matrice.

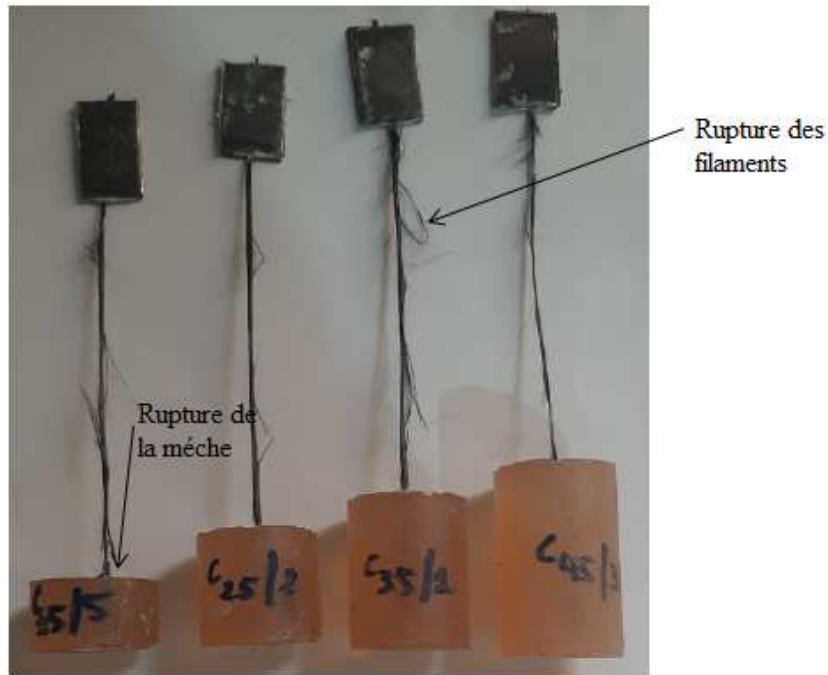


Figure IV.14: Les différents endommagements des éprouvettes

L'analyse visuelle des éprouvettes endommagées nous montre la rupture des filaments constituant la mèche. Durant les essais d'arrachement, nous avons entendu des craquements correspond à l'endommagement de la mèche avant la rupture totale.

IV.7.1.b Comparaison des résultats de lot C

La figure IV.15 présente Les courbes forces/déplacements de lot C pour les différentes longueurs enchâssées. Les éprouvettes présentent le même comportement mécanique avec une dispersion de la force à la rupture. Nous remarquons que la longueur enchâssée est inversement proportionnelle à la force maximale pour les lots C15, C25. Ce qui montre qu'une mèche enfoncée dans plus de résine est fragilisée pendant l'essai.

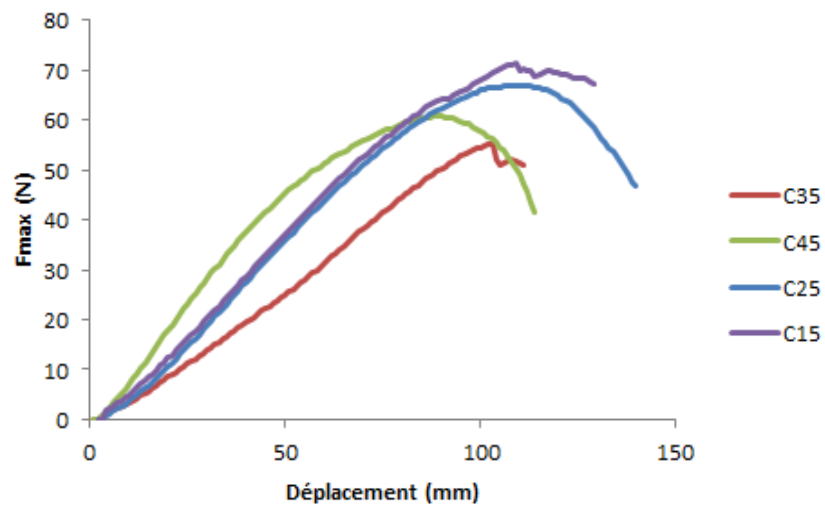


Figure IV.15: Les courbes forces/déplacements de lot C

IV.7.2 Résultats de lot V

Lot V	L_e (mm)	L_u (mm)	F_{max} (N)	ΔL (mm)
V15	15	100	336,26±17,38	2,09±0,28
V25	25	100	232,36±26,06	1,37±0,13
V35	35	100	350,15±37,52	1,8±0,13
V45	45	100	317,96±31,33	1,82±0,18

