

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



Mémoire de fin d'Etudes

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

Thème

**Caractérisation du comportement mécanique
d'un renfort UD à mèches de carbone**

Proposé et dirigé par:

Mr. KACIML.B

Mme. KACIML.F

Réalisé par :

M^{elle} ISSAADI Hakima

Promotion: 2016/2017

Remerciements

Avant tout, je remercie le bon Dieu qui a illuminé mon chemin et qui m'a armé de courage et de bonne volonté pendant tout mon cursus universitaire.

Je tiens à exprimer mes vifs remerciements et ma gratitude à mon promoteur «Mr KACIMI.B» ainsi que « Mme KACIMI.F » pour leurs précieux conseils, leur encouragement et leur disponibilité.

Mon plus grand respect aux membres du jury qui me feront l'honneur de lire et de juger ce mémoire.

Je tiens à remercier également les ingénieurs des laboratoires de génie mécanique, génie civile et de Hall technologie de Oued Aissi.

Je tiens aussi à remercier le personnel de la bibliothèque de Génie Mécanique.

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

Dédicaces

Aucune dédicace ne saurait exprimer l'amour, l'estime, le dévouement et le respect que j'ai toujours eu pour toi. Rien au monde ne vaut les efforts fournis jour et nuit pour mon éducation et mon bien être. Ce travail est le fruit de tes sacrifices que tu as consentis pour mon éducation et ma formation, tu es parti avant de lire ces mots, mon cher papa, que dieu t'accorde sa clémence et t'accueille dans son vaste paradis inchallah.

A la plus belle créature que Dieu a crée sur terre, à cette source de tendresse, de patience et de générosité, à ma très chère maman que dieu te protège et t'accorde santé et sérénité inchallah.

Tes sacrifices, ton soutien moral et matériel, ta gentillesse sans égal, ton profond attachement m'ont permis de réussir mes études. Sans ton aide, tes conseils et tes encouragements ce travail n'aurait vu le jour, que dieu te protège mon adorable mari Djaffar.

En témoignage de l'attachement, de l'amour et de l'affection que je porte pour vous, je vous dédie ce modeste travail ma très chère belle mère Ferroudja et mon beau père Mokrane.

Sans eux rien n'aurait été possible :

- *Mes frères : Omar, Sofiane, Hakim et Kamel ;*
- *Ma sœur : Safia et son mari ;*
- *Mes belles sœurs : Chabha, Fatiha, Taous et Zahia ;*
- *Mes neveux : Yanis, Chabane, Amnay, et Eliane ;*
- *Mes nièces : Ferroudja et Alice ;*
- *Tout mes ami(e)s en particulier Djouhar et Moumouh.*

Hakima

Liste des tableaux

| | |
|----------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone..... | 15 |
| Tableau IV.1 : Différents lots d'éprouvettes d'essai | 56 |
| Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques du « lot A » en traction | 60 |
| Tableau IV.3 : Caractéristiques mécaniques du « lot B » en traction..... | 61 |
| Tableau IV.4 : Caractéristiques mécaniques du « lot C » en traction..... | 65 |
| Tableau IV.5 : Caractéristiques mécaniques du « lot D » en traction | 66 |
| Tableau IV.6 : Caractéristiques mécaniques du « lot M (0°) » en traction | 70 |
| Tableau IV.7 : Caractéristiques mécaniques du « lot M (90°) » en traction | 71 |
| Tableau IV.8 : Résultats de la microdureté | 77 |

Liste des figures

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.1 : Les échelles caractéristiques d'étude des renforts tissés..... | 3 |
| Figure I.2 : Convention chaîne et trame..... | 4 |
| Figure I.3 : Principe de mesure de l'embuvage des structures tissées | 5 |
| Figure I.4 : Exemples de constitutions de mèches de renfort tissé | 6 |
| Figure I.5 : Sens de torsion de fil..... | 7 |
| Figure I.6 : Schéma de deux tricots : (a) maille cueillie et (b) maille jetée | 8 |
| Figure I.7 : Structure d'un non tissée..... | 8 |
| Figure I.8 : Schéma de principe d'obtention de câble..... | 8 |
| Figure I.9 : Renfort mat | 9 |
| Figure I.10 : Renforts bidimensionnels non tissés: UD (a), NFC (b), tricot (c) | 10 |
| Figure I.11 : Armure toile | 11 |
| Figure I.12 : Armure sergé 3x1 | 11 |
| Figure I.13 : Armure de satin..... | 11 |
| Figure I.14 : Exemple de tresses | 12 |
| Figure I.15 : Renfort interlock | 12 |
| Figure I.16 : Tissage 3D..... | 13 |
| Figure I.17 : Elaboration des fibres de carbone à partir de fibres acryliques | 16 |
| Figure I.18 : Fibres de Carbone | 16 |
| Figure I.19 : schéma d'un tissu avec le sens chaîne (1) et trame (2) | 17 |
| Figure I.20 : Schéma d'un processus de tissage..... | 18 |
| Figure I.21 : Un métier à navette | 18 |
| Figure I.22 : Une navette..... | 18 |
| Figure I.23 : Une machine à tisser jet d'air de marque Sulzer G6500..... | 18 |
| Figure I.24 : Constituants d'un matériau composite..... | 19 |
| Figure I.25 : Différentes familles de matrice | 20 |
| Figure I.26 : Principaux matériaux de renfort..... | 20 |
| Figure I.27 : Principe de moulage au contact | 21 |
| Figure I.28 : Principe du moulage par projection simultanée..... | 22 |
| Figure I.29 : Principe du moulage sous vide..... | 22 |
| Figure I.30 : Moulage par injection de résine | 23 |
| Figure I.31 : Principe de moulage par compression à froid | 23 |

| | |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure I.32 : Principe de moulage par compression à chaud | 24 |
| Figure I.33 : Moulage en continue | 25 |
| Figure I.34 : Moulage par Pultrusion | 25 |
| Figure I.35 : Moulage par centrifugation | 26 |
| Figure I.36 : Moulage par enroulement filamentaire | 27 |
| Figure II.1 : Machine de traction biaxiale | 28 |
| Figure II.2 : Eprouvette cruciformes | 29 |
| Figure II.3 : Courbes caractéristiques biaxiales de renforts à différent rapport de déformation | 29 |
| Figure II.4 : Principe de cisaillement simple | 30 |
| Figure II.5 : Principe de cisaillement pur | 31 |
| Figure II.6 : Comportement théorique d'essai de cisaillement. Etat initial (a) et déformé (b)... | 32 |
| Figure II.7 : Principe du Picture Frame (a), éprouvette à l'état initial et dispositif (b) | 32 |
| Figure II.8 : Principe de drapemètre | 33 |
| Figure II.9 : Schéma du dispositif de frottement | 34 |
| Figure II.10 : Principe d'un essai de compaction | 35 |
| Figure II.11 : Essai de traction sur mèche avec acquisition optique..... | 35 |
| Figure II.12 : Courbe de traction | 36 |
| Figure II.13 : Modèle géométrique de Peirce | 37 |
| Figure II.14 : Structure de croisement des fils proposée par Kawabata | 38 |
| Figure II.15 : Traction longitudinale | 41 |
| Figure II.16 : Traction transversale..... | 41 |
| Figure II.17 : Traction hors axes..... | 42 |
| Figure II.18 : Obtention des éprouvettes unidirectionnelle et hors axe dans la plaque | 43 |
| Figure III.1 : Les différentes échelles d'observation de l'endommagement | 45 |
| Figure III.2 : Modes de fissuration de la matrice | 46 |
| Figure III.3 : Modes de fissuration de la matrice | 47 |
| Figure III.4 : Rupture de fibre..... | 47 |
| Figure III.5 : Différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre..... | 47 |
| Figure III.6 : Décohésion fibre-matrice..... | 48 |
| Figure III.7 : Structure d'un stratifié | 48 |
| Figure III.8 : Différents types de fissuration au sein d'un composite stratifié | 49 |
| Figure III.9 : Différents mécanismes de rupture d'un stratifié | 49 |
| Figure III.10 : Exemple de défaut de type nœud ou dislocation | 50 |
| Figure III.11 : Schématisation de l'opération de tissage | 50 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure III.12 : Exemple d'une matrice ouverte et poinçon en forme tétraédrique | 51 |
| Figure III.13 : Exemple de maintien serre-flan | 51 |
| Figure III.14 : Apparence des défauts de boucle | 52 |
| Figure III.15 : Apparence des défauts de glissement (décohésion)..... | 53 |
| Figure III.16 : Apparence des plissements | 53 |
| Figure IV.1 : Renfort unidirectionnel en carbone utilisé | 55 |
| Figure IV.2 : Moulage au contact, a)Dépôt de tissu, b) Imprégnation avec la résine..... | 57 |
| Figure IV.3 : Les différentes éprouvettes utilisées pour l'étude..... | 58 |
| Figure IV.4: Machine et dispositif de traction de type IBERTEST..... | 59 |
| Figure IV.5 : Evolution contraintes/déformations des mèches du lot A..... | 61 |
| Figure IV.6 : Evolution contraintes/déformations des mèches du lot B..... | 62 |
| Figure IV.7 : Epreuve d'une mèche carbone, a)avant et b) après rupture en traction | 63 |
| Figure IV.8 : Comparaison des contraintes à rupture pour les lots A et B | 64 |
| Figure IV.9 : Comparaison des modules d'élasticité pour les lots A et B | 64 |
| Figure IV.10 : Evolution contraintes/déformations de renfort du lot C..... | 65 |
| Figure IV.11 : Evolution contraintes/déformations renfort du lot D | 66 |
| Figure IV.12 : Epreuve d'un tissu, (a)au cours d'essai, (b) fin d'essai | 68 |
| Figure IV.13 : Décohésion et plissement des mèches durant un essai de traction..... | 68 |
| Figure IV.14 : Comparaison des résultats des contraintes pour les lots C et D..... | 69 |
| Figure IV.15 : Comparaison des résultats du module d'élasticité pour les lots C et D | 70 |
| Figure IV.16 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot M (0°)..... | 71 |
| Figure IV.17 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot M (90°)..... | 72 |
| Figure IV.18 : Epreuve de composite M (0°): (a) avant essai, (b) fin d'essai..... | 73 |
| Figure IV.19 : Epreuve de composite M (90°): (a) avant essai, (b) fin d'essai..... | 74 |
| Figure IV.20 : Comparaison des résultats des contraintes pour les lots M (0°) et M (90°)..... | 75 |
| Figure IV.21 : Comparaison des résultats des modules d'élasticité pour M (0°), M (90°) | 75 |
| Figure IV.22 : Image d'une empreinte..... | 76 |
| Figure IV.23 : Duromètre et empreinte Knoop..... | 77 |

Liste des symboles

- Tex : Masse linéique [g/km].
- k : Rapport de traction transversale et longitudinale.
- γ : Angle de cisaillement [rad].
- f : Coefficient de drapé.
- F_N : Effort normal [N].
- P : Pression à la compaction [MPa].
- S_{mat} : Section de matière dans la mèche [mm²].
- V_f : Fraction volumique des fibres.
- AN_f : Facteur qui correspond à la section de la matière dans la mèche.
- ρ : Masse volumique du matériau [kg/m³].
- E_L : Module de Young longitudinal [MPa].
- μ : Coefficient de poisson.
- G_{LT} : Module de cisaillement longitudinal [MPa].
- σ_{fr} : Contrainte à la rupture de la fibre [MPa].
- σ_{max} : Contrainte normale maximale en traction [MPa].
- ε : Déformation relative qui correspond à la contrainte maximale.
- F : Charge appliqué en traction [N].
- S : Surface de l'éprouvette soumise à la traction [mm²].
- Δl : L'allongement à la rupture [mm].
- l : Longueur de l'éprouvette [mm].
- b : Largueur de l'éprouvette [mm].
- h : Epaisseur de l'éprouvette [mm].
- E : Module Young [MPa].

SOMMAIRE

| | |
|----------------------------|---|
| Remerciements | |
| Dédicaces | |
| Sommaire | |
| Liste des figures | |
| Liste des tableaux | |
| Introduction générale..... | 1 |

CHAPITRE I : Caractéristiques et élaboration des composites

| | |
|----------------------------------------------|----|
| I.1 Introduction..... | 3 |
| II.2 Différents échelles des tissus..... | 3 |
| II.3 Caractéristiques des tissus..... | 4 |
| I.4 Types des tissus..... | 7 |
| I.4.1 Tissu traditionnel..... | 7 |
| I.4.2 Tissu à usage technique..... | 7 |
| I.4.3 Tissu à structure linéique..... | 8 |
| I.5 Différents types d'armures..... | 9 |
| I.5.1 Armures bidimensionnelles..... | 9 |
| I.5.1.1 Mats..... | 9 |
| I.5.1.2 Unidirectionnels (UD)..... | 9 |
| I.5.1.3 NCFs (un Non Crimp Fabric)..... | 10 |
| I.5.1.4 Tricots..... | 10 |
| I.5.1.5 Tissus 2D..... | 10 |
| I.5.2 Armures tridimensionnelles..... | 12 |
| I.5.2.1 Tresses..... | 12 |
| I.5.2.2 Interlocks..... | 12 |
| I.5.2.3 Renforts 3D..... | 13 |
| I.6 Caractéristiques des mèches..... | 13 |
| I.7 Différents constituants de renforts..... | 13 |
| I.7.1 Le verre..... | 14 |
| I.7.2 L'aramide..... | 14 |
| I.7.3 Les céramiques..... | 14 |
| I.7.4 Le carbone..... | 15 |

| | |
|---------------------------------------------------|----|
| I.8 Mode d'élaboration des tissus..... | 17 |
| I.9 Les matériaux composites..... | 19 |
| I.9.1 Définition..... | 19 |
| I.9.2 Constituants d'un matériau composite..... | 19 |
| I.9.2.1 Matrice..... | 19 |
| I.9.2.2 Renfort..... | 19 |
| I.9.3 Procédés de fabrication des composites..... | 19 |
| I.9.3.1 Moulage sans pression..... | 21 |
| I.9.3.1.1 Moulage au contact..... | 21 |
| I.9.3.1.2 Moulage par projection simultanée..... | 21 |
| I.9.3.1.3 Moulage sous vide..... | 22 |
| I.9.3.2 Moulage par compression..... | 22 |
| I.9.3.2.1 Moulage par injection de résine..... | 22 |
| I.9.3.2.2 Moulage par compression à froid..... | 23 |
| I.9.3.2.3 Moulage par compression à chaud..... | 23 |
| I.9.3.2.4 Moulage en continue..... | 24 |
| I.9.3.3 Moulage par Pultrusion..... | 25 |
| I.9.3.4 Moulage par Centrifugation..... | 26 |
| I.9.3.5 Moulage par Enroulement Filamentaire..... | 26 |
| I.9.4 Domaines d'utilisation..... | 27 |
| I.10 Conclusion..... | 27 |

CHAPITRE II : Techniques de caractérisation des composites

| | |
|-----------------------------------------------------------------------------|----|
| II.1 Introduction..... | 28 |
| II.2 Essais mécaniques sur les tissus..... | 28 |
| II.2.1 Essai de traction..... | 28 |
| II.2.2 Essai de cisaillement..... | 30 |
| II.2.3 Essai de flexion..... | 33 |
| II.2.4 Essais de frottement..... | 34 |
| II.3 Essais mécaniques sur les mèches..... | 34 |
| II.3.1 Essais de compaction..... | 34 |
| II.3.2 Essai de traction..... | 35 |
| II.4 Modélisation de certains essais mécaniques effectués sur le tissu..... | 36 |
| II.4.1 Travaux de PEIRCE..... | 36 |

| | |
|-------------------------------------------------|----|
| II.4.2 Travaux de GROSBERG | 37 |
| II.4.3 Travaux de ABBOTT | 38 |
| II.4.4 Travaux de KAWABATA | 38 |
| II.4.5 Travaux de LINDBERG | 39 |
| II.5 Essais mécaniques sur les composites | 39 |
| II.5.1 Essai de traction | 40 |
| II.6 Conclusion | 43 |

CHAPITRE III : Mécanismes d'endommagement des composites

| | |
|-----------------------------------------------------------------------|----|
| III.1 Introduction | 44 |
| III.2 Définition | 44 |
| III.3 Les différentes échelles d'observation de l'endommagement | 45 |
| III.4 Les mécanismes d'endommagement | 45 |
| III.4.1 Rupture de la matrice | 45 |
| III.4.2 Rupture de fibre | 46 |
| III.4.3. Décohésion fibre/matrice | 47 |
| III.5 Endommagement des composites stratifiés | 48 |
| III.5.1 Les fissurations | 48 |
| III.6 Défauts des renfort | 50 |
| III.6.1 Défauts de fibre | 50 |
| III.6.2 Défauts de mise en œuvre des renforts | 50 |
| III.6.3 Essai de mise en forme | 51 |
| I.7 Conclusion | 54 |

CHAPITRE IV : Partie expérimentale

| | |
|----------------------------------------------------|----|
| IV.1 Introduction | 55 |
| IV.2 Matériaux de l'étude | 55 |
| IV.3 Types d'éprouvettes d'essai de traction | 55 |
| IV.4 Préparation des échantillons | 56 |
| IV.4.1 Mèches et tissus (lot A, B, C et D) | 56 |
| IV.4.2 Matériau composite (lot M) | 57 |
| IV.5 Caractérisation mécanique des matériaux | 58 |
| IV.5.1 Machine de traction | 58 |

| | |
|------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| IV.5.2 Essai de traction | 59 |
| IV.5.3 Résultats des essais de traction | 60 |
| IV.5.4 Interprétation des résultats | 62 |
| IV.5.5 Influence de la longueur de l'éprouvette sur les caractéristiques mécaniques..... | 63 |
| IV.5.6 Interprétation des résultats | 67 |
| IV.5.7 Influence de la longueur de l'éprouvette sur les caractéristiques mécaniques..... | 69 |
| IV.5.8 Interprétation des résultats | 72 |
| IV.5.9 Effet de l'anisotropie..... | 74 |
| IV.6 Essai de microdureté | 76 |
| IV.6 .1 Résultats obtenus..... | 77 |
| IV.6.2 Analyse des résultats | 77 |
| IV.7 Conclusion | 78 |
| Conclusion générale | 79 |

Références bibliographiques

Annexes

Introduction générale

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

Dans ce contexte, l'étude et la maîtrise de l'élaboration des pièces composites fait l'objet d'intenses recherches car ces matériaux restent encore peu connus devant les matériaux plus classiques (métaux principalement). Pour des applications à hautes performances, les renforts à fibres continues, par exemple tissés, sont très largement utilisés pour leur très bonne formabilité et la possibilité d'obtenir des pièces de forme complexe. Lors de la fabrication d'une pièce renforcée par des fibres en particulier, le renfort est d'abord mis en forme avant qu'une résine ne vienne figer la structure de la pièce. Si les études sur les matériaux composites finis sont assez nombreuses, celles sur les renforts secs et le préformage le sont beaucoup moins. Pourtant leur comportement est très particulier et les caractéristiques mécaniques des pièces finales ou le succès de la mise en œuvre en dépendent largement. La phase de préformage peut faire apparaître des défauts majeurs qui altèrent la qualité de la pièce finale, comme des plis voire des ruptures de mèches. L'orientation finale des fibres dans la pièce dépend de cette même première phase du procédé. La maîtrise de la mise en forme des renforts fibreux nécessite donc de connaître leur comportement mécanique et leurs mécanismes de déformation. A l'échelle macroscopique, les renforts présentent une forte raideur en tension dans le plan et c'est leur grande aptitude à se déformer de façon importante en cisaillement et en flexion qui permet leur mise en forme. Cependant, pour de fortes déformations, les rigidités correspondantes peuvent devenir importantes et entraîner l'apparition de défauts.

La connaissance du comportement très particulier du renfort est alors indispensable pour garantir le succès de la mise en forme et la qualité des pièces fabriquées. On s'intéresse ainsi à la forme finale du renfort, à la position et à l'orientation des fibres mais aussi à

l'apparition possible de défauts tels que les plissements du renfort, la rupture ou la décohésion de mèches.

Le présent travail est axé sur la caractérisation du comportement mécanique d'un renfort sec unidirectionnel à fibres de carbone, ainsi qu'à l'élaboration d'un matériau composite à base de ce renfort et une résine polyester insaturée. Des essais de caractérisation en traction sont menés sur des éprouvettes de mèches et tissus en variant la longueur de l'échantillon et la vitesse de sollicitation. Pour le composite, des essais de traction suivant la direction principale et transverse de renfort ont été réalisés. Les résultats et les mécanismes d'endommagements engendrés sont discutés et analysés.

Notre mémoire est scindé en deux parties, une partie théorique constituée au premier chapitre de brèves présentations des renforts tissés et matériaux composites (constituants, architectures et procédés d'élaboration); Quant au second chapitre, nous étudions quelques techniques de caractérisation mécaniques sur les renforts tissés et les matériaux composite. Une étude sur les mécanismes d'endommagement des composites et les défauts de mise en forme des tissus, ainsi que leur impact sur les propriétés mécaniques des pièces finales seront présentés au troisième chapitre. La deuxième partie est consacrée à une étude expérimentale, dans laquelle nous exposons la description des matériaux utilisés et la détermination de leur comportement et propriétés mécaniques (force de rupture, contrainte à la rupture, module d'élasticité...) par le biais des essais de traction. Les résultats obtenus et les mécanismes de rupture engendrés sont analysés et confrontés. Nous terminons cette étude par une conclusion générale.

I.1 Introduction

Il existe une grande variété de matériaux composites. Comme nous le verrons, leurs propriétés et leurs applications sont très dépendantes de leurs caractéristiques internes. La bonne connaissance de leur comportement passe par une analyse multi-échelles de ces matériaux. Un matériau composite est constitué d'au moins deux matériaux dont l'assemblage permet de tirer profit des caractéristiques individuelles de chacun d'eux. Il s'agit en général d'un renfort et d'une matrice. Le renfort assure en grande partie la rigidité nécessaire au futur matériau et la matrice joue le rôle d'enrobage et de liant afin d'empêcher le mouvement relatif des fibres. La maîtrise de l'élaboration de ces matériaux est primordiale car une déviation de l'orientation des fibres du renfort au cours de la mise en forme impacte fortement les caractéristiques mécaniques de la pièce finie. La grande majorité des procédés de fabrication de pièces composites intègrent une phase de mise en forme du renfort sec ou préimprégné. Cette mise en forme est déterminante pour la pièce finale car c'est elle qui va donner à la fois la forme définitive et l'agencement des mèches du renfort au sein de la pièce finie.

II.2 Différents échelles des tissus

La compréhension du comportement des renforts de matériaux composites s'appuie sur des phénomènes physiques à des échelles très différentes (Figure I.1) [1].

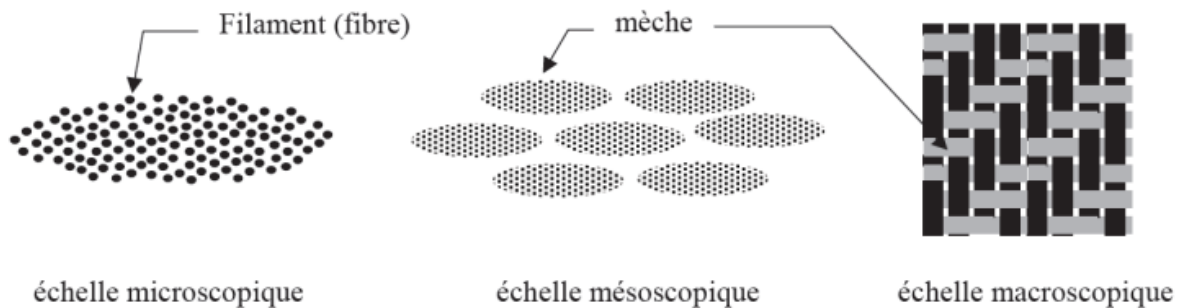


Figure I.1 : Les échelles caractéristiques d'étude des renforts tissés.

- Une échelle microscopique: celle des fibres ($\varnothing \approx 10\mu\text{m}$) qui tient compte de leurs mouvements et de leurs interactions mutuelles.
- Une échelle mésoscopique: celle des mèches qui tient compte de leurs mouvements et des interactions entre les fils constituant la mèche. Une mèche est un assemblage de plusieurs milliers de fibres.

- Une échelle macroscopique: celle de la pièce. La nature de cette pièce ou renfort peut être :
 - A fibres courtes (0.1-1mm) : fibres sans orientations préférentielles pour des applications à faibles sollicitations mécaniques.
 - A fibres longues (1-50mm) : fibres avec orientations préférentielles adaptées pour répondre à des sollicitations plus importantes.

Le comportement des fibres (rigidité forte en traction et faible en flexion), assemblées sous forme de mèches (alignement plus ou moins vérifié, interactions fibre-fibre), qui vont ensuite constituer la préforme (par tissage, tressage ou tricotage) de renfort (interactions mèche-mèche), va conditionner le comportement du matériau à l'échelle macroscopique. La différenciation entre ces différentes échelles est alors essentielle.

II.3 Caractéristiques des tissus

L'armure du tissu résulte de l'entrecroisement de fils disposés dans le sens de la chaîne et de fils dans le sens de la trame (Figure I.2).

- **Chaîne**: ensemble des fils parallèles au sens d'avancement du tissu en cours de fabrication.
- **Trame**: ensemble des fils perpendiculaires aux fils de chaîne, nommé aussi duites.

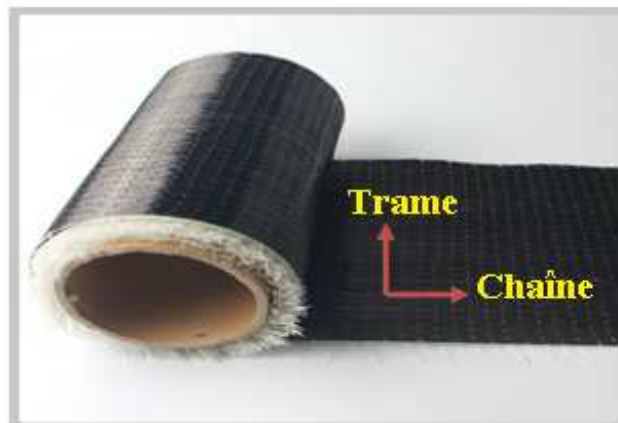


Figure I.2 : Convention chaîne et trame.

Suivant l'armure considérée, on définit un rapport d'armure qui constitue le plus petit motif répétitif dans le tissu (nombre de trames x nombre de chaînes).

Dans le cas des structures tissées les mèches présentent une ondulation. Cette ondulation est quantifiée par l'embuvage ou le retrait s'exprime en pourcentage et se calcule à partir des longueurs de mèches et de tissu par la relation I.1 [1] :

$$\text{embuvage ou retrait} = \frac{\text{longueur de la mèche} - \text{longueur du tissu}}{\text{longueur du tissu}} \times 100 \quad (\text{I.1})$$

- **Embuvage** : différence entre la longueur de fil de chaîne extrait du tissu à l'état tendu et la longueur de ce même fil inséré dans le tissu.
- **Retrait** : différence entre la longueur de fil de trame extrait du tissu à l'état tendu et la longueur de la même trame insérée dans le tissu.

A titre d'exemple :

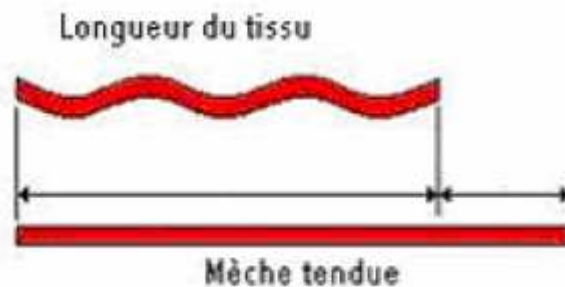


Figure I.3 : Principe de mesure de l'embuvage des structures tissées.

L'embuvage et le retrait seront d'autant plus élevés que l'état d'ondulation du tissu sera important (Figure I.3). Ce phénomène entraîne une modification du comportement du tissu comparativement à celles des fils constitutifs.

Par définition, une mèche est un assemblage de fibres plus ou moins cohérentes entre elles suivant leur mode de fabrication (Figure I.4). Les mèches peuvent être par exemple à fibre(s) :

- Unique (a) ;
- Juxtaposées (b) ;
- Courtes entrelacées (c) ;
- Torsadées (d, e, f, g) ;
- Torsadées avec un composant différent (h) ;

Elles peuvent également subir un enduit (ensimage) qui les rendra plus solidaires. L'ensimage consiste en l'application d'un revêtement chimique dont les fonctions sont multiples :

- Etablir la cohésion entre les filaments ;
- Les protéger de l'abrasion ;

- Eviter l'apparition de charges électrostatiques ;
- Améliorer la mouillabilité et la compatibilité chimique avec la résine afin de faciliter la liaison entre ces deux constituants.

Le comportement, la géométrie, ... d'une mèche dépendent de son mode de fabrication. Les mèches sont caractérisées par leur masse linéique dite «le titre» qui se calcule par la formule (I.2), correspondant à la masse par unité de longueur. Cette mesure est donnée par le tex, correspondant à la masse d'une mèche de 1 000 mètres : 1 tex = 1 g/km [2].

$$Titre = \frac{M(g)}{L(m)} \times 100 \quad (I.2)$$

Où, M est la masse du fil exprimée en gramme et L est la longueur du fil exprimée en mètre.

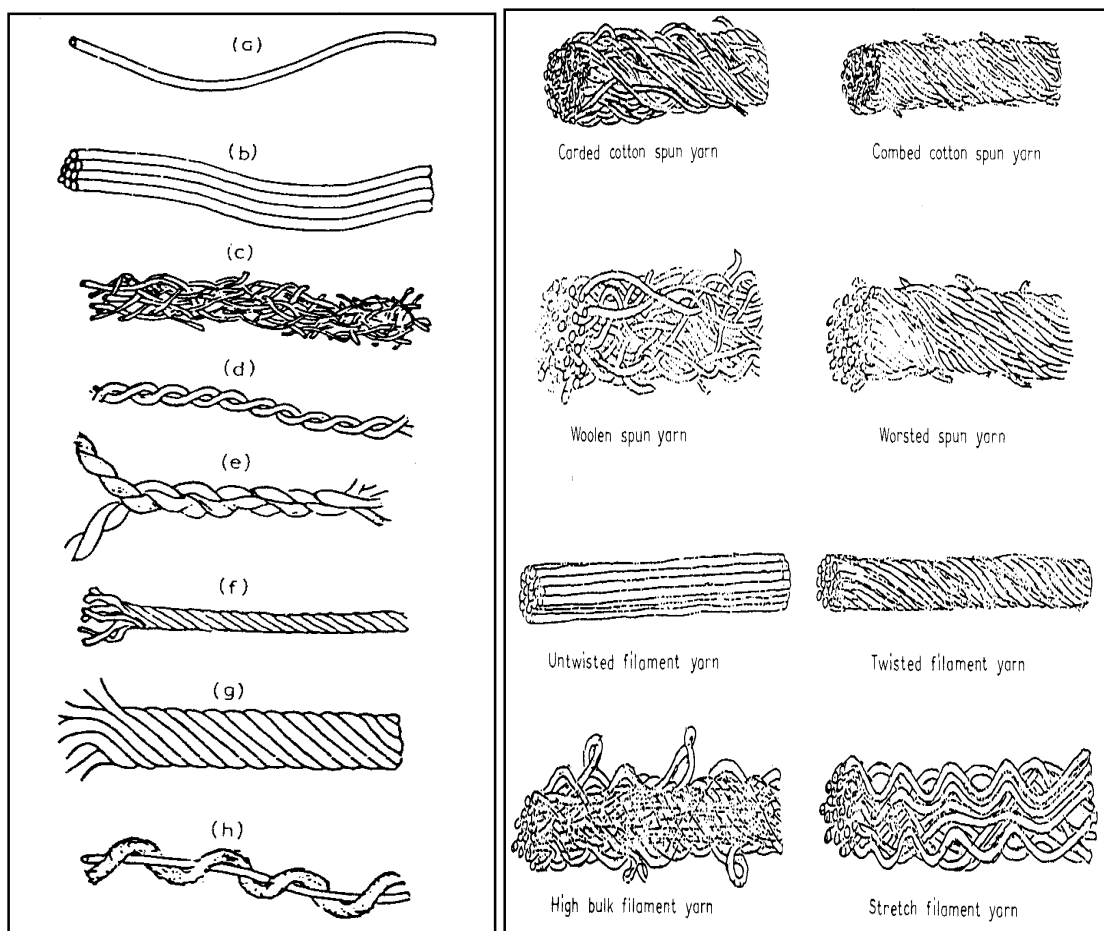


Figure I.4 : Exemples de constitutions de mèches de renfort tissé.

