

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté de Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



MEMOIRE

En vue de l'obtention du diplôme de Master académique en

Génie Mécanique

Option : Génie Des Matériaux

THEME :

**Etude de l'influence du vieillissement thermique
sur le comportement mécanique des matériaux
composites à matrice polymère-Fibre de verre**

Proposé et dirigé par

Mme MOHELLEBI Fadila

Co-encadreur

Mr MOHELLEBI Mouloud

Présenté par

Mr GOUCEM Massinissa

2021/2022

Dédicaces

Je dédie ce travail à :

- Mon très cher père et ma précieuse mère

- Mes trois frères

-La mémoire de mes grands-parents paternels !

-La mémoire de mon grand-père maternel !

-Ma grand-mère !

- Mes tantes et oncles ainsi leurs familles.

-Cousins et Cousines et leurs familles.

- Tous ceux qui me sont chers.

- Tous mes amis et amies.

-La mémoire de mon ami –Sigrid Ait Mouheb-paix à son âme !

- A toi...!

Sommaire

<u>REMERCIEMENTS</u>	8
<u>Liste des figures</u>	11
<u>Listes des tableaux</u>	13
Introduction Générale	14

Chapitre I : Introduction aux matériaux composites

Introduction	15
1. Définition d'un matériau composite.....	15
2. Types de matériaux composites :	16
2.1. Matériaux composites à grande diffusion :	16
2.2. Matériaux composites à hautes performances :.....	16
3. Classification des matériaux composites.....	17
3.1. Classification suivant la forme des constituants.....	17
3.1.1. Composites à fibres	17
3.1.2. Composites à particules	17
3.2. Classification selon la nature des constituants	17
4. Constituants des composites.....	18
4.1. La matrice.....	18
4.1.1. Différent types de matrices.....	19
4.2 Les renforts.....	22
4.2.1. Différents types de forme des fibres :.....	22
4.2.2. Différents types de renforts	24
4.3 Charges et additifs.....	25
4.3.1. Les charges	25
4.3.2 Additifs.....	25
5. Architecture des matériaux composites.....	25
5.1. Les monocouches:	26
5.2 Les sandwiches	26
5.3. Les stratifiés	27
5.3.1 Définitions.....	27
5.3.2 Mécanismes de rupture des stratifiés.....	28
6. Mise en œuvre des matériaux composites :.....	28
6.1. Moulage au contact :	29
6.2. Moulage par projection simultanée	29
6.3 Moulage sous vide.....	30
6.4. Moulage par pultrusion :	30
7. Domaines d'application des composites	31
8. Conclusion.....	32

Chapitre II; Comportement mécanique et vieillissement des matériaux composites

Introduction.....	33
1. Essais mécaniques.....	33

1.1. Essais sur produits finis.....	34
1.1.1. Essais statiques.....	34
Essai de traction.....	34
Essai de compression.....	34
Essai de cisaillement	35
Essai de flexion	35
Essai de flexion trois points.....	36
Essai de micro-dureté :	37
2.Le vieillissement des matériaux composites.....	39
2.1. Principes du vieillissement.....	39
2.2. Influence du vieillissement.....	39
2.3. Vieillissement naturel.....	39
2.4. Vieillissement accéléré.....	40
2.4.1. Vieillissement physique.....	40
2.4.2. Vieillissement chimique	40
Le vieillissement thermochimique	40
Le vieillissement photochimique.....	40
Le vieillissement hydrolytique	41
Le vieillissement radiochimique.....	41
Les coupures statistiques des chaînes :.....	41
La réticulation :	42
CONCLUSION :.....	42

Chapitre III : Techniques expérimentales

Introduction.....	44
1. Matériaux et matériels utilisés :.....	44
1.1. La résine :	44
1.2. Durcisseur :.....	45
1.3. Le Renfort :	45
1.4. Mélangeur :.....	45
1.5. Le contre moule :.....	46
1.6. Le moule :.....	46
1.7. La balance :	47
1.8. Ebulleur	47
1.9. Scie diamantée :	47
2. Etapes suivies pour l'élaboration du matériau d'étude.....	48
3. Machines de flexion :	49
4. Technique de vieillissement	49
4.1. Etuve (Enceinte thermique) :.....	49
4.2. Four de calcination :	50
4.3.Creuset.....	50
4.4. Balance de précision :	51
Conclusion :.....	51

Chapitre IV : Résultats et discussions

Introduction.....	52
-------------------	----

1. Résultats de l'essai de flexion pour les matériaux non vieillis.....	52
1.1. Résultat de l'essai de flexion pour la résine seule.....	52
1.2. Résultat de l'essai de flexion du matériau composite non vieilli.....	53
1.2.1. Résultat de l'essai de flexion du matériau composite monocouche non vieilli	53
1.2.2. Résultat de l'essai de flexion du matériau composite bicouches non vieilli	54
1.2.3. Résultat de l'essai de flexion du matériau composite tricouches	56
2. Résultats de l'essai de flexion pour matériaux vieillis.....	57
2.1. Résultats du vieillissement thermique pour la résine seule.....	57
2.1.1. Résultats du vieillissement thermique pour la résine seule 24h	57
2.1.2. Résultats du vieillissement thermique pour la résine seule 48h	58
2.1.3. Résultats du vieillissement thermique pour la résine seule 72h	59
2.1.4. Résultats du vieillissement thermique pour la résine seule 96h	60
2.1.5. Histogramme de la force moyenne et du déplacement moyen de la résine	61
2.2. Résultats de l'essai de flexion pour les matériaux composites monocouche vieillis.....	62
2.2. 1. Résultats du vieillissement thermique du monocouche 24h.....	62
2.2. 2. Résultats du vieillissement thermique du monocouche 48h.....	62
2.2.3. Résultats du vieillissement thermique du monocouche 72h.....	63
2.2. 4. Résultats du vieillissement thermique du monocouche 96h.....	64
2.2.5. Histogramme de la force moyenne de du déplacement moyen du monocouche.....	65
2.3. Résultats de l'essai de flexion pour les éprouvettes vieilles matériaux composites bicouches.....	65
2.3.1. Résultats du vieillissement thermique du bicouches vieilli 24h.....	66
2.3.2. Résultats du vieillissement thermique du bicouches vieilli 48h.....	66
2.3.3. Résultats du vieillissement thermique du bicouches, vieilli 72h.....	67
2.3.4. Résultats du vieillissement thermique bicouches vieilli 96h.....	68
2.3.5. Histogramme de la force moyenne de du déplacement moyen bicouches	69
2.4. Résultats de l'essai de flexion du matériau composite tricouches.....	70
2.4. 1. Résultats de l'essai de flexion du matériau composite tricouches vieilli 24h	70
2.4. 2. Résultats de l'essai de flexion du matériau composite tricouches vieilli 48h	71
2.4. 3. Résultats de l'essai de flexion du matériau composite tricouches, vieilli 72h	72
2.4.4. Résultats de l'essai de flexion du matériau composite tricouches vieilli 96h	73
3. Paramètres influençant le comportement mécanique en flexion de nos matériaux composites.....	74
4. Résultats de la calcination de nos matériaux composites.....	76
4.1. Résultats de la de calcination des matériaux composites non vieillis.....	78
4.2. Résultats de la de calcination des matériaux composites vieillis.....	79
5. Résultats de la micro dureté des matériaux composites.....	80
5.1. Résultats de la micro dureté de la résine.....	80
5.2. Résultats de la micro dureté des matériaux composites.....	81
5.2.1. Résultats de la micro dureté des matériaux composites monocouche.....	81
5.2.2. Résultats de la micro dureté des matériaux composites bicouches.....	82
5.2.3. Résultats de la micro dureté des matériaux composites tricouches (stratifié2).....	83
6. Conclusion.....	83
Conclusion générale	84
Références bibliographiques.....	86

REMERCIEMENTS

Je remercie en premier lieu le Bon Dieu de m'avoir donné le courage d'aller au bout de mon travail

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et toutes ma familles, qui grâce à leurs aide mon travail a vu le jour.

Le bon encadrement de ce travail a été assuré par Mme MOHELLEBI.F, je voudrais donc lui exprimer toute ma sympathie et ma reconnaissance pour l'aide qu'elle a su me prodiguer.

Mes vifs remerciements vont aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner mon travail.

Que les membres du personnel des labos SDM, RDM (Milyada-Idir-et Amar) trouvent ici le témoignage de mes sincères reconnaissances pour leur excellent accueil et disponibilités

Mes sincères remerciements vont à tous mes enseignants et ceux qui m'ont appris quelques choses dans la vie.

Je remercie très vivement tous ceux et celles qui, de près ou de loin, m'ont porté aides et encouragements en particulier les étudiants de la promotion (GDM 2020/2023).

Je remercie précisément mon très cher camarade YENNEK Amine pour son aide précieuse.

Sans oublier WA KAKI pour son soutien

A vous tous, du profond du cœur : Grand Merci !

Liste des figures :

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

Figure I.2 : Différents constituants d'un matériau composite.

Figure I.3 : Différentes familles de matrice

Figure I.4 : Diverses formes et origines de renfort

Figure I.5 : Tissage 3D

Figure I.6 :Tissu de verre

Figure I.7 :Composite monocouche

Figure I.8 :Composite sandwich

Figure I.9 :Composite stratifié

Figure I.10 :Principe de moulage au contact

Figure I.11 : méthode de moulage par projection simultanée

Figure I.12 : Méthode du moulage sous vide

Figure I.13 : Moulage par pultrusion

Figure II.1 : Différents types d'essais mécaniques

Figure II.2: Essai de traction

Figure II.3 : Essai de compression

Figure II.4 : Essai de cisaillement

Figure II.5 :Essai de flexion trois point

Figure II.6 :Essai de micro dureté

Figure II.7 : Le micro Duromètre

FigureII.8Processus de coupure statistique des squelettes macromoléculaires

Tirée de Verdu (1990)

Figure II.9Représentation schématique des processus de réticulation dans un polymère initialement linéaire et dans un polymère initialement tridimensionnel

Figure III.1 : Résine polyester

Figure III.2 :Durcisseur

Figure III.3 :Renfort

Figure III.4 : Mélangeur

Figure III.5 : Contre moule

Figure III.6 : Moule

Figure III.7 : Balance

Figure III.8 : Ebulleur

Figure III.9 :Scie diamantée

Figure III.10 : Schéma de machine de flexion

Figure III.12 : Four de calcination

Figure III.13 : Creuset

Figure III.15 : Balance de précision

Figure IV.1 : Essai de flexion pour la résine seule

Figure IV.2 : Rupture fragile des éprouvettes de résine

Figure IV.3 : Essai de flexion du matériau composite monocouche

Figure IV.4: Rupture des éprouvettes du monocouche Rupture fragile sans fragmentation des éprouvettes