Tableau IV.2: Les caractéristiques mécaniques de lot V en traction

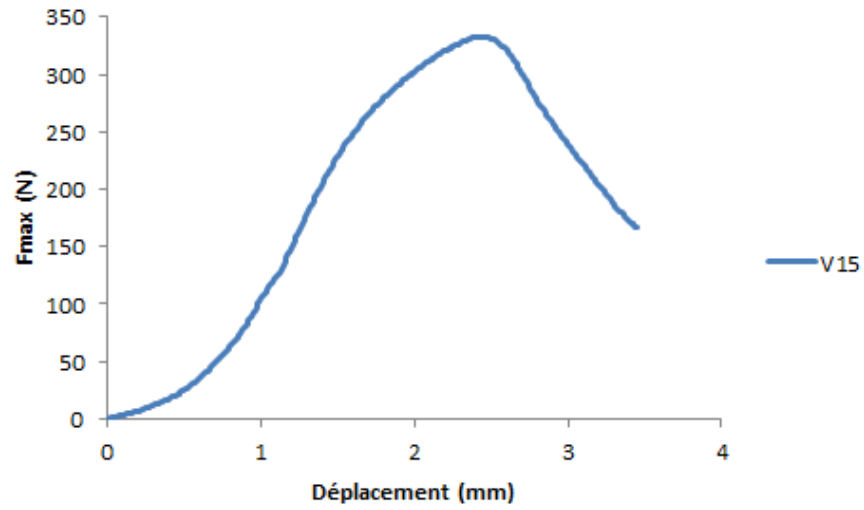


Figure IV. 16: Evolution forces/déplacements de lot V15

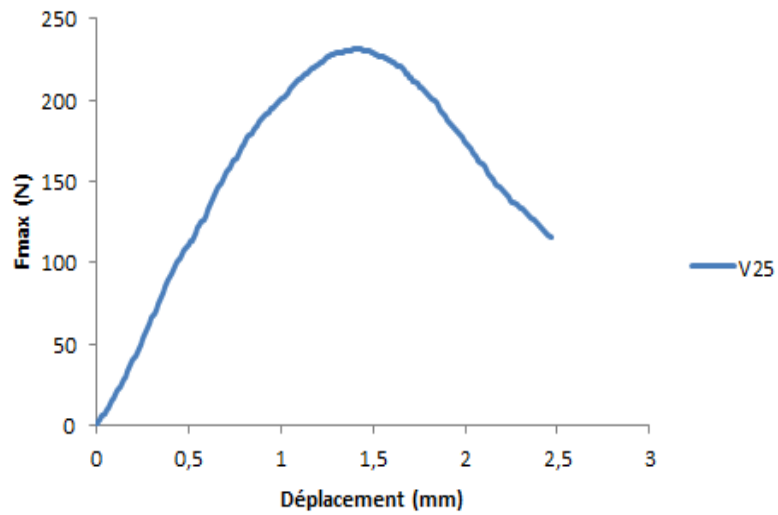


Figure IV.17: Evolution forces/déplacements de V25

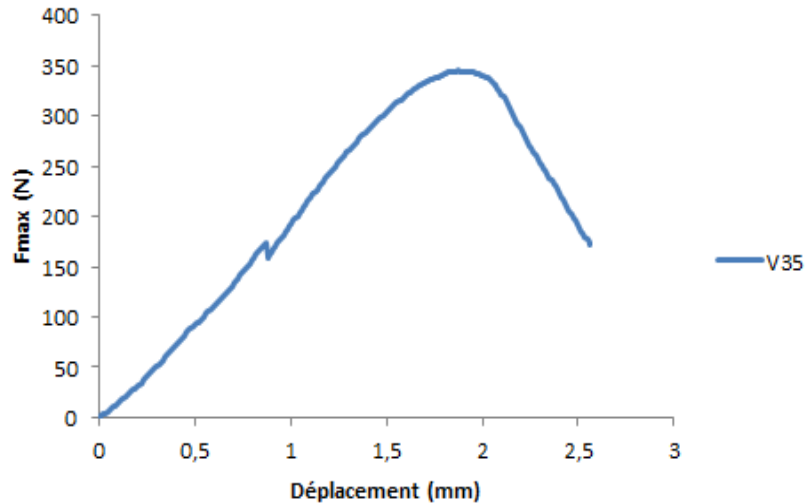


Figure IV.18: Evolution forces/déplacements de lot V35

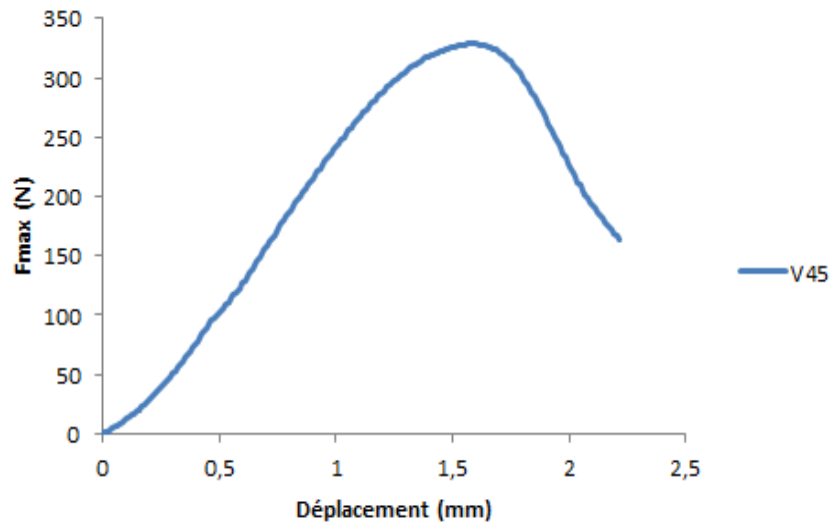


Figure IV.19: Evolution forces/déplacements de lot V45

IV.7.2.a Interprétation des résultats de lot V

D'après les figures IV.16, IV.17, IV.18, IV.19, les courbes force-déplacement obtenues nous permettent de distinguer deux zones : la première zone linéaire correspond au comportement élastique de la méche et la deuxième zone correspond aux premiers endommagements jusqu'à la rupture totale (figure IV.20).