I.4 Types des tissus

On distingue trois types de tissus [3]:

I.4.1 Tissu traditionnel

Depuis longtemps, le tissage a comme objectif la fabrication des habits. Pour tisser un tissu traditionnel, les fibres constituant le fil sont souvent unies entre elles par une torsion assurant la cohésion. Un fil peut être tordu dans le sens «S» ou «Z», (Figure I.5). La torsion se mesure en « tours par mètre ».

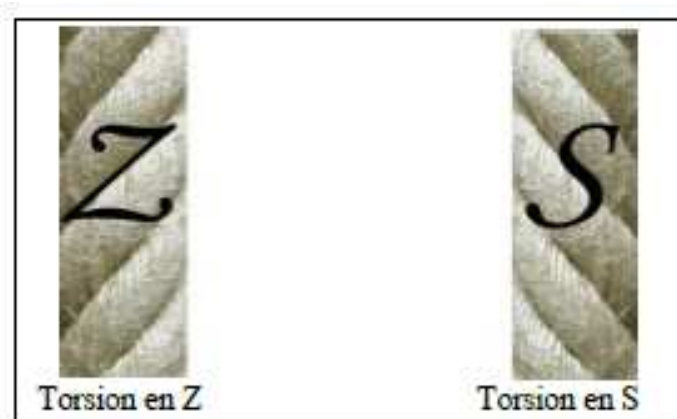


Figure I.5 : Sens de torsion de fil.

I.4.2 Tissu à usage technique

Les textiles à usage techniques (Tut) se différencient des textiles traditionnels par le soin qui est apporté à choisir leurs constituants, leurs armures, leurs paramètres de fabrication, et les post-traitements éventuels.

Le (Tut) peut être un tissu, un tricot qui est par définition un ensemble d'aiguilles positionnées les unes à côté des autres permet de former la maille qui sera glissée dans une autre maille déjà formée au passage précédent. Il existe deux types de tricots différents : la maille cueillie (démaillable, exemple Pull...) et la maille jetée (indémaillable, exemple dentelle, prothèse médicale...) (Figure I.6).

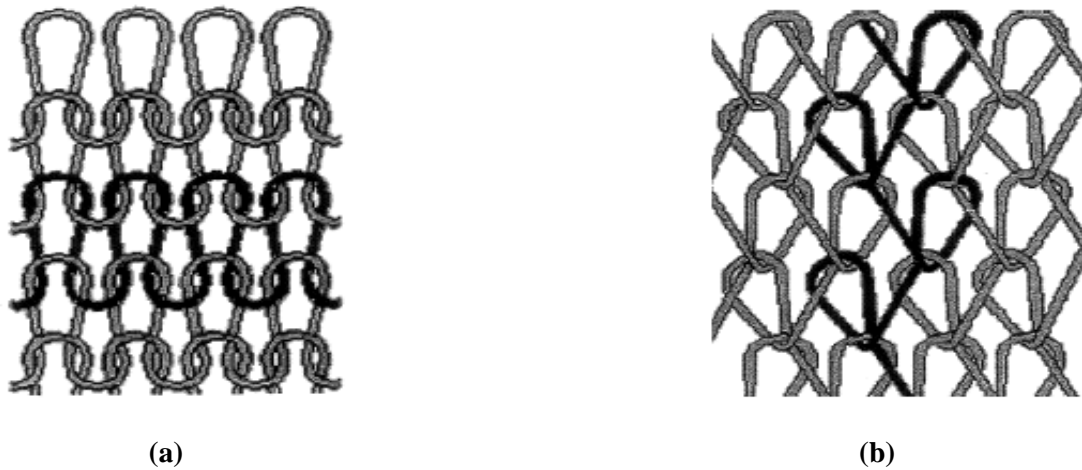


Figure I.6 : Schéma de deux tricotés : (a) maille cueillie et (b) maille jetée.

Un tissu à usage technique peut exister encore sous forme d'un non-tissé dont la production est par entrelacement aléatoire d'un ensemble de fils ou de fibres. À titre d'exemple les renforts de sols, les lingettes ... (Figure I.7)



Figure I.7 : Structure d'un non tissé.

I.4.3 Tissu à structure linéique

Les tissus à structures linéiques obtenus par retordage d'un ensemble de fils comme les câbles et les tresses (Figure I.8), ils sont utilisés dans la fabrication des cordes des bateaux, renfort pour les pneus automobiles ...



Figure I.8 : Schéma de principe d'obtention de câble

I.5 Différents types d'armures

Les armures de tissage peuvent être produites de manière rapide et efficace et présentent de bonnes caractéristiques de déformabilité utiles lors des procédés de mise en forme. Elles sont classiquement composées de deux réseaux de mèche orientées à 0° et 90° (sens trame et chaîne) entrelacés selon une certaine armure. On distingue plusieurs types d'armures [4]:

I.5.1 Armures bidimensionnelles

I.5.1.1 Mats

Ils sont composés de fibres de faible longueur (quelques dizaines de millimètres), disposées dans un plan sans orientation préférentielle (Figure I.9). L'assemblage se fait généralement à l'aide d'un liant. L'absence d'orientation privilégiée des fibres confère au matériau composite final une isotropie de ses propriétés mécaniques dans le plan.



Figure I.9 : Renfort mat.

I.5.1.2 Unidirectionnels (UD)

Il s'agit de nappes de mèches disposées parallèlement (Figure I.10.a). Ces renforts permettent de transmettre des efforts dans une direction, celle des mèches, toute sollicitation dans la direction perpendiculaire entraînant une séparation des mèches. Leurs comportements dépendent fortement de leurs constituants et de la manière dont ceux-ci ont été élaborés. Dès lors, on peut les caractériser par :

- Le type de fil (matériau, diamètre des fibres,...) ;
- L'armure ;
- La densité de fil (en fil/cm) pour chaque réseau ;
- L'embuage qui caractérise l'ondulation des fils et s'exprime en pourcentage.

I.5.1.3 NCFs(un Non CrimpFabric)

Il s'agit de renforts non-tissés ou "Non CrimpFabrics" (NCFs), qui sont constitués de plusieurs nappes d'unidirectionnels solidarisiées par des fils de couture, éventuellement dans des directions perpendiculaires (Figure I.10.b). Les mèches n'étant pas ondulées, ces renforts sont très rigides en traction dans les directions des mèches.

I.5.1.4 Tricots

Ils sont obtenus par bouclage d'une unique mèche (Figure I.10.c), ce qui leur confère une souplesse importante. Ils permettent donc de réaliser des formes complexes, imposant des distorsions importantes par rapport à l'agencement initial.



Figure I.10 : Renforts bidimensionnels non tissés:UD (a), NFC (b), tricot (c).

I.5.1.5 Tissus 2D

Sont des renforts qui résultent de l'entrelacement de mèches (chaîne et trame) pour former une surface à deux directions, initialement, trois sortes d'armures différentes existent [3]:

- **La toile (ou taffetas)**

Les fils de chaîne et de trame s'entrecroisent alternativement (Figure I.11), conduisant à un tissu très plat, stable, mais peu déformable. Cette armure confère au tissu des propriétés mécaniques sensiblement identiques dans les deux directions chaîne et trame.



Figure I.11: Armure toile.

- **Le sergé $n \times m$**

Chaque mèche de trame passe sous m puis sur n mèches de chaîne (Figure I.12). Ce mode d'entrecroisement produit sur le renfort des nervures diagonales. La variation des paramètres m et n permet d'obtenir des renforts de rigidité de cisaillement différente.



Figure I.12 : Armure sergé 3x1.

- **Le satin de n avec décochement de m**

Chaque mèche de trame passe sous 1 puis sur $(n-1)$ mèches de chaîne (Figure I.13). L'absence de nervures diagonales est assurée par le décochement m , qui représente un décalage du motif de m mèches de chaînes à chaque nouvelle mèche de trame. Ces renforts sont souvent utilisés pour leur souplesse en cisaillement.

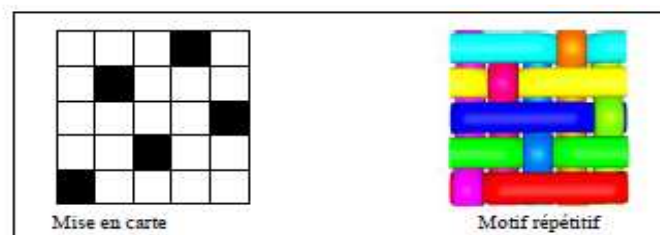


Figure I.13 : Armure de satin.

I.5.2 Armures tridimensionnelles

I.5.2.1 Tresses

Il s'agit d'un tissage cylindrique ou conique des mèches, permettant de réaliser des pièces 3D (Figure I.14). Ces renforts sont notamment utilisés pour satisfaire aux besoins de la construction aéronautique (tuyères...) ou de l'armement [5].

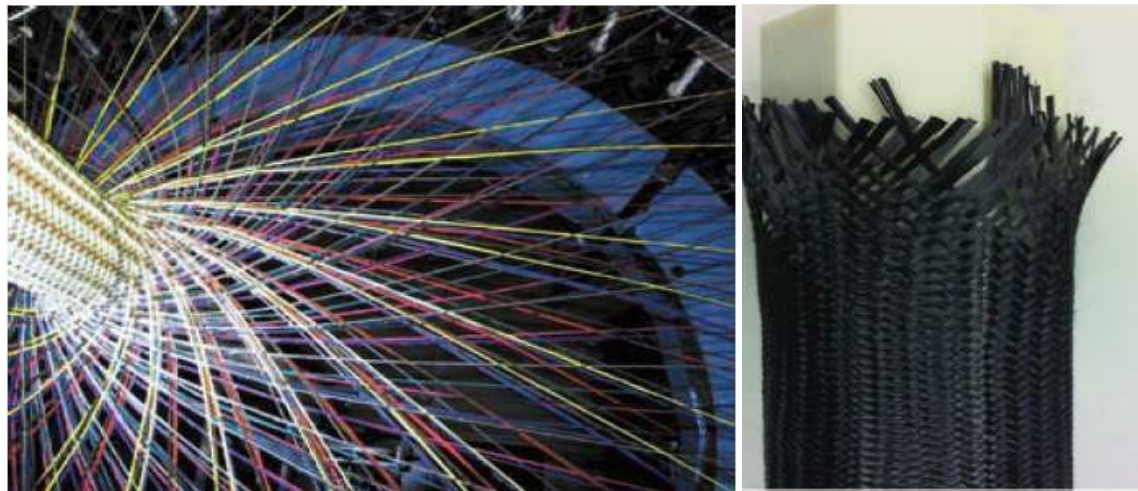


Figure I.14 : Exemple de tresses.

I.5.2.2 Interlocks

Il s'agit de plusieurs couches de mèches de chaîne reliées entre elles par des mèches de trame (Figure I.15). Ce type d'entrelacement, associé aux progrès des procédés de tissage, permet de réaliser une infinité de motifs différents, périodiques ou non. Les renforts de type interlock sont de plus en plus utilisés pour la réalisation de pièces composites de structure car ils présentent l'avantage de permettre la réalisation de pièces épaisses (à partir de renforts de plus en plus épais) tout en évitant les problèmes de délaminage, qui surviennent par superposition de plusieurs couches de renforts 2D par exemple.

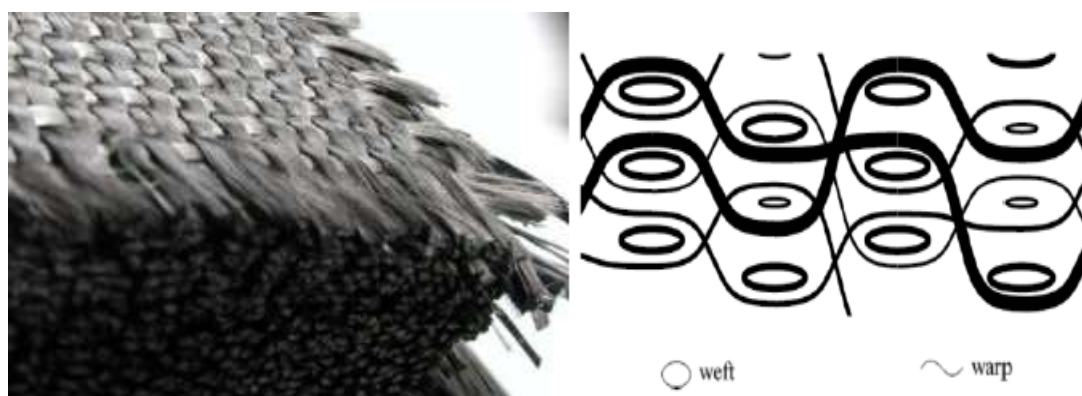


Figure I.15 : Renfort interlock.

I.5.2.3 Renforts 3D

Les renforts 3D comportent des mèches disposées suivant trois directions orthogonales (Figure I.16). Souvent, il s'agit de plusieurs couches d'unidirectionnels reliées par une mèche orientée dans la direction de l'épaisseur du renfort.

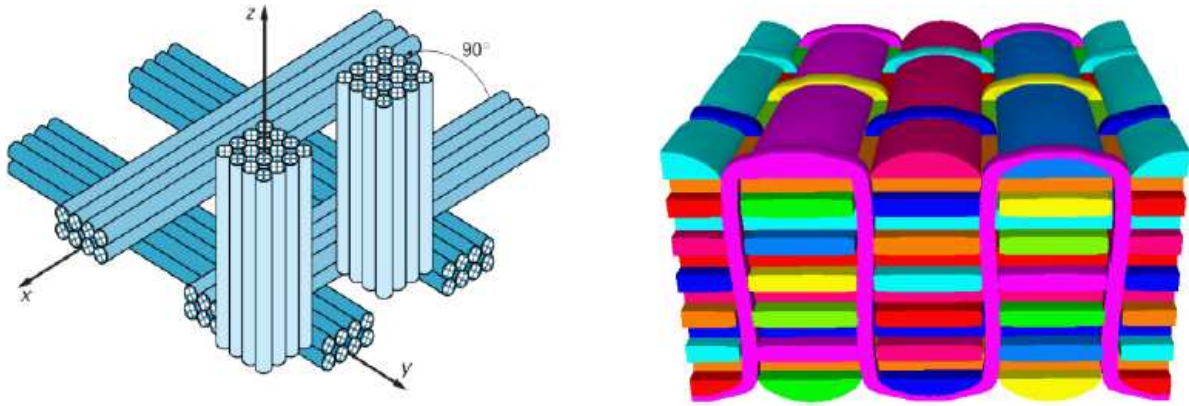


Figure I.16 : Tissage 3D [6].

I.6 Caractéristiques des mèches

Les fibres sont assemblées sous forme de mèche, lui conférant plus ou moins de cohérence suivant qu'elles sont torsadées, entrelacées ou juste juxtaposées avec ou sans traitement (ensimage, ignifugation,...). Chaque mèche peut contenir plusieurs milliers de fibres. Les propriétés utilisées pour caractériser une mèche sont les suivantes [4] :

- Matériau constitutif (nature de la fibre) ;
- Le type d'assemblage (torsadé...) ;
- Le nombre de fibres s'exprime en milliers ;
- La rigidité en tension s'exprime en N ;
- L'effort à la rupture en tension s'exprime en N ;
- La masse linéique exprimée en tex (1 tex=1 g/km).

I.7 Différents constituants de renforts

Le renfort, comme son nom l'indique, apporte la résistance mécanique au composite. Il peut se présenter sous forme de particules, fibres courtes ou fibres longues. Les renforts à fibres longues sont utilisés pour obtenir des pièces possédant des propriétés mécaniques élevées. Les principaux matériaux utilisés pour la production de fibres longues sont :

I.7.1 Le verre

C'est le matériau le plus utilisé à l'heure actuelle, et ce dans de nombreux domaines tels que le nautisme, l'automobile, le bâtiment...etc. Il doit principalement son succès à son faible coût. Le verre possède d'autres propriétés intéressantes, il est par exemple un bon isolant électrique, plusieurs types de verres existent :

- Le verre de type E, de composition standard, qui est le plus utilisé ;
- Le verre de type D, utilisé pour ses hautes propriétés diélectriques, notamment pour la construction de matériel de télécommunications ;
- Le verre de type C, utilisé pour des applications nécessitant une bonne résistance aux agents chimiques ;
- Les verres de types R et S, aux caractéristiques mécaniques élevées, utilisés pour des structures à hautes performances mécaniques [4].

I.7.2 L'aramide

Les fibres aramides ont des propriétés mécaniques élevées en traction mais leurs résistances à la compression est faible. La faible tenue mécanique en compression est généralement attribuée à une mauvaise adhérence des fibres à la matrice dans le matériau composite. Pour y remédier, des ensimages des fibres peuvent être utilisés. L'utilisation de composites à fibres hybrides permet également de remédier aux faiblesses des composites à fibres d'aramides. Des renforts hybrides de type verre-kevlar ou carbone-kevlar sont largement utilisés dans le domaine des loisirs (ski, raquette de tennis) [8].

I.7.3 Les céramiques

Les matériaux composites de type céramiques sont souvent constitués de renforts et de matrice en céramique. Les fibres sont élaborées par dépôt chimique en phase vapeur sur un fil support. Ces fibres sont rencontrées dans des applications où la température est très élevée entre 500°C et 2 000°C. Ces matériaux sont utilisés notamment dans les parties chaudes des moteurs d'avions. Quelques exemples de fibres céramiques [8]:

- Fibres de Carbure de Silicium ;
- Fibres de Bore ;
- Fibres de Bore carbure de silicium.

I.7.4 Le carbone

Les fibres de carbone sont utilisées pour leurs bonnes caractéristiques mécaniques associées à une masse volumique faible. Elles sont obtenues à partir d'une matière première appelée précurseur. La qualité des fibres de carbone dépend de la qualité de ce précurseur. Deux précurseurs sont couramment utilisés : les fibres acryliques (polyacronitrile ou PAN) et les fibres de brai, obtenu par filage de résidus de houille ou de pétrole [8].

Elaboration

Les fibres acryliques (Figure I.17) subissent d'abord une décomposition thermique sans fusion des fibres, aboutissant à une graphitisation dans laquelle la structure initiale des fibres est retrouvée. Les procédés actuels utilisent des filaments acryliques assemblés sans torsion, qui subissent quatre traitements successifs:

- Une oxydation : chauffage des fibres à 300°C ;
- Une carbonisation : chauffage progressif des fibres de 300°C à 1100°C. Cette étape permet d'obtenir des fibres HR (haute résistance) ou HT (haute ténacité) ;
- Une graphitisation uniquement si des fibres à module d'Young élevées sont souhaitées. Cette étape s'effectue par pyrolyse des fibres à 2600°C ou plus et permet d'obtenir des fibres HM (haut module) ou THM (très haut module) mais dont la contrainte à la rupture est plus faible que celle des fibres HR ou HT (Tableau I.1) ;
- Un traitement de surface qui permet d'augmenter la rugosité des filaments et donc d'améliorer la liaison fibres/résine.

Le brai, quant à lui, est utilisé pour son faible coût. Il est chauffé entre 350°C et 450°C, étape après laquelle un produit intermédiaire entre liquide et cristal (appelé mésophase) est obtenu. Ce produit est ensuite filé, carbonisé et pyrolysé à une température supérieure à 2000°C. Les fibres de brai permettent d'obtenir, par cette méthode, des fibres haut module [4].

| Matériau | Carbone HM | Carbone HR |
|-------------------------------------------------|------------|------------|
| Densité | 1,81 | 1,74-1,78 |
| Module d'Young (GPa) | 390-400 | 200-250 |
| Contrainte à rupture en traction (MPa) | 2300-2700 | 3700-4500 |
| Diamètre filament (μm) | 6-8 | 6-8 |

Tableau I.1 : Caractéristiques mécaniques des fibres de carbone [7].

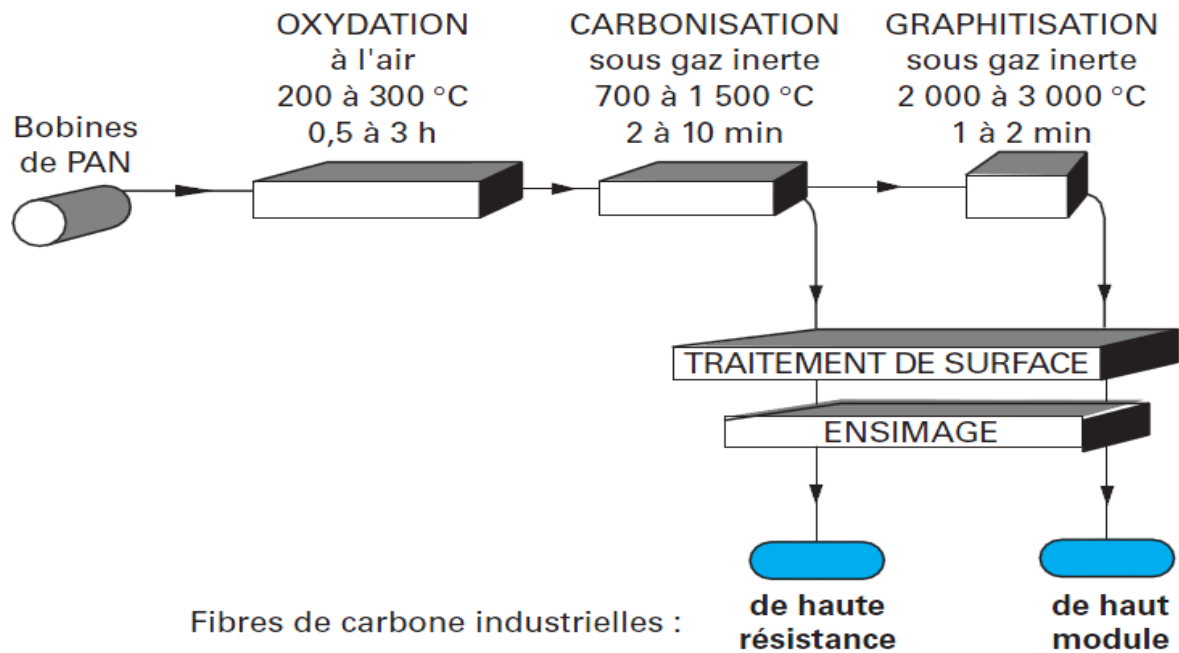


Figure I.17 : Elaboration des fibres de carbone à partir de fibres acryliques [4].

✚ Avantages des fibres de carbone

- Les fibres de carbone (Figure I.18) conduisent bien l'électricité et la chaleur (avantages qui peuvent aussi devenir des inconvénients selon l'application) ;
- sont rigides (leur module d'élasticité peut toutefois varier en fonction des paramètres de mise en œuvre) ;
- Résistent bien à la traction, tout comme à la compression. Elles s'avèrent, en ce sens, même aussi solides que l'acier ;
- Les fibres de carbone sont près de 70 % plus légères que l'acier ;
- Très faible densité ;
- Faible coefficient de dilatation ;
- Haute résistance chimique.



Figure I.18 : Fibres de Carbone.

I.8 Mode d'élaboration des tissus

C'est le mode de production de structures tissés à partir d'entrecroisement de deux ensembles de fils (Figure I.19) avec la chaîne dans le sens longitudinal (1) et la trame dans le sens transversal (2). Pour ce type de production, les fils de chaîne dont le mouvement est géré par des cadres (Figure I.20), sont séparés en deux couches permettant ainsi l'insertion de la trame. Ensuite la fermeture et l'ouverture de la chaîne dans l'autre sens (ensemble du haut vers le bas et vice versa) permettent le blocage de la trame dans le tissu.

Au cours des années l'évolution technologique a permis d'augmenter la productivité de machines utilisées. En effet, pour les premières machines à tisser appelées métiers à navette, (Figure I.21) l'insertion de la trame se faisait à l'aide d'un tube en bois appelé navette (Figure I.22) dans lequel une longueur limitée de fils de trame pouvait être stockée. Une fois le tube vide, la machine était arrêtée pour recharger la navette. Aujourd'hui des machines à lances, à projectiles, à jet d'eau et à jet d'air (Figure I.23) avec des vitesses d'insertion 5 fois plus élevé (1000 coups par minute pour les machines à jet d'air). D'autres avancées technologiques ont permis d'améliorer la gestion des fils de chaîne telle que la levée fil à fil (technique Jacquard) et non pas par ensemble de fils, ce qui permet d'avoir différents dessins (armures (Figures : I.11, I.12 et I.13)) de tissage. Ce type de machine est utilisé pour les tissus techniques tel que les airbags, les ceinture de sécurité, ...etc. [9].

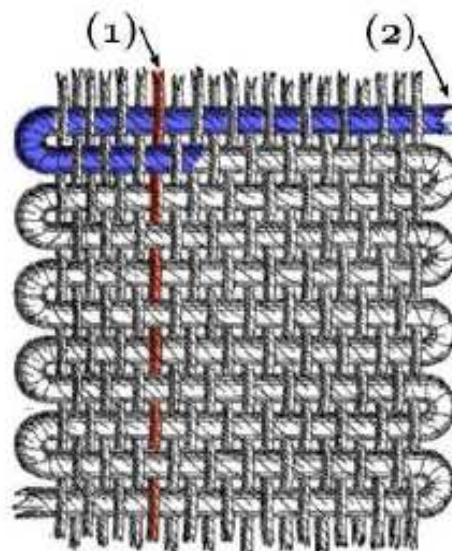


Figure I.19 : schéma d'un tissu avec le sens chaîne (1) et trame (2).

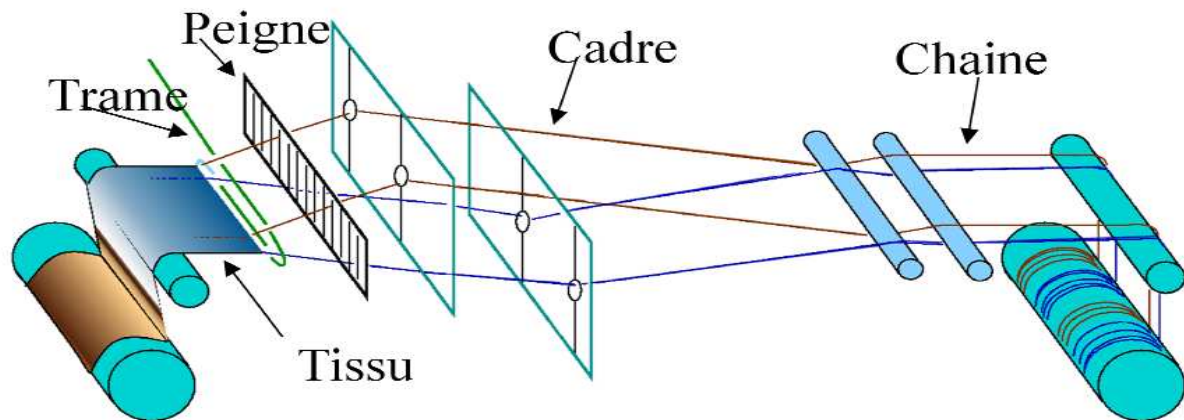


Figure I.20 : Schéma d'un processus de tissage.



Figure I.21 : Un métier à navette.



Figure I.22 : Une navette.



Figure I.23 : Une machine à tisser jet d'air de marque Sulzer G6500.

I.9 Les matériaux composites

Un matériau composite est un matériau issu de la combinaison de plusieurs couches de tissus liées entre elles avec la résine.

I.9.1 Définition

Un composite est l'assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles de natures différentes, et dont les qualités se complètent afin d'obtenir un matériau hétérogène et fortement anisotrope dont les performances sont supérieures à celles de ses constituants de base, ou mieux encore, par effets de synergie. Les matériaux composites ne sont pas alliés, mais associés [10]. Un matériau composite nécessite l'association intime d'au moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser (Figure I.24) ; ce qui introduit la notion d'un agent de liaison, l'interface qui assure la compatibilité renfort matrice, transmet les contraintes d'un constituant à l'autre sans déplacement relatif.

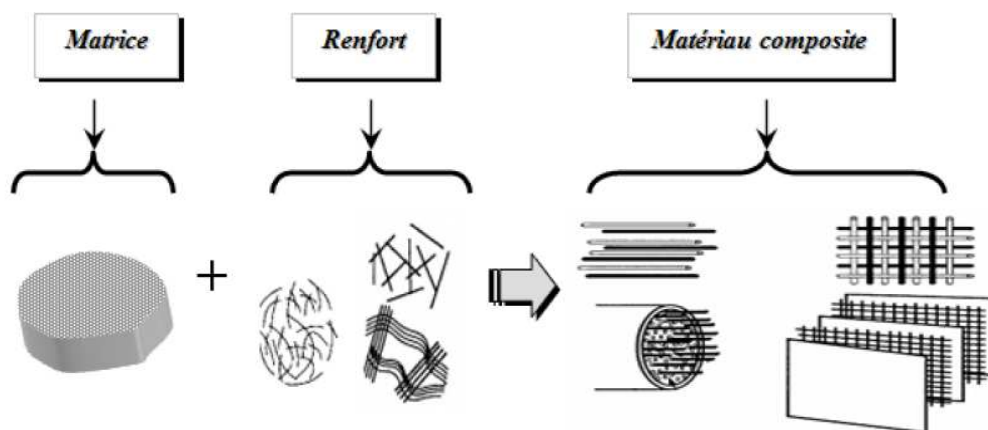


Figure I.24 : Constituants d'un matériau composite.

I.9.2 Constituants d'un matériau composite

Il est constitué de deux constituants de base, la matrice et le renfort.

I.9.2.1 Matrice

Cette phase est indispensable à la liaison des divers éléments constitutifs, est composée d'une résine (polyester, époxyde, etc....) et d'une charge (carbonate de calcium, graphite, etc.). Leur rôle est de lier les renforts, de répartir les charges (contraintes, résistance à la traction et rigidité) et d'assurer la protection chimique contre les agents agressifs extérieurs tels que acides, humidité, corrosion..., et donne la forme au produit réalisé; pour les

composites plastiques, elle est par définition un polymère ou une résine organique. Le choix de la matrice dépend de l'utilisation à laquelle est destinée le matériau composite. La figure I.25 présente les différentes familles de matrice [8].

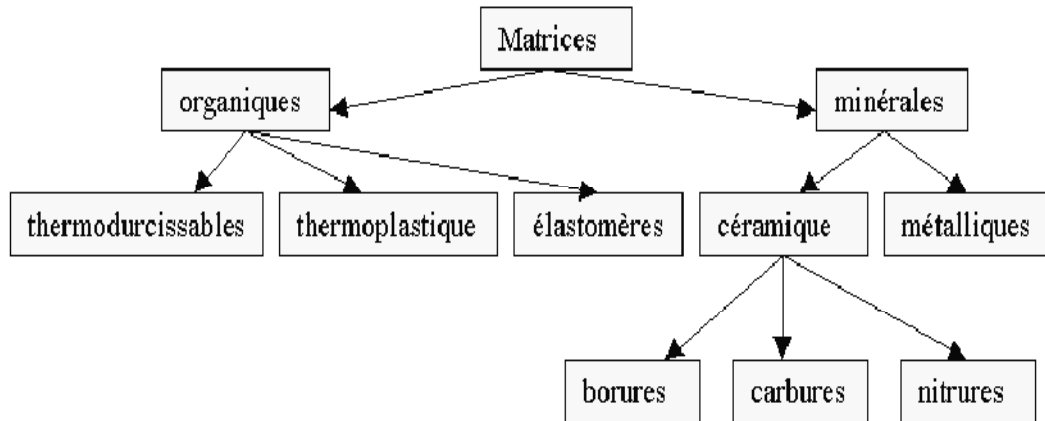


Figure I.25 : Différentes familles de matrice.