Figure IV.5: Essai de flexion du matériau composite bicouches

Figure IV.6 : Domaines du comportement mécanique du matériau composite bicouches

Figure IV.7 : Rupture du matériau composite bicouches

Figure IV.8 : Essai de flexion du matériau composite tricouches, non vieilli

Figure IV.9: Rupture du tricouches non vieilli

Figure IV.10: Courbe Force – Flèche de la résine vieillie 24h

Figure IV.11: Rupture des éprouvettes en résine vieilles 24h

Figure IV.12: Courbe Force – Flèche de la résine vieillie 48h

Figure IV.13: Rupture des éprouvettes en résine vieilles 24h

Figure IV.14: Courbe Force – Flèche de la résine vieillie 72h

Figure IV.15: Rupture des éprouvettes en résine vieilles 72h

Figure IV.16: Courbe Force – Flèche de la résine vieillie 92h

Figure IV.17: Rupture des éprouvettes en résine vieilles 96h

Figure IV.18: Histogramme de la moyenne et du déplacement moyen de la résine

Figure IV.19: Courbes Force – déplacement du monocouche vieilli 24h

Figure IV.20 : Rupture des éprouvettes du monocouche vieilli 24h

Figure IV.21: Courbes Force – déplacement du monocouche vieilli 48h

Figure IV.22: Rupture des éprouvettes du monocouche vieilli 48h

Figure IV.23: Courbes Force – déplacement du monocouche vieilli 72h

Figure IV.24: Rupture des éprouvettes du monocouche vieilli 72h

Figure IV.25: Courbes Force – déplacement du monocouche vieillie 96h

Figure IV.26: Rupture des éprouvettes du monocouche vieilli 96h

Figure IV.27: Histogramme de la force moyenne et du déplacement moyen du matériau composite monocouche

Figure IV.28: Courbes Force – déplacement du bicouches vieilli 24h

Figure IV.29: Rupture des éprouvettes du bicouches vieilli 24h

Figure IV.30: Courbes Force – déplacement du bicouches vieillie 48h

Figure IV.31: Rupture des éprouvettes du bicouches vieilli 48h

Figure IV.32: Courbes Force – déplacement du bicouches vieillie 72 h

Figure IV.33: Rupture des éprouvettes du bicouches vieilli 72 h

Figure IV.34: Courbes Force – déplacement du bicouches vieilli 96h

Figure IV.35: Rupture des éprouvettes du bicouches vieilli 96h

Figure IV.36: Histogramme de la force moyenne et du déplacement moyen du matériau bicouches

Figure IV.37: Courbes Force – déplacement du tricouches vieillie 24h

Figure IV.38 Rupture des éprouvettes du tricouches vieilli 24h

Figure IV.39: Courbes Force – déplacement du tricouches vieilli 48h

Figure IV.40: Rupture des éprouvettes du tricouches vieilli 48h

Figure IV.41: Courbes Force – déplacement du tricouches vieilli 72h

Figure IV.42: Rupture des éprouvettes du tricouches vieilli 72h

Figure IV.43: Courbes Force – déplacement du tricouches vieillie 96h

Figure IV.44: Rupture des éprouvettes du tricouches vieilli 96h

Figure IV.45: Influence du nombre de couche sur le comportement du MC

Figure IV.45: Influence du nombre de couche sur le comportement du MC

Figure IV.46: Variation du taux de fibres dans le composite non vieilli

Figure IV.47: Variation du taux de fibres dans les composites vieillis

Figure IV.48: Variation de la micro dureté de la résine en fonction du vieillissement

Figure IV.49: Variation de la micro dureté du matériau composite monocouche en fonction du vieillissement

Figure IV.50: Variation de la micro dureté du matériau composite bicouches en fonction du vieillissement

Listes des tableaux

Tableau I.1 :Principales caractéristiques des résines thermodurcissables

Tableau IV.1 : Variation de la force moyenne et du déplacement du composite en fonction du nombre de couches et de la durée du vieillissement.

Tableau IV.2 :Résultats des échantillons non-vieillis

Tableau IV.3 :Résultats des échantillons vieillis 24h

Tableau IV.4 : Résultats des échantillons vieillis 48h

Tableau IV.5 : Résultats des échantillons vieillis 72h

Tableau IV.6 :Valeur de la micro dureté des matériaux composites

Tableau IV.7 :Valeurs de la micro dureté des matériaux composites monocouche vieilli

Tableau IV.8 :Valeurs de la micro dureté des matériaux composites bis couches vieilli

Tableau IV.9 :Valeurs de la micro dureté des matériaux composites tricouches vieilli

Introduction générale

Les pièces en matériaux composites à matrice polymère occupent une place grandissante dans notre univers quotidien qu'il s'agit de la construction automobile, navale ou aéronautique...leur pénétration dans ces secteurs est dû aux nombreux avantages qu'ils présentent, à savoir, la légèreté, le coût, la résistance, la facilité de mise en œuvre... Ainsi, ils permettent de répondre à des besoins parfois contradictoires que les matériaux classiques ne peuvent satisfaire. Cependant, l'utilisation de ces matériaux est assujettie à la connaissance de leur comportement mécanique, aussi bien en statique qu'en dynamique.

Dans la majorité des cas, la demande industrielle se borne à essayer de connaître la durée de vie d'une structure sous un spectre de sollicitation (mécanique et environnement) représentatif au mieux du fonctionnement en service.

L'objectif de ce travail consiste à analyser le comportement mécanique en flexion trois points d'un composite stratifié constitué de 01,02 et 03 plis de tissus de fibres de verre/résine polyester insaturé, utilisé dans la fabrication des bateaux de pêche et de plaisance. En axant notre étude sur l'influence du vieillissement thermique à 60°C, à différentes durées (24h, 48h, 72h et 96h) sur les caractéristiques d'usage du matériau. Il s'agit de définir certaines propriétés mécaniques et d'observer leurs évolutions dans le temps.

Afin de mener à bien notre travail, nous l'avons organisé en deux parties :

- Une partie théorique consacrée à la recherche bibliographique composée de deux chapitres ;
 - Dans le premier nous présenterons les matériaux composites à matrice polymère, leurs constitutions ainsi que leurs modes d'élaboration ainsi que les différents types de stratifiés et leurs désignations,
 - Le second chapitre sera débuté par une présentation des différents essais de caractérisation mécanique et puis nous avons mis l'accent sur les mécanismes d'endommagement des composites en outre nous abordons l'aspect théorique du vieillissement des matériaux composites à matrice polymère dans un, environnement thermique,
- Une partie expérimentale. où nous présentons le déroulement du travail de l'élaboration de nos matériaux composite jusqu'à l'analyse des résultats, cette partie est composée de deux chapitres ;
 - Un chapitre pour les différents outillages et matériaux de travail, nous donnons le mode d'élaboration et les conditions de vieillissement retenues pour la présente étude ainsi que les différents essais effectués,
 - Nous présenterons les résultats obtenus et une discussion de ces derniers sera donnée.

En conclusion nous résumons l'ensemble des résultats trouvés, nous mettons en exergue les points les plus originaux, nous dégagons quelques perspectives à entreprendre pour compléter notre étude.

Chapitre I : Introduction aux matériaux composites

Introduction

Les matériaux composites sont vieux comme le monde. Il y a plus de 4000 ans, les artisans de l'ancienne Egypte savaient améliorer les performances mécaniques des briques en ajoutant un certain taux de la paille courte à l'argile fraîchement préparée. Plusieurs matériaux comme les bois (composite naturel), torchis, béton (agrégats et pâte de ciments), béton armé, bois contre-plaqué (sandwichs), lamifiés décoratifs par exemple, et se développent rapidement dans les matières de grande diffusion bien que leur coût soit plus élevé que celui des matériaux traditionnels. [1]

1. Définition d'un matériau composite

Un matériau composite est constitué de l'assemblage de deux matériaux ou plus de natures différentes. Se complétant et permettant d'aboutir à un matériau hétérogène dont l'ensemble des performances est supérieur à celui des composants pris séparément. Le principal intérêt de l'utilisation des matériaux composites provient de ses excellentes caractéristiques.

La zone de contact entre chacun des matériaux constitue l'interface, dont la qualité est très influente sur les caractéristiques mécaniques et physiques du composite

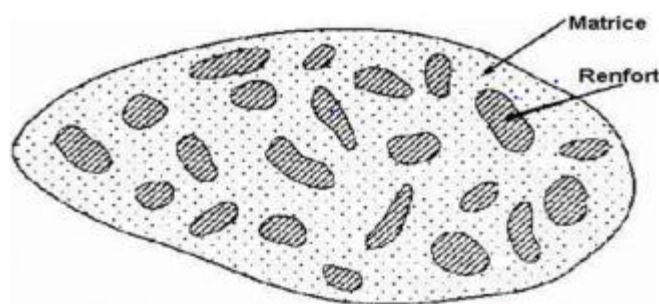


Figure I.1 : Schéma illustratif d'un matériau composite

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels :

- Légèreté, grande résistance à la fatigue, liberté de formes, maintenance réduite, faible vieillissement sous l'action de l'humidité, de la chaleur, de la corrosion (sauf au-carbone), insensibles aux produits chimique sauf les décapants de peinture qui attaquent les résines, une bonne isolation électrique.

Généralement, un composite est constitué d'une matrice et d'un renfort (figure I.2).

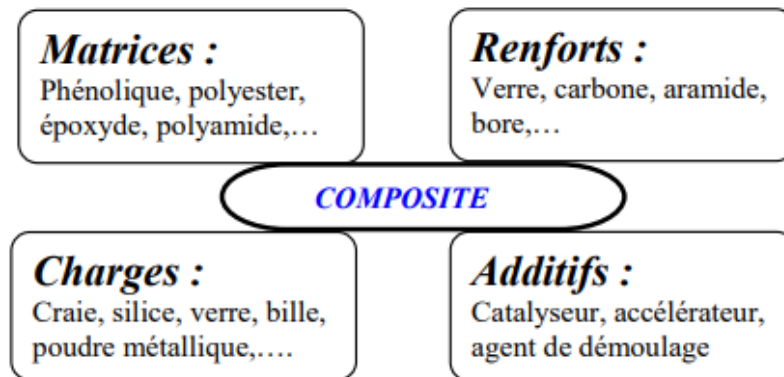


Figure I.2 : Différents constituants d'un matériau composite.

2. Types de matériaux composites :

On distingue deux types de composites : les composites à grande diffusion et les composites à haute performance.

2.1. Matériaux composites à grande diffusion :

Sont les plus courants, généralement réalisés à partir des fibres de verre et de résine polyester insaturé ou phénolique, destiné à des fabrications de grandes séries.

Les matériaux composites à grande diffusion offrent des avantages essentiels, qui sont : optimisation des coûts par diminution des prix de revient.

2.2. Matériaux composites à hautes performances :

Les matériaux composites à hautes performances sont utilisés dans le domaine d'aéronautique où le besoin d'une grande performance déduite des hautes valeurs ajoutées. Les renforts sont plutôt des fibres longues. Le taux de renfort est supérieur à 50%.

3. Classification des matériaux composites

Les matériaux composites peuvent être classés selon la forme de leurs constituants ou selon la nature des composites.

3.1. Classification suivant la forme des constituants

Les composites sont classés en deux classes selon la forme des constituants : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

3.1.1. Composites à fibres

Un matériau composite est un matériau composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres se présentent soit sous forme de fibres continues (Fibres courtes), soit sous forme de fibres discontinues (Fibres coupées). L'arrangement des fibres, leur orientation, ont un rôle principal dans les propriétés mécaniques des matériaux composites, et tout ça pour obtenir de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotrope dans un plan [2].

3.1.2. Composites à particules [2]

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules, et ces particules ne possèdent pas de dimension privilégiée. On générale, les particules sont utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution de retrait, etc. Dans des nombreux cas ces particules sont utilisées comme des charges pour réduire le cout du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

3.2. Classification selon la nature des constituants [2]

Selon la nature de la matrice, les matériaux sont classés suivant des composites à matrice organique, à matrice minérale ou à matrice métallique.