Des ruptures de filaments peuvent se produire dans la zone élastique (voir la chute de charge dans la zone élastique pour la figure IV.18). Cela est dû au fait que certains filaments ont atteint leur forces limite avant d'autres.

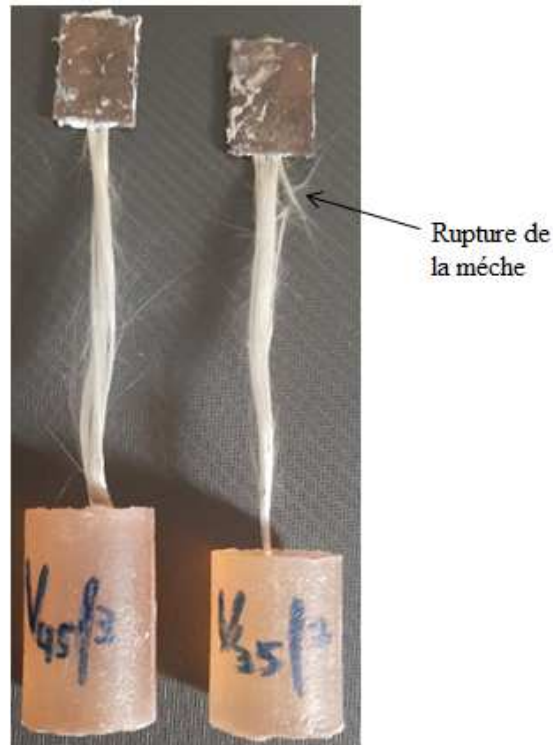


Figure IV.20: Rupture totale de la mèche

L'analyse visuelle des éprouvettes endommagées nous montre la rupture des filaments constituant la mèche. La rupture de l'ensemble mèche/matrice n'est pas obtenue pour ces essais. La rupture correspond à l'endommagement de la mèche avec des glissements des filaments qui peuvent se produire pendant l'essai. Lorsque l'effort appliqué atteint la charge de la rupture, on observe la rupture totale des filaments dans la mèche (figure IV.21). Durant les essais, nous avons entendu des craquements correspond à la rupture de filaments.