I.9.2.2 Renfort

Ils sont de nature filamentaire ; ils constituent l'armature ou le squelette du matériau composite avec une fraction volumique de (30 à 70%). Ils sont destinés à améliorer ou assurer la tenue mécanique (rigidité, résistance à la rupture, à la traction). La figure I.26 présente les principaux matériaux de renfort [11].

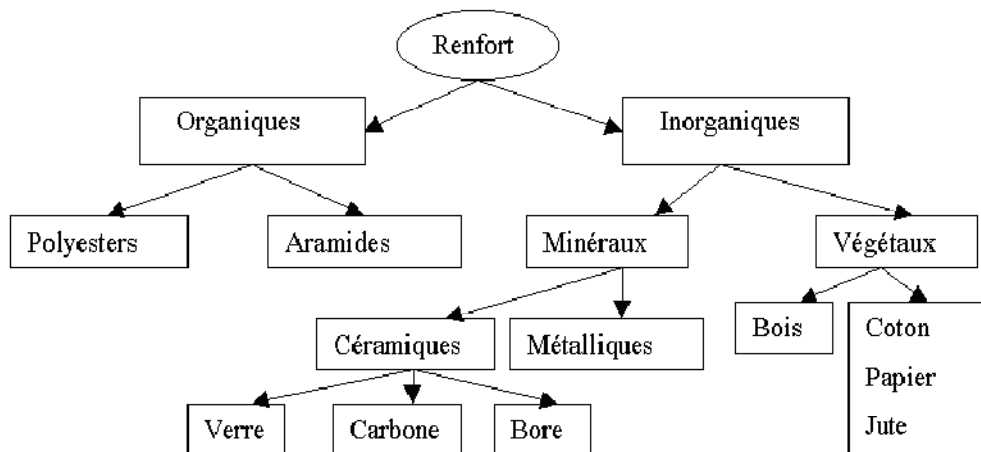


Figure I.26 : Principaux matériaux de renfort.

I.9.3 Procédés de fabrication des composites

Les techniques de fabrication jouent un rôle considérable sur les propriétés mécaniques des composites car chacune des opérations influe de manière irréversible sur le produit fini. De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins bien

définis, et leurs choix dépendent surtout des caractéristiques mécaniques et de la géométrie du produit, et l'importance des séries.

I.9.3.1 Moulage sans pression

I.9.3.1.1 Moulage au contact

• Principe

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.27) et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

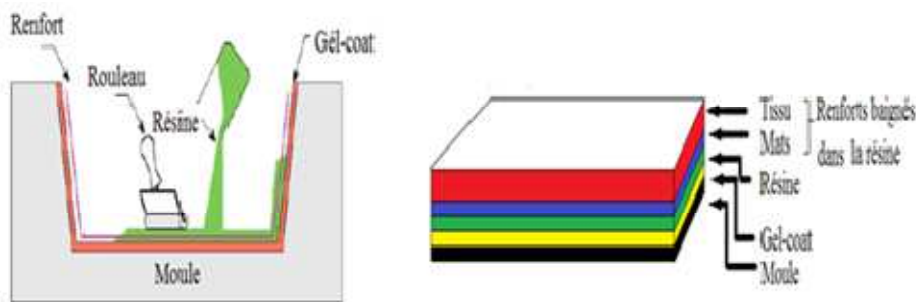


Figure I.27 : Principe de moulage au contact.

• Cas d'utilisation

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

I.9.3.1.2 Moulage par projection simultanée

Procédé manuel ou robotisé permettant la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables à température ambiante et sans pression (Figure I.28). Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machine dite "de projection" comprenant :

- un dispositif de coupe - projection du renfort (roving);
- un ou deux pistolets projetant simultanément la résine.

Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface du moule puis compactés et éboulés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs. La résine pré-accélérée est catalysée en continu lors de sa projection [12].

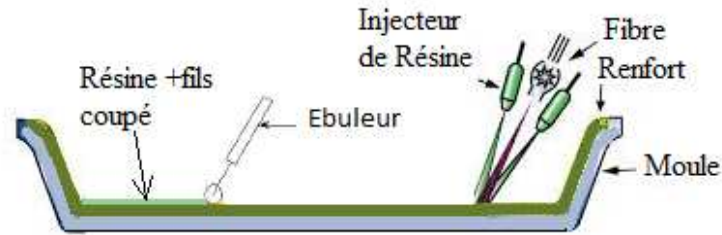


Figure I.28 : Principe du moulage par projection simultanée.

I.9.3.1.3 Moulage sous vide

Ce procédé est encore appelé moulage en dépression ou moulage au sac. Comme dans le cas du moulage au contact, on utilise un moule ouvert sur lequel on dispose les couches de renfort imprégné, ainsi éventuellement que les âmes de remplissage lorsqu'il s'agit de matériaux sandwichs. Une feuille de plastique souple vient couvrir le tout hermétiquement (pose d'un joint d'étanchéité sur le périmètre de la pièce). On fait le vide sous la feuille de plastique (Figure I.29). Il y'a alors compactage de la pièce, élimination des bulles d'air, fluage de l'excédent de résine qui est absorbé par un tissu de pompage. L'ensemble est ensuite soumis à polymérisation [13].

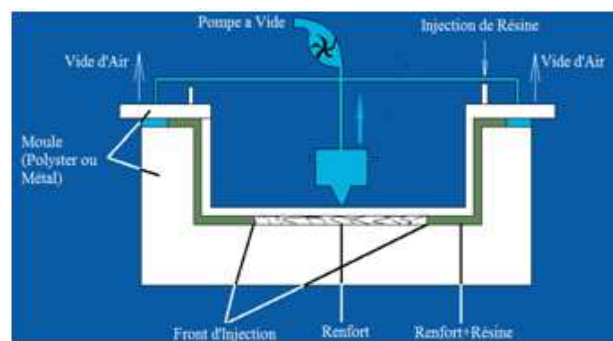


Figure I.29 : Principe du moulage sous vide.

I.9.3.2 Moulage par compression

I.9.3.2.1 Moulage par injection de résine

Le moulage consiste, par injection de résine sous pression, à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation automatique des résines élimine leur manipulation (Figure I.30). La proportion de renfort peut être élevée, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes compliquées [14].

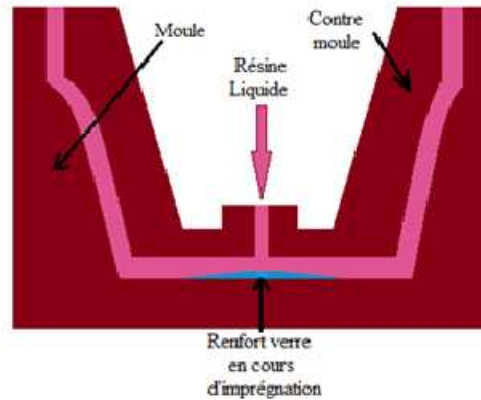


Figure I.30 : Moulage par injection de résine.

I.9.3.2.2 Moulage par compression à froid

Moulage à l'aide d'une presse à compression entre moule et contre-moule rigides en composite, initialement sans apport thermique extérieur. Moule ouvert, le renfort est posé sur la partie inférieure du moule et la résine, dotée d'un système catalytique très réactif, est versé en vrac sur le renfort. La fermeture du moule sous pression (2 à 4 bars) entraîne la répartition de la résine dans l'empreinte et l'imprégnation du renfort. Le durcissement de la résine est accéléré progressivement par l'élévation de température du moule due à l'exothermie de la réaction, ce qui permet un démoulage rapide (Figure I.31). Les performances du procédé peuvent être considérablement améliorées par l'usage de moules métalloplastiques, voire métalliques, et d'un système de régulation thermique basse température [12].

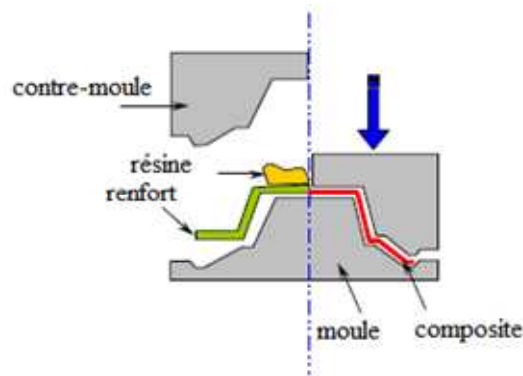


Figure I.31 : Principe de moulage par compression à froid.

I.9.3.2.3 Moulage par compression à chaud

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

vrac sur le renfort. Le moule est fermé suivant un cycle déterminé par descente et pressage du contre-moule. Le temps de pressage est lié au temps de polymérisation de la résine, fonction de la réactivité de la résine et de l'épaisseur de la pièce. Le moule est ensuite ouvert, et la pièce éjectée.

Ce procédé de moulage permet d'obtenir des proportions importantes de renfort, et par conséquent des pièces de bonnes caractéristiques mécaniques. Les dimensions des pièces sont fonction de l'importance de la presse. La pression de moulage est de l'ordre de 10 à 50 bars, la température des moules de l'ordre de 80 à 150 °C. Les cadences de fabrication peuvent atteindre 15 à 30 pièces par heure (Figure I.32). Elles nécessitent un investissement important en matériel, presse et moule [14].

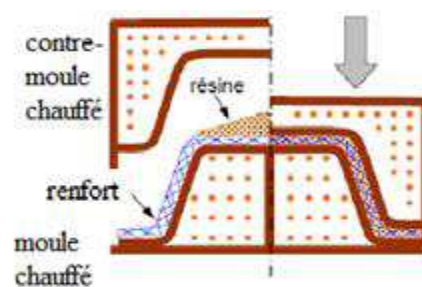


Figure I.32 : Principe de moulage par compression à chaud.

I.9.3.2.4 Moulage en continu

Le moulage en continu permet la fabrication de plaques, panneaux sandwichs, de panneaux ondulés pour toitures, plaques nervurées, etc. Schématiquement, ce procédé peut être séparé en plusieurs phases :

1. Une phase d'imprégnation des renforts : fibres, mats ou tissus. La résine catalysée et le renfort véhiculés sur un film de démoulage (cellophane, polyéthylène, etc.);
2. Une phase de mise en forme;
3. Une phase de polymérisation, effectuée dans une étuve (50 à 150°C) en forme de tunnel, dont la longueur est fonction de la température et de la résine (15 à 50 m de long);
4. Une phase de refroidissement et de découpage (Figure I.33).

Dans le cas de fabrication de plaques planes, la mise en forme est simplement réalisée par une mise à l'épaisseur de la plaque, par passage entre les rouleaux de calandrage. Dans le cas des panneaux ondulés, la mise en forme intervient au cours de la polymérisation, par l'intermédiaire de rouleaux mobiles. Le procédé de moulage en continu peut être entièrement

automatisé. Et permet alors d'élaborer des plaques ou des panneaux en continu. Il nécessite toutefois un investissement très important en matériel [13].

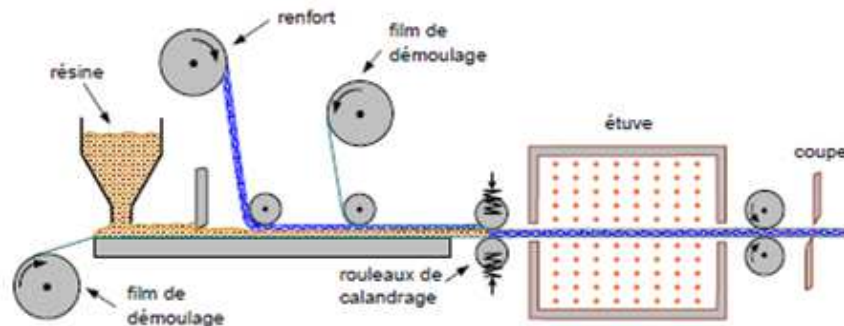


Figure I.33 : Moulage en continu.

I.9.3.3 Moulage par Pultrusion

Le procédé de moulage par pultrusion sert pour la fabrication de profilés, rectilignes, à section constante, hautement renforcés dans la direction principale. Dans cette technique, les renforts : fils et rubans, etc. ..., passent dans un bain de résine catalysée où ils sont imprégnés. Ils traversent ensuite une filière chauffée dans laquelle ont lieu simultanément mise en forme du profilé et polymérisation de la résine (Figure I.34). Ce procédé est applicable aux résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les profilés obtenus ont des caractéristiques mécaniques très élevées, compte tenu de la possibilité d'obtenir des proportions de renfort élevées jusqu'à 80% en volume. Le procédé est adapté aux productions d'assez grandes séries (vitesse de défilement jusqu'à 20 m/h). Il nécessite un investissement très important en matériel. Exemples de fabrication : cannes à pêche, profilés divers, raidisseurs [13].

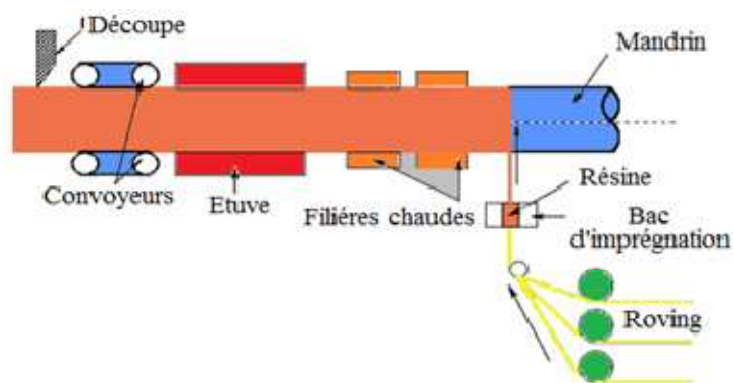


Figure I.34 : Moulage par Pultrusion.

I.9.3.4 Moulage par Centrifugation

Cette technique est réservée au moulage des pièces de révolution, en particulier tubes, tuyaux, etc. Elle est une extrapolation de la technique de fabrication des tuyaux en fonte ou en béton centrifugé. Le moule de révolution, enduite d'agent de démoulages, est mis en rotation (à environ 2000 tours/min). Après dépôt éventuel de gel-coat, on introduit simultanément en continu :

- Le renfort : fibre coupée ou stratifil coupé ;
- La résine catalysée et accélérée (résine époxydes, polyesters, etc.) durcissant à froid.

L'imprégnation du renfort par la résine sous l'effet de la centrifugation. La stratification s'effectue par passages successifs de la buse l'alimentation en résine et de renfort. La polymérisation est effectuée à température ambiante, ou éventuellement accélérée dans une étuve (Figure I.35). Un renfort sous forme de rouleau peut être introduit éventuellement en discontinu avant la rotation du moule. La résine est introduite ensuite lors de la centrifugation. Après polymérisation, la pièce cylindrique est extraite du moule, le retrait des résines permet le démoulage. Cette technique permet d'obtenir un bel aspect de surface à l'extérieur, avec un diamètre et une épaisseur des pièces bien calibrés. Ce processus d'élaboration nécessite un matériel de grande précision un très bon équilibrage du moule [13].

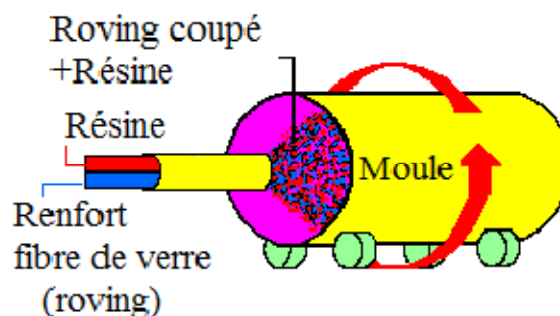


Figure I.35 : Moulage par centrifugation.

I.9.3.5 Moulage par Enroulement Filamentaire

Le renfort (fil continu, ruban, etc.) imprégné de résine catalysée est enroulé avec une légère tension, sur un mandrin cylindrique ou de révolution en rotation (Figure I.36). Ce type de moulage est bien adapté aux surfaces cylindriques et sphériques, et permet une conception avancée des pièces. Les stratifiés obtenus peuvent comporter des proportions élevées de renfort (jusqu'à 80 % en volume), permettant donc d'obtenir de hautes caractéristiques

mécaniques. L'investissement en matériel est très important. Suivant les mouvements relatifs du mandrin et du système d'approvisionnement en renfort, divers types d'enroulements (et par conséquent de stratifications) sont obtenus. On distingue : l'enroulement circonférentiel, l'enroulement hélicoïdal, l'enroulement polaire [14].

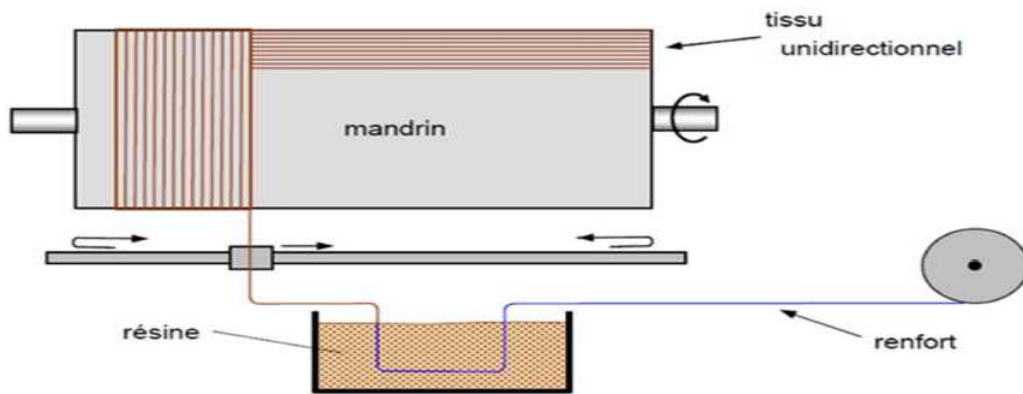


Figure I.36 : Moulage par enroulement filamentaire.

I.9.4 Domaines d'utilisation

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

I.10 Conclusion

Maintenant nous remarquons une avancée étonnante de l'emploi de ces matériaux nouveaux. Il ne s'agit pas d'un hasard mais d'un développement étudié judicieusement, vu les besoins dans des domaines très divers, que ces matériaux révolutionnaires ont apportés par rapport aux matériaux traditionnels. L'aperçu qu'on a fait jusqu'à maintenant sur les matériaux composites est indispensable, pour connaître mieux leurs comportements mécaniques qui présentent un paramètre très important dans l'étude des matériaux, on présentera les différentes techniques de caractérisations des tissus et les essais mécaniques sur les composites dans le chapitre II.

II.1 Introduction

L'ingénieur mécanicien a besoin de connaître le comportement mécanique des matériaux utilisés pour fabriquer diverses structures. Car toute conception d'une nouvelle structure nécessite une connaissance du comportement mécanique des matériaux utilisés ainsi que leurs propriétés mécaniques (limite d'élasticité, charge de rupture, limite d'endurance en fatigue, etc.).

II.2 Essais mécaniques sur les tissus

II.2.1 Essai de traction

La propriété mécanique force-allongement est indispensable pour l'évaluation de la rigidité du tissu. Cette mesure se fait par la mise sous tension d'une éprouvette du tissu en la sollicitant par une traction. Les propriétés force-allongement du tissu sont différentes dans les deux directions. Il faut effectuer des mesures dans les deux directions orthogonales chaîne et trame. Afin de réaliser la mesure force-allongement, on distingue deux procédés des essais: Traction uni axiale et traction biaxiale [3].

- **Traction uni-axiale :** L'essai s'effectue à l'aide d'une machine de traction conventionnelle. Grâce à cet essai nous pouvons calculer le module élastique et le coefficient de Poisson dans les deux directions.

- **Traction biaxiale:** Ce test se réalise sur des machines spécifiques (Figure II.1). Les essais sont réalisés sur des éprouvettes cruciformes (Figure II.2) orientées suivant les directions trame et chaîne. Les machines disposent de deux axes pilotés en déplacement de manière indépendante qui permettent de réaliser des essais avec différents rapports de déformation.

$$k = \frac{\varepsilon_{chaîne}}{\varepsilon_{trame}} \quad (\text{II.1}) \quad \text{Avec : } \varepsilon : \text{déformation}$$

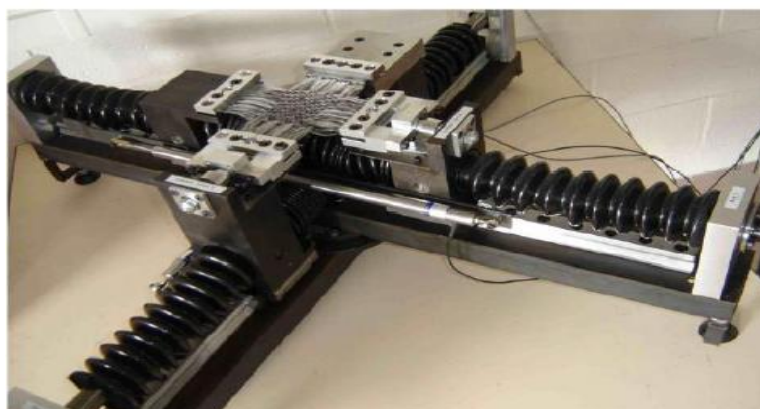


Figure II.1 : Machine de traction biaxiale.

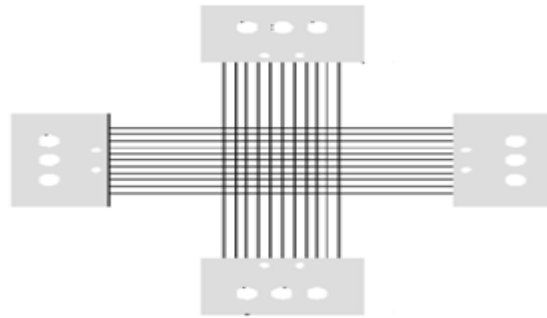


Figure II.2 : Eprouvette cruciformes.

Le comportement caractéristique des renforts tissés pour différent k peut être décrit par la Figure II.3 [3]. A la différence du comportement en traction des mèches seules considéré comme linéaire, une non-linéarité, plus ou moins marquée, est observé en début d'essai.

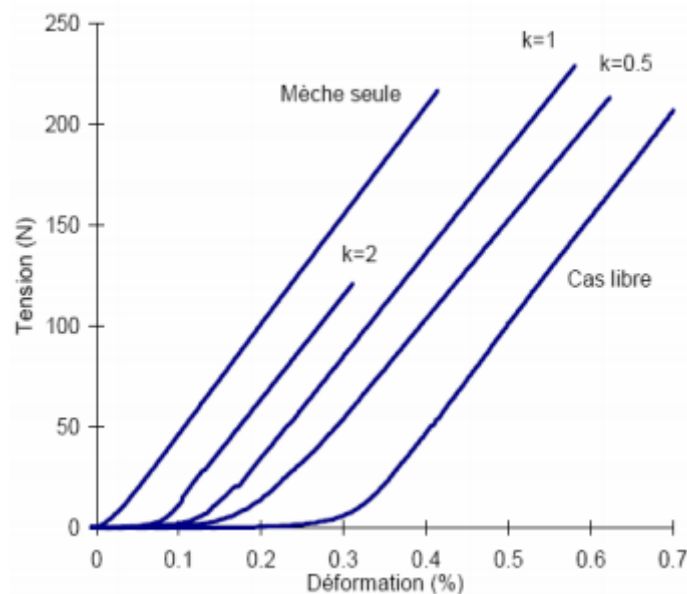


Figure II.3 : Courbes caractéristiques biaxiales de renforts à différent rapport de déformation.

Cette non linéarité, caractéristique d'une rigidification progressive, provient de l'embuvage du tissé, c'est-à-dire de l'ondulation naturelle des mèches, due au tissage, dans les deux directions du renfort.

Lorsque le chargement du renfort débute, l'état d'ondulation des mèches est modifié et ces dernières tendent vers un état rectiligne.

Dans le cas d'un essai uniaxial ($k=0$), les mèches soumises à l'effort en tension vont se désonduler et les mèches transverses, libres de se déplacer, vont fortement s'onduler. La désondulation achevée, le comportement devient linéaire et tend vers celui de la mèche.

Dans le cas d'un essai biaxial, les deux réseaux de mèches vont subir une désondulation jusqu'à un état d'équilibre géométrique où un phénomène de compression transverse apparaîtra, entraînant une rigidification du renfort (comportement linéaire). La non-linéarité est moins marquée que pour un essai uniaxial car la désondulation est moindre et la rigidité demeure inférieure à celle de la mèche.

II.2.2 Essai de cisaillement

Il existe deux types de cisaillement : cisaillement simple et cisaillement pur, qui peuvent être définis comme suit [3] :

- **Le cisaillement simple**

Se produit lorsqu'une étoffe de forme carré ou rectangulaire se déforme parallèlement par rapport à deux côtés opposés (Figure II.4).

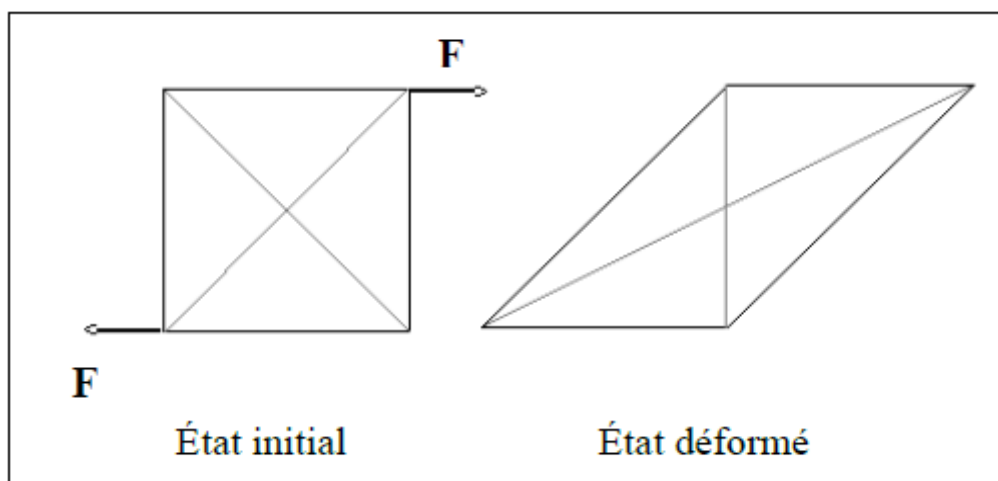


Figure II.4 : Principe de cisaillement simple.

- **Le cisaillement pur**

Le cisaillement pur peut se produire quand une éprouvette de forme carrée est soumise à une sollicitation de traction suivant la diagonale mais elle garde la même surface. Autrement dit la déformation est due à la variation d'angle entre les fils qui gardent la même longueur initiale (Figure II.5).

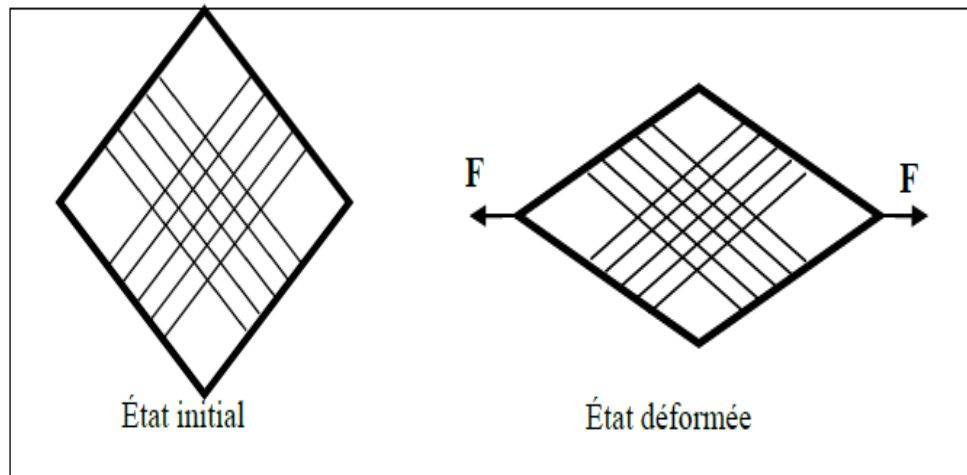


Figure II.5 : Principe de cisaillement pur.

❖ Comportement en cisaillement d'un renfort tissé

Deux protocoles sont classiquement utilisés pour l'identifier [1]:

- L'essai de cadre également appelé « Picture Frame »
- L'essai de tension à 45° appelé « Bias-test ».

a. Le Bias-test

Est une des expérimentations existantes permettant de caractériser le comportement du tissu en cisaillement. Il consiste à effectuer un essai de traction sur un renfort tissé. L'orientation entre la direction de sollicitation et l'orientation du réseau est de $\pm 45^\circ$.

Si le rapport de dimensions (correspondant au rapport entre la longueur et la largeur initiale de l'éprouvette) est au moins égal à 2, trois zones peuvent par conséquent être distinguées après déformation (Figure II.6) :

- Une zone en cisaillement pur (**Zone A**) : les deux directions de mèches sont libres (non maintenues par les mors). On parle de cisaillement pur du fait qu'il n'existe en théorie aucune tension des mèches dû à leur liberté.
- Une zone en demi-cisaillement (**Zone B**) : l'angle de cisaillement correspond à la moitié de l'angle de la zone en cisaillement pur. Une direction de mèche est maintenue par les mors, l'autre reste libre.
- Une zone sans cisaillement (**Zone C**) : les deux directions de mèches sont maintenues par les mors, empêchant toute déformation.

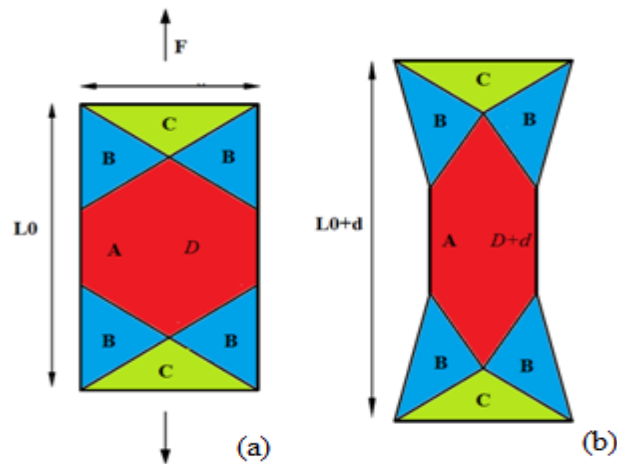


Figure II.6 : Comportement théorique d'essai de cisaillement. Etat initial (a) et déformé (b).

En se basant sur la géométrie déformée de l'éprouvette, dans la zone de cisaillement pur, l'angle de cisaillement peut être calculé analytiquement par l'équation suivante :

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\arccos\left(\frac{D+d}{\sqrt{2}D}\right) \quad (\text{II.2})$$

Avec D et d sont respectivement la longueur de diagonale de la zone A et le déplacement de mors mobile de la machine de traction.

b. Le Picture Frame

Permet également de caractériser le comportement en cisaillement d'un tissu. Ce tissu est théoriquement sollicité en cisaillement pur sur toute sa surface au travers d'un cadre articulé (Figure II.7).

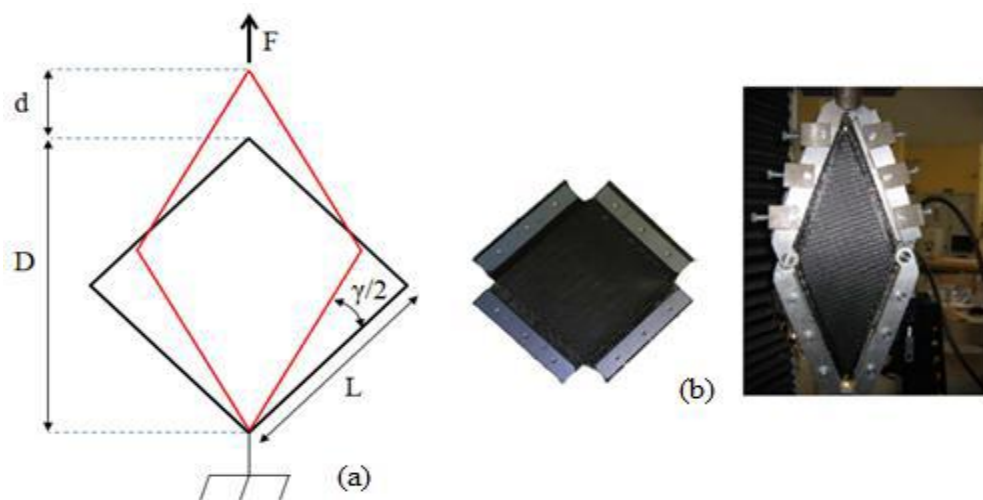


Figure II.7 : Principe du Picture Frame (a), éprouvette à l'état initial et dispositif (b).