Parmi ces composites, nous pouvons citer :

A. Composites à matrice organique (résine, charge), avec :

- Des fibres minérales : verre, carbone, etc.

- Des fibres organiques : kevlar, polyamides, etc.

- Des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.

B. Composites à matrice métallique (alliages légers et ultralégers) :

Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium (SiC), etc.

-Des fibres métalliques : bore, etc.

- Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtement de carbure de silicium (BorSiC).

C. Composites à matrice minérale (céramiques), avec :

- Des fibres métalliques : bore, etc.

- Des particules métalliques : cermets, etc.

- Des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

4. Constituants des composites

4.1. La matrice

D'un point de vue mécanique, la matrice d'un composite se comporte comme un matériau homogène. Elle remplit deux rôles fondamentaux :

1) Elle assure le transfert des sollicitations mécaniques aux fibres alors que les fibres apportent au composite leurs performances mécaniques élevées. Pour cela, elle doit être ductile et présenter une bonne cohésion avec les fibres afin d'assurer un transfert optimal et limiter les déplacements de l'ensemble. D'autre part, elle doit avoir une faible masse volumique, ce qui donne au composite des propriétés spécifiques élevées [3].

2) Elle incorpore les fibres et les protège vis-à-vis des agressions extérieures [3].

On fait appel à différents types de matrices, comme indiqué à la figure (I.3), que nous détaillons dans ce qui suit.

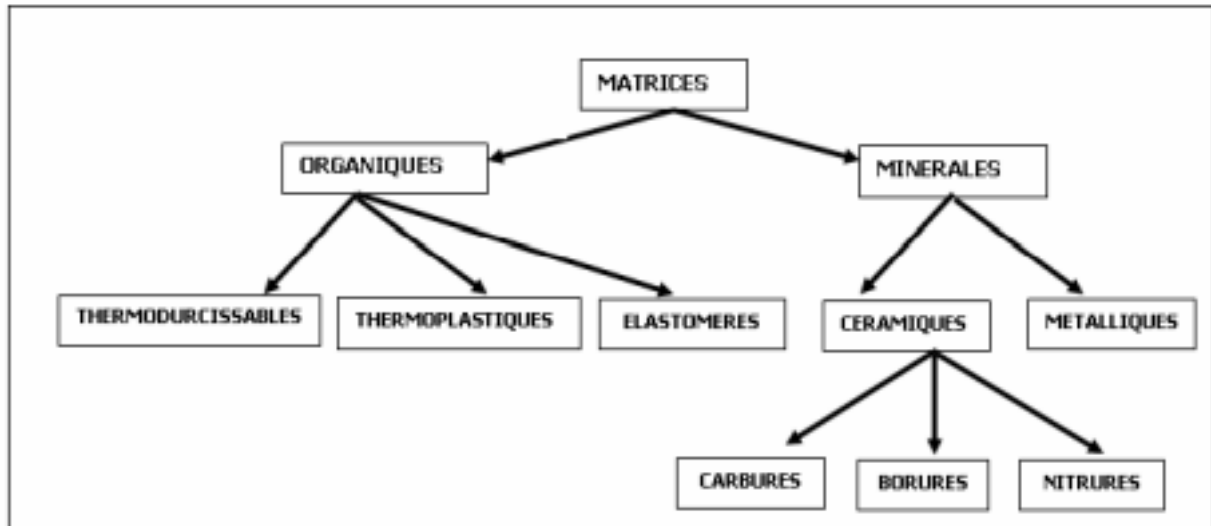


Figure I.3 : Différentes familles de matrice

4.1.1. Différent types de matrices

a) Matrices organiques (résineuses)

Se présente souvent sous forme de résine obtenues à partir de polymères, nous pouvons distinguer trois type de résines.

➤ Résine thermodurcissable

Les résines thermodurcissables(TD) sont, en général, associées à des fibres longues. Les polymères thermodurcissables ont la forme d'un réseau tridimensionnel ; au cours de la polymérisation, ce réseau se pont (double liaison de polymérisation) et durcit de façon définitive lors du chauffage selon la forme souhaitée, les thermodurcissables sont aussi des matériaux caractérisés par une stabilité thermique beaucoup plus élevée en comparaison avec les matériaux thermoplastiques, un grand avantage pour des applications d'une demande très élevée. Elles ne peuvent être mises en forme qu'une seule fois. La transformation est irréversible. Les résines thermodurcissables principalement utilisées actuellement sont : [4]

Résines polyester : Les polyesters insaturés sont les résines les plus utilisées dans les applications grand diffusion. Elles se présentent sous la forme d'une solution polyacide plus polyalcool qui se rigidifie sous l'action d'un catalyseur et de l'action de la chaleur. Elles

présentent le grand défaut d'émettre des vapeurs de styrène au cours de la polymérisation et d'être difficiles à stocker [4].

Tableau I.1 : Principales caractéristiques des résines thermodurcissables [5]

	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes
Caractéristiques mécaniques	Moyennes	Faibles	Très bonnes
Tenue en choc	Très bonne	Très faible	Bonne
Tenue en fatigue	Faible	Faible	Moyenne
Pouvoir adhésif	Moyen		Très bon
Température maxi d'utilisation	140°C	130°C	190°C
Tenue en feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne
Retrait	Important	Faible	Très faible
Durée d'utilisation	Courte	Courte	Longue
Mise en oeuvre	Très faible	Difficile	Facile

Résine thermoplastique :

La famille des résines thermoplastiques (on parle de "plastique") est très vaste, et peut être séparée en plastiques de grand diffusion et plastiques techniques (ou techno polymères). Les plastiques de grande diffusion sont mis en œuvre soit par injection pour obtenir des objets moulés, soit par extrusion pour obtenir des films, des plaques, des tubes, des profilés, des plastiques techniques sont généralement mis en œuvre par injection. Parmi les résines thermoplastiques, nous citerons: le polychlorure de vinyle, le polyéthylène, le polypropylène le polystyrène, le polyamide, le polycarbonate, etc. L'intérêt des thermoplastiques réside dans leur faible coût, résultant à la fois de matières premières disponibles et des procédés de fabrication. Toutefois, ce faible coût est lié à des propriétés mécaniques et thermomécaniques faibles. Les divers thermoplastiques peuvent être renforcés par des fibres et font partie alors des matériaux composites. Cependant, dans le domaine des composites, les résines thermoplastiques ont un développement limité, du fait de la nécessité de faire appel à des transformations à hautes températures de produits solides [6].

Résine thermostable :

Les résines thermostables se distinguent des autres résines, précédemment considérées, essentiellement par leurs performances thermiques qui conservent leurs propriétés mécaniques pour des températures plus élevées que 200 °C. Dans la pratique nous retrouvons pour ces résines les deux grandes familles des résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les résines thermostables sont développées surtout dans les domaines de l'aviation et de l'espace, où les laboratoires cherchent à mettre au point de nouvelles résines. Parmi les résines thermostables, les résines bismaléimides et polyimides sont les plus utilisées. Les résines bismaléimides sont des résines dont le réseau est élaboré à des températures de 180 à 200 °C. Les procédés de moulage sont identiques à ceux des composites à matrice thermodurcissable de type polyester ou époxyde. Prix très élevé. [6].

b) Matrices minérales

Les matrices inorganiques se divisent en deux familles principales : matrices métalliques, matrices céramiques. Ce sont des matrices formées à base de carbure de silicium et de carbone. Elles permettent d'atteindre de hautes températures.

Matrice métallique :

L'utilisation des matrices métalliques est encore actuellement en grande partie à un stade préindustriel. Plusieurs matériaux composites tels que ; l'Aluminium et ses alliages, Nickel, Titane. Elles présentent plusieurs propriétés : rigidité et résistance mécanique élevées, fragilisation par le renforcement fibreux, bon comportement à haute température, densité élevée, mise en œuvre difficile ainsi qu'une meilleure résistance à l'usure.

Matrices céramiques :

Elles sont particulièrement intéressantes en raison de leur caractère réfractaire. Elles sont utilisées dans des pièces qui doivent faible résistance à la rupture en traction, est partiellement masqué par l'insertion de fibres subir sans dommage de très hautes températures [7]. Les matériaux utilisés sont les carbures de silicium et de carbone.

4.2 Les renforts

Le renfort, souvent sous forme de fibres, ont pour rôle d'améliorer les caractéristiques des composites : rigidité, résistance à la rupture, dureté... et d'augmenter certaines propriétés physiques: tenue à la température, tenue au feu, résistance à l'abrasion, propriétés électriques.

La structure moléculaire d'une fibre est généralement alignée. Dans le sens de l'axe de fibre ce qui produit une structure forte dans cette direction. Les fibres sont donc fortes mais fines, ce qui leur confère une grande souplesse. On les commercialise essentiellement sous forme de fibres courtes ou fibres longues. Les fibres peuvent se présenter sous forme linéique, surfacique et multi directionnelle [4].

Les différents types de renforts sont indiqués à la figure I.4.

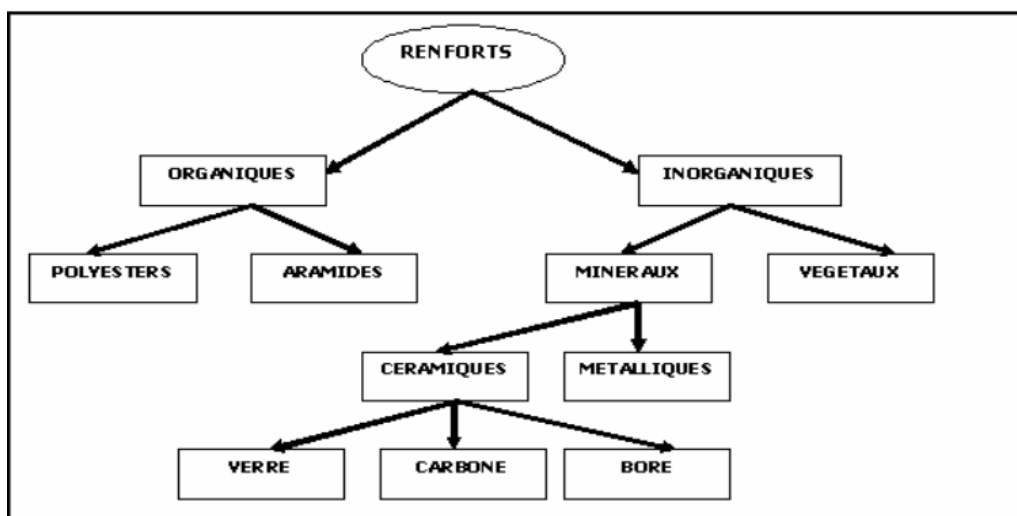


Figure I.4 : Diverses formes et origines de renfort

4.2.1. Différents types de forme des fibres :

Au vu de la diversité des fibres non pas du faite de leur nature mais aussi par leur diversité des formes commerciales dans les quelle elles sont présentées comme suit :

A. Formes linéiques [9]

- Fil de base : ensemble de filaments élémentaires.

- Fil simple : ensemble de fils de base unitaires continus ou discontinus, maintenus ensemble par torsion.
- Fil retors : ensemble de fils simples retordus ensemble.
- Fil câblé : ensemble de fils retors, avec éventuellement des fils simples retordus une ou plusieurs fois ensemble.
- Mèches : ensemble de fibres élémentaires discontinues
- Stratifil : ensemble de fils de base continus.