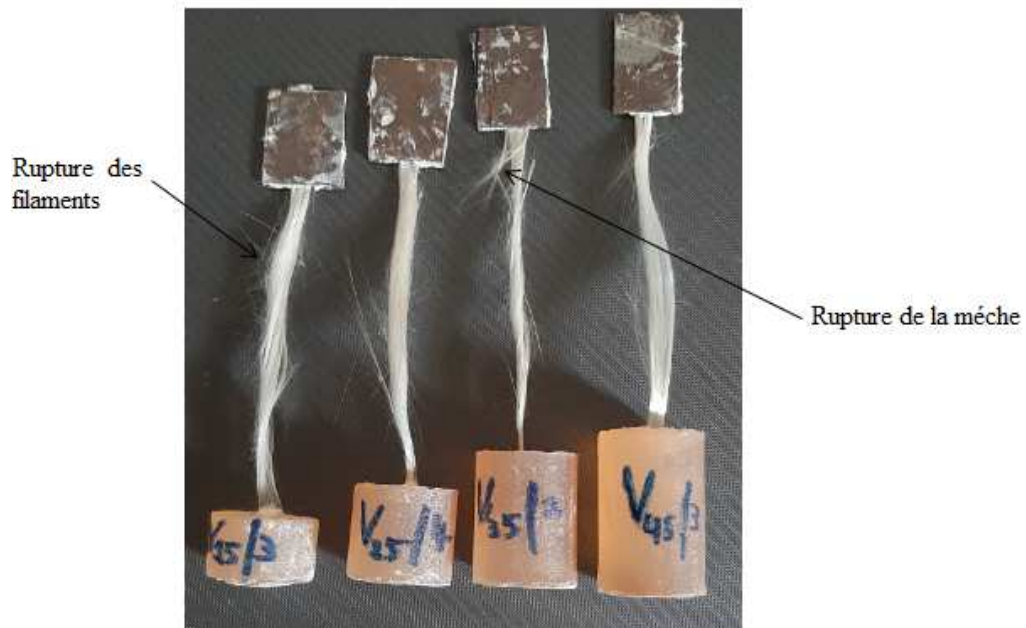


Figure IV.21: Les différents endommagements des éprouvettes

IV.7.2.b Comparaison des résultats de lot V

La figure IV.22 présente Les courbes forces/déplacements de lot V pour les différentes longueurs enchâssées. On observe le même comportement mécanique pour chaque longueur enchâssée avec une dispersion au niveau des efforts maximal et les déplacements correspondant.

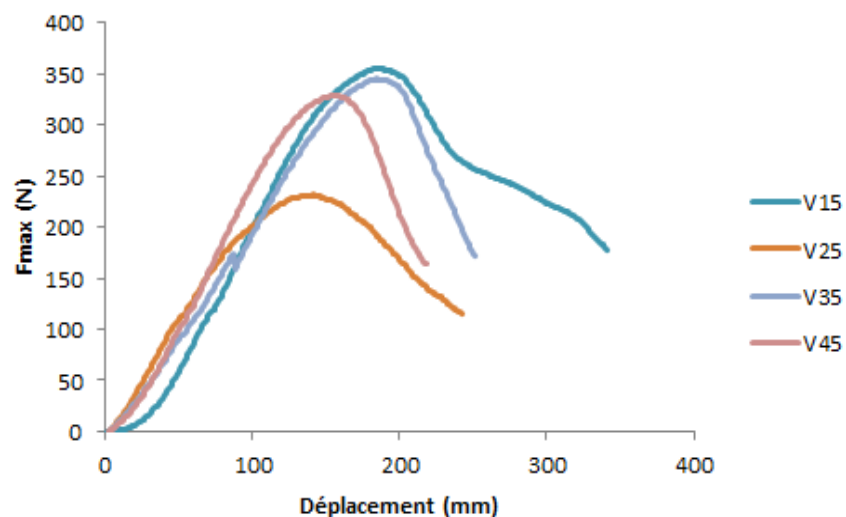


Figure IV.22: Les courbes forces/déplacements de lot V

IV.7.3 Comparaison des résultats de lot C et lot V

Les figures IV.23, IV.24, IV.25 et IV.26 présentent l'évolution de forces-Déplacements pour chaque longueur enchâssée de chaque lot (lot C et lot V).