Comme pour le Bias-test, l'angle de cisaillement peut être calculé via l'équation suivante :

$$\gamma = \frac{\pi}{2} - 2\arccos\left(\frac{\sqrt{2}+d}{2L}\right) \quad (\text{II.3})$$

Cependant, ce type d'essai présente certaines contraintes par rapport au Bias-test :

- L'alignement initial des mèches par rapport aux bords du cadre modifie le comportement en cisaillement. Si cette condition n'est pas respectée, des tensions peuvent parasiter les mesures de cisaillement.
- Il a été mis en évidence par l'influence des tensions dans les directions chaîne et trame lors de l'essai du Picture Frame. La suppression de ces tensions amène à des résultats proches de ceux obtenus avec le Bias-test.

II.2.3 Essai de flexion

L'essai de flexion permet de décrire la résistance à la déformation sous une sollicitation normale à la surface du tissu.

La flexion du tissu peut être évaluée par la méthode de drapé en utilisant un drapemètre (Figure II.8). Une éprouvette circulaire de diamètre C est tenue concentrique entre deux petits disques "support" de diamètre A. Il est permis à ses bords de tomber du support en projetant une ombre irrégulière, dont l'aire est équivalente à celle d'un cercle de diamètre B [3].

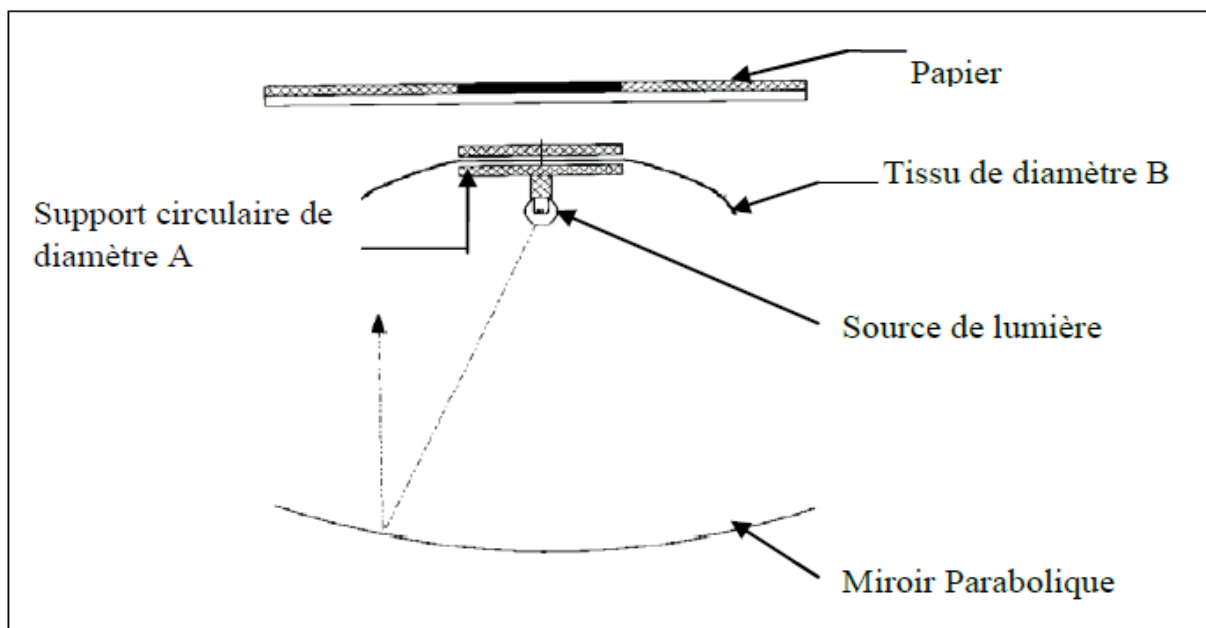


Figure II.8 : Principe de drapemètre.

Le coefficient de drapé f est donné par la formule suivante :
$$f = \frac{B^2 - A^2}{C^2 - A^2} \quad (\text{II.4})$$

Sa valeur varie de zéro pour un tissu parfaitement flexible à l'unité pour un tissu extrêmement raide.

II.2.4 Essais de frottement

Le frottement entre tissus et outils d'emboutissage a un impact significatif sur le comportement des tissus autant en traction, flexion qu'en cisaillement. Des dispositifs d'essai permettant de mesurer les coefficients de frottement (Figure II.9).

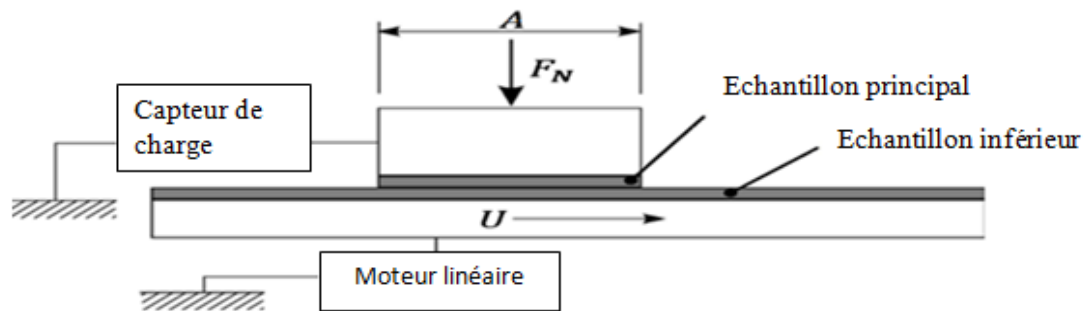


Figure II.9 : Schéma du dispositif de frottement [7].

Grâce à l'utilisation de masses, un effort normal F_N est appliqué sur l'échantillon supérieur par gravité (induisant une pression $P = \frac{F_N}{A}$ avec A l'aire de l'échantillon). Un déplacement est imposé à l'échantillon inférieur. Le coefficient de frottement est calculé en faisant le rapport entre l'effort tangentiel résultant F_s , mesuré par le capteur, et l'effort normal.

II.3 Essais mécaniques sur les mèches

II.3.1 Essais de compaction

Le comportement en compaction du renfort a un impact significatif sur le procédé de fabrication, car il influe sur la compressibilité de la préforme et a des conséquences importantes sur le choix des équipements à utiliser et sur les propriétés mécaniques de la pièce obtenue [7].

Cet essai consiste la plupart du temps en la compaction d'échantillons de mèche entre deux plateaux (Figure II.10).

La pression de compaction se calcule par la formule suivante :

$$P = \frac{F}{A} \quad (\text{II.5})$$

Avec : F l'effort de compaction et A la surface de l'échantillon compacté (mèche), la fraction volumique de fibre est donnée par :

$$V_f = \frac{S_{mat}}{S_{mèche}} \quad (\text{II.6})$$

Avec la section S_{mat} de matière dans la mèche se calcule par la formule suivante :

$$S_{\text{mat}} = AN_f = \frac{T_{\text{ex}}}{\rho} \quad (\text{II.7})$$

Avec : AN_f le facteur qui correspond à la section de la matière dans la mèche, T_{ex} la masse linéique de la mèche et ρ la masse volumique du matériau constitutif.

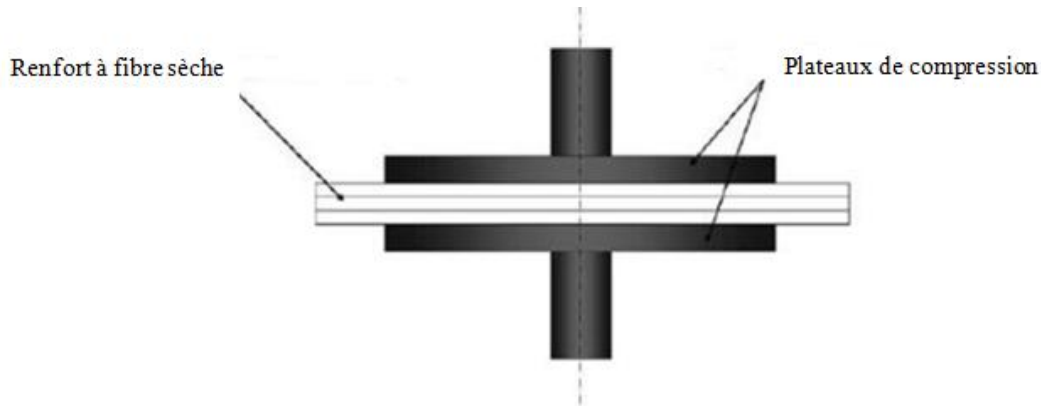


Figure II.10 : Principe d'un essai de compaction [7].

II.3.2 Essai de traction

Cet essai est utilisé pour déterminer la force et l'allongement des fils soumis à une traction jusqu'à la rupture (Figure II.11).

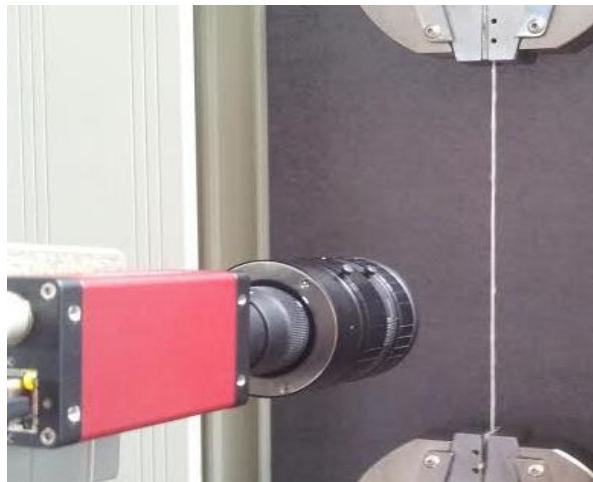


Figure II.11 : Essai de traction sur mèche avec acquisition optique [7].

La courbe (Figure II.12) contient plus d'informations que juste la résistance à la traction de l'échantillon. Les principales caractéristiques qu'on peut dégager de la courbe force-allongement sont [3]:

- **La limite élastique**

La courbe contient souvent un point de diminution de pente. Ce point est la "limite d'élasticité ou limite élastique". Au-dessous de la limite élastique, l'extension du matériau est considérée comme élastique et l'éprouvette retourne à sa longueur initiale quand la force est

arrêtée. Au-dessus de la limite élastique, une partie de l'extension est non recouvrable et l'éprouvette maintient une portion de son extension à la fin de l'essai.

- **Le module d'élasticité**

La pente de la première partie linéaire de la courbe jusqu'à la limite élastique est connue comme le module initial (module d'Young).

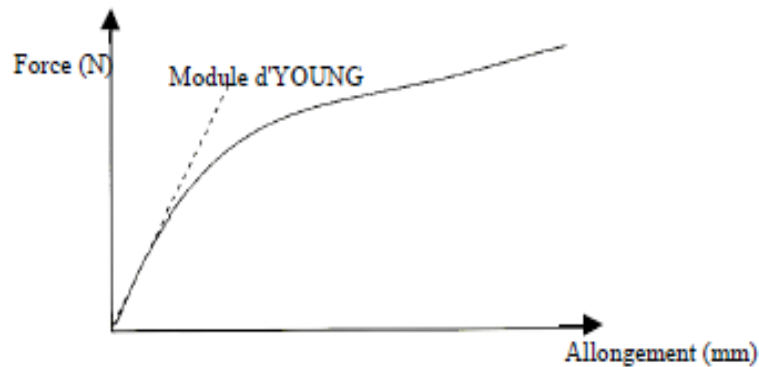


Figure II.12: Courbe de traction.

II.4 Modélisation de certains essais mécaniques effectués sur le tissu

Depuis les années 30, plusieurs chercheurs ne se sont pas contentés de caractériser le textile en tant que matériau, mais ils ont aussi tenté de développer des modèles de comportement.

II.4.1 Travaux de PEIRCE

En 1930, Peirce publia dans le " Journal of Textile Institute " un travail fondamental, intitulé " The handle of cloth as a mesurable quantity ", auquel on peut attribuer la première tentative d'exprimer les composantes élémentaires de la géométrie des textiles, en termes de mécanique et de physique, mesurées par des méthodes objectives et quantitatives [3].

Les principales propriétés considérées par Peirce sont la rigidité à la flexion, la résistance à la compression, l'épaisseur du tissu et le frottement de surface du tissu. Peirce a développé également quelques mesures telles que la densité, l'extensibilité

En 1937, il développa le modèle le plus connu dans la modélisation des propriétés mécaniques du tissu en fonction de sa contexture. Bien que ce modèle soit incomplet il constitue la base de la recherche dans ce domaine.

Ce modèle suppose une structure initiale du tissu d'armure toile, composée de fils uniformes de section circulaire (Figure II.13).

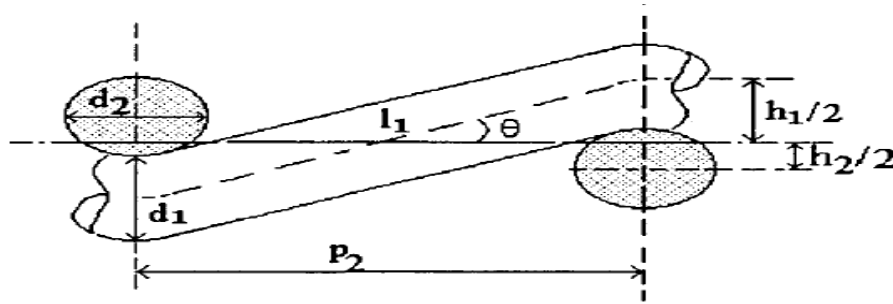


Figure II.13: Modèle géométrique de Peirce.

A partir de ce modèle, plusieurs chercheurs ont proposé d'autres modèles, en modifiant les hypothèses de Peirce. On peut citer les travaux de Leaf et Olofsson en 1964 et de Grosberg en 1966.

Les principales modifications apportées par ces travaux sont :

- la forme ellipsoïdale de la section du fil au lieu d'une section circulaire ;
- la trajectoire de l'axe du fil de forme droite ou sinusoïdale

II.4.2 Travaux de GROSBERG

L'essentiel des travaux de ce chercheur a porté sur le comportement en flexion des structures textiles surfaciques. Le comportement en flexion peut être modélisé à partir d'un système multicouche dans lequel sont définies deux zones [3] :

- une zone où la pression entre fibres est faible et permet le glissement entre ces fibres. Ceci induit l'apparition d'un phénomène d'hystérésis dans le comportement en flexion des tissus,
- une zone où la pression entre fibres est grande interdisant tout glissement entre fibres.

A partir de ces considérations, Grosberg décrit le comportement en flexion d'un tissu par la relation :

$$M = M_0 + \frac{E}{\rho} \quad (\text{II.8})$$

Avec :

M : Moment de flexion appliqué sur le tissu ;

M_0 : Moment dû aux forces de frottement dans la structure ;

E : Rigidité à la flexion ;

ρ : Rayon de courbure de la partie fléchie.

Dans ce modèle, la relaxation des contraintes internes et la fixation de la forme ne figurent pas parmi les paramètres intervenant dans la flexion.

II.4.3 Travaux de ABBOTT

Le modèle de G.M. Abbott, met en évidence la relation liant la composante de la résistance élastique et les paramètres de texture. Pour cela il utilise le modèle géométrique de Peirce pour analyser le comportement en flexion de l'armure toile [3].

Il développe son analyse dans une première phase pour une structure non relaxée, où les fils enlevés deviennent rectilignes mais conservent leurs contraintes internes. Pour cette structure, il propose la relation suivante :

$$b = k(U_1 - U_0) \quad (\text{II.9})$$

Avec :

b : Force élastique de flexion ;

k : Constante géométrique dépendante du tissu ;

U_1 : Énergie totale de déformation ;

U_2 : Énergie élastique de déformation dans le fil ondulé.

Dans une seconde phase, Abbott considère un tissu relaxé où les fils gardent une forme ondulée, c'est pour cette raison que la force élastique de flexion ne dépend plus de l'énergie élastique de déformation dans le fil et l'équation devient:

$$b = kU_1 \quad (\text{II.10})$$

II.4.4 Travaux de KAWABATA

Plusieurs modèles et travaux sont élaborés par ce chercheur et son équipe depuis le début des années 70. Au départ, il a défini un modèle relatif à la traction biaxiale, en proposant une structure de tissu inspirée du modèle de Peirce, mais représentée de façon différente [3].

Les fils de chaîne et de trame sont représentés par des lignes qui se brisent en des points P1 et P2 sur l'axe perpendiculaire au plan du tissu (Figure II.14).

Lorsque le tissu subit une traction biaxiale, Kawabata tire les équations des allongements dans le sens chaîne et trame en se basant sur des considérations géométriques données par son modèle.

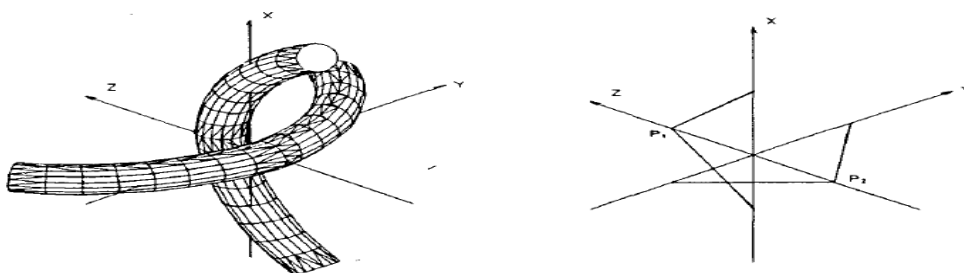


Figure II.14 : Structure de croisement des fils proposée par Kawabata.

Il propose de traiter le problème selon que les fils constituant le tissu sont compressibles ou incompressibles. Les équations élaborées sont modifiées en conséquence. A partir de cette analyse il traite aussi la traction uniaxiale. Dans ce cas il annule une des deux forces qui agissent sur le système. Kawabata s'est également intéressé aux problèmes de cisaillement et a aussi élaboré un système d'évaluation des tissus " Kawabata Evaluating System for Fabrics (K.E.S.F) ". Cette chaîne de mesure caractérise et qualifie le tissu dans son adaptabilité au corps humain, dans le confort qu'il procure en habillement, dans son aspect visuel et aussi dans son état de surface.

II.4.5 Travaux de LINDBERG

Les travaux de Lindberg sont essentiellement fondés sur l'établissement de la relation liant les propriétés mécaniques élémentaires du tissu et ses qualités de mise en forme pour l'habillement. Dans l'industrie de la confection, les coûts de fabrication sont fortement liés aux coûts d'assemblage des pièces constituant le vêtement, et donc au nombre de pièces. L'utilisation d'un tissu à haut pouvoir de déformation permet de minimiser ce nombre de pièces [3]. Par conséquent ce pouvoir de déformation est une qualité importante qu'il convient de caractériser à partir de propriétés mécaniques élémentaires.

Selon Lindberg, les trois propriétés mécaniques les plus importantes à ce sujet sont:

- la rigidité à la flexion;
- l'extensibilité;
- l'équilibre et la stabilité dimensionnelle.

A partir des modèles cités précédemment, d'autres chercheurs ont développé de nouveaux modèles. A titre indicatif, on peut citer: les travaux de B. Olofsson sur le cisaillement, H.P. Lundgren sur la " main " qui est le concept de Kawabata connu sous le nom de "K.E.S.F."

II.5 Essais mécaniques sur les composites

Les propriétés du composites doivent satisfaire le cahier des charges (calculs de résistance et durabilité). Le contrôle du taux de renfort et de la température de transition permet de situer la qualité du produit. Les essais non destructifs permettent la mise en évidence des défauts de structure qui initient l'endommagement ainsi que l'évolution du processus de rupture. Parmi les moyennes utilisés pour avoir accès à ces données, la caractérisation passe donc par des essais sur chaque type de composite utilisé. Ces essais sont classés en plusieurs types:

- **Essais statiques**
 - essai de traction et de compression (traction longitudinale, transversale, hors axes, compression longitudinale...)
 - essai de flexion (trois points, quatre points, par flambement, ...)
 - essai de dureté
- **Essais dynamiques**
 - essai de compression dynamique
 - essai au choc
 - essai de fatigue

➤ **Essais mécaniques sur l'interface fibre-matrice :**

- essai sur éprouvettes modèles (Essai Pull-out, essai de fragmentation, ...)
- essai sur produit fini (essai de micro-indentation, essais de cisaillement interlaminaire, par flexion ou par traction...)

De plus d'autres essais ou analyses permettront une meilleure connaissance du composite :

- vieillissement (absorption d'eau, tenue en température,...)
- dilatation thermique...

➤ **Essais sur les composants:**

- le renfort ;
- la matrice (la résine)...etc.

Dans notre étude, nous intéressons à la détermination des propriétés mécaniques fondamentale des matériaux composites UD par des essais statiques (essai de traction). Pour attendre cet objectif on citera le principe des essais de traction.

II.5.1 Essai de traction

Il s'agit d'un des essais les plus pratiqués et simple à mettre en œuvre, permet de déterminer des caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux : limite d'élasticité σ_e , charge de rupture σ_r , Le module de Young E, Le coefficient de poisson μ ainsi la contrainte maximale de traction $\sigma_{tr\ max}$.

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

- Longueur des fibres (traction longitudinale) ;
- Perpendiculaire aux fibres (traction transversale) ;
- L'angle de 45° par rapport à la direction des fibres (traction hors axes).

a. Traction longitudinale

La charge F_1 est exercée suivant la direction des fibres (composite unidirectionnel) ou suivant la direction de chaîne (composite tissu) sur la section droite S_1 du matériau (Figure II.15) [15].

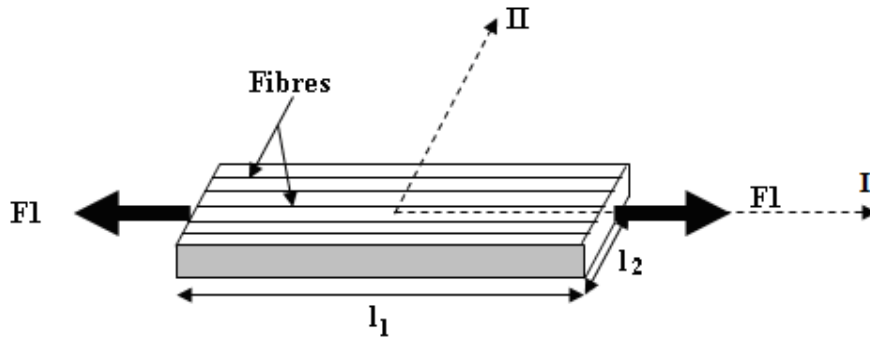


Figure II.15 : Traction longitudinale.

La contrainte normale σ_{11} est donnée par :

$$\sigma_{11} = \frac{F_1}{S_1} \quad (\text{II.11})$$

Les déformations longitudinales et transversales sont données respectivement par :

$$\varepsilon_{11} = \frac{\Delta l_1}{l_1} \quad (\text{II.12})$$

$$\varepsilon_{22} = \frac{\Delta l_2}{l_2} \quad (\text{II.13})$$

Le module longitudinal E_L et le coefficient de poisson ν_{LT} sont ensuite calculés à partir des expressions suivantes :

$$E_L = \frac{\sigma_{11}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{II.14})$$

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_{22}}{\varepsilon_{11}} \quad (\text{II.15})$$

b. Traction transversale

La charge F_2 est exercée suivant la direction transverse aux fibres ou suivant le sens trame (Figure II.16) [16].

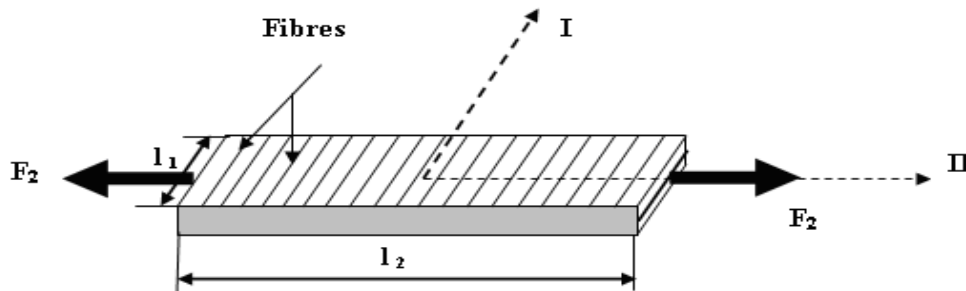


Figure II.16 : Traction transversale.

La contrainte normale σ_{22} est donnée par :

$$\sigma_{22} = \frac{F_2}{S_2} \quad (\text{II.16})$$

S_2 : l'aire de la section droite sur laquelle est exercée la charge F_2 .

Le module de Young transversal E_T et le coefficient de poisson ν_{TL} sont calculés respectivement par les relations suivantes :

$$E_T = \frac{\sigma_{22}}{\varepsilon_{22}} \quad (\text{II.17})$$

$$\nu_{LT} = -\frac{\varepsilon_{11}}{\varepsilon_{22}} \quad (\text{II.18})$$

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

L'essai usuellement utilisé pour mesurer le module de cisaillement longitudinal G_{LT} , est un essai de traction effectué à 45° de la direction des fibres. La charge F est exercée suivant la direction X sur la section S (Figure II.17) [14].

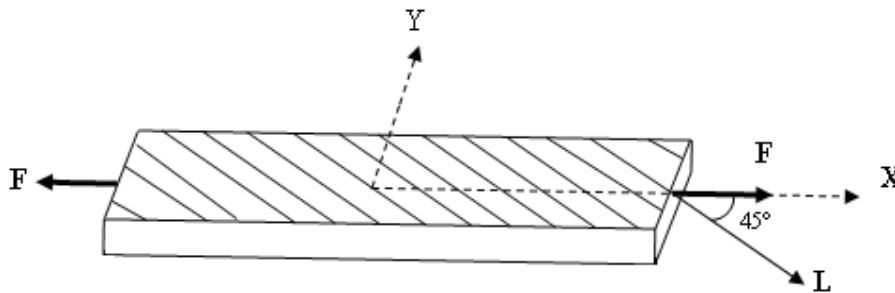


Figure II.17 : Traction hors axes.

Lors d'un essai de traction hors axes sur composites unidirectionnel, le matériau subit un état de contraintes planes (contraintes longitudinales, transversales et de cisaillement). La contrainte normale σ_{xx} est donnée par :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S} \quad (\text{II.19})$$

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

$$E_{45} = E_X = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}} \quad (\text{II.20})$$

Ce module s'exprime par :

$$\frac{1}{E_X} = \frac{1}{E_{45}} = \frac{1}{4} \left(\frac{1}{E_L} + \frac{1}{E_T} + \frac{1}{G_{LT}} - \frac{2\nu_{LT}}{E_L} \right) \quad (\text{II.21})$$

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

$$\frac{1}{G_{LT}} = \frac{4}{E_{45}} - \frac{1}{E_L} - \frac{1}{E_T} + 2 \frac{\nu_{LT}}{E_L} \quad (\text{II.22})$$

La figure II.18 représente des éprouvettes découpées avec des angles de 5, 15 et 30° par rapport à la direction du renfort pour l'essai hors-axe.

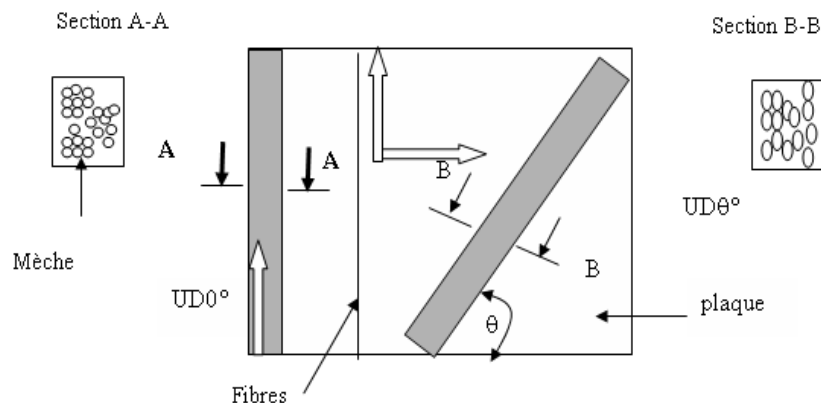


Figure II.18 : Obtention des éprouvettes unidirectionnelle et hors axe dans la plaque.

Remarque

Il est nécessaire de bien veiller à ce que, lors d'un essai de traction longitudinale, la direction de la charge appliquée coïncide réellement avec la direction des fibres. Un désalignement, même faible, peut entraîner, dans le cas d'un composite unidirectionnel, des valeurs mesurées nettement plus faibles que les valeurs réelles du module d'Young longitudinal. Ce problème n'est pas aussi critique dans le cas d'un essai de traction transversale [14].

II.6 Conclusion

La caractérisation d'un matériau composite doit tenir compte de toutes les conditions et considérations afin de mieux définir son comportement exact (son rôle et ses performances).

On réalisera des essais mécaniques destinés, non seulement à mesurer les propriétés mécaniques, mais aussi à déterminer les caractéristiques locales des renforts qui le constituent. Pour l'étude de son comportement et pour pouvoir ainsi établir ses propriétés mécaniques, d'autres paramètres peuvent intervenir comme l'endommagement de ses constituants de base. Dans cet intérêt une étude sur l'endommagement des matériaux composites et les défauts de mise en forme fera l'objet du troisième chapitre.

III.1 Introduction

Lors de la vie des pièces en service, elles peuvent être soumises à diverses sollicitations mécaniques dont les efforts peuvent être aggravés par le facteur temps ou par un environnement plus ou moins agressif. Le comportement dépend en grande partie des paramètres microstructuraux. De par leur nature hétérogène, l'endommagement des matériaux composites est complexe ; il se manifeste en général par la combinaison de trois modes : rupture des fibres, décohésion de l'interface fibre/matrice et fissuration de la matrice. Ces mécanismes et la multiplicité des facteurs influençant la résistance du composite rendent difficile la description de son endommagement et défauts de mise en forme des renforts qui le constituent.

III.2 Définition

D'une manière générale, l'endommagement est défini comme un ensemble de changements microstructuraux au sein du matériau qui occasionne une détérioration irréversible plus ou moins importante. Par exemple, les matériaux composites, notamment ceux à forte anisotropie, leur géométrie dépend, non pas du mode de chargement comme pour les matériaux métalliques, mais de l'arrangement géométrique des constituants du composite. Notons également que l'endommagement présente un caractère unilatéral, les microfissures pouvant se refermer sous l'action du chargement [18].

III.3 Les différentes échelles d'observation de l'endommagement

Il existe plusieurs types d'endommagement au sein d'un matériau composite, unidirectionnel ou tissée qui se révèlent à différentes échelles d'observation. Les plus significatifs sont (Figure III.1) [19] :

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

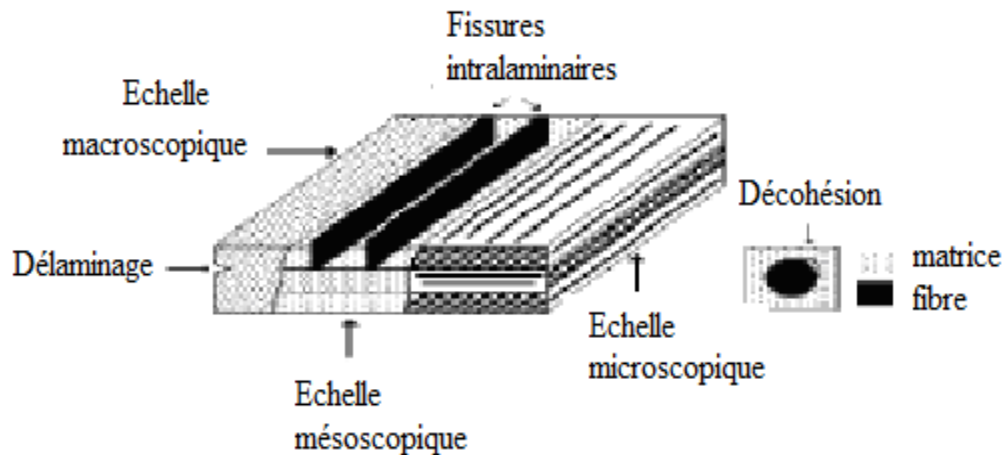


Figure III.1 : Les différentes échelles d'observation de l'endommagement.