B. Formes surfaciques

Les fils sont utilisés pour réaliser des formes surfaciques de divers types : mats, tissus ou rubans.

- **Les mats :** Ce sont des nappes de fils continus ou discontinues, disposés dans un plan sans aucune orientation préférentielle.
- **Les tissus :** Un tissu est un ensemble surfacique de fils, de mèches, etc., réalisé sur un métier à tisser. Il est constitué d'une chaîne et d'une trame qui sont deux ensembles de fils, les premiers parallèles et répartis dans un plan suivant la longueur du tissu, les seconds s'entrecroisant avec les files de chaîne.
- **Formes multidirectionnelles :** Des tissages volumiques sont utilisés et caractérisés par le nombre de directions de tissage : 3D, 4D, etc (figure I.5).

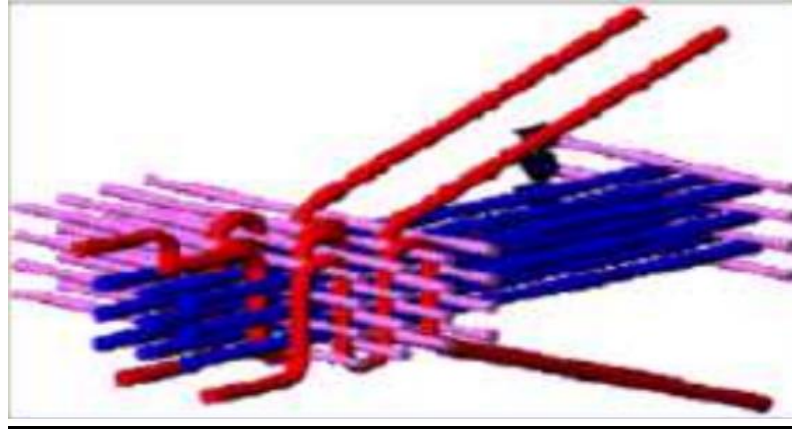


Figure I.5 : *Tissage 3D*

4.2.2. Différents types de renforts

- **Fibres de verre :** Elles constituent le renfort essentiel des composites de grande diffusion. Elles sont élaborées à partir d'un verre filable appelé verre textile, composé de silice, alumine, chaux, magnésie etc. Le verre est un matériau dont les propriétés sont considérablement améliorées au cours du temps. Ce produit peu coûteux, associé à des procédés assez simples d'élaboration qui confèrent aux fibres un excellent rapport performance/prix qui les place de loin dans le premier rang des renforts utilisés dans les composites (95%). En Europe, les fibres de verre utilisées dans les composites représentent 0,5 mégatonnes/an [10].



Figure I.6 : *Tissu de verre*

Les fibres de verre sont réparties en trois qualités :

Verre E : Pour les composites de grande diffusion et les applications courantes ;

Verre R : Pour les composites à hautes performances ;

Verre D : Pour la fabrication de circuits imprimés, en raison des propriétés diélectriques.

Fibres aramides : Les fibres aramides à caractéristiques mécaniques élevées sont généralement connues sous le nom de "KEVLAR", nom commerciale de la fibre. Les fibres aramides sont des fibres polyamides ou polyamides aromatiques [11].

Fibres de carbure de silicium : Le principe d'élaboration de carbure de silice est analogue à celui de fibres de bore, le dépôt résulte de la décomposition chimique à 1200°C du méthyltrichlorosilane en présence d'hydrogène [9].

4.3 Charges et additifs

Différents produits sont incorporés à la résine pour lui conférer des caractéristiques particulières ou en réduire le coût. La quantité des produits ajoutés varie de:

- quelques dizaines de % dans le cas de charges ;
- à quelques % et moins dans le cas d'additifs.

4.3.1. Les charges

Les charges sont des particules solides que l'on disperse au sein de la matrice. Elles peuvent être minérales, organiques (végétales ou synthétiques) ou métalliques, et s'utilisent grosso modo de la même façon que dans les plastiques « traditionnels ».

4.3.2 Additifs

Les additifs se trouvent en faible quantité, quelques pourcents et moins, et interviennent comme :

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

5. Architecture des matériaux composites

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

- Les monocouches ; les stratifiés et les Sandwichs.

5.1. Les monocouches:

Les monocouches sont les éléments de base des structures composites. Des fibres unidirectionnelles placées dans le plan médian sont emprisonnées dans une matrice polymère (voir la figure I.7). Ils sont caractérisés par le type de renfort utilisé : des fibres longues (unidirectionnelles ou non), courtes, sous forme de tissus de rubans [12].

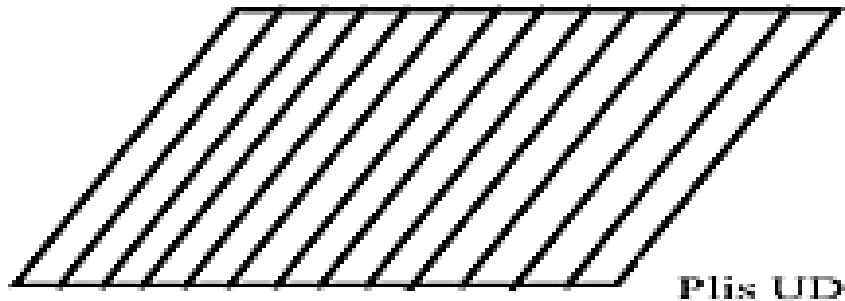


Figure I.7 : Composite monocouche [5]

5.2 Les sandwichs [2]

C'est une technique qui consiste à appliquer ou envelopper sur une âme de forte épaisseur deux feuilles ou peaux de grande rigidité et de faible épaisseur. L'ensemble de matériaux sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique. Les peaux sont le plus souvent des stratifiés (verre, carbone, kevlar) ou des feuilles d'alliages légers.

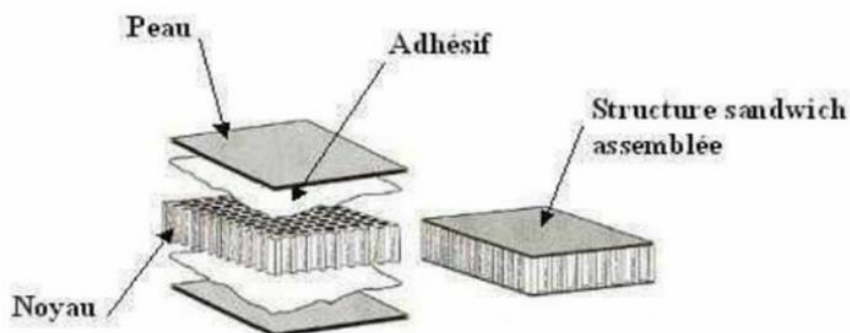


Figure I.8 : Composite sandwich [2]

5.3. Les stratifiés

5.3.1 Définitions

On appelle stratifié un matériau composé d'un ensemble ordonné de couches d'orientation et d'épaisseur données, constituées de divers matériaux (figure I.9). Une couche d'un stratifié est souvent appelée une strate. Le type de stratifié est défini généralement par sa séquence d'empilement, information qui fournit de manière synthétique l'orientation des diverses couches d'un stratifié. L'avantage que présentent les composites stratifiés est de permettre de créer des matériaux aux propriétés mécaniques orientées de manière optimale afin de mieux répondre aux sollicitations de la structure [13].

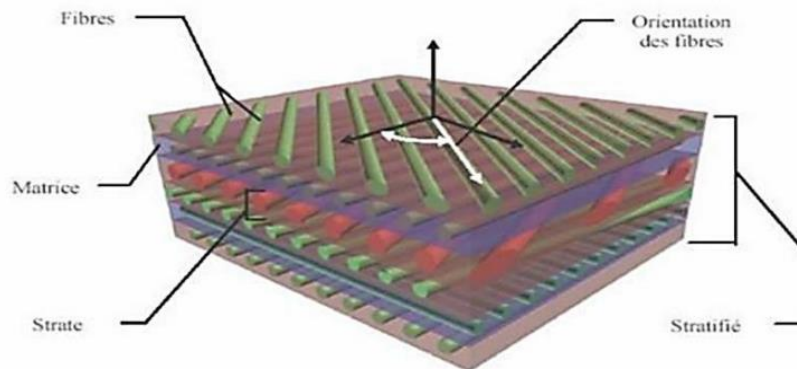


Figure I.9 : Composite stratifié [2]

Les stratifiés peuvent être classés en trois types :

- **Equilibrés** : le stratifié contient autant de couches orientées suivant la direction $+45^\circ$ que de couches suivant la direction -45° .
- **Symétriques** : les couches du stratifié sont disposées symétriquement par rapport à un plan moyen.
- **Orthogonaux** : le stratifié comporte autant de couches à 0° que de couches à 90° .

Dans le cas général des stratifiés, le renfort de chaque couche est de natures diverses et chaque couche doit être désignée par l'indication de la nature et le type des fibres.

5.3.2 Mécanismes de rupture des stratifiés

A l'opposé des métaux où la rupture sous des contraintes mécaniques résulte de l'amorçage et de la propagation d'une fissure dominante, la rupture des laminés en matériaux composites fibreux est caractérisée par l'initiation, la propagation et l'accumulation de différents modes d'endommagement. Parmi ces derniers, on trouve les fissurations transversales et longitudinales des matrices, le décollement inter facial, les ruptures des fibres et le délaminage entre plis adjacents du laminé [3]. Différentes méthodes de calcul existent et permettent de déterminer un état de contrainte limite.

6. Mise en œuvre des matériaux composites :

Il existe différentes techniques pour élaborer des matériaux composites, La plupart des méthodes de mise en œuvre contribuent à élaborer les pièces en matériaux composites répondant à toutes les exigences, comme la forme ou la cadence, par des couches successives comportant matrice et renfort pour avoir un matériau composite stratifié [14].

Il y a trois opérations qui sont indispensables : à savoir :

- Imprégnation du renfort par le système résineux.
- Mise en forme à la géométrie de la pièce.
- *Durcissement du système :*
 - Pour les matrices thermodurcissables, on utilise un refroidissement polycondensation et réticulation ;
 - pour les matrices thermoplastiques, on utilise un simple refroidissement.

Les procédés les plus importants sont :

- Moulage au contact ; moulage par projection simultanée ; moulage sous vide et - moulage par pultrusion ;

6.1. Moulage au contact :

C'est une technique qui consiste à réaliser des pièces prototypes ou de simulation. Son principe consiste à imprégner manuellement les renforts disposés dans un moule. C'est une technique onéreuse et lente mais fabrique des pièces de formes complexes (Figure I.10) [15].

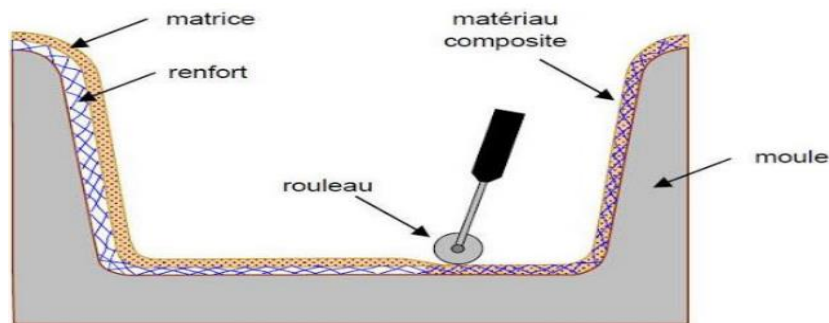


Figure I.10 : Principe de moulage au contact

6.2. Moulage par projection simultanée [2]

Le moulage est effectué par projection simultanée de fibres coupées et résine catalysée sur un moule. L'équipement à projeter est constitué d'une machine à couper le stratifil et d'un pistolet projetant la résine et les fibres à coupées, l'ensemble fonctionnant par air comprimé. La couche de fibres imprégnées de résine est ensuite compactée et ébullée au rouleau cannelé. Le moulage par projection permet d'obtenir de grandes séries de pièces.