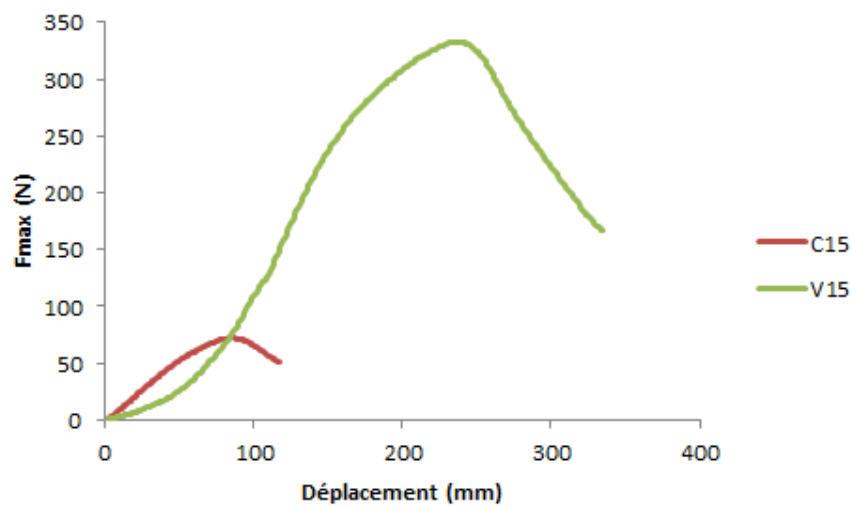


Figure IV.23: Evolution forces/déplacement pour C15 et V15

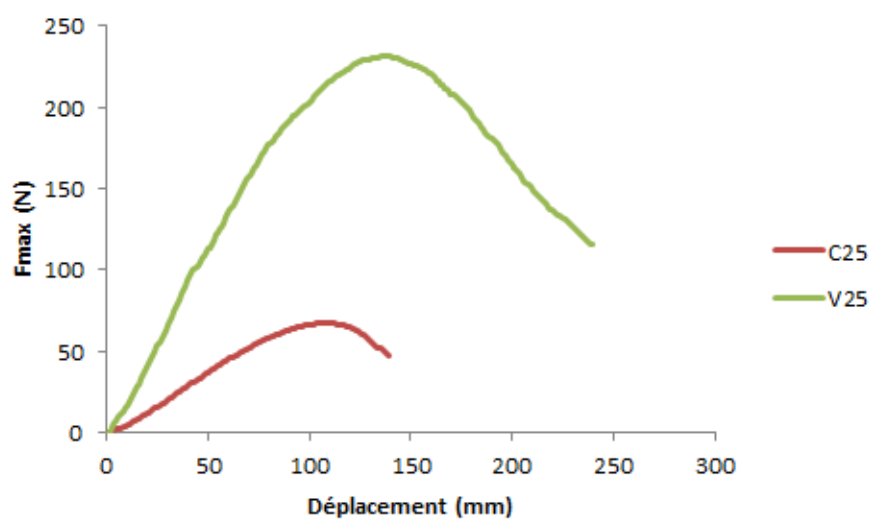


Figure IV.24: Evolution forces/déplacement pour C25 et V25

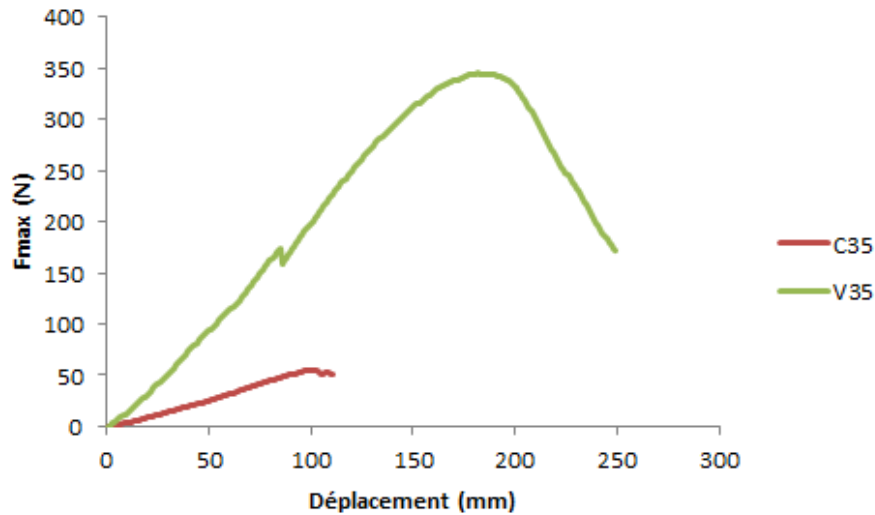


Figure IV.25: Evolution forces/déplacement pour C35 et V35

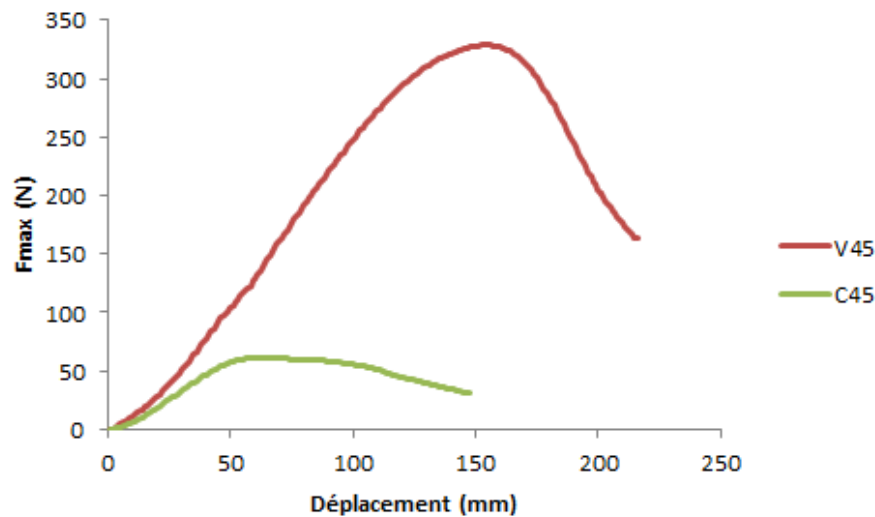


Figure IV.26: Evolution forces/déplacement pour C45 et V45

D'après les courbes force-déplacement obtenues pour chaque lot (lot C et lot V), on remarque que malgré la variation de la longueur enchâssée, le comportement mécanique observé reste qualitativement le même pour les