III.4 Les mécanismes d'endommagement

Les mécanismes d'endommagement d'un matériau composite ne sont pas uniformément présents au sein du matériau. Ils dépendent notamment de la sollicitation, de l'architecture des constituants et de l'orientation des plis [20].

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

- ❖ la rupture de la matrice ;
- ❖ la rupture des fibres ;
- ❖ la rupture de l'interface fibre/matrice (décohésion).

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

III.4.1 Rupture de la matrice

La rupture finale de la matrice intervient, après une initiation de la fissure et sa progression, dès que la contrainte à la rupture σ_{mr} est atteinte. Ces fissures prennent naissance aux défauts présents dans les matériaux lors de son élaboration.

En traction longitudinale, la fissuration de la matrice est soit transverse dans le cas où σ_m dans la matrice atteint la contrainte à la rupture en traction ; soit longitudinale dans le cas où la contrainte à la rupture en cisaillement est atteinte (Figure III.2). Ce dernier mode ne se produit que dans le cas où la contrainte de décohésion de l'interface est supérieure à la contrainte en cisaillement de la matrice. Dans le cas contraire, il y aura alors décohésion de l'interface [21].

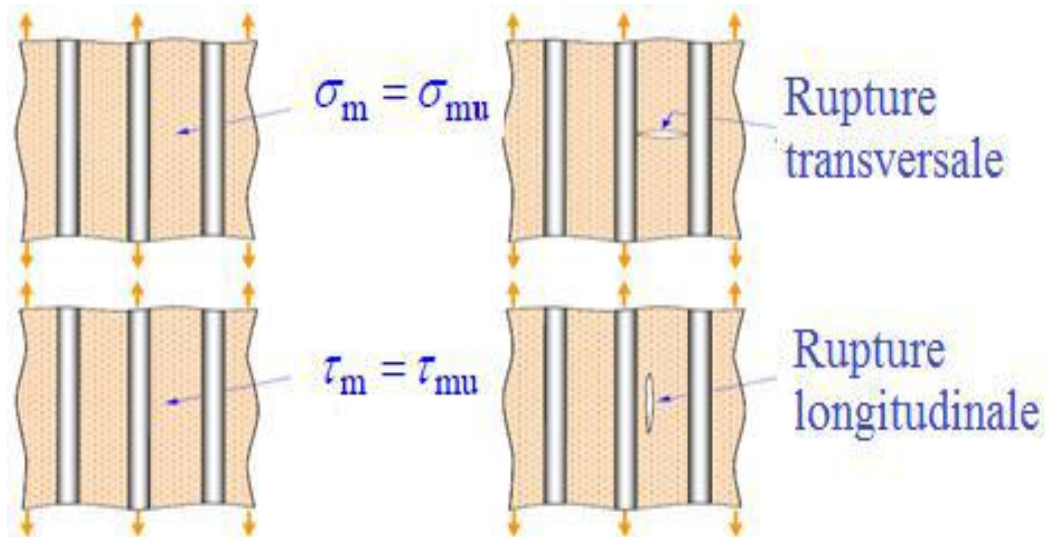


Figure III.2 : Modes de fissuration de la matrice.

Pour des déformations assez faibles sous charges cycliques, seule la matrice est endommagée par l'apparition de plusieurs fissures. On parle de mode de fissuration dispersé (Figure III.3). Par contre, pour les contraintes élevées, les fibres se cassent et permettent la propagation de fissures. C'est le mode de rupture localisé.

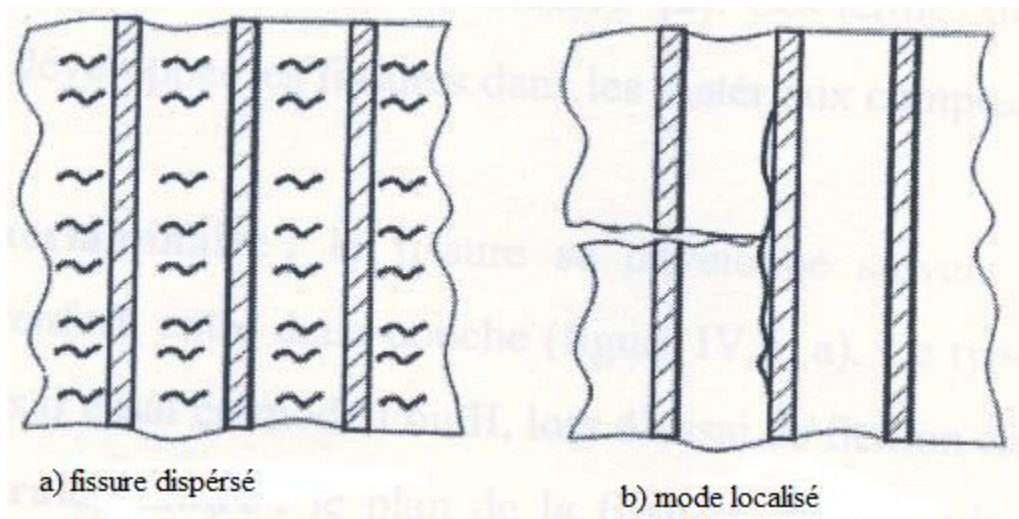


Figure III.3: Types de fissuration de la matrice.

III.4.2 Rupture de fibre

Dans un matériau composite unidirectionnel soumis à des sollicitations mécaniques, la rupture des fibres intervient lorsque les contraintes de traction σ_f dans une fibre atteignent la contrainte à la rupture σ_{fu} (σ_{fr}) de la fibre (Figure III.4). La rupture de la fibre produit une concentration de contrainte au voisinage de la rupture. La redistribution de ces contraintes, est par conséquent le processus de la rupture résultant, dépend principalement : de la contrainte à

rupture des fibres, de la capacité de la matrice à absorber l'énergie libère, des propriétés de l'interface fibre/matrice, etc. La figure montre les différents processus de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre [16].

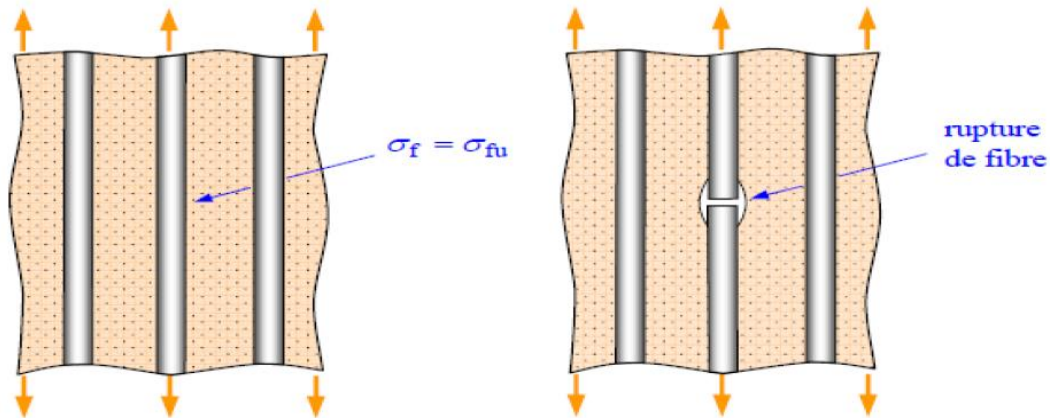


Figure III.4: Rupture de fibre.

La figure III.5 montre les différents processus de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre.

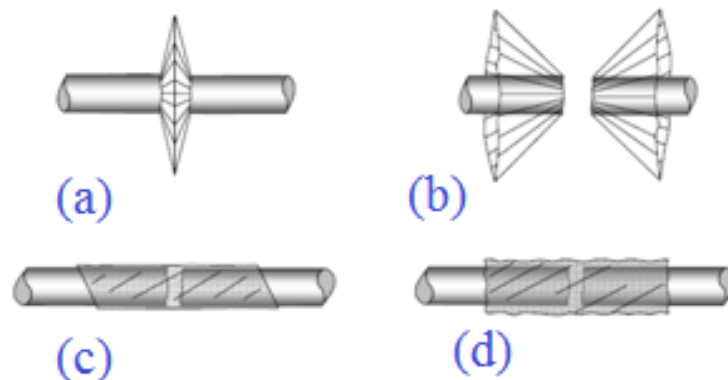


Figure III.5 : Différents modes de rupture de la matrice associés à la rupture d'une fibre.

(a) Rupture transverse de la matrice

(b) Rupture en cisaillement de la matrice

(c) Décohésion de l'interface fibre-matrice

(d) Rupture longitudinale de la matrice

III.4.3 Décohésion fibre/matrice

C'est dans la zone de l'interface où s'effectue le transfert de charges de la matrice vers le renfort. Après initiation, la propagation de la rupture change suivant la nature de l'adhésion fibre-matrice. Dans le cas d'un composite à fibres unidirectionnelles sollicité parallèlement aux fibres (Figure III.6), on peut distinguer les cas suivant :

- Cas d'une interface très forte : si l'adhérence entre fibres et matrice est très forte, on aura une propagation de la fissure initiée soit par rupture de fibres, soit par rupture de

la matrice comme si elle n'avait rencontré aucun obstacle, la rupture observée sera de type fragile.

- Cas d'une interface très faible: la fissuration matricielle est déviée à l'interface, la décohésion fibre-matrice s'étend sur une très grande distance.
- Cas d'une interface ayant des propriétés intermédiaires : la fissure au contact d'une fibre se dévie dans un plan perpendiculaire en provoquant un décollement de la matrice au niveau de l'interface [22].

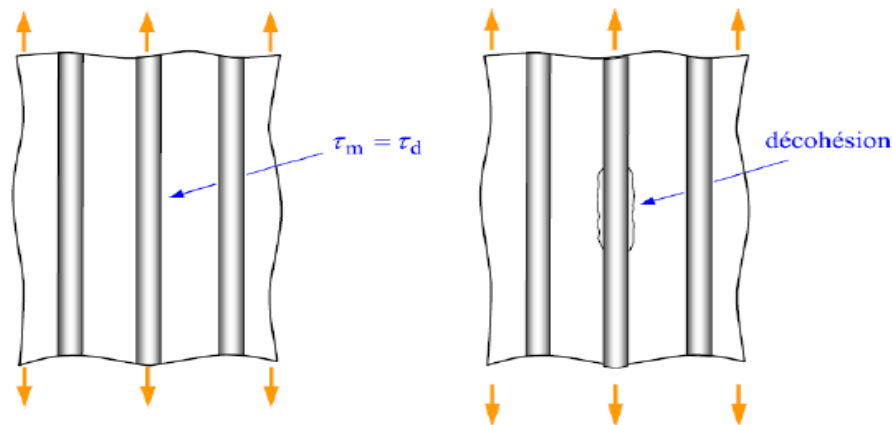


Figure III.6 : Décohésion fibre-matrice.

III.5 Endommagement des composites stratifiés

III.5.1 Les fissurations

Les matériaux composites stratifiés constitués des couches superposées renforcées de fibres unidirectionnelles, de tissus ou de mats (Figure III.7) peuvent présenter différents type de fissuration (interlaminaire, intralaminaire, ou translaminaire) [16]. Ces termes définissent les plans dans lesquels peuvent se développer les fissures dans les matériaux composites.



Figure III.7 : Structure d'un stratifié.

- **Fissure interlaminaire** : développement de la fissure selon un plan parallèle aux couches de renforts, et entre deux couches. On le rencontre lors d'essai en mode I ou II aussi en flexion entre appuis rapprochés (Figure III.8.a).

- **Fissure intralaminare** : développement de la fissure selon un plan perpendiculaire ou parallèle aux couches de renforts et à l'intérieure des couches. On le rencontre lors d'essai de cisaillement ou traction transverse sur matériau unidirectionnel (Figure III.8.b).
- **Fissure translaminaire** : développement de la fissure selon un plan perpendiculaire aux couches et aux renforts. Exemple : essai de traction ou compression uniaxial dans le sens des fibres (Figure III.8.c).

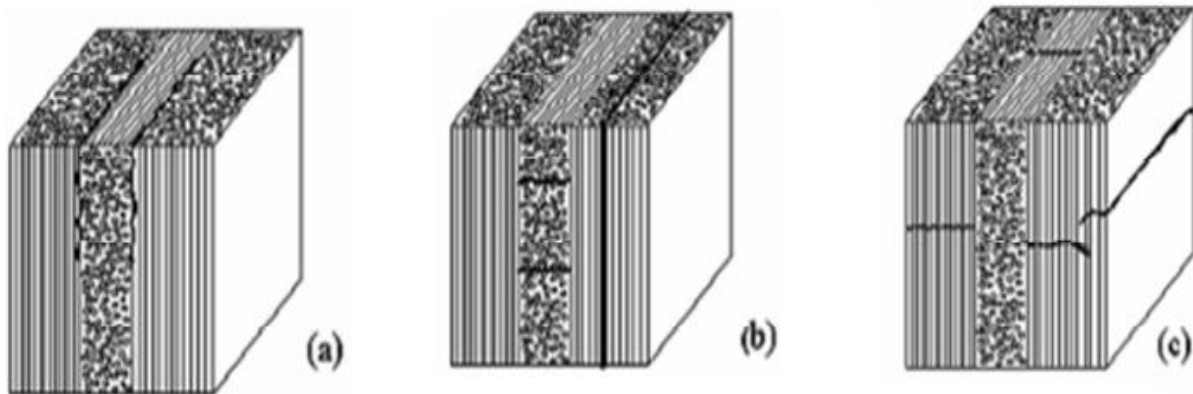


Figure III.8 : Différents types de fissuration au sein d'un composite stratifié.

Dans le cas de stratifiés, aux mécanismes élémentaires décrits précédemment (décohésion fibre-matrice, rupture longitudinale de la matrice, rupture transverse de la matrice, rupture de fibres), s'ajoute (Figure III.9) un mécanisme de rupture entre les couches, appelé rupture par délaminage. Les mécanismes de rupture induits dépendent de la nature des constituants, de l'architecture des couches et du mode de sollicitation mécanique imposé.

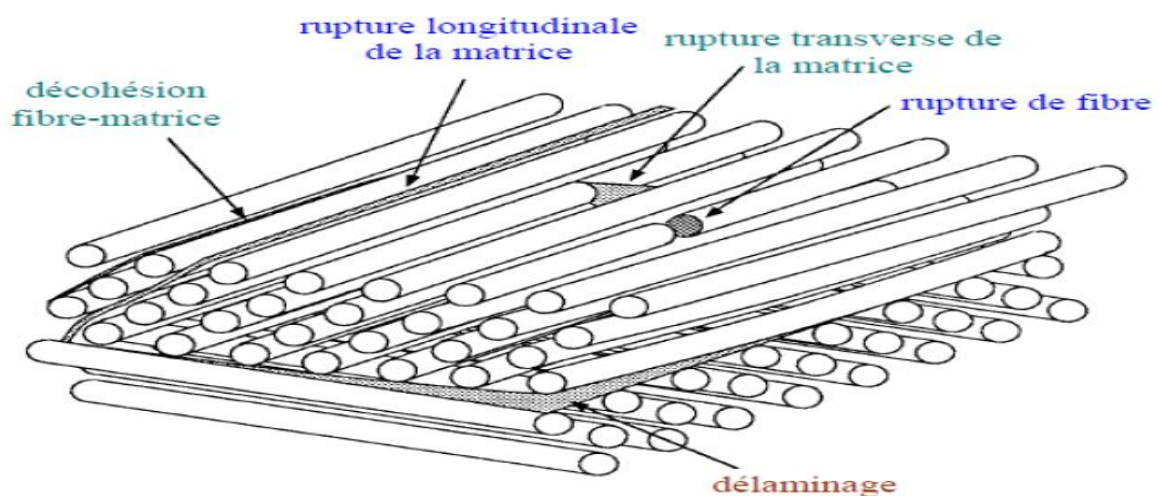


Figure III.9 : Différents mécanismes de rupture d'un stratifié.

III.6 Défauts des renforts

III.6.1 Défauts de fibre

De manière générale, les défauts conditionnent les propriétés mécaniques des matériaux. Or, il existe de nombreux défauts appelés nœuds ou dislocations (Figure III.10) au sein même de la fibre qui apparaissent lors de la croissance ou de la récolte de cette dernière et qui influence sur les propriétés internes de la fibre. Ces défauts correspondent généralement aux zones de ruptures de la fibre lors d'essais de traction. Difficilement prévisibles et irréversibles, ils sont la cause de la grande dispersion dans la mesure des propriétés mécaniques de la fibre, ces défauts étant différents d'une fibre à l'autre [1].

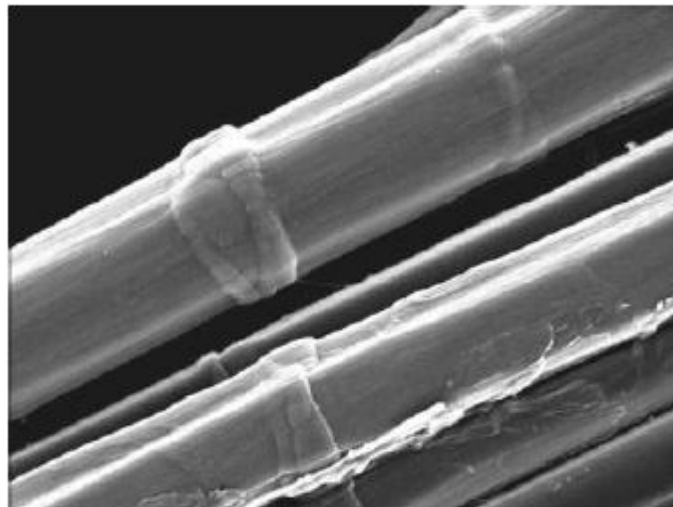


Figure III.10 : Exemple de défaut de type nœud ou dislocation.

III.6.2 Défauts de mise en œuvre des renforts

Lors du tissage des renforts, les chaînes sont mises en tension pour permettre le passage des trames (Figure III.11) [1]. La manipulation mécanique et les frottements induits conduisent à une dégradation des propriétés mécaniques des fibres et à des écarts de propriétés entre chaînes et trames plus ou moins importants ce qui influence sur la mise en forme du tissu.

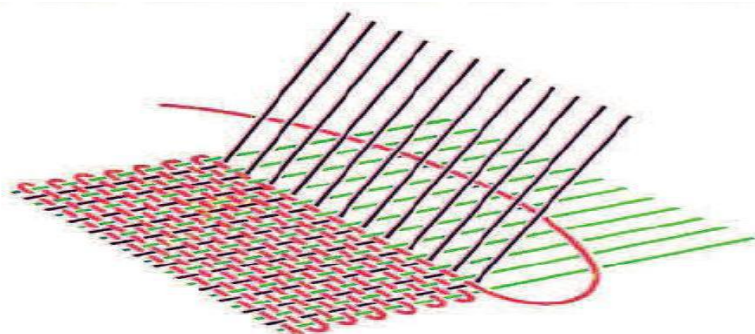


Figure III.11 : Schématisation de l'opération de tissage.

III.6.3 Essai de mise en forme

L'analyse de la déformabilité des renforts tissés lors de leur mise en forme peut se faire par le principe d'emboutissage (Figure III.12). Le renfort se maintient en position contre la matrice (profile) à l'aide d'un système de serre-flan [1].

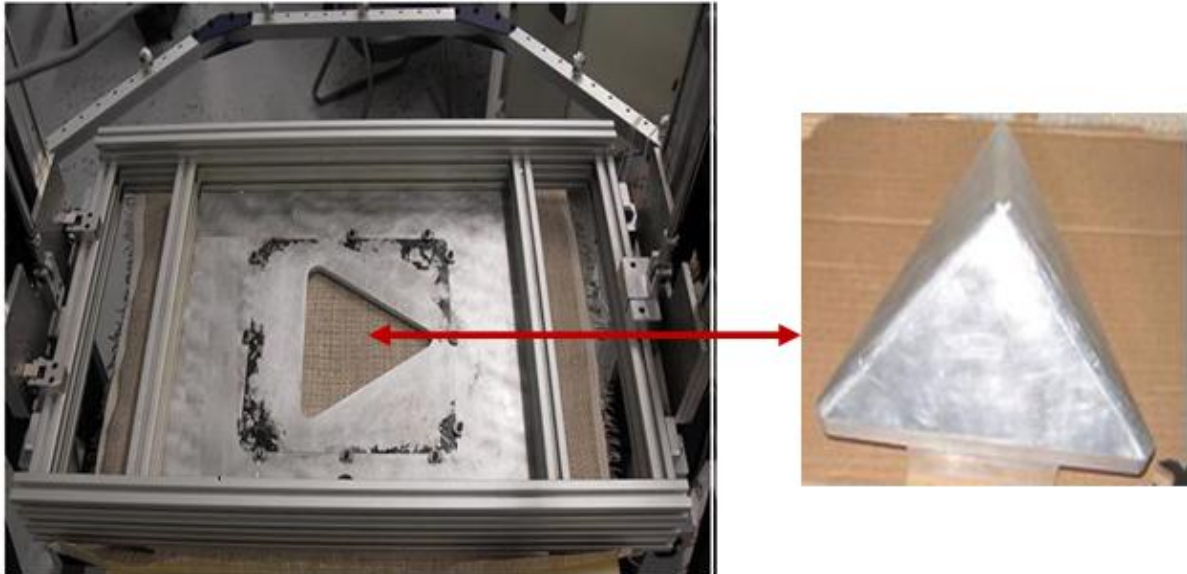


Figure III.12 : Exemple d'une matrice ouverte et poinçon en forme tétraédrique.

Les poinçons induisent des profondeurs d'embouti pouvant aller jusqu'à 200 mm. Les poinçons ne représentent pas d'applications particulières mais simulent des conditions sévères de mise en forme.

Le poinçon est mis en mouvement ascendant vertical par un vérin électrique. Cette mise en mouvement se fait en général à vitesse faible pour maintenir au maximum l'intégrité du renfort. Le poinçon vient ensuite imposer sa forme au renfort, maintenu tout le long de cette phase de préformage par serres-flan (Figure III.13).



Figure III.13 : Exemple de maintien serre-flan.

✚ Types de défauts de mise en forme

Lors de la mise en forme, les tissus sont soumis à de nombreuses sollicitations telles que le cisaillement, la traction, la flexion ou encore la compaction. Ces sollicitations conduisent à une modification de la fraction volumique de fibres et de l'orientation des mèches, ce qui a un impact sur les propriétés mécaniques des pièces finales. Ces sollicitations peuvent, d'autre part, conduire à l'apparition de plusieurs types de défauts sur les renforts.

- **Déformation hors plan : défaut de boucles**

Les boucles sont des défauts qui se produisent à l'échelle de la mèche. Elles apparaissent suite à un phénomène de flambage des mèches hors du plan du renfort, ce qui induit une surépaisseur locale importante du renfort (Figure III.14).

Au travers des essais de mise en forme sur des géométries prismatiques et tétraédriques, les zones de boucles se situent toujours sur une ligne partant du sommet de la forme (point de triple courbure) jusqu'à la base de la préforme. Dans le cas du prisme elles apparaissent également sur les arêtes des petites faces.

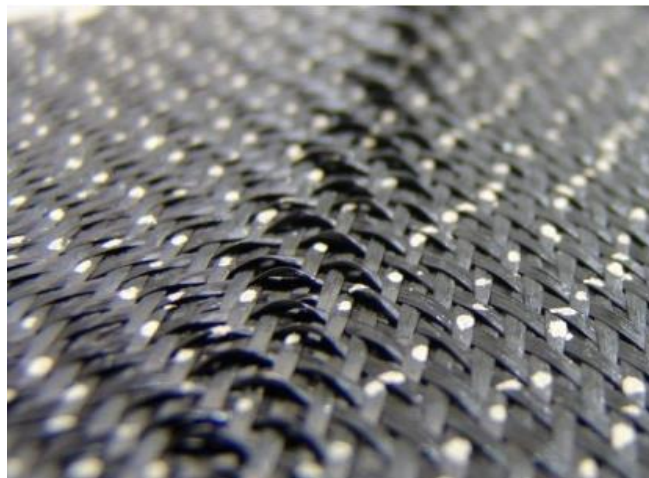


Figure III.14 : Apparence des défauts de boucle [1].

- **Glissements du réseau de mèches**

Les glissements du réseau de mèches peuvent se traiter comme une perte de cohésion du tissage (Figure III.15) [1], leur apparition est la cause de fortes tensions dans les mèches et de la faible cohésion du renfort.

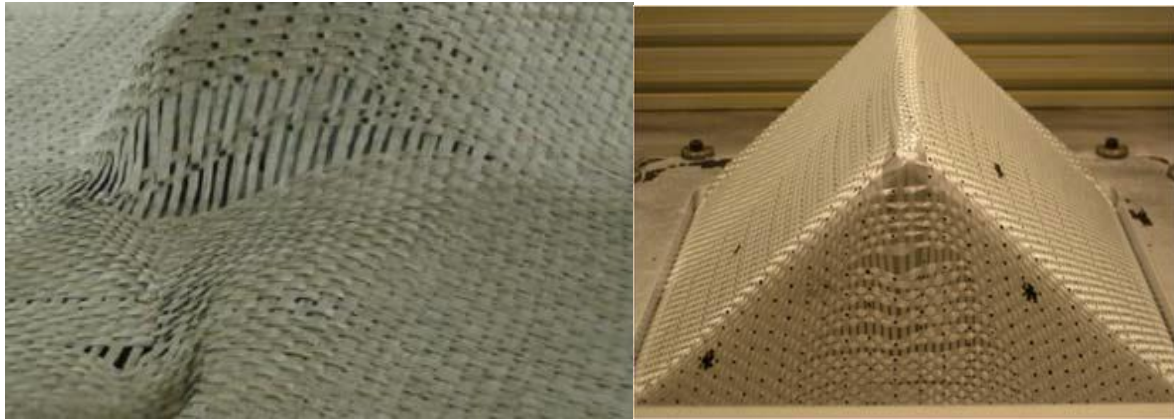


Figure III.15 : Apparence des défauts de glissement (décohésion).

- **Plis et rupture des fibres**

Les défauts de pli apparaissent lorsque le renfort n'est pas suffisamment mis en tension (Figure III.16) [1], ne lui permettant pas d'épouser parfaitement la forme du poinçon ou quand le cisaillement du renfort dépasse un angle limite (angle de blocage) créant des surépaisseurs de matière. Les points triples (points de jonction de trois arêtes) génèrent également des difficultés de préformage.

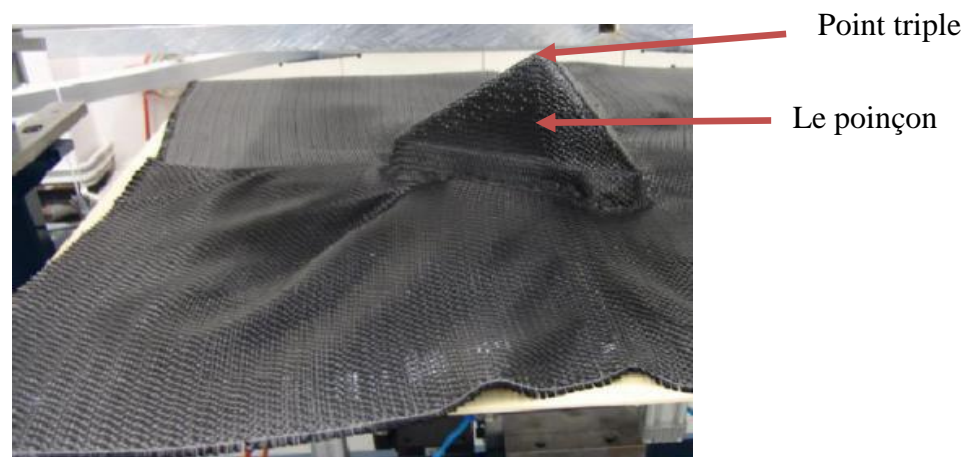


Figure III.16 : Apparence des plissements.

Ces défauts ont pour conséquence une diminution significative des propriétés mécaniques des pièces composites. La présence de plis pouvait conduire à une réduction des efforts à rupture de plusieurs dizaines de pourcents. La présence de plis conduit également à des phénomènes de concentration de contraintes entraînant un endommagement prématuré, l'apparition et la propagation de fissures. Le désalignement des mèches conduit lui aussi à une réduction de la rigidité et de la résistance des pièces. L'apparition de ces défauts est principalement liée :

- À la complexité de la géométrie de la pièce à obtenir ;
- Aux caractéristiques et paramètres du procédé de mise en forme : géométrie et positionnement des serre-flans, pressions appliquées sur les serre-flans, position relative poinçon/renfort ;
- Au comportement mécanique des tissus utilisés.

Ainsi, la compréhension et la maîtrise des phénomènes mis en jeu lors des procédés de mise en forme passent par une connaissance approfondie du comportement des renforts. La caractérisation du comportement mécanique des renforts tissés nécessite la réalisation d'un ensemble d'essais spécifiques adaptés à leur structure et comportement particulier. Ces essais sont souvent longs, complexes et coûteux à réaliser.

I.7 Conclusion

La connaissance de l'état d'endommagement d'une structure en matériaux composites est une nécessité largement reconnue, pour des raisons de fiabilité, donc en conséquence de sécurité. La caractérisation d'un matériau composite doit tenir compte de toutes les conditions et considérations afin de mieux définir désormais, son rôle et ses performances. On réalisera des essais mécaniques destinés, non seulement à mesurer les propriétés mécaniques, mais aussi à déterminer les caractéristiques locales des interfaces. Pour l'étude de son comportement et pouvoir ainsi établir ses propriétés, d'autres paramètres peuvent intervenir comme l'endommagement de ses constituants de base. Dans cet intérêt une étude sur la ténacité en statique de mèches et de tissus d'un renfort unidirectionnel fera l'objet du quatrième chapitre.

IV.1 Introduction

Le travail présenté dans cette partie est la caractérisation du comportement mécanique d'un renfort unidirectionnel haute performance de mèches en carbone, et d'un matériau composite élaboré à base de ce renfort par le biais des essais de traction uniaxial. La détermination des caractéristiques mécaniques de tissu sec seul passe par une caractérisation à l'échelle mésoscopique (échelle de la mèche) et macroscopique (échelle de renfort) en utilisant deux longueurs d'éprouvettes à différentes vitesses de sollicitation. Les résultats et les mécanismes d'endommagement engendrés seront discutés et analysés.

IV.2 Matériaux de l'étude

Le renfort textile utilisé dans cette étude, est principalement destinés à la fabrication de composite haute performance. Il s'agit d'un renfort unidirectionnel en fibres de carbone (fig.IV.1) de masse surfacique de 160g/m^2 et de 0,16 d'épaisseur, avec une répartition de 7,6 mèches/cm pour les chaines qui constitue une proportion de 97% dans le renfort (Voir fiche technique en annexe). Un matériau composite à base de ce renfort a été élaboré en utilisant une matrice en polyester insaturée la POLYLITE® 440-800 par moulage au contact. Il est constitué de 12 plis du renfort UD sous forme de plaque d'épaisseur moyenne de 2,80 mm.

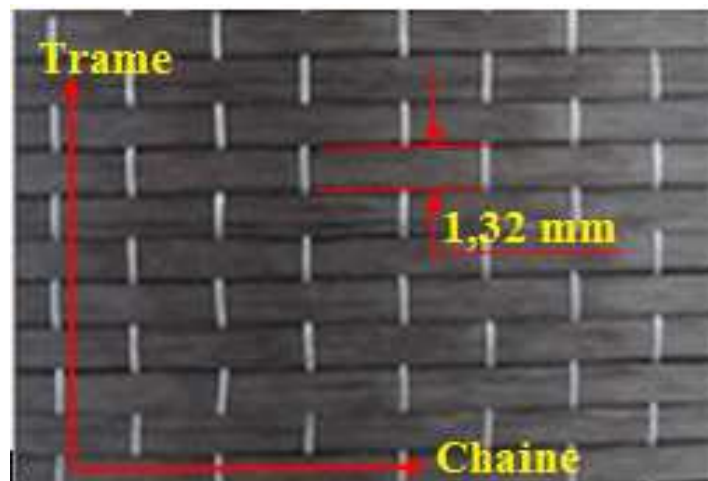


Figure IV.1 : Renfort unidirectionnel en carbone utilisé.