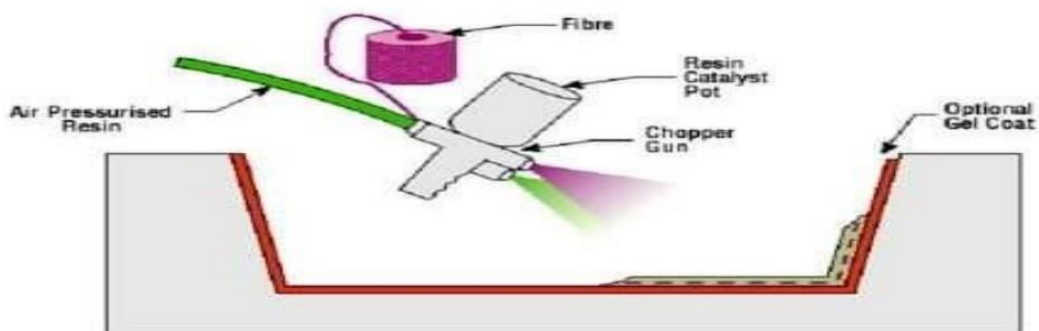


Figure I.11 : Méthode de moulage par projection simultanée [16]

6.3 Moulage sous vide

Le moulage sous vide s'effectue entre moule et contre moule, semi rigide ou souple suivant les caractéristiques des pièces. Le renfort est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce qui le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort.

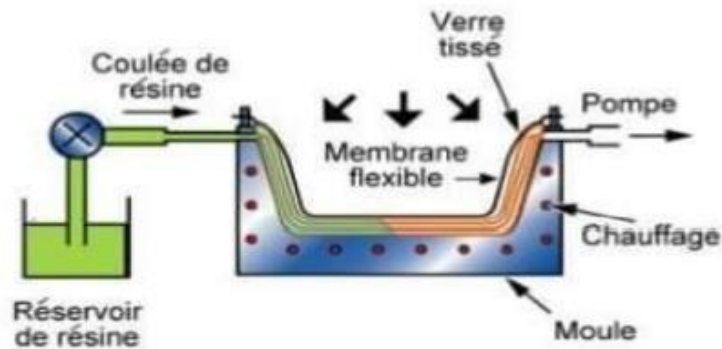


Figure I.12 : Méthode du moulage sous vide

6.4. Moulage par pultrusion : [2]

Le principe de moulage par pultrusion, c'est de passer les renforts 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. Dans ce procédé on n'utilise que les résines thermoplastiques et thermodurcissables. Les avantages sont la production en continue, possibilité de réaliser des sections très complexes, et d'avoir un taux de renfort élevé.

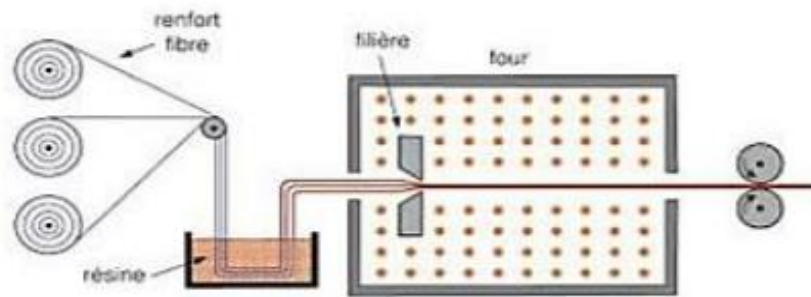


Figure I.13 : Moulage par pultrusion [2]

7. Domaines d'application des composites

Les excellentes caractéristiques et les bonnes performances mécaniques des matériaux composites à matrice de résine en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les différentes structures. L'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures.

De nos jours, les matériaux composites ont pris une place importante dans divers domaines :

- Electricité et électronique.
- Construction navale.
- Construction aéronautique.
- Construction automobile.
- Bâtiment et travaux publics.
- Santé (instrumentation médicale).
- Sport et loisir (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, ...).

8. Conclusion

Dans ce premier chapitre, une présentation globale est donnée sur les matériaux composites du point de vue du rôle de chaque constituants, types, architectures, mise en œuvre et domaines d'applications des composites.

Les composites sont préférés à d'autres matériaux parce qu'ils offrent des atouts liés à : leur légèreté, Leur résistance à la corrosion et aussi à la fatigue. Leur insensibilité aux produits comme les graisses, les liquides hydrauliques, les peintures et les solvants. Malgré cela il ne reste n'est en moins que les composite comme tout autre matériau subit les ravage du temps ainsi que des facteurs environnementaux au quelles ils font face en vus de la diversité des domaines de leurs applications, nous noterons généralement que ces dernies sont plus exposés à des vieillissements de nature chimiques ainsi que mécaniques.

***Chapitre II : Comportement mécaniques
et vieillissement des matériaux composites***

Introduction

Après l'élaboration d'un nouveau matériau, au laboratoire ou en industrie, on le soumet à plusieurs tests pour le caractériser ; des tests physiques, chimiques et mécaniques.

La connaissance des caractéristiques mécaniques d'un matériau composite et sa structure permettent de comprendre son comportement en service.

L'utilisation d'un polymère dépend en partie de l'habileté de sa structure à rester inchangée le plus longtemps possible. Le vieillissement des polymères se manifeste par une variation lente de leurs propriétés. Elle est causée par différents mécanismes qui se produisent dans leurs structures et qui entraînent en général leurs fragilisations

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents tests mécaniques utilisés pour la caractérisation mécanique du matériau composite. L'influence du temps et de l'environnement conduit au vieillissement du composite et par la suite à sa dégradation, les mécanismes de dégradation seront analysés et développés.

1. Essais mécaniques

Effectués en laboratoire ou sur le terrain, ils apportent des renseignements précis et fiables sur les performances d'un matériau. Il en existe un grand nombre qui sont réglementés par des normes internationales pour la plupart.

A partir des essais mécaniques, l'ingénieur mécanicien pourra connaître le comportement mécanique des matériaux utilisés pour fabriquer diverses structures.

Ces essais sont des expériences permettant de donner des valeurs numériques concernant la façon dont la matière réagit dans certaines conditions fixées par les normes. Ils ont pour but de caractériser ou d'évaluer numériquement les propriétés des matériaux. []. On distingue essentiellement deux types d'essais :

- Essais sur éprouvettes modèles (micromécanique) ;
- Essais sur des produits finis (composites de structure).

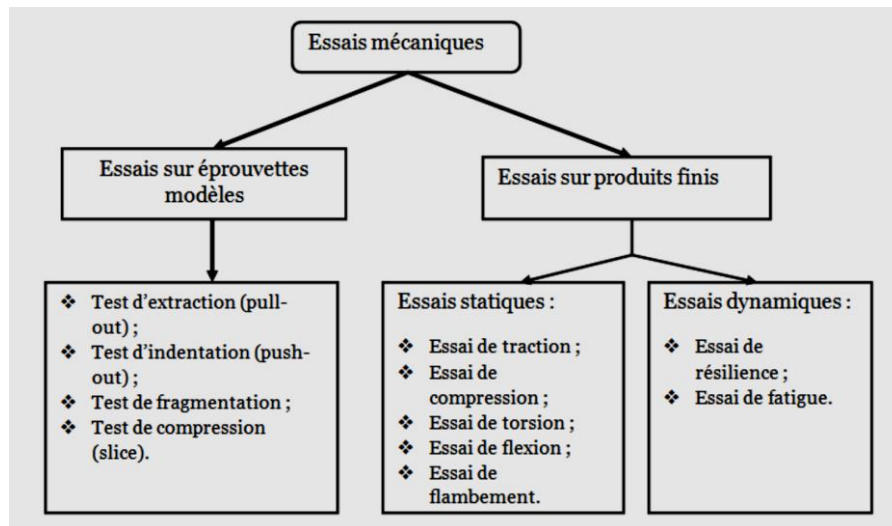


Figure II.1. Différents types d'essais mécaniques

1.1. Essais sur produits finis

Ce sont des essais réalisés sur des éprouvettes normalisées d'un matériau fini dans le but de connaître les caractéristiques fonctionnelles d'un matériau composite et son comportement en service.

1.1.1. Essais statiques

Essai de traction

Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), cylindrique ou parallélépipédique (plate), deux actions mécaniques et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

Cet essai permet de déterminer les caractéristiques mécaniques fondamentales des matériaux.

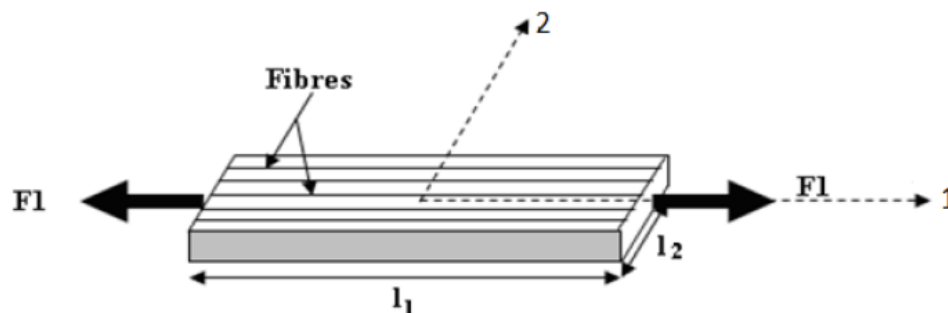


Figure II.2: Essai de traction

Essai de compression

L'essai consiste à appliquer, à vitesse constante, un effort de compression sur une éprouvette disposée verticalement. [18]

Mais pour cet essai, la résistance du matériau composite unidirectionnel dépend de multiples fonctions telles que la fibre, la matrice, la résistance inter-faciale et le taux de vide. [17]



Figure II.3. Essai de compression

Essai de cisaillement

Ils sont très importants pour des matériaux sensibles aux contraintes de cisaillement, mais sont malheureusement souvent difficiles à mettre en oeuvre et à exploiter. Il y a lieu de distinguer :

- Le cisaillement perpendiculaire au plan des couches (inter-laminaire)
- Le cisaillement dans le plan des couches (intra-laminaire). [19].