deux lots. La dispersion relevée concerne exclusivement les niveaux des efforts maximaux et leurs déplacements correspondant (figure IV.27). La figure IV.28 présente une comparaison du mode de rupture entre une éprouvette de lot C qui est C25, et une éprouvette de lot V qui est V25.

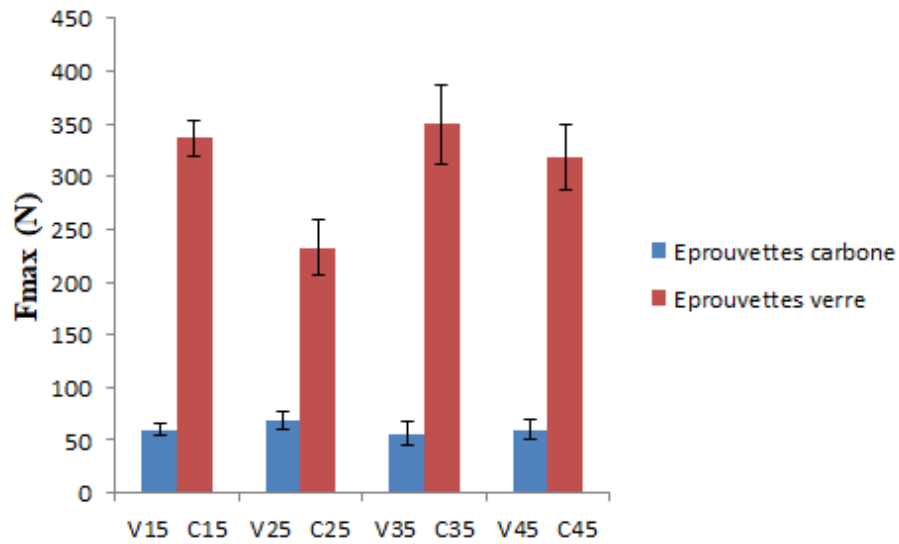


Figure IV.27: Les niveaux d'effort entre lot C et lot V

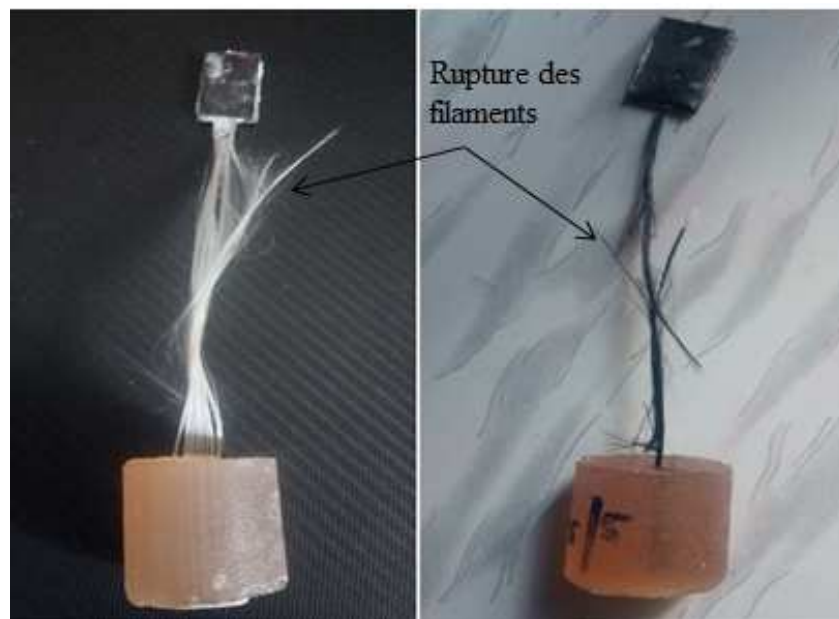


Figure IV.28: Mode de rupture entre C25 et V25

IV.8 Influence de la longueur utile L_u

Nous avons varié la longueur utile pour le lot V25 et nous avons obtenu les résultats dans le tableau IV.3.