IV.3 Types d'éprouvettes d'essai de traction

Afin d'évaluer les performances des matériaux, nous sommes conduits à l'élaboration de différents types d'éprouvettes qui sont montrés dans le tableau IV.1.

| | Type d'éprouvette | | | | | |
|---------------------|-------------------|-----|--------|-----|------------|---------|
| | Mèches | | Tissus | | Composites | |
| Lots | A | B | C | D | M (0°) | M (90°) |
| Longueur utile (mm) | 200 | 400 | 200 | 400 | 150 | 150 |

Tableau IV.1 : Différents lots d'éprouvettes d'essai de traction.

IV.4 Préparation des échantillons

IV.4.1 Mèches et tissus (lot A, B, C et D)

Les échantillons ont été préparés en fixant les mèches et les tissus entre des talons en acier avec de colle spéciale (Araldite). Cette méthode, permet une bonne tenue de la mèche et de tissu dans les talons ainsi qu'une fixation aisée de l'échantillon dans les mors de la machine de traction. De par sa simplicité, elle permet aussi d'éviter l'utilisation de dispositifs spécifiques et onéreux. Les talons utilisés pour les mèches ont une longueur de 30 mm, une largeur de 20 mm et une épaisseur de 1 mm, et ceux des tissus ont une longueur de 60 mm, une largeur de 50 mm et une épaisseur de 1 mm.

La face des talons sur laquelle est appliquée l'Araldite est rayée (en utilisant du papier de verre par exemple) pour permettre une meilleure adhérence de la colle. Chaque extrémité de la mèche ou bien du tissu est placée entre deux talons. Un léger poids est appliqué pendant le temps de séchage de la colle. Lorsque ce poids est appliqué, il faut faire attention à ce que les talons ne glissent pas : s'il y a trop de colle, cela risque de favoriser le glissement et le désalignement des talons, de plus l'Araldite risque de déborder sur la partie utile de l'éprouvette.

Au contraire, une quantité insuffisante d'Araldite peut ne pas garantir un bon maintien de l'éprouvette dans les talons : il faut trouver le meilleur compromis qui peut dépendre notamment de l'éprouvette testée. Par ailleurs, pendant le procédé de fabrication des éprouvettes, les mèches et les tissus doivent être manipulées avec attention pour éviter tout endommagement.

IV.4.2 Matériau composite (lot M)

Les plaques de stratifiés ayant servi au découpage des éprouvettes sont obtenues par le procédé de moulage au contact (fig.IV.2). Le procédé est manuel, il consiste à nettoyer d'abord le moule avec de la cire qui sert d'un agent de démoulage, puis passer une fine couche de résine et nous procédons à la disposition des couches successives de renfort imprégnées de la résine (mélangée à 1,5% du durcisseur) (fig.IV.2.a), au moyen d'un pinceau et d'un d'ébulleur qui sert d'un compacteur et chasseur des bulles d'air (fig.IV.2.b).

L'ensemble est maintenu dans cet état et à température ambiante pendant la polymérisation et jusqu' à la fin de la gélification qui dure à peu près une demi-journée. A la fin de la polymérisation nous procédons au démoulage. Les éprouvettes soumises aux essais sont découpées dans les plaques à l'aide d'une scie à disque diamanté suivant deux directions définies relativement à l'axe des chaînes ($M(0^\circ)$) et des trames ($M(90^\circ)$).

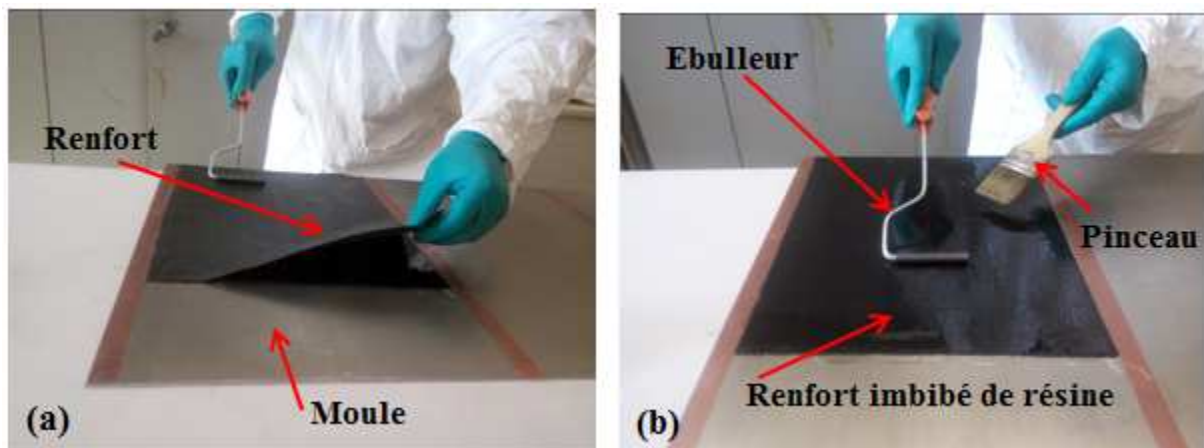


Figure IV.2 : Moulage au contact, a) Dépôt de tissu, b) Imprégnation avec la résine.

Les talons utilisés pour les composites (stratifiés) sont découpés sur les mêmes plaques que les éprouvettes testées. Ils ont une longueur de 50 mm, une largeur de 25 mm et une épaisseur moyenne de 2,80mm. Les talons ont été rayés pour se maintenir dans les mors et éviter le glissement de l'éprouvette au cours de l'essai (fig.IV.3.c). Les trois types d'éprouvettes testées sont montrés sur la figure IV.3. Les éprouvettes en tissu sec (lot C et D) sont composés de 38 mèches (fig.IV.3.b).

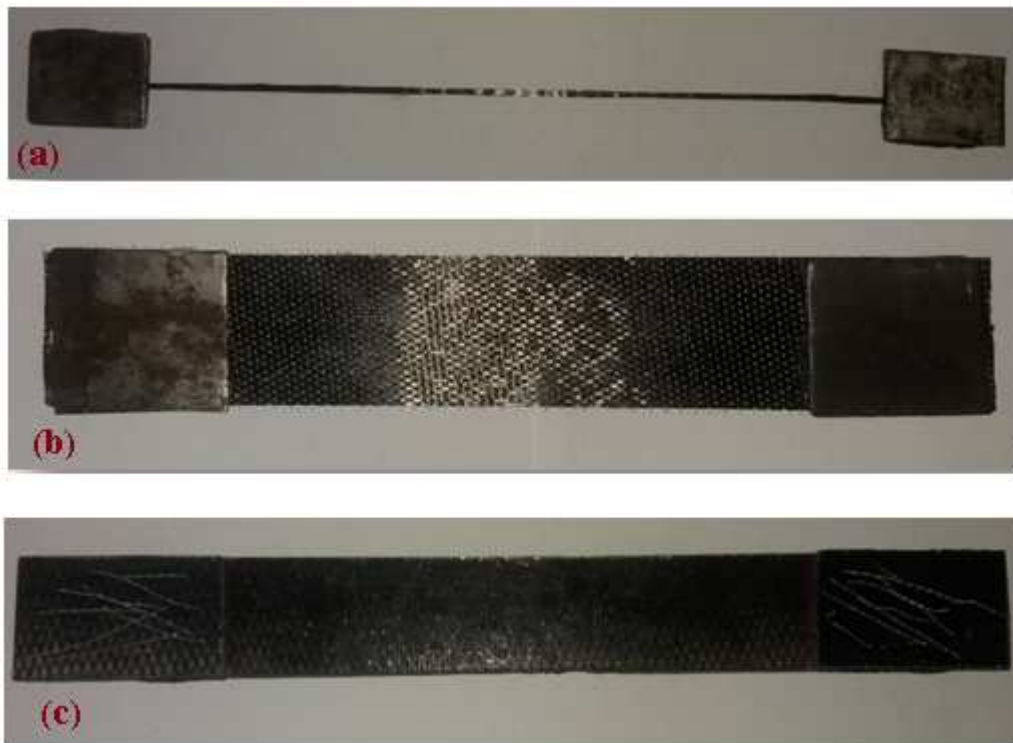


Figure IV.3 : Les différentes éprouvettes utilisées pour l'étude.

IV.5 Caractérisation mécanique des matériaux

La détermination des caractéristiques mécaniques intrinsèques d'un quelconque matériau nécessite la pratique d'un certain nombre d'essais mécaniques tels que la traction, flexion, compression...etc. Pour les besoins de notre étude nous avons opté pour l'essai de traction uniaxial.

IV.5.1 Machine de traction

Les essais de traction sont réalisés sur une machine de traction de type IBERTEST (fig.IV.4). C'est une machine universelle qui peut effectuer sans encombre la traction, la compression et la flexion, avec bien sûr changement de mors qui se montent et démontent facilement, elle est dotée d'une cellule de charge d'une capacité de 200 KN, accompagnée par des vitesses de chargement qui varient de 10 à 500 mm/min contrôlées automatiquement. Elle est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fin, mis en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment supérieur sur laquelle se trouvent les capteurs servant à mesurer la force appliquée sur l'éprouvette ainsi que le déplacement au cours de l'essai qui seront projetés

directement sur l'écran d'un ordinateur lié à la machine. Sur chacune des traverses se trouve des mors permettant de fixer l'éprouvette.

Nous avons effectués des essais de traction sur les mèches et les tissus avec trois vitesses de sollicitation différentes qui sont : 10 mm/mn, 100mm/mn et 200mm/mn. Pour les stratifiés, nous avons utilisés une seule vitesse qui est de 10 mm/mn à la température de 25°C.



Figure IV.4: Machine et dispositif de traction de type IBERTEST.

IV.5.2 Essai de traction

Nous intéressons à la détermination des propriétés mécaniques usuelles telles que le module d'élasticité E , la contrainte à la rupture σ_{\max} et la déformation à la rupture ϵ , la force maximale F_{\max} , ainsi que l'allongement à la rupture (Δl).

IV.5.3 Résultats des essais de traction

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

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

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \quad (IV.2)$$

Avec :

σ : La contrainte normale (MPa);

ε : La déformation relative ;

F : La charge appliqué (N) ;

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

Δl : L'allongement à la rupture (mm);

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

Nous avons effectué des essais de traction sur les différentes éprouvettes (mèches, tissus et composites), en tenant compte de la variation des vitesses et des longueurs. Les caractéristiques mécaniques de l'essai seront présentées dans les tableaux qui suivent et son comportement mécanique par les courbes d'évolution contraintes en fonction des déformations.

❖ Résultats du lot A (Mèche, l = 200 mm)

| | B (mm) | H (mm) | F _{max} (N) | Δl (mm) | σ_{max} (MPa) | ε | E(MPa) |
|------------|--------|--------|----------------------|-------------------|----------------------|----------------------|--------------------|
| V=10mm/mn | 1.32 | 0.16 | 226 ± 9 | 2,73 ± 0,17 | 1077 ± 42 | 0,013 ± 0,0008 | 79351 ± 1811 |
| V=100mm/mn | 1.32 | 0.16 | 221 ± 21 | 2,36 ± 0,20 | 1097 ± 45 | 0,011 ± 0,001 | 80140 ± 7948 |
| V=200mm/mn | 1.32 | 0.16 | 229 ± 19 | 2,50 ± 0,01 | 1107 ± 65 | 0,012 ± 0.0007 | 82070 ± 1827 |

Tableau IV.2 : Caractéristiques mécaniques des mèches du lot A en traction.

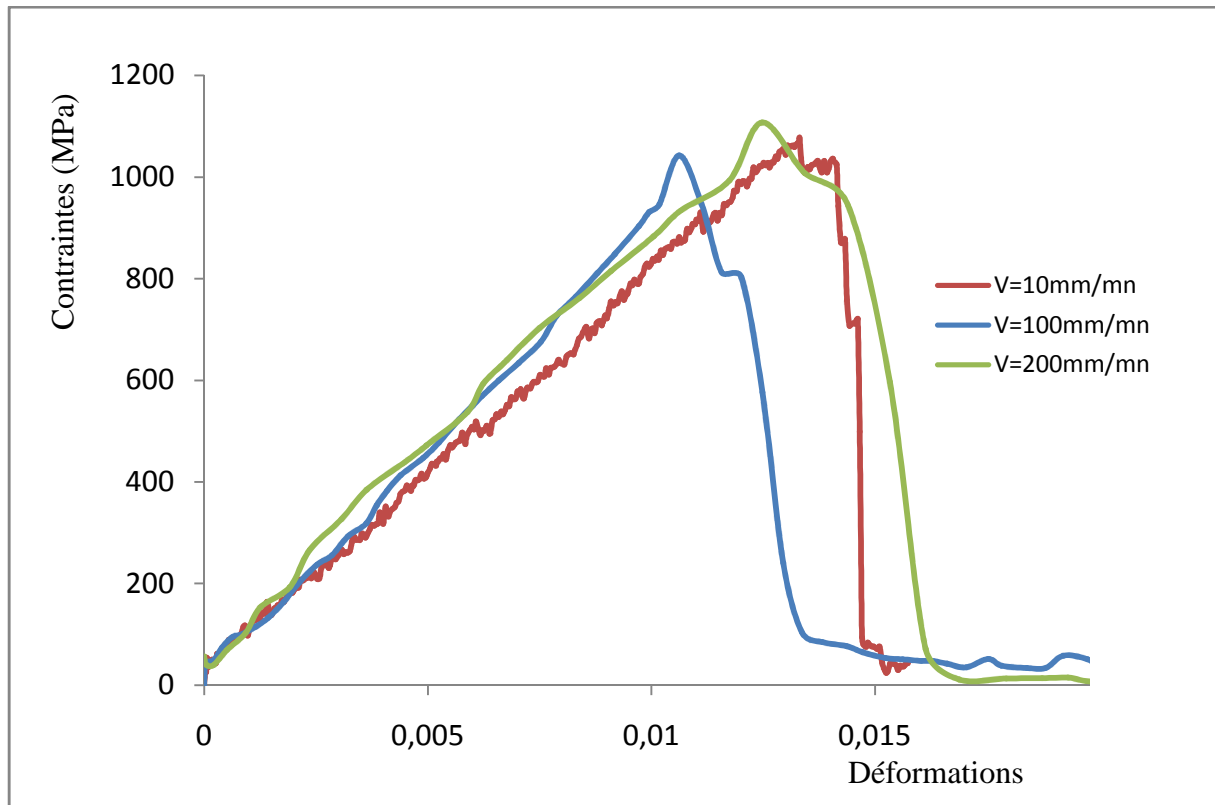


Figure IV.5 : Evolution contraintes/déformations des mèches du lot A.

❖ **Résultats du lot B (Mèche, l = 400 mm)**

| | B (mm) | H (mm) | F_{\max} (N) | Δl (mm) | σ_{\max} (MPa) | ε | E(MPa) |
|------------|--------|--------|-----------------|-------------------|-----------------------|------------------------------------|--------------------|
| V=10mm/mn | 1.32 | 0.16 | 180 ± 1,5 | 3,45 ± 0,19 | 855 ± 6,79 | 0,008 ± 0,0004 | 90961 ± 5094 |
| V=100mm/mn | 1.32 | 1.32 | 204 ± 13 | 4,03 ± 0,15 | 969 ± 65,74 | 0,010 ± $5,69 \cdot 10^{-7}$ | 95974 ± 4238 |
| V=200mm/mn | 1.32 | 0.16 | 157 ± 72 | 3,22 ± 0,31 | 1045 ± 15,30 | 0,008 ± 0,0007 | 96323 ± 5153 |

Tableau IV.3 : Caractéristiques mécaniques des mèches du lot B en traction.

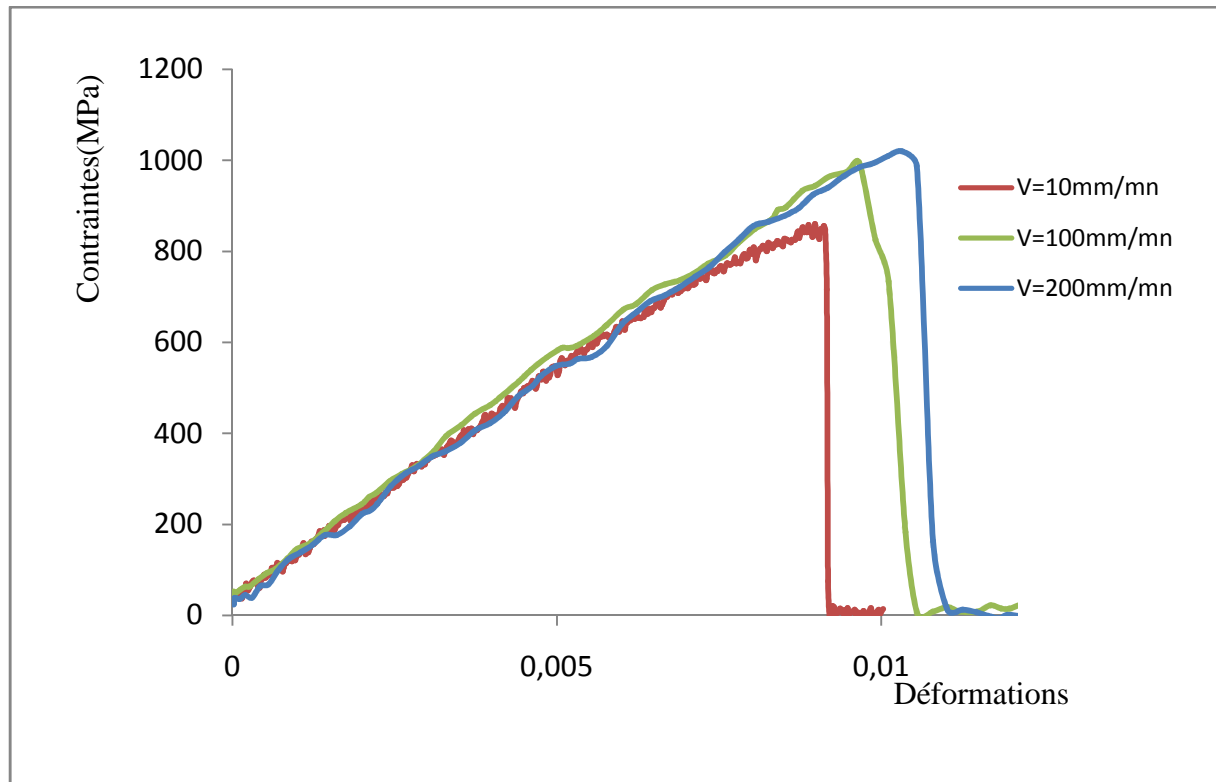


Figure IV.6 : Evolution contraintes/déformations des mèches du lot B.

IV.5.4 Interprétation des résultats

D'après les figures IV.5 et IV.6, nous relevons que les courbes du comportement à rupture en traction obtenues sur les mèches, nous permettent de distinguer; une zone linéaire correspondant au comportement élastique de la mèche, puis une zone non linéaire associée à l'apparition de premiers endommagements des fibres suivi d'une chute brutale de l'effort qui correspond à la rupture totale des fibres dans la mèche. La rupture totale des fibres de renfort dans une mèche pendant une mise en forme constituant un défaut rédhibitoire. Au cours du chargement, de petites chutes d'effort, liées à l'ouverture de nœuds instables, peuvent être observées. Toutes les éprouvettes testées présentent un comportement quasi fragile avec une rupture qui s'opère toutefois de manière beaucoup plus brutale. Toutes les éprouvettes présentent un comportement similaire pour le même lot (voir annexe).

Les modules de Young sont obtenus par la courbe de tendance de régression linéaire de la partie élastique.

Les résultats d'essais présentés dans les tableaux IV.2 et IV.3, ont permis de montrer que la vitesse de sollicitation n'a pas vraiment d'effet sur les caractéristiques mécaniques. Par contre, une influence notable est observée pour l'augmentation de la longueur d'échantillon. Au cours de la phase finale des essais de traction sur les mèches, on entend des craques, qui

correspondent à une rupture successive des fibres de carbone suivi d'une rupture totale de l'éprouvette. Des phénomènes de concentration de contrainte peuvent conduire à la rupture prématurée des fibres au niveau des fixations. Pour les mèches de carbone, les observations directes sur les échantillons montrent que la rupture des fibres se répartit uniformément dans la longueur et ne se concentre pas près des talons (fig.IV.7.b). La rupture se produit le plus souvent loin des talons et si tel n'est pas le cas, l'essai n'est pas pris en compte. La méthode de fixation utilisée permet donc de bonnes conditions aux bords des essais.

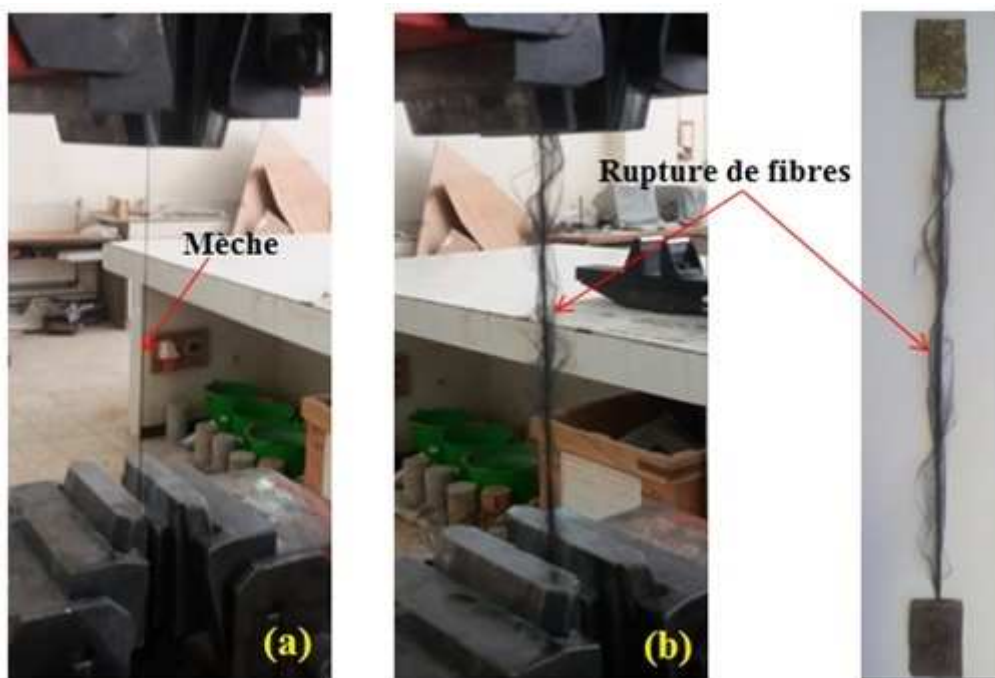


Figure IV.7 : Epreuve d'une mèche carbone, a) avant et b) après rupture en traction.

IV.5.5 Influence de la longueur de l'éprouvette sur les caractéristiques mécaniques

La comparaison des valeurs des contraintes à rupture moyennes et des modules de Young, mesurées pour les deux longueurs d'échantillon et pour les trois vitesses de sollicitation sont montrées par les histogrammes des figures IV.8 et IV.9. Nous constatons que la variation de la vitesse de sollicitation a peu d'effet sur la contrainte à rupture et le module de Young des mèches. Par contre, l'augmentation de la longueur des éprouvettes a une influence notable sur ces caractéristiques mécaniques. En effet, la contrainte à rupture diminue en augmentant la longueur de l'éprouvette de 21%, 12% et 6% respectivement pour les vitesses de 10 mm/mn, 100 mm/mn et 200 mm/mn (figIV.8). Par ailleurs, le module de Young augmente avec l'augmentation de la longueur de l'éprouvette de 13%, 17% et 15% respectivement pour les vitesses de 10 mm/mn, 100 mm/mn et 200 mm/mn (figIV.9).

Ceci peut s'expliquer que dans la mèche, toutes les fibres n'ont pas la même épaisseur. De plus, l'épaisseur peut varier le long d'une même fibre (défauts de fabrication). De plus, quand la longueur de la mèche est grande plus la probabilité de trouver des défauts dans les fibres augmente d'où la contrainte de rupture (la résistance maximale) va diminuer.

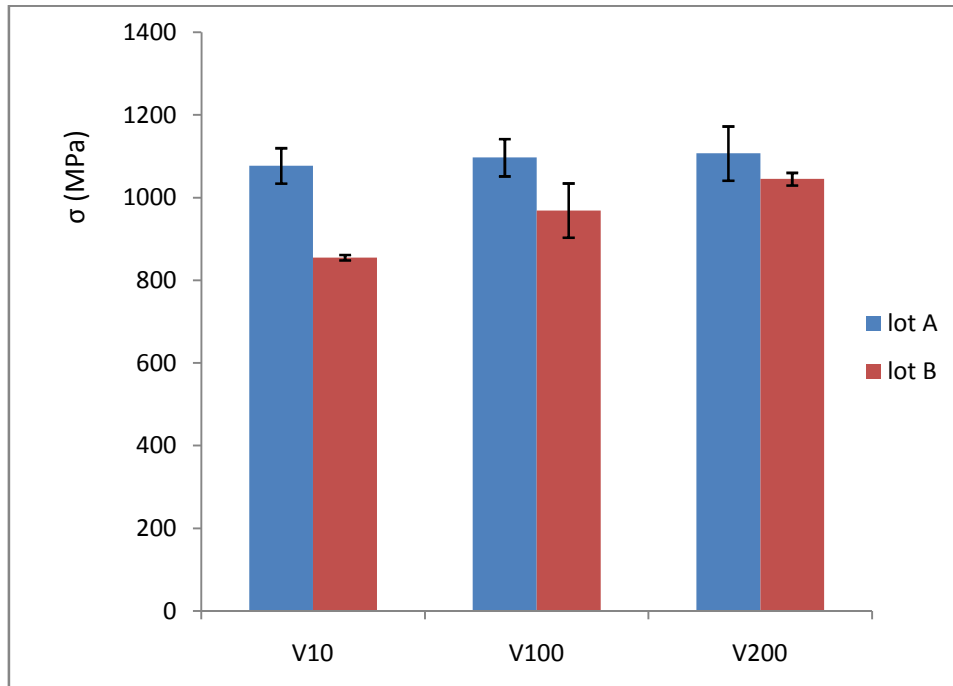


Figure IV.8 : Comparaison des contraintes à rupture pour les lots A et B.

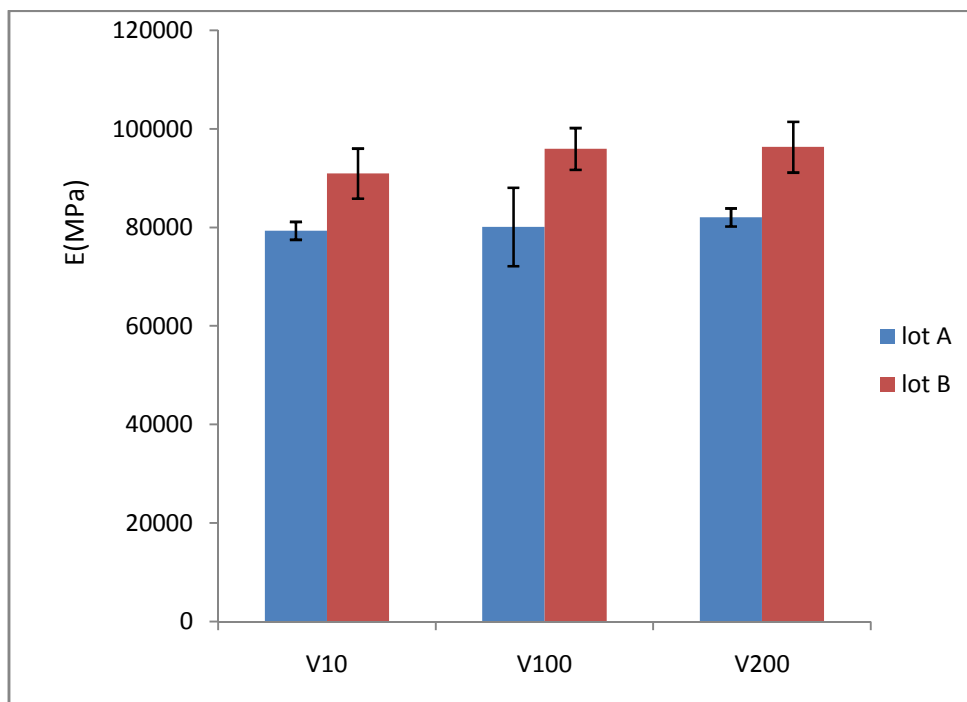


Figure IV.9 : Comparaison des modules d'élasticité pour les lots A et B.

❖ Résultats du lot C (Tissu, l = 200 mm)

| | B (mm) | H (mm) | F_{\max} (N) | Δl (mm) | σ_{\max} (MPa) | ε | E(MPa) |
|------------|--------|--------|------------------|--------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| V=10mm/mn | 50 | 0.16 | 7888 ± 695 | 4,55 ± 0,45 | 986 ± 86 | 0,025 ± 0,002 | 59432 ± 1917 |
| V=100mm/mn | 50 | 0.16 | 8619 ± 40 | 5,07 ± 0,28 | 1077 ± 5 | 0,025 ± 0,001 | 59670 ± 4987 |
| V=200mm/mn | 50 | 0.16 | 8809 ± 315 | 5,38 ± 0,021 | 1101 ± 39 | 0,026 ± 0,0001 | 63150 ± 2243 |

Tableau IV.4 : Caractéristiques mécaniques de renfort du lot C en traction.

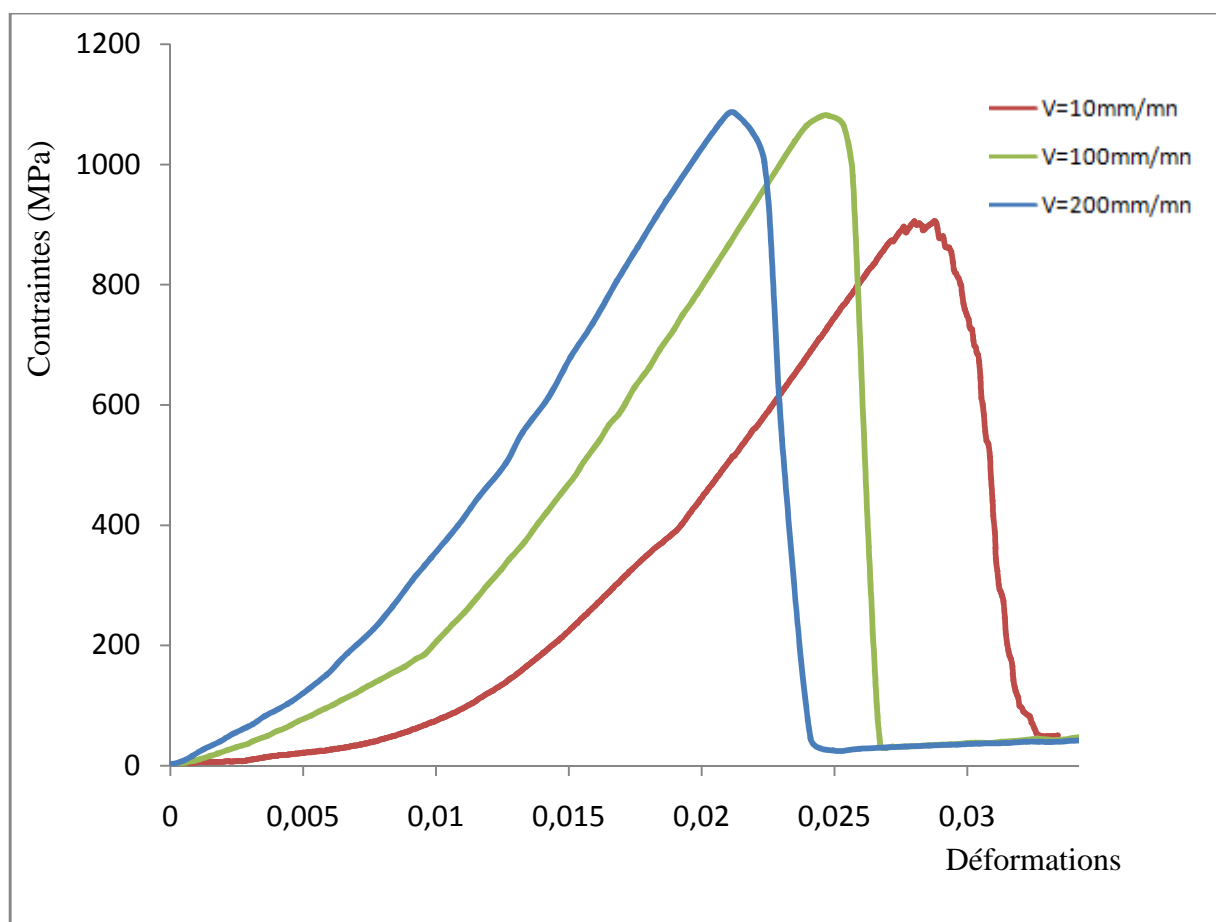


Figure IV.10 : Evolution contraintes/déformations de renfort du lot C.