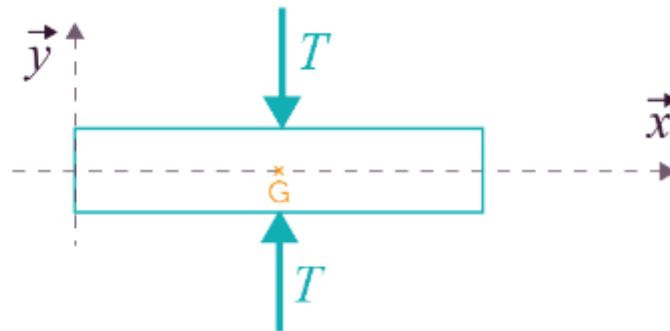


Figure II.4. Essai de cisaillement

Essai de flexion

Les essais de flexion sur composites sont largement utilisés dans les milieux industriels en raison de leur simplicité. Cependant, la flexion n'engendre pas un état de contrainte simple (ou pur) au sein des matériaux testés : les contraintes de traction sont maximales dans la partie convexe, les contraintes de compression sont maximales dans la partie concave et les

Chapitre II : Comportement mécanique et vieillissement des matériaux composites

contraintes de cisaillement sont maximales sur l'axe neutre de l'éprouvette. De ce fait, en fonction de l'élançement de l'éprouvette (rapport de l'épaisseur sur la distance entre appuis) qui gouverne le rapport contraintes normales (traction/compression) / contraintes de cisaillement et en fonction des résistances en traction, compression et cisaillement du matériau, l'un ou l'autre des trois modes de rupture peut être obtenu. Trois types d'essais de flexion se proposent :

- Essai de flexion trois points ;
- Essai de flexion quatre points ;
- Essai de flexion par flambement (permet de remédier aux problèmes soulevés par les contraintes locale). [18]

Le principe de cet essai consiste à déformer un barreau rectangulaire reposant sur deux appuis et d'un poinçon (ou panne) situé à égale distance et se déplaçant à vitesse constante. [17].

Essai de flexion trois points

Cet essai consiste à imposer une déformation (ou *flèche*) à une éprouvette normalisée (Barreau rectangulaire) placé sur deux appuis, à l'aide d'un poinçon se déplaçant à vitesse constante à mis distance des deux appuis, puis on mesure la force qu'oppose l'éprouvette à cette déformation.

Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur b	Hauteur h
100	80	15	4

Les conditions de l'essai de flexion sont notées ci-dessous :

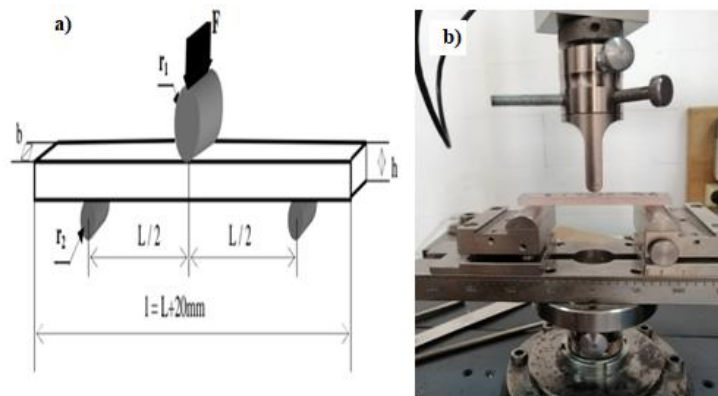


Figure II.5. Essai de flexion trois points

Chapitre II : Comportement mécanique et vieillissement des matériaux composites

a) Schéma de l'essai b) Eprouvette en cours d'essai

r_1 : Rayon de cylindre de la panne (5mm).

r_2 : Rayon des cylindres d'appuis (2,5mm).

L : Longueur entre appuis.

l : Longueur totale de l'éprouvette.

. Essai de micro-dureté : []

L'essai de dureté Knoop (HK) est une alternative à l'essai Vickers, il est destiné aux essais de microdureté. Comme pour l'essai de dureté Vickers, le pénétrateur utilisé en dureté Knoop est un diamant pyramidal. Cependant, au lieu d'être symétrique, la pyramide est allongée. La dureté Knoop (HK) est évaluée par une mesure optique de la longueur de la diagonale la plus longue de l'empreinte

L'essai de dureté Knoop est utilisé pour la micro dureté (charge inférieure ou égale à 1Kgf) de sorte que la surface de l'échantillon doit être parfaitement polie ou électro polie avant de démarrer l'essai. Les empreintes résultantes font quelques microns.

Pour la détermination de la dureté Knoop HK (selon ISO 4545), le pénétrateur pyramidal de forme losange (angle de bord longitudinal $172,5^\circ$, angle de bord transversal 130°) est pressé avec une charge d'essai définie (entre 1 gf et 2 kgf) contre un échantillon.

La dureté Knoop HK est le quotient de la force d'essai F (en Newton N) et de la surface de projection (surface) de l'empreinte, calculée à l'aide de la plus longue diagonale d (en mm) de l'empreinte pyramidale de forme losange (voir la figure II.6 ci-dessous). À l'inverse, dans la méthode Vickers, la valeur moyenne des deux diagonales de l'empreinte pyramidale de forme carrée est utilisée pour calculer la valeur de dureté.

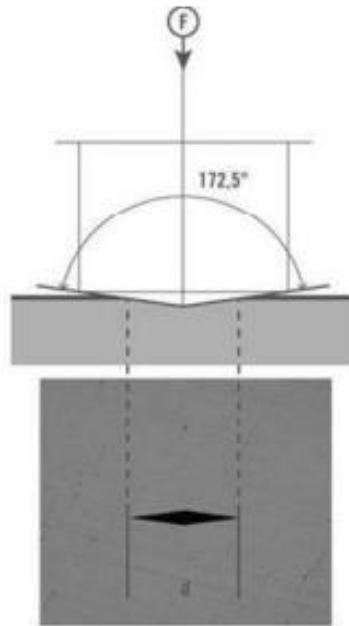


Figure II.6. Essai de micro dureté

La valeur de la dureté Knoop est donnée par l'expression suivante :

$$HK = Constante \times \frac{\text{force appliquée}}{\text{surface de l'indentation}} = 0,102 \times \frac{F}{A} = 1,451 \times \frac{F}{d^2} \quad (II.1)$$



Figure II.7. Le micro Duromètre

2. Le vieillissement des matériaux composites

2.1. Principes du vieillissement

Le vieillissement correspond à une évolution lente et irréversible d'une ou de plusieurs propriétés structurales (physiques, chimiques, mécaniques) du matériau à partir d'un point de référence, généralement pris dès la fin du cycle de fabrication. Le vieillissement pose le problème de la durabilité, c'est-à-dire de la durée de vie du matériau lorsque ses propriétés rapportées à une utilisation précise sont altérées.

Cette évolution peut résulter de modifications de la structure des macromolécules qui assurent leur cohésion mécanique, de leur composition ou de sa morphologie.

Le vieillissement se traduit par une altération des propriétés fonctionnelles (aspect, résistance mécanique, etc) ou de propriétés plus spécifiques liées à une utilisation donnée (isolation électrique, perméabilité gazeuse ou liquide, protection contre le feu...).

2.2. Influence du vieillissement

Les mécanismes de vieillissement des composites sont très divers et varient en fonction du polymère, des conditions de vieillissement comme la température, l'humidité, la pression d'oxygène, mais aussi en fonction de l'état de référence (vitesse de refroidissement, contraintes internes), des conditions de mise en oeuvre et en fin la géométrie du matériau lui-même. [9]

On sait qu'au cours d'un vieillissement hygrothermique par exemple, la présence de molécules d'eau dans un matériau composite à matrice polymère peut notamment dégrader les liaisons à l'interface renfort-matrice et entraîner ainsi une dégradation irréversible des propriétés du composite.

L'absorption d'eau par un composite à matrice organique dépend de plusieurs paramètres tels que :

- La nature des fibres et de la résine ;
- La disposition des fibres par rapport à la direction de diffusion ;
- L'écart de concentration en eau entre le composite et le milieu environnant.

2.3. Vieillissement naturel

Le vieillissement naturel du matériau composite est compliqué, il peut être causé par l'influence du rayonnement solaire ; des intempéries ; des milieux agressifs ou d'une

combinaison de ces paramètres. Le vieillissement accéléré au laboratoire peut aider à étudier un seul ou plusieurs paramètres selon nos besoins. [21]

2.4. Vieillissement accéléré

Afin d'effectuer des prévisions à long terme, un "vieillissement accéléré" est appliqué au matériau. Le paramètre d'accélération peut alors être la contrainte mécanique appliquée, le rayonnement, ou la température. En ce qui concerne la diffusion de l'eau et les processus de dégradations chimiques, le paramètre d'accélération retenu est généralement la température [9].

Les différents mécanismes responsables du vieillissement des polymères peuvent être classés en deux grandes catégories : physique ou chimique.

2.4.1. Vieillissement physique

Ce type de vieillissement correspond à tout processus conduisant à une modification des propriétés d'utilisation du matériau sans qu'il y ait modification de la structure chimique de ce dernier. Il englobe les phénomènes de vieillissement sous contrainte mécanique, les phénomènes de relaxations, les phénomènes liés au transfert de masse (pénétration de solvants, migration d'adjuvants) et les phénomènes de surface.

2.4.2. Vieillissement chimique

Il correspond à tout phénomène impliquant une modification chimique du matériau sous l'influence de son environnement d'usage.

Dans la réalité les deux vieillissements interfèrent et se manifeste en :

Le vieillissement thermochimique

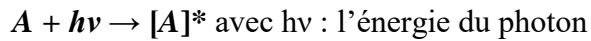
Qui correspond à tout vieillissement chimique en atmosphère inerte (thermolyse) ou dans l'air (thermoxydation), dont la cinétique dépend essentiellement d'un paramètre externe qui est la température. Pour le cas particulier de la dégradation à des températures très élevées, on parle de pyrolyse.

Le vieillissement photochimique

C'est-à-dire le vieillissement résultant de l'exposition directe au rayonnement solaire.

Chapitre II : Comportement mécanique et vieillissement des matériaux composites

L'acte primaire de tout processus photochimique est l'absorption d'un photon. Cette absorption va amener l'espèce absorbante A à l'état excité $[A]^*$, c'est-à-dire à un niveau électronique d'énergie plus élevée, conférant à la molécule une réactivité qu'elle n'a pas à l'état fondamental.



La grande majorité des polymères n'absorbent pas dans l'UV c'est-à-dire à des longueurs d'onde supérieures à 300 nm. Le vieillissement photochimique est alors lié à la réactivité de défauts de structure et d'impuretés absorbantes qui induisent celle du polymère.

Le vieillissement hydrolytique

S'accompagnant d'une hydrolyse, entraîne des coupures statistiques des chaînes macromoléculaires du polymère, d'où une altération, à terme, des propriétés mécaniques. La réaction est généralement très lente à température ambiante, la vitesse de l'action chimique élémentaire étant elle-même faible et le processus étant le plus souvent contrôlé par la diffusion (également lente) de l'eau dans le matériau.

Le vieillissement radiochimique

Par des radiations ionisantes de forte énergie (X , α , β , γ , neutrons).

D'autres types de vieillissement chimique peuvent exister. On peut citer par exemple le vieillissement en milieu réactif, le vieillissement biochimique, le vieillissement sous contrainte mécanique conduisant à des coupures de chaînes (mécanochimique), etc.

Les processus communs à tous les types de vieillissement chimique, sont les suivants :

Les coupures statistiques des chaînes :

Le processus de la coupure dépend de l'énergie de dissociation des liaisons chimiques dans la structure qui correspondent à la création de deux chaînes polymères à partir d'une seule (Figure II.9).