Lot V	L_e (mm)	L_u (mm)	F_{max} (N)	ΔL (mm)
V25	25	50	250,04±11,41	1,955±0,21
V25	25	100	232,36±26,06	1,37±0,13
V25	25	150	215,945 ±30,35	2,10 ±0,18

Tableau IV.3: Caractéristiques mécaniques de l'éprouvette V25 en variant L_u

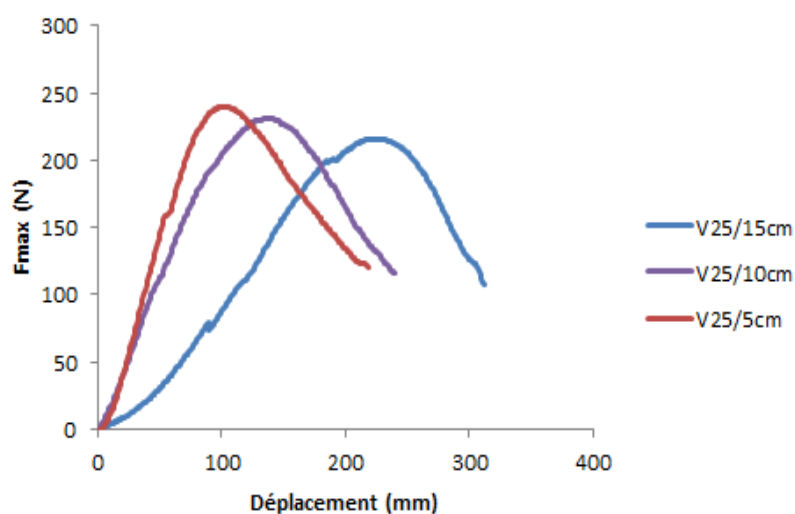


Figure IV.29: Les courbes forces/déplacements de l'éprouvette V25 en variant L_u

Nous observons le même comportement mécanique malgré la variation de la longueur utile (15cm, 10cm, 5cm) avec une dispersion des efforts maximaux et leurs déplacements correspondant. L'analyse visuelle des éprouvettes endommagées nous montre le même mode de rupture qui est la rupture des filaments constituant les mèches (figure IV.30).

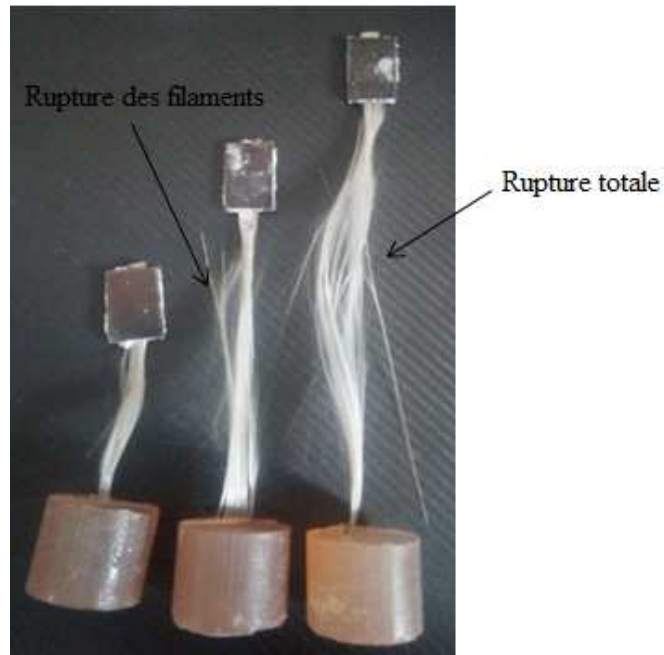


Figure IV.30: Les différents endommagements des éprouvettes pour les trois longueurs utiles.

IV.9 Conclusion

- Pour les essais d'arrachement, nous avons remarqué que la rupture des filaments commence à apparaître dès que la charge appliquée atteint la valeur seuil d'un filament. Le mécanisme de rupture est caractérisé par la rupture des filaments qui se focalise sur toute la longueur de la mèche et pendant différents chargement lors de l'essai.
- Nous avons constaté que l'influence de la longueur enchâssée L_e n'est pas proportionnelle à la charge maximale.
- Les courbes forces-déplacements obtenues montre que le comportement mécanique observé reste qualitativement le même pour les éprouvettes en mèches de verre ou de carbone. Elles représentent presque le comportement de la mèche.
- Nous remarquons que malgré la variation de la longueur enchâssée dans chaque lot testé ainsi que la longueur utile, nous n'avons pas observé de déchaussement de la mèche dans le cylindre de résine. Par contre un déchaussement inter filamentaires est observés.