❖ Résultats du lot D (Tissu, l = 400 mm)

| | B (mm) | H (mm) | F_{\max} (N) | Δl (mm) | σ_{\max} (MPa) | ε | E(MPa) |
|------------|--------|--------|-------------------|-------------------|-----------------------|----------------------|--------------------|
| V=10mm/mn | 50 | 0.16 | 6771 ± 487 | 6,15 ± 0,32 | 846 ± 60 | 0,015 ± 0,0008 | 71752 ± 6647 |
| V=100mm/mn | 50 | 0.16 | 8160 ± 172 | 6,86 ± 0,41 | 892 ± 43 | 0,017 ± 0,001 | 76075 ± 7540 |
| V=200mm/mn | 50 | 0.16 | 7340 ± 1002 | 7.37 ± 0,32 | 917 ± 125 | 0.018 ± 0,0008 | 75300 ± 5844 |

Tableau IV.5 : Caractéristiques mécaniques de renfort du lot D en traction.

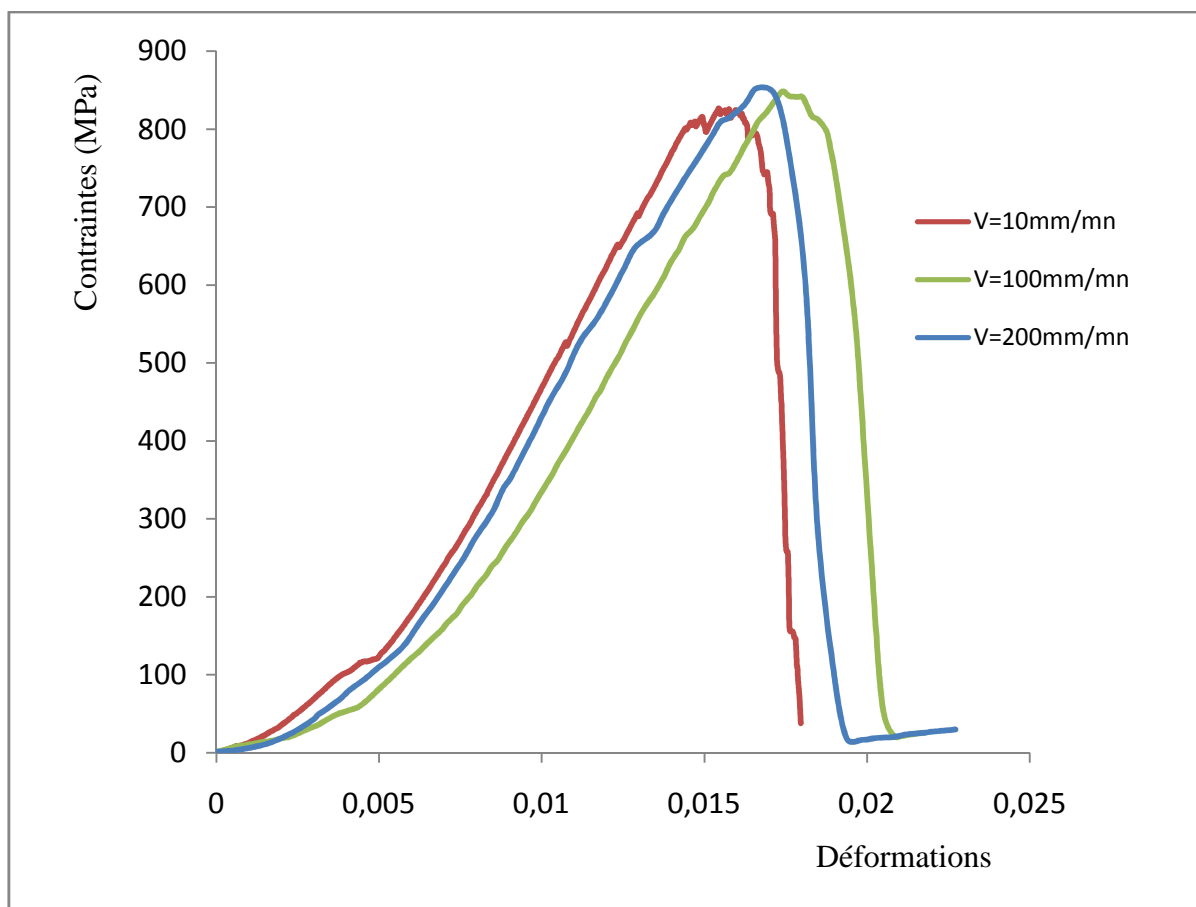


Figure IV.11 : Evolution contraintes/déformations renfort du lot D.

IV.5.6 Interprétation des résultats

Comme le montre les figures IV.10 et IV.11, nous relevons que les courbes du comportement à rupture en traction obtenues sur les tissus, nous permettent de distinguer trois zones; une zone non linéaire en début de chargement, ce comportement non linéaire initial est le fait que dans le tissu toutes les fibres ne commencent pas à entrer en tension au même moment, phénomène pouvant être dû à une légère différence de longueur des fibres aussi le glissement de l'échantillon au niveau des mors du dispositif de la traction peut entraîner une non linéarité des courbes, puis une deuxième quasi linéaire correspondant au comportement élastique de tissu, puis une zone non linéaire associée à l'apparition de premiers endommagements des fibres suivi d'une chute brutale de l'effort qui correspond à la rupture totale des fibres du renfort dans le tissu. La rupture totale des fibres de renfort dans une mèche pendant une mise en forme constituant un défaut rédhibitoire. Au cours du chargement, de petites chutes d'effort, liées au glissement du réseau de mèches, peuvent être observées. Toutes les éprouvettes testées présentent un comportement quasi fragile avec une rupture qui s'opère après une petite zone qui s'apparenterait à un pseudo plasticité avant rupture. En réalité, ce comportement « pseudo élastoplastique » est associé au glissement du réseau des mèches et à l'accumulation de l'endommagement par ruptures aléatoires isolées des fibres les plus faibles. Toutes les éprouvettes des tissus testées présentent un comportement similaire pour le même lot (voir annexe). Les modules de Young sont obtenus par la courbe de tendance de régression linéaire de la partie élastique.

De même que les résultats des essais sur les mèches, les valeurs des essais sur les tissus ont permis de montrer que la vitesse de sollicitation n'a pas vraiment d'effet sur les caractéristiques mécaniques. Par contre, un effet notable est observée pour l'augmentation de la longueur d'échantillon (tableaux IV.4 et IV.5).

Au cours des essais de traction sur les tissus, l'endommagement commence par une perte de cohésion de la structure de tissu (glissements du réseau de mèches) (fig.IV.12.a). Ce défaut est généralement attribué aux tensions importantes dans les mèches. Ensuite, vient la rupture successive des fibres des mèches qui se situent aux bords de la largeur de l'éprouvette jusqu'à rupture totale du tissu (fig.IV.12.b), des ruptures de fibres se propagent sur toute la largeur et des défauts de plissement apparaît sur différentes endroit où le renfort n'est pas suffisamment mis en tension tout au long de l'éprouvette (fig.IV.13).

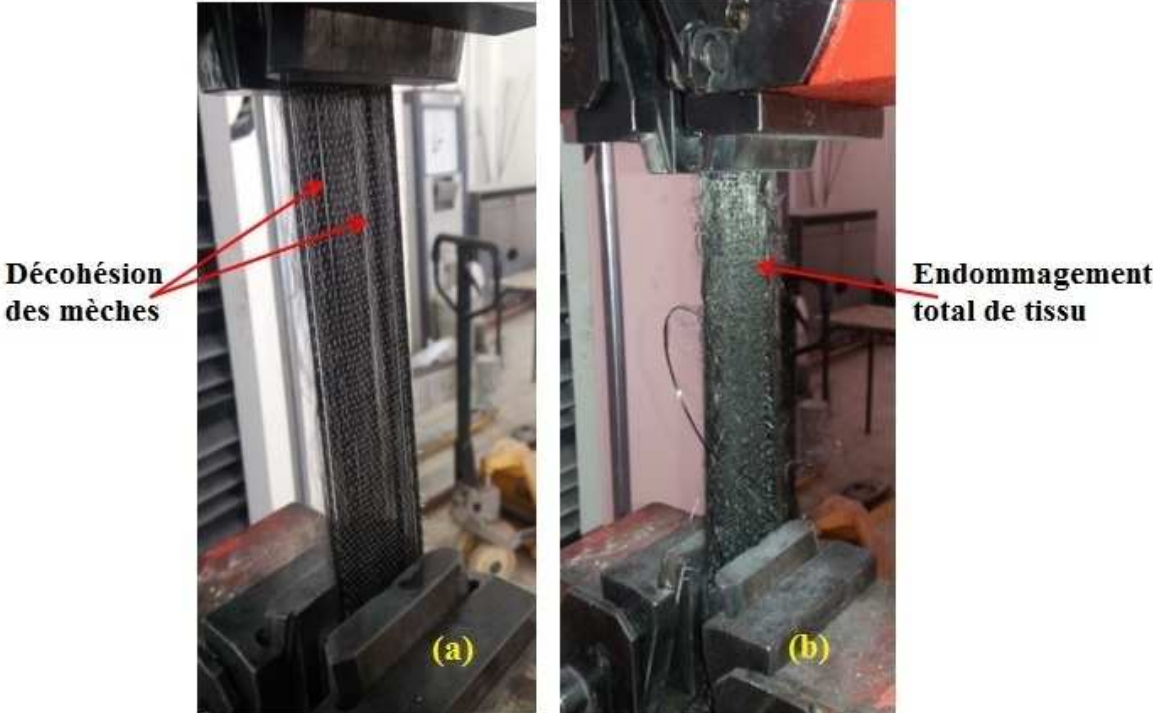


Figure IV.12 : Eprouvette d'un tissu, (a) au cours d'essai, (b) fin d'essai.

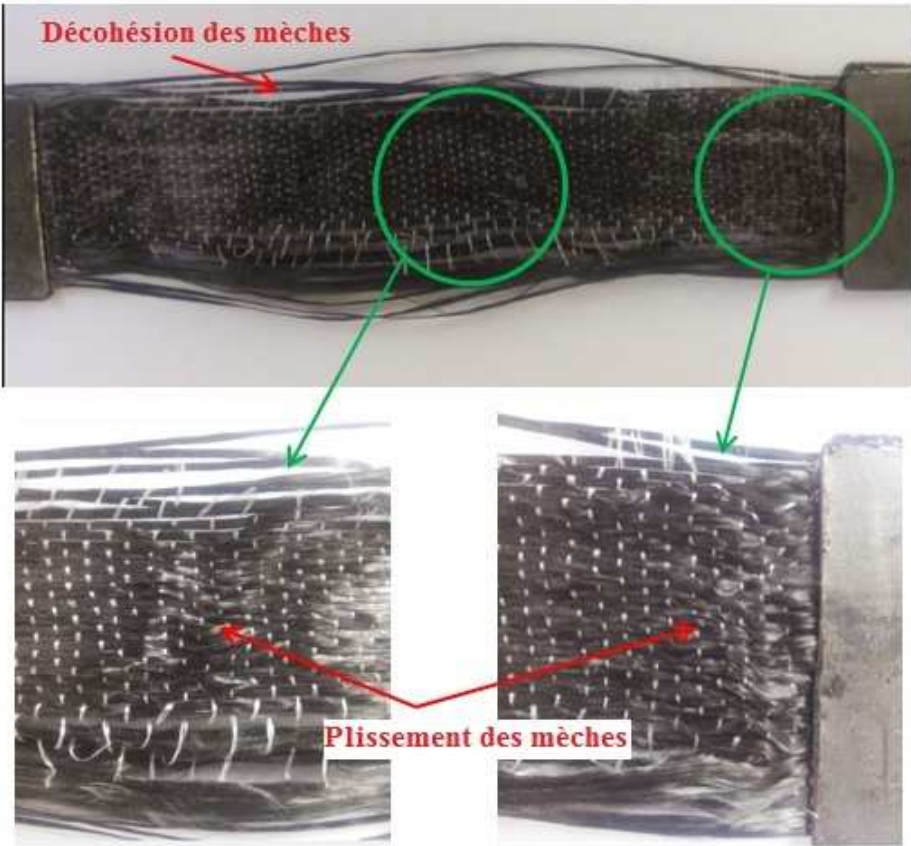


Figure IV.13 : Décohésion et plissement des mèches durant un essai de traction.

IV.5.7 Influence de la longueur de l'éprouvette sur les caractéristiques mécaniques

Les histogrammes des figures IV.14 et IV.15, nous montrent que la variation de la vitesse de sollicitation n'a pas vraiment d'effet sur la contrainte à rupture et le module de Young des tissus testés. Par contre, une augmentation de la longueur de l'éprouvette de double engendre un effet important sur les caractéristiques mécanique (contrainte à rupture, déformation, module de Young ...). En effet, la contrainte à rupture diminue en augmentant la longueur de l'éprouvette de 14%, 18% et 17% respectivement pour les vitesses de 10 mm/mn, 100 mm/mn et 200 mm/mn (figIV.14). Par ailleurs, le module de Young augmente avec l'augmentation de la longueur de l'éprouvette de 17%, 22% et 16% respectivement pour les vitesses de 10 mm/mn, 100 mm/mn et 200 mm/mn (figIV.15). Ceci peut s'expliquer que dans le tissu, plus la longueur est importante, plus la probabilité d'existence de défauts de fibres dans le tissu est grande, ce qui réduit la valeur de la contrainte à rupture. L'alignement de l'éprouvette par rapport à la direction de sollicitation, ainsi que l'existence de mèches plus sollicitée que d'autres pendant l'essai de traction influent sur les résultats finals.

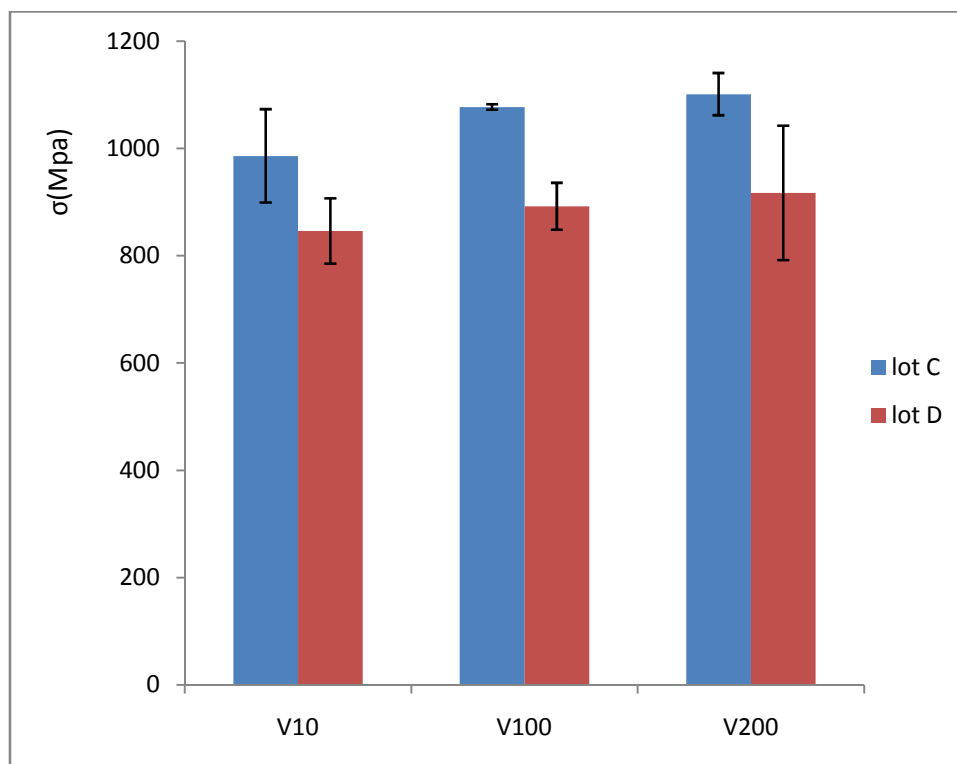


Figure IV.14 : Comparaison des résultats des contraintes pour les lots C et D

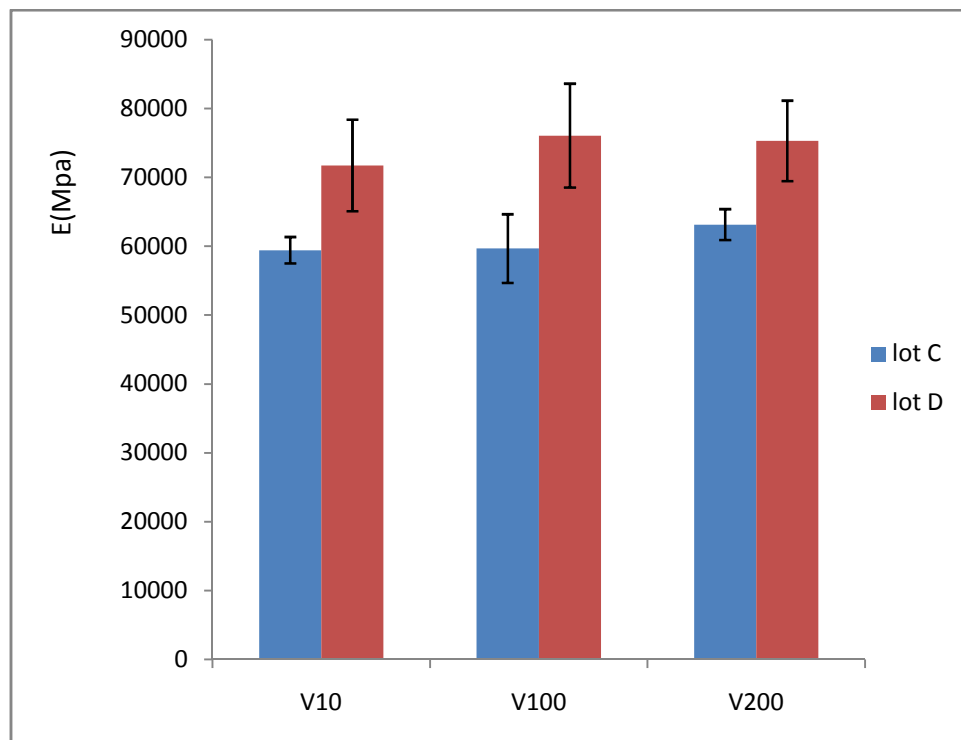


Figure IV.15 : Comparaison des résultats du module d'élasticité pour les lots C et D.

Les caractéristiques mécaniques de l'essai de traction sur le composite unidirectionnel (lot M) dans la direction des mèches à 0° et dans la direction transverse à 90° seront présentées dans les tableaux IV.6 et IV.7. Le comportement mécanique est présenté par les courbes d'évolution contraintes en fonction des déformations par les figures IV.16 et IV.17.

Le taux massique de renfort pour le composite (lot M) est de $47\% \pm 1\%$.

❖ Résultats du lot M (0°)

| L=150mm | B (mm) | H (mm) | F_{\max} (N) | Δl (mm) | σ_{\max} (MPa) | ε | E(MPa) |
|-------------------|------------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------|-----------------------|--------------------------|--------------------------|
| M (0°) 1 | 25.9 | 2.8 | 62100 | 11.73 | 856 | 0.0782 | 18212 |
| M (0°) 2 | 25.04 | 2.79 | 61800 | 10.79 | 884 | 0.0719 | 19305 |
| M (0°) 3 | 25.2 | 2.75 | 55700 | 11.29 | 803 | 0.0752 | 17537 |
| moyenne | 25.38 \pm 0.45 | 2.78 \pm 0.02 | 59846.4 \pm 3637.66 | 11.27 \pm 0.46 | 847 \pm 41.33 | 0.0751 \pm 0.003 | 18351 \pm 892.20 |

Tableau IV.6 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot M (0°) en traction.

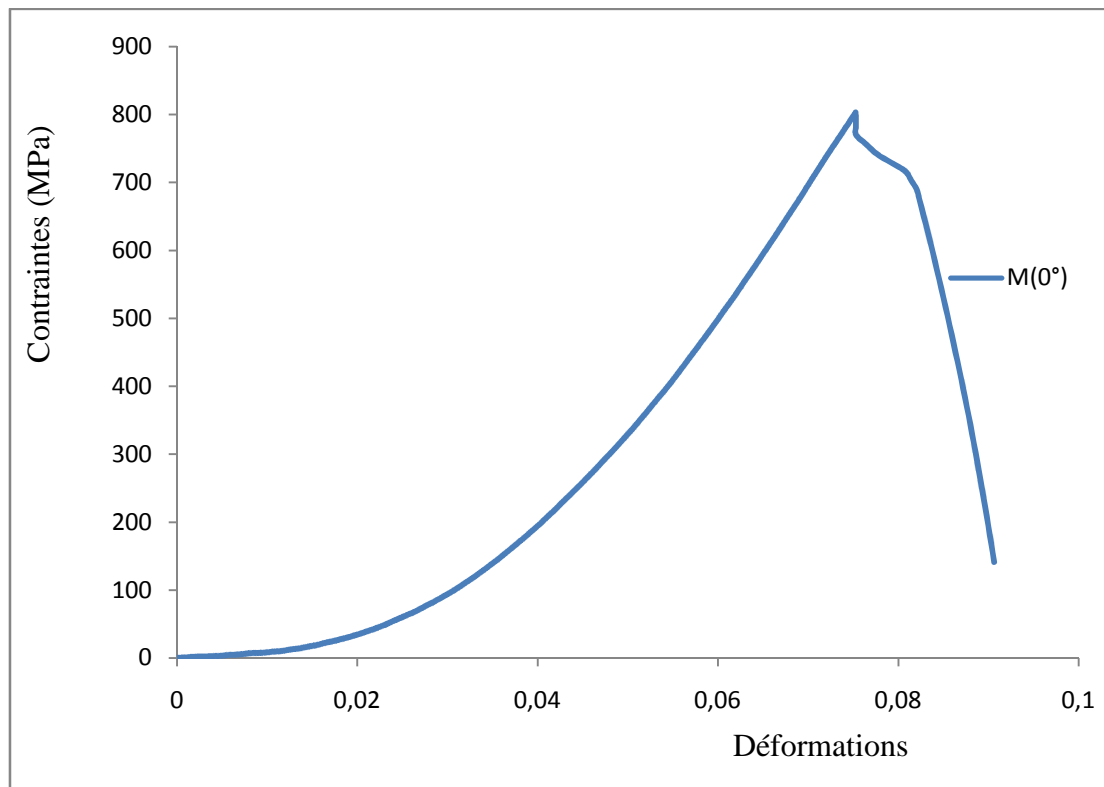


Figure IV.16 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot M (0°).

❖ **Résultats du lot M (90°)**

| L=150mm | B (mm) | H (mm) | F _{max} (N) | Δl(mm) | σ _{max} (MPa) | ε | E(MPa) |
|-----------|--------------------|-------------------|----------------------|--------------------|------------------------|-----------------------|---------------------|
| M (90°) 1 | 25,3 | 2,82 | 704 | 2,29 | 9,87 | 0,0153 | 886 |
| M (90°) 2 | 25,43 | 2,83 | 942 | 2,27 | 13,08 | 0,015 | 1132 |
| M (90°) 3 | 25,3 | 2,85 | 996 | 2,75 | 13,80 | 0,018 | 1087 |
| moyenne | 25,34 ± 0,45 | 2,83 ± 0,02 | 880,7 ± 154,97 | 2,44 ± 0,268 | 12,25 ± 2,09 | 0,0162 ± 0,0017 | 1035 ± 130,98 |

Tableau IV.7 : Caractéristiques mécaniques de composite du lot M (90°) en traction.

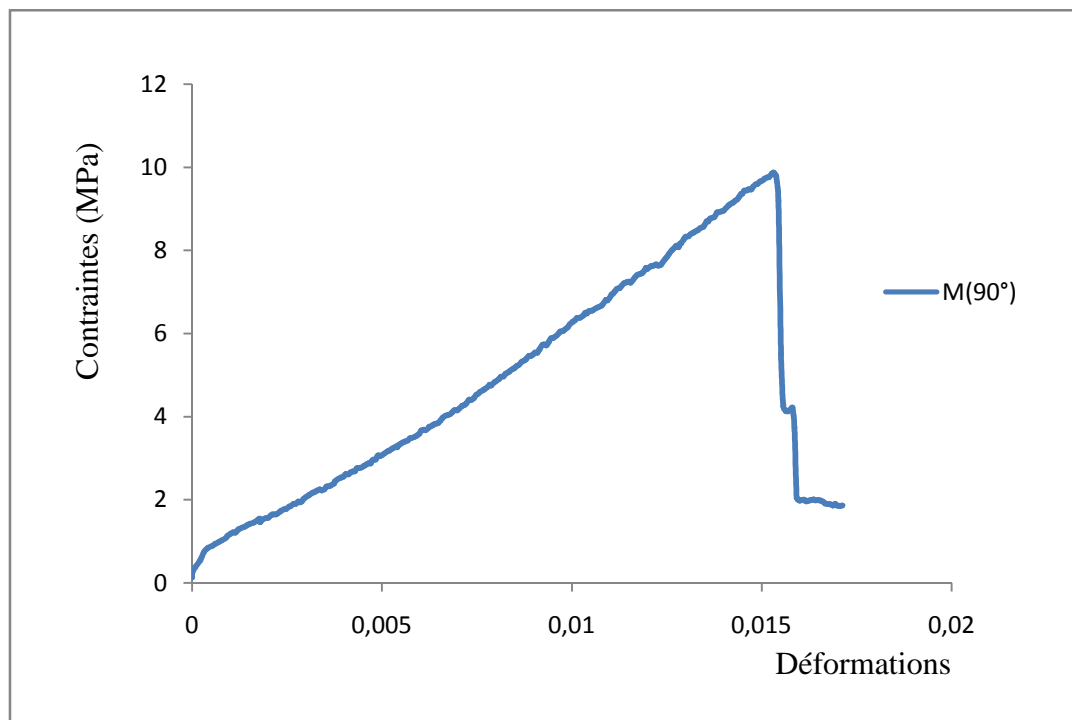


Figure IV.17 : Evolution contraintes/déformations de composite du lot M (90°).

IV.5.8 Interprétation des résultats

D'après la figures IV.16, nous relevons que la courbe du comportement à rupture en traction obtenues sur le composite M (0°), nous permette de distinguer trois zones; une zone non linéaire en début de chargement, ce comportement non linéaire initial est le résultat de glissement de l'échantillon au niveau des mors du dispositif de la traction suite au plus forte force de sollicitation, puis une deuxième linéaire correspondant au comportement élastique de composite, puis une zone non linéaire associée à l'apparition de premiers endommagements (rupture de la matrice, délaminage et rupture de fibres) suivi d'une chute brutale de l'effort qui correspond à la rupture totale de matériau. Par contre, le comportement de matériau M (90°) présente les mêmes phases de chargement que le matériau M (0°) à l'exception de la première phase de non linéarité qui est très faible, grâce au faible chargement que support ce matériau dans la direction transverse.

Toutes les éprouvettes présentent un comportement similaire pour le même lot avec une légère dispersion de la contrainte à rupture, ceci est dû principalement à l'existence de défauts (bulles d'air) qui influencent la résistance à la rupture. La contrainte à rupture pour le lot M (0°) est de 845 MPa et la déformation correspondante est de 7,82% avec un module de Young de 18351 MPa. Par contre, le matériau M (90°) présente de faible caractéristiques mécaniques ; une contrainte à rupture de 12,25 MPa et une déformation correspondante de

1,62% et un module de Young 1035MPa. Cela est dû à l'architecture du renfort (tissu unidirectionnel), dans la direction des mèches M (0°) c'est le renfort qui est sollicité, par contre dans la direction transverse M (90°) c'est la matrice qui est sollicité.

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

Au cours des essais de traction, on entend des craques avant la rupture totale de l'échantillon M (0°), qui correspondent à la rupture de la matrice, au délaminage inter pli et rupture des fibres. Nous obtenons des ruptures en traction (Mode I) pour le matériau M (90°), correspondant à une rupture plate (rupture fragile) et le éprouvette sont rompues près des talons cause de concentration de contrainte au voisinage des talons.

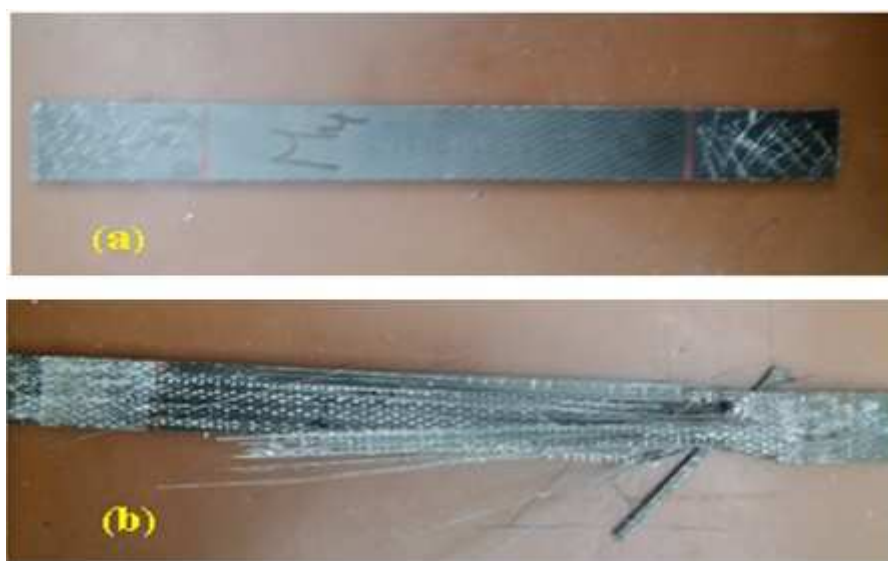


Figure IV.18 : Epreuve de composite M (0°): (a) avant essai, (b) fin d'essai

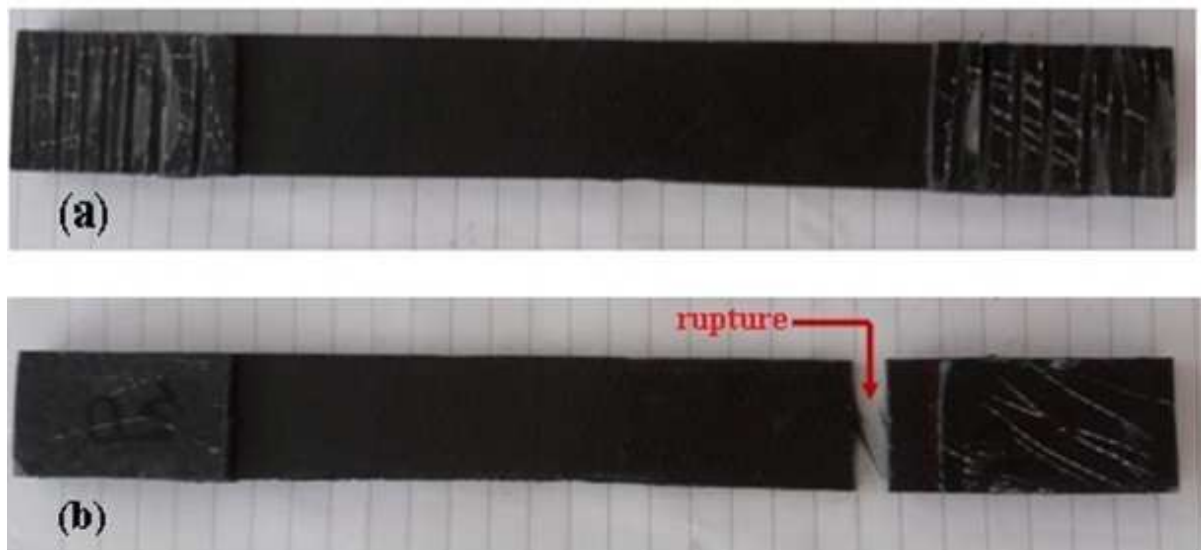


Figure IV.19 : Epreuve de composite M (90°): (a) avant essai, (b) fin d'essai.