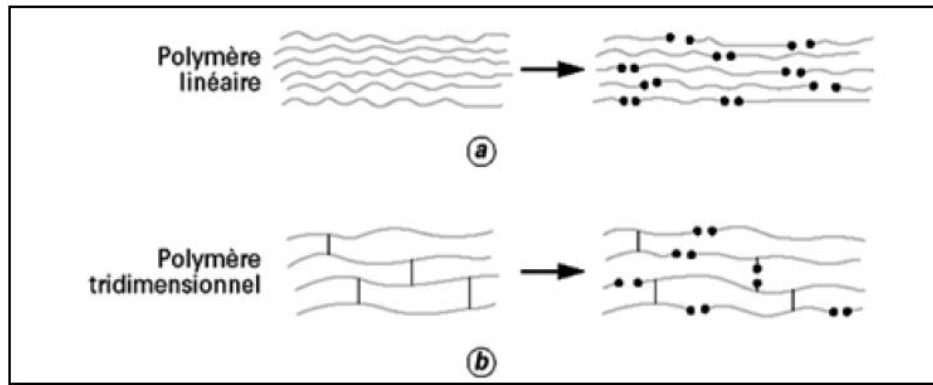


Figure II.8 *Processus de coupure statistique des squelettes macromoléculaires*

Tirée de Verdu (1990)

La réticulation :

C'est le processus inverse de la coupure de chaînes. Il se traduit par une augmentation de la masse moléculaire à cause de la création d'une seule "grande" chaîne à partir de deux chaînes polymères (Figure II.10).

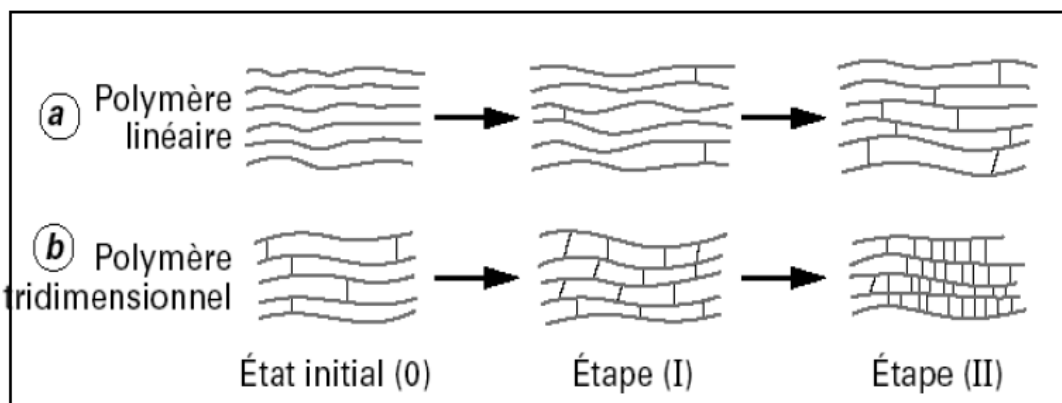


Figure II.9 *Représentation schématique des processus de réticulation dans un polymère initialement linéaire et dans un polymère initialement tridimensionnel*

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). La connaissance de l'état d'endommagement d'une structure travaillante en matériaux composites est une nécessité largement reconnue, et ce pour des raisons de fiabilité. L'évolution des caractéristiques mécanique, physiques et chimiques au cours du temps est

Chapitre II : Comportement mécanique et vieillissement des matériaux composites

gouvernée par le vieillissement des structures. Ce vieillissement est très long dans le temps, des vieillissements accélérés sont envisagés dans ce cas pour mieux maîtriser les phénomènes.

Chapitre III : Techniques expérimentales

Introduction

Dans ce chapitre, nous présentons les constituants choisis pour l'élaboration de notre matériau composite, le mode d'élaboration adopté ainsi que les techniques de caractérisations physico-chimiques et mécaniques de notre matériau composite.

1. Matériaux et matériels utilisés :

L'élaboration de nos échantillons s'est effectuée au niveau du laboratoire de sciences des matériaux du département génie mécanique de la faculté génie de la construction.

Pour l'élaboration de notre matériau nous avons utilisé :

1.1. La résine :

La résine utilisée est une résine polyester ortho phtalique de stratification de couleur bleu opaque, moyenne réactivité, nommée LORNESTER O-512 LTA.



Figure III.1. Résine polyester

a) Référence de la résine, b) résine versée pour l'élaboration du matériau composite

Propriétés mécaniques de la résine :

-Dureté Barcol	40-45
Résistance en flexion	80-100 MPA
Méthode d'application	Application manuelle
-Densité	1,09-1,11 kg/dm ³
Temps de durcissement	45-60 min

1.2. Durcisseur :

Adéquat pour la polymérisation et le durcissement de notre résine, C'est une substance qui augmente la vitesse d'une réaction chimique sans être consommé et sans modifier la position finale de l'équilibre thermodynamique de cette réaction. Le dosage à respecter pour ce catalyseur est de 1 à 2% en masse.



Figure III. 2. *Durcisseur*

1.3. Le Renfort :

Dans cette étude nous avons utilisé différentes formes de fibre de verre comme nous montre la figure ci-dessous :

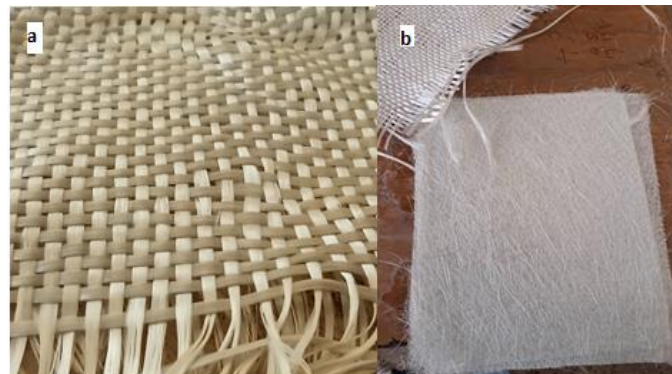


Figure III.3. *Renfort a) Rowing 800 b) Mat 600*

1.4. Mélangeur :

Pour bien répartir la quantité du durcisseur dans la résine et permettre une bonne distribution de ce dernier, nous avons utilisé un mélangeur électrique.



Figure III.4. Mélangeur

1.5. Le contre moule :

Un prototype réalisé en bois découpé suivant la forme voulu du moule



Figure IV.5. Contre moule

1.6. Le moule :

Pour élaborer des éprouvettes normalisées pour essais de flexion et de compression nous avons fabriqué des moules en Silicone liquide.



Figure III.6. Moule

1.7. La balance :

Nous avons utilisé une balance pour peser nos mélanges, des dosages bien précis doivent être respectés. Une balance de précision a été utilisée.



Figure III.7. Balance

1.8. Ebulleur

C'est un rouleau métallique utilisé pour bien étaler la résine et pour éliminer les bulles d'air pouvant créer des défauts pour notre matériau.



Figure III.8. Ebulleur

1.9. Scie diamantée :

Dispositif utilisé pour découper des tranches dans des matériaux fragiles et très durs, ou lorsque l'on veut éviter une modification de structure des zones de part et d'autre de la coupe (par exemple pour éviter l'écrouissage)



Figure III.9. Scie diamantée

2. Etapes suivies pour l'élaboration du matériau d'étude

Pour la préparation de notre matériau, nous avons suivi les étapes mentionnées ci-dessous pour l'élaboration ainsi que d'autres étapes nécessaires pour l'usinage des éprouvettes normalisées.

Etapes suivies pour l'élaboration des plaques du matériau d'étude

- 1ère étape : Préparation du moule et les couches de renforts.
- 2ème étape : Application de la cire.
- 3ème étape : découpe des renforts.
- 4ème étape : Peser et mélanger soigneusement la résine avec le durcisseur.
- 5ème étape : Versement d'une quantité de la résine mélanger avec le durcisseur sur les moules qui contient les renforts et une autre quantité sur des moules sans renforts.
- 6ème étape : Etalement de la résine à l'aide du rouleau.
- 7ème étape : Laisser le matériau composite élaboré ainsi durcir le temps nécessaire.

Etapes suivies après l'élaboration des plaques en matériaux d'étude

Après un temps de repos de nos plaques de matériau d'étude, nous avons découpé des éprouvettes normalisées pour l'essai de flexion.

-Le découpage s'est fait avec une scie circulaire diamanté.

-Un polissage de l'état de surface des échantillons a été mène à l'aide d'une polisseuse.

-Numérotation et mise des éprouvettes à sec dans l'étuve thermique de marque MAMMERT à une température de 60°C pendant 24 heures, 48 heures, 72 heures et 96 heures.

3. Machines de flexion :

La plupart des machines de flexion sont aujourd'hui dites universelles (traction, flexion, Compression, fluage...), voir figure

Cet essai de flexion trois points, permet de déterminer :

- La contrainte de flexion à rupture σ_r :

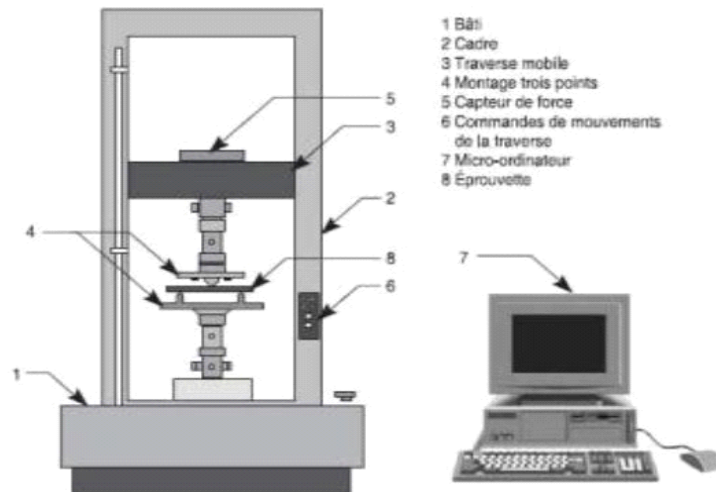


Figure III.10. Schéma de machine de flexion

4. Technique de vieillissement

Afin de réaliser les différents types de vieillissement souhaités, nous avons utilisé au sein du laboratoire des enceintes spécifiques aux essais visés. Nous avons utilisé une enceinte thermique (étuve).

4.1. Etuve (Enceinte thermique) :

Pour le vieillissement thermique, une étuve de type Memmert est utilisée. Elle est à la forme d'une armoire isolée thermiquement et dont le chauffage est assuré par des résistances électriques reliées à un régulateur électronique qui permet de contrôler la vitesse de chauffe et le maintien en température. La température est affichée instantanément par l'appareil. Le transfert se fait par convection dont un clapet d'admission d'air extérieur assure le brassage de l'air naturellement, permettant un transfert thermique rapide et une bonne homogénéité de la température. La chambre de l'étuve est équipée de clayettes en acier inoxydable sur lesquelles les échantillons sont déposés.



Figure III.11. Étuve thermique

4.2. Four de calcination :

Four vertical à chauffage direct : ce sont des fours à calcination dans lesquels les matières premières sont dans un compartiment séparé du combustible. La méthode est énergivore et tend à être remplacée.



Figure III.12. Four de calcination

4.3. Creuset

Un creuset est un pot en matériau réfractaire ou en métal servant à la fusion ou la calcination. La qualité d'un creuset est d'être capable de résister à des températures supérieures aux températures de fusion des alliages que le métallurgiste va y déposer, sans altérer ni polluer le métal en fusion.



Figure III.13. Creuset

4.4. Balance de précision :

Les balances au microgramme s'utilisent exclusivement en environnement de laboratoire et leur vocation est la calibration de pipettes, la détermination de la masse volumique, les pesées différentielles ou le pesage de quantités infimes.