Conclusion générale

Conclusion générale

Cette étude nous a permis de définir une approche de la caractérisation de matériaux composites à fibre de verre et fibre de carbone par des essais statique. La présente étude a concerné des essais de déchaussement qui sont réalisés en appliquant un effort de traction direct à l'extrémité libre d'une mèche dont l'autre extrémité a été enchâssée dans un cylindre de résine avec différentes longueurs d'enchâssement.

En variant la longueur enchâssée, on remarque que le comportement mécanique observé reste qualitativement le même pour les éprouvettes en mèches de verre ou de carbone. Les dispersion relevées concernent exclusivement les niveaux d'efforts maximaux atteint et leur déplacements correspondant.

Nous avons remarqué que la rupture des filaments commence à apparaître dès que la charge appliquée atteint la valeur seuil d'un filament. Le mécanisme de rupture est caractérisé par la rupture des filaments qui se focalise sur toute la longueur de la mèche et pendant différents chargement lors de l'essai.

La rupture du fil commence à apparaître dès que la charge appliquée aborde sa valeur maximale. Le mécanisme de rupture est caractérisé par la découpe de blocs entiers de filament à différents endroits du filament en commençant principalement du périmètre vers le noyau du filament, mais en cassant les fils individuels et les blocs de fil dans le noyau du filament.

Malgré la variation de la longueur enchâssée dans chaque lot testé ainsi que la longueur utile, nous n'avons pas observé de déchaussement de la mèche dans le cylindre de résine. Par contre un déchaussement inter filamentaires est observés.

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 déchaussement permettent bien d'identifier les mécanismes de rupture qui peuvent se produire dans une mèche de fibre de carbone ou de verre.

Pour poursuivre cette étude, il sera intéressant de faire une étude approfondie pour trouver les dimensions souhaitable de l'éprouvette pour l'obtention d'un déchaussement.

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

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

La caractérisation de ces composites peut être complétée par le biais des essais de fatigue en utilisant différentes séquences d'empilement.

Bibliographie

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] A. BOUDENNE

"Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques d'matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003

[5] BERTHELOT.J-M

«Matériaux composites : comportement mécanique et analyse des structures». 4^{ème} édition, Lavoisier, 2005.

[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] RENARD.J

«Elaboration, microstructure et comportement des matériaux composites à matrice polymère», Lavoisier, 2005.

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

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

[10] Christophe TEPHANY

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

[4] A. BOUDENNE

"Etude expérimentale et théorique des propriétés thermo physiques d'matériaux composites à matrice polymère," Université PARIS XII, 2003

[11] Beckerman J.J.

The science of adhesive joints

2^{eme} edition, 258 p., Academic Press, Inc., New York London (1968)

[12] GUIGON.M

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

[13] Rapaud, O.

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

[14] Bertrand, S., Paillet, R., and Lamon, J.

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

[15] Jean-Paul FAVRE

Techniques de l'Ingénieur, traité Plastiques et Composites

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

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

[17] 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.

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

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

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

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

[20] Cox H.L.

"The elasticity and strength of paper and other fibrous materials". British journal of applied physics, 12, 72-79, 1952.

[21] S. Nemat-Nasser, M. Hori, Micromechanics

Overall Properties of Heterogeneous Materials, Second Edition, North-Holland, 1999, (ISBN 0-444-50084-7)

[22] Thèse de Sofien Bouzouita 2005

Optimisation des interfaces fibre /matrice de composite à renfort naturel ; Chapitre II : Revue littérature ; Caractérisation micromécanique.

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

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

[24] E. Barthel, D. Chicot, J.P. Guin, E. Le Bourhis, G. Mauvoisin,

L'indentation : un outil de caractérisation multi-échelle des matériaux, presented at the Commission thématique Indentation, SF2M Info, 2014, p. 13[Google Scholar]

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

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

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

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

[27] 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.

[28] Hadrien Bidouard

Etude de l'effet de surcharges sur la tenue en fatigue à grande durée de vie d'un acier Ferrito-Bainitique sous chargement d'amplitude variable.

Thèse doctorat, L'Ecole Nationale Supérieures d'Arts et Métiers, 2009.

[29] Hana Al jewifi

Etude de comportement mécanique à l'arrachement de fils multifilamentaires enrobés dans une matrice cimentaire et influence de l'imprégnation. Matériels. Université de Cergy Pontoise, 2011. French.