IV.5.9 Effet de l'anisotropie

Les résultats des contraintes à rupture obtenus en traction sur les éprouvettes du stratifié M (0°) sont plus importantes que celle trouvées pour le stratifié M (90°) (67 fois plus). Ce qui montre que la résistance à la rupture est dépendante de la direction de sollicitations (fig.IV.20). De même pour les modules d'élasticité (fig.IV.21), avec un rapport de 17 fois plus. Cela est dû à la structure du renfort (tissu UD carbone), dans la direction des mèches M (0°) c'est le renfort qui est sollicité, par contre dans la direction transverse M (90°) c'est la matrice qui est sollicité et le renfort ne travaille pas selon cette direction.

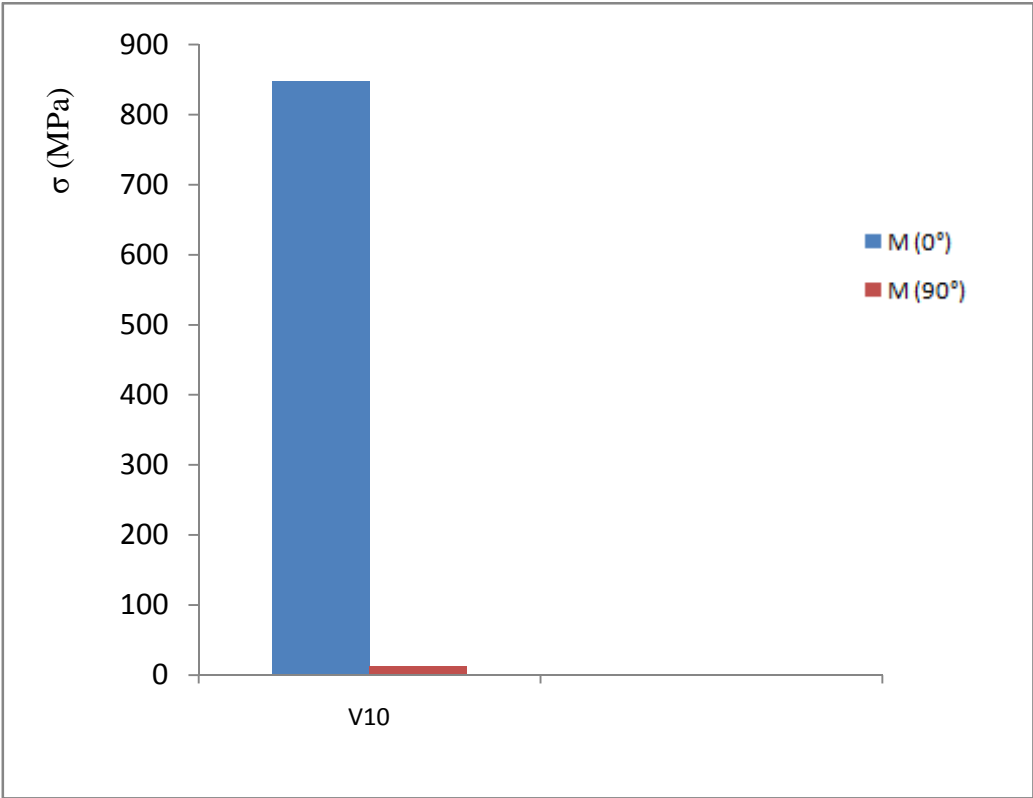


Figure IV.20 : Comparaison des résultats des contraintes pour les lots M (0°) et M (90°).

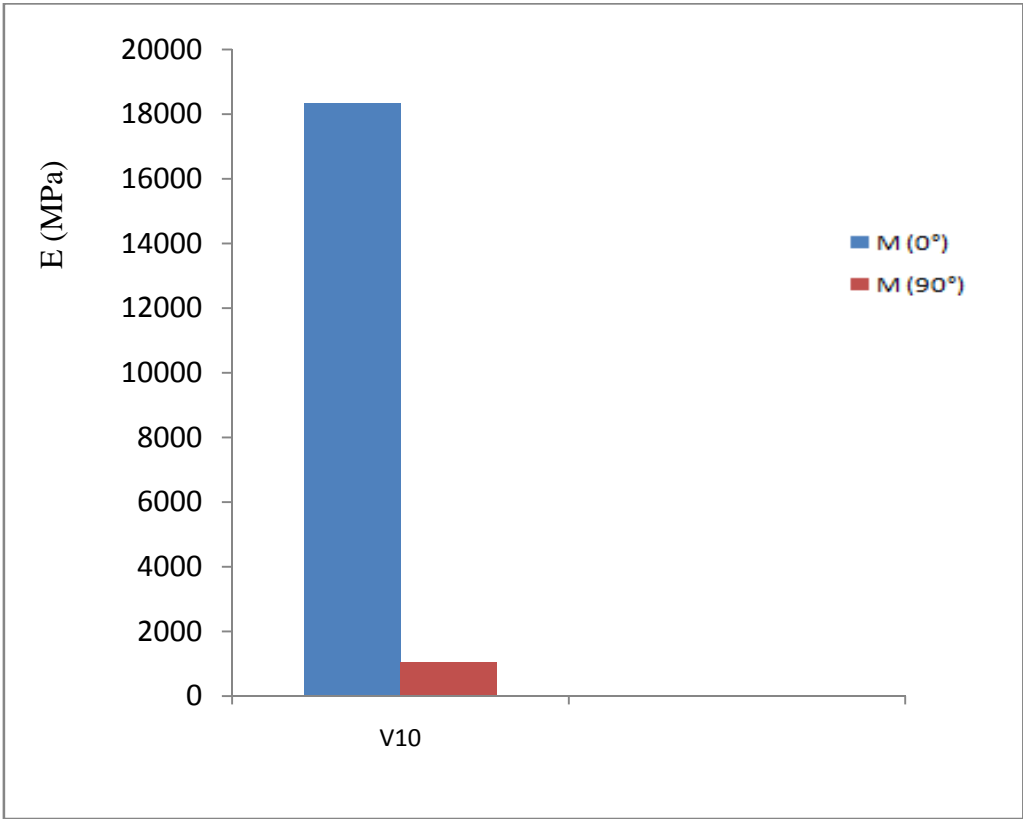


Figure IV.21 : Comparaison des résultats des modules d'élasticité pour M (0°), M (90°).

IV.6 Essai de microdureté

La dureté a été définie comme résistance d'un matériau à la pénétration permanente par un autre matériau plus dur que lui. La mesure est faite après que la force d'essai ait cessé. La connaissance de la valeur de la dureté nous permet d'accéder aux caractéristiques mécaniques du matériau, ainsi que de prévoir son comportement à l'usure lors d'un contact avec d'autres matériaux.

Les tests de microdureté ont été réalisés sur un appareil semi automatique de type ZWICK ROELL ZHV (Figure IV.23). Ce microduromètre est constitué d'un microscope permettant d'avoir une image agrandie à 400fois et d'un système d'indentation. Le pénétrateur utilisé est en diamant de forme pyramidale (Knoop) à base rectangulaire avec un angle de $172^{\circ}30'$ entre deux faces opposées et 130° pour les deux autres faces. Une fois les paramètres introduits dans le programme (valeur de la charge tel que les charges appliquées sont inférieures à 1Kgf) la phase à indenter est localisée est ramenée en un point connu de la règlette (deux droites superposées). En actionnant l'indentation, le pénétrateur est déplacé de sorte à indenter la phase ciblée laisse une empreinte dont la taille est comprise entre 0.01 et 0.1mm ($D=7d$). La charge est appliquée pendant 20 secondes puis retirée automatiquement.

Le microscope se repositionne sur l'empreinte (Figure IV.22) et permet de mesurer, par déplacement des deux droites, les deux diagonales de l'empreinte. L'appareil affiche les mesures effectuées et le programme calcul alors la valeur de la microdureté correspondante.

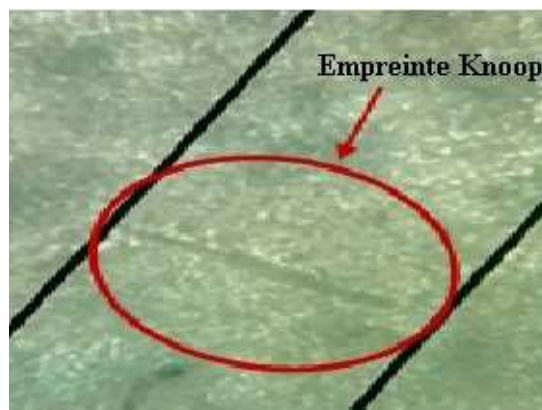


Figure IV.22 : Image d'une empreinte.



Figure IV.23 : Duromètre et empreinte Knoop.

IV.6 .1 Résultats obtenus

Après avoir appliqué une charge de 0.01Kgf à l'aide de microduromètre sur deux échantillons à surfaces lisses de matériaux composites à base de fibres UD carbone nous avons obtenus les résultats présentés dans le tableau IV.8 :

| Echantillons | | Test 1 | Test2 | Test 3 | Test 4 | Test 5 |
|--------------|--------|--------|-------|--------|--------|--------|
| 1 | d (µm) | 103.5 | 76.8 | 133.2 | 103.6 | 66.4 |
| | HK | 13 | 24 | 8 | 13 | 32 |
| 2 | d (µm) | 111.4 | 114.8 | 87.6 | 103.5 | 69.6 |
| | HK | 11 | 11 | 19 | 13 | 29 |

Tableau IV.8 : Résultats de la microdureté.

IV.6.2 Analyse des résultats

L'analyse des résultats nous permet de conclure que tous les éprouvettes présentent une dispersion de valeur de dureté due à l'hétérogénéité de la distribution des fibres dans la matrice à l'échelle microscopique. Cette variation de la microdureté est due aussi à la variation de la profondeur des fibres. Nous obtenons des valeurs plus importantes quand le

pénétrateur s'enfonce sur une surface qui présente une concentration des fibres. Quand le pénétrateur s'est enfoncé dans des endroits moins durs (la matrice), il en résulte de petites valeurs.

IV.7 Conclusion

-Le comportement en traction des mèches et tissus d'un renfort UD à fibres de carbone a été caractérisé expérimentalement. Les résultats des essais ont notamment permis de montrer un comportement non linéaire initial marqué essentiellement pour les tissus. L'influence de la vitesse de sollicitation n'a pas vraiment d'effet sur les caractéristiques mécaniques. Par contre, une influence notable est observée pour l'augmentation de la longueur d'échantillon (diminution de la contrainte à rupture et augmentation de module de Young).

- La rupture des fibres d'une mèche se répartit uniformément sur sa longueur, et celle du tissu présente une perte de cohésion de la structure de tissu, des ruptures successives des fibres et des défauts de plissement apparaît sur différentes endroit où le renfort n'est pas suffisamment mis en tension tout au long de l'éprouvette.

- Le matériau composite élaboré avec les fibres de carbone présente des caractéristiques mécaniques très intéressante dans la direction des mèches principales de renfort d'où le nom de composite haute performance.

Conclusion générale

Cette étude nous a permis de définir une approche de caractérisation statique de renfort sec unidirectionnel à fibres de carbone haute performance. La présente étude a concerné en premier lieu, la mise au point d'un protocole et d'une méthodologie de caractérisation en traction de mèches et tissus de renfort en variant la vitesse de sollicitation et la longueur de l'éprouvette. Par la suite, un composite à base de ce renfort et une matrice polyester insaturée a été élaboré par moulage au contact. Des essais de traction du composite ont été menés suivant la direction principale et la direction transverse du renfort.

Le comportement en traction des mèches et tissus ont notamment permis de montrer un comportement non linéaire initial marqué essentiellement pour les tissus. L'influence de la vitesse de sollicitation n'a pas vraiment d'effet sur les caractéristiques mécaniques. Par contre, une influence notable est observée pour l'augmentation de la longueur d'échantillon (diminution de la contrainte à rupture et augmentation de module de Young). Nous avons obtenus un comportement similaire pour le même lot d'éprouvette avec une dispersion de la contrainte à rupture. Le comportement à rupture est quasi fragile pour tous les matériaux testés (mèches, tissus et composite).

La rupture des fibres d'une mèche se répartit uniformément sur sa longueur, et celle du tissu présente une perte de cohésion de la structure de tissu, des ruptures successives des fibres et des défauts de plissement apparait sur différentes endroit où le renfort n'est pas suffisamment mis en tension tout au long de l'éprouvette

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

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

Pour poursuivre cette étude, il sera intéressant de faire des essais sur des renforts bidirectionnels et multidirectionnels et étendre la caractérisation par d'autres essais comme le cisaillement.

Elaborés des composites avec différentes séquences d'empilement et faire une caractérisation sur des éprouvettes découpées suivant plusieurs directions.

Elaborés des éprouvettes avec défauts calibrés pour voir leurs influences sur le composite finale.

La détermination de la phénoménologie d'endommagement permet de mettre un modèle de comportement et de prédire le comportement de divers stratifiés avec différentes séquences d'empilement.

Bibliographie

[1] Christophe TEPHANY

Analyse de la déformabilité de renforts composites à base de fibres naturelles.

Thèse doctorat, université d'Orléans, 2014.

[2] BERHELOT J.M.

Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. Mechanical Engineering Serie, 1ère édition, Springer, 1998.

[3] Samia DRIDI

Essais de caractérisation des structures tissées.

Thèse doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2010.

[4] Audrey WENDLING

Simulation à l'échelle mésoscopiques de la mise en forme de renforts de composites tissés.

Thèse doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2013.

[5] Telmar A

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

[6] Nemoz G

Textures textiles tridimensionnelles. Techniques de l'ingénieur, AM 5 122, 2003, 14 p.

[7] Jean-Emile ROCHER

Caractérisation expérimentale et modélisation à l'échelle mésoscopique du comportement de tissus 3D de mèches coméllées, Thèse doctorat, université d'Orléans, 2014.

[8] Lorent Gornet

Généralités sur les matériaux composites, 28/09/2008 cel-00470296, version 1 - 6 Apr. 2010

[9] Mohamed Bouraoui KECHICHE

Etude et développement de capteurs /effecteurs filamenteux de faibles diamètres intégrables dans des structures textiles.

[10] Pierre JACQUINET

Utilisation des matériaux composite, édition HERMES, Paris1991.

[11] L'industrie française des matériaux composites

Etude stratégique réalisée pour le compte de la DiGITIP / SIM. Louis Berreur, Bertrand de Maillard Rév. 2 du 13 mai 2002 Stanislas Nösperger17 décembre 2001.

[12] [CARMA]

Glossaire des Matériaux Composites

Centre d'animation régional en matériaux avances, actualisation Octobre 2006.

[13] Daniel GAY

Matériaux composites, 4ème édition revue et augmentée, Editions Hermès, 1997.

[14] Jean-Marie BERTHELOT

Mécanique des Matériaux et Structures Composites.

Institut Supérieur des Matériaux et Mécaniques Avancés, édition Novembre 2010, Le Mans.

[15] DANIEL GAY

Matériaux composites, 3ème Edition revue et augmentée, HERMES 1991.

[16] Jean-Marie BERTHLOT

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

[17] B.JACQUOT

Propriétés mécaniques des biomatériaux utilisés en odontologie

Société francophone de biomatériaux dentaires 2009-2010 Université médicale virtuelle francophone.

[18] D.Rouby

Comportement des composites à fibres longues et matrice flexible et tenace. Micromécanique des composites (1999).

[19] Bénédicte BONNET

Comportement au choc de matériaux composites pour applications automobiles

Thèse doctorat de l'école nationale supérieure des mines de Paris, 2005.

[20] Jose Martin Herrera Ramirez

Les mécanismes de fatigue dans les fibres thermoplastiques.

Thèse doctorat 2004.

[21] Smail BELHADJ

Contribution à la caractérisation des matériaux composites matrice organique/verre.

Thèse magister UMMTO, 2005.

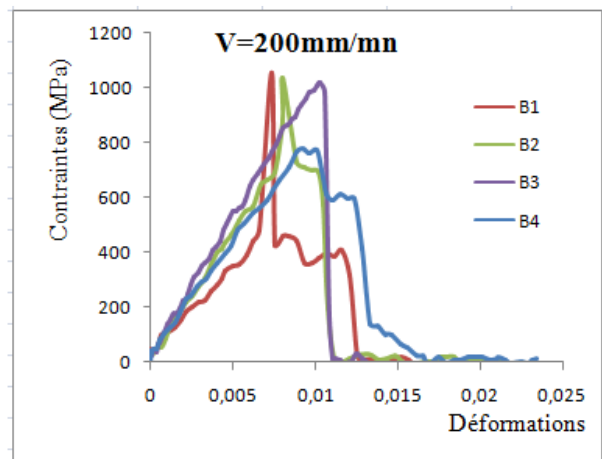
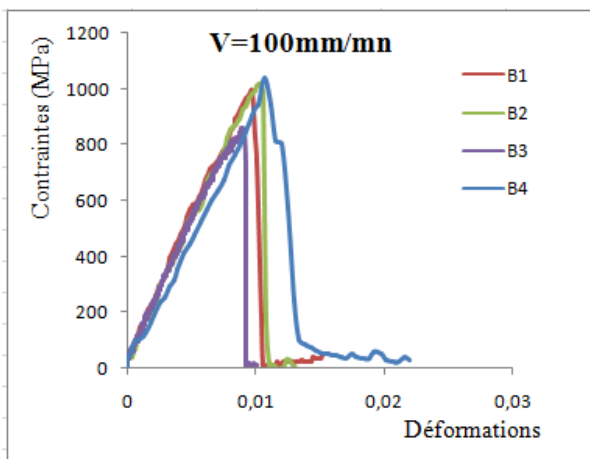
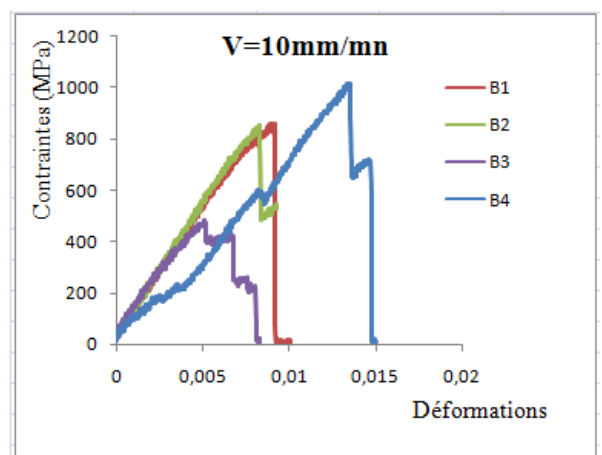
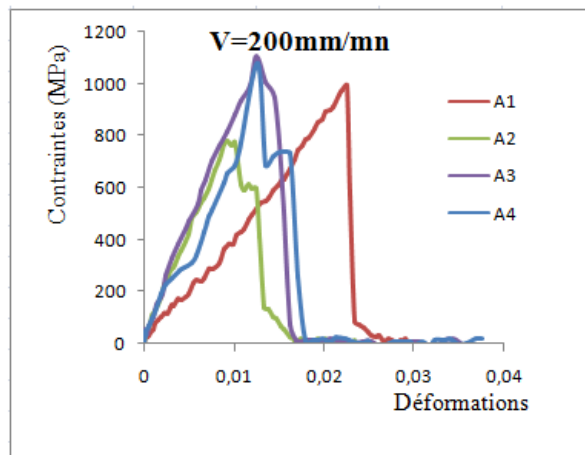
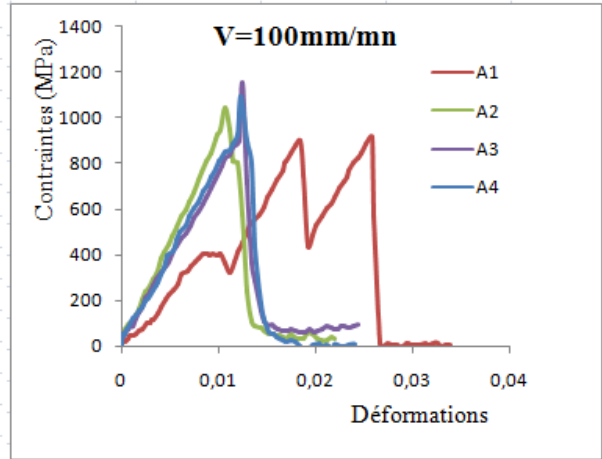
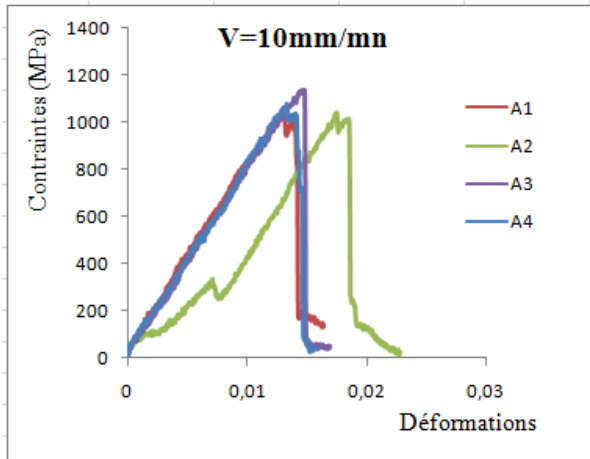
[22] Hanane NECHAD

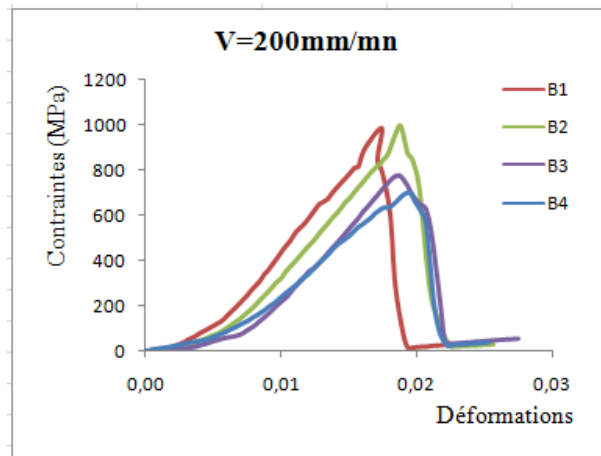
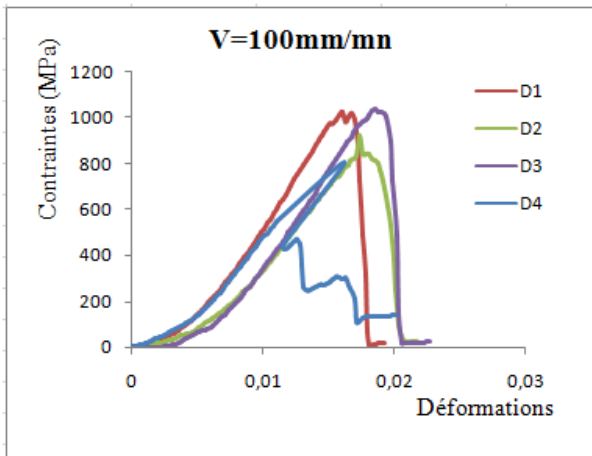
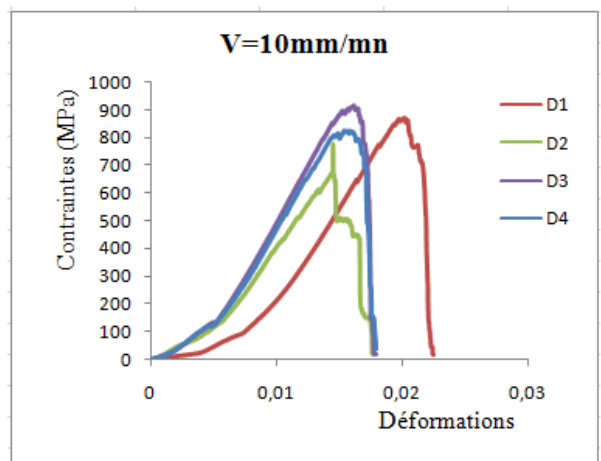
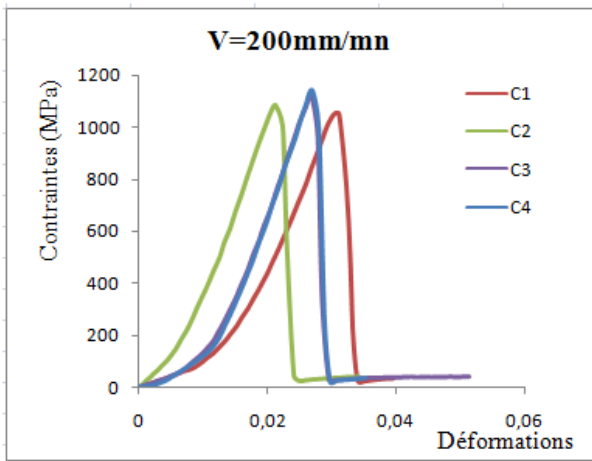
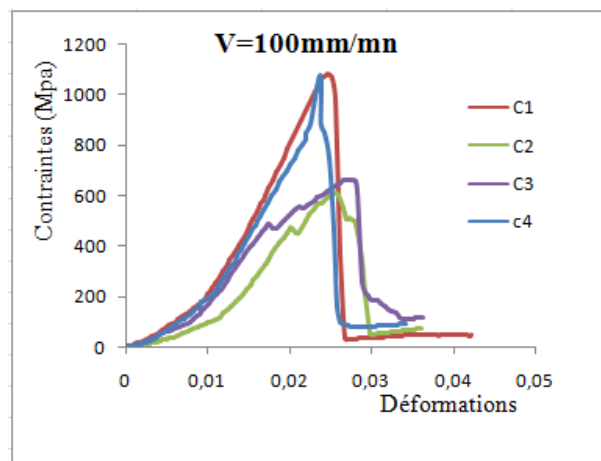
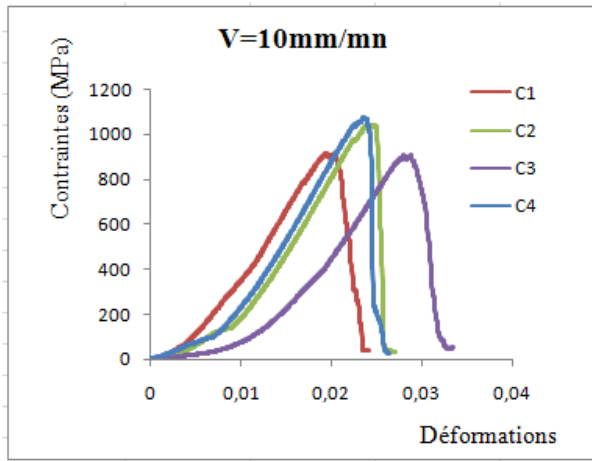
Evaluation de l'endommagement et de la rupture des matériaux hétérogènes.

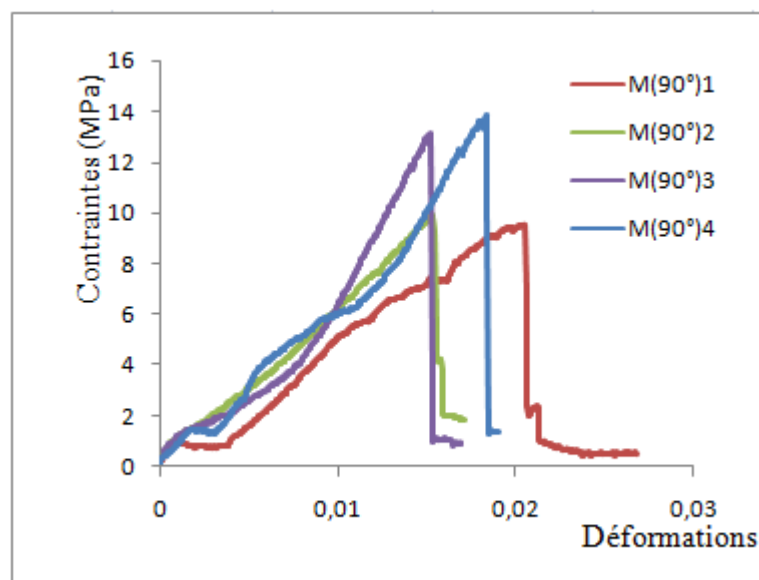
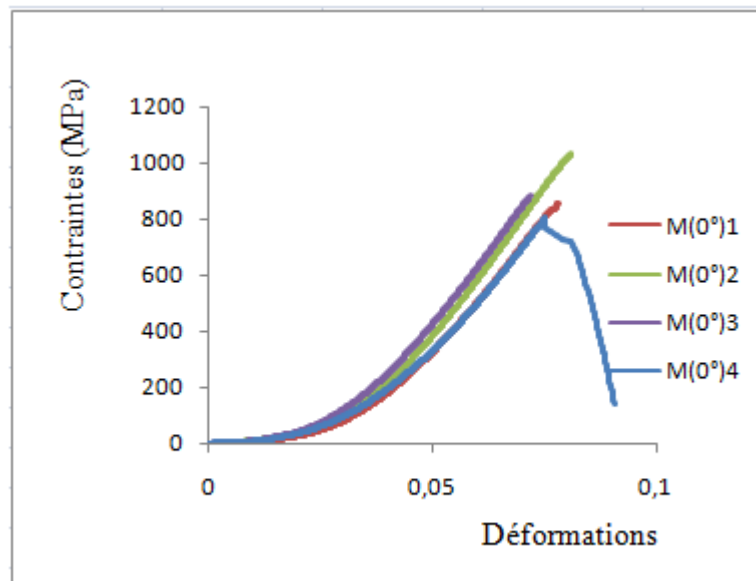
Thèse doctorat, Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2004.

Annexe 1

Courbes contraintes/déformations des différents lots testés à savoir les mèches, les tissus et les composites:







Annexe 2



HexForce® G0947 D 1040 HS
HS03K CARBON FABRIC

Product Data

Textile Reinforcement for High Performance Composite

HexForce® reinforcements are available in a range of weave styles – from woven fabrics to multiaxials and specialties that offers a range of globally certified aerospace / industrial products in carbon, glass and aramid and specialty fibers that we sell under the HexForce® trademark.

DESCRIPTION August / 2016

| | | |
|--------------------|----------------------------------------------------|--------------------------|
| Type of yarns | Warp : TENAX E HTA 40 E13 3K Weft : EC5 5.5 X 2 | |
| Nominal weight | 160 g/m ² | 4.72 oz/sqy ² |
| Weave style | UD PW | |
| Width | 1040 mm | 40.9 in |
| Finish type | | |
| Finish description | | |

CHARACTERISTICS

| | | |
|----------------------|-----------------------------------------|-------------------------------|
| Nominal construction | Warp : 7.6 yarn/cm Weft : 4 picks/cm | 19.5 yarn/in 10.2 picks/in |
| Weight distribution | Warp : 97 % Weft : 3 % | |
| Thickness (*) | 0.16 mm | 0.006 in |

*NB : The above average values are obtained with epoxy laminate at 55% of fibres in volume.

IMPORTANT

All information is believed to be accurate but is given without acceptance of liability. Users should make their own assessment of the suitability of any product for the purpose required. All sales are made subject to our standard terms of sales which include limitations on liability and other important terms.

© Copyright Hexcel



For European sales office telephone numbers and a full address list,
please go to : <http://www.hexcel.com/contact/salesoffices>