Figure III.15. Balance de précision

Conclusion :

Pour chacune des caractéristiques d'un matériau, plusieurs méthodes sont disponibles pour la déterminer ; chacune a ses avantages et ses inconvénients. Le choix d'une de ces méthodes se fait selon le type de matériau, le type des résultats attendus de l'essai et les moyens disponibles.

Les résultats obtenus à partir de ces différents essais font l'objet du chapitre suivant.

Chapitre IV : Résultats et discussion

Introduction

Les éprouvettes élaborées en résine seule et en matériaux composites, résine plus fibres de verre, seront caractérisées par des essais : flexion trois points, calcination et micro dureté.

Le comportement mécanique des éprouvettes, l'influence du taux de renfort et l'influence du vieillissement thermique seront analysés. Pour chaque essai cinq éprouvettes sont testées, pour avoir une bonne répétitivité des résultats

Quatre matériaux seront étudiés : matériau 1 : résine seule, matériau 2 : résine + mat 600 (monocouche), matériau 3 : résine + deux couches de mat 600 (bicouches) et matériau 4 : résine plus trois couches (tricouches) deux couches mat 600 + une couche roving.

Pour chaque matériau, cinq lots d'éprouvettes seront formés :

- le premier lot est non vieilli,
- le deuxième lot sera vieilli 24h dans une étuve à 60°C,
- le troisième lot sera vieilli 48h dans une étuve à 60°C,
- le quatrième lot sera vieilli 72h dans une étuve à 60°C,
- le cinquième lot sera vieilli 96h dans une étuve à 60°C.

1.Résultats de l'essai de flexion pour les matériaux non vieillis

1.1. Résultat de l'essai de flexion pour la résine seule

Les résultats de l'essai de flexion de cinq éprouvettes normalisées de résine non vieillie sont regroupés dans la figure IV.1 ci-dessous.

Le comportement mécanique en flexion de nos éprouvettes en résine polyester, non vieilles et non renforcés, est un comportement fragile : seule la partie élastiques (ligne droite) de la courbes Force – Déplacement existe.

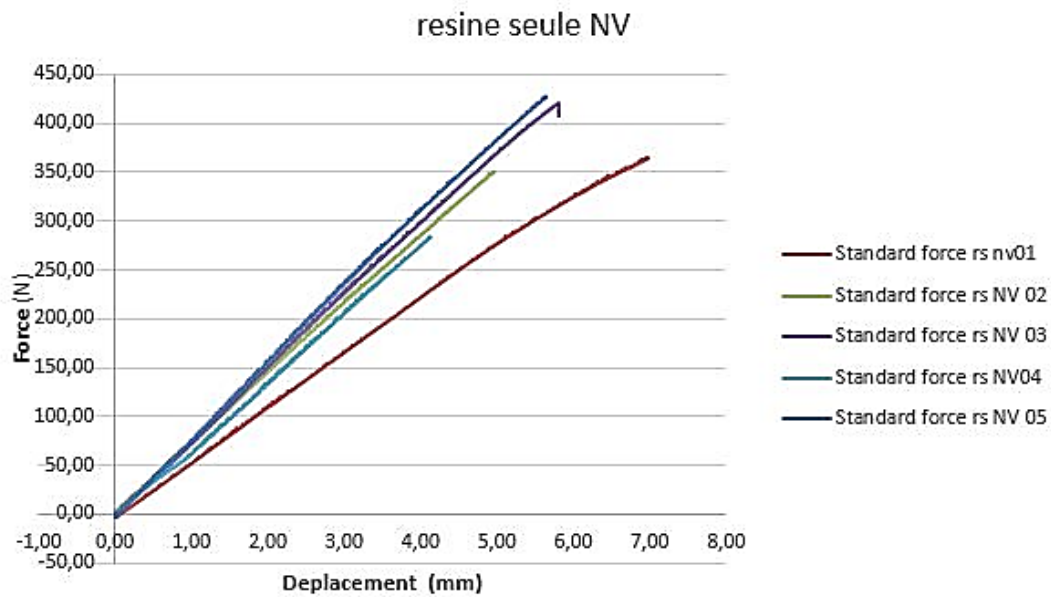


Figure IV.1 : Essai de flexion pour la résine seule

La figure IV.2 montre les éprouvettes de résines, seules sans vieillissement, rompues lors de l'essai de flexion. Nous constatons la rupture fragile des éprouvettes et la fragmentation de la résine.



Figure IV.2 : Rupture fragile des éprouvettes de résine

1.2. Résultat de l'essai de flexion du matériau composite non vieilli

1.2.1. Résultat de l'essai de flexion du matériau composite monocouche non vieilli

La figure IV.3 donne les résultats de l'essai de flexion pour les éprouvettes de matériaux composites élaborées à partir de la résine renforcée avec une couche de mat 600.

Selon la (figure IV.3), la plupart des éprouvettes ont un comportement fragile, avec toute fois une légère courbure avant la rupture. Le matériau reste fragile mais la rupture se fait sans

fragmentation de l'éprouvette durant l'essai (figure IV.4), on peut dire que la rupture est semi fragile.

La résine renforcée avec le mat 600 devient plus résistante.

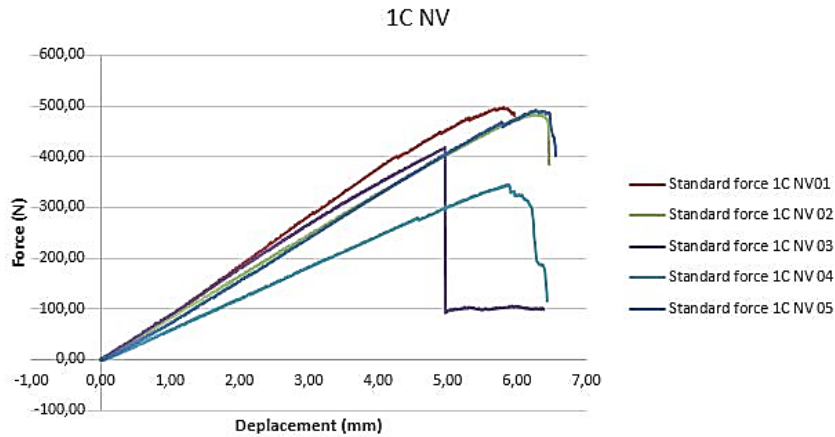


Figure IV.3 : Essai de flexion du matériau composite monocouche

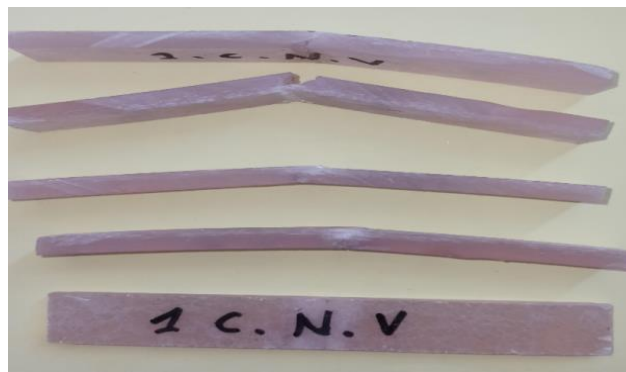


Figure IV.4: Rupture des éprouvettes du monocouche
Rupture fragile sans fragmentation des éprouvettes

I.2.2. Résultat de l'essai de flexion du matériau composite bicouches non vieilli

Le comportement mécanique des éprouvettes du matériau composite, résine polyester renforcée avec deux couches de mat 600, est différent de celui de la résine seule et du monocouche.

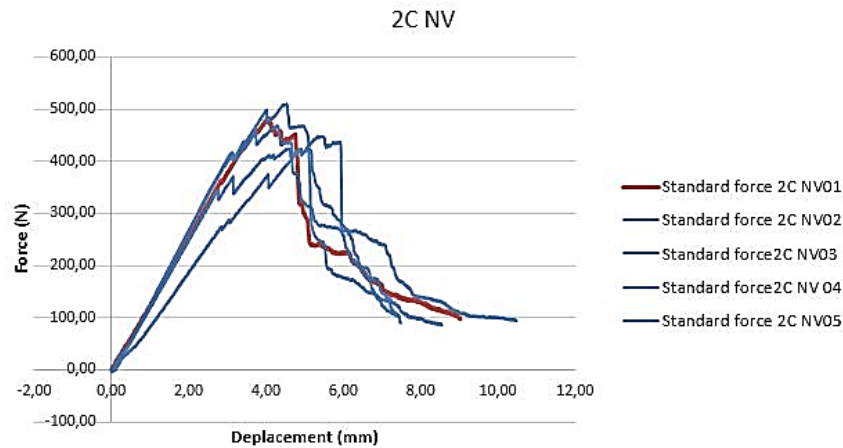


Figure IV.5 : Essai de flexion du matériau composite bicouches

En observant la figure IV.5, on remarque que la rupture s'est faite par étapes.

Selon la figure IV.6, la courbe de flexion présentent trois domaines :

- Domaine 1 : la courbe est une ligne droite, le comportement est élastique.
- Domaine 2 : la courbe présente trois pics en dents de scie, chaque pic correspond à une rupture ; le premier pic est la rupture de la résine, le second pic est la rupture de la première couche et le dernier pic correspond à la rupture de la deuxième couche.
- Domaine 3 : rupture totale de l'éprouvette, les deux parties de l'éprouvette restent solidaires (collées).

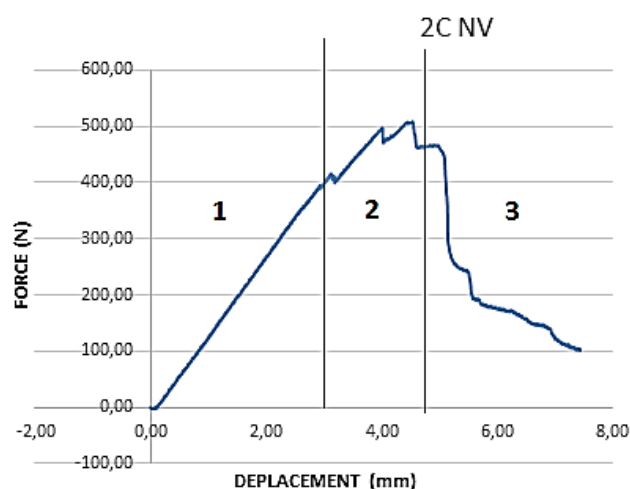


Figure IV.6 : Domaines du comportement mécanique du matériau composite bicouches

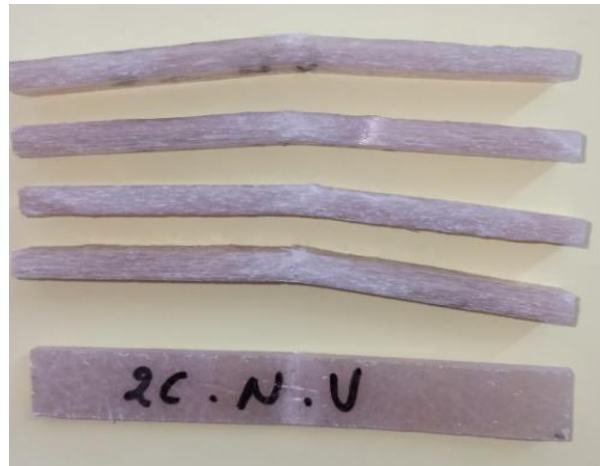


Figure IV.7 : Rupture du matériau composite bicouches

En observant les éprouvettes du bicouches après rupture (figure IV.7), on remarque qu'il n'y a pas de fragmentation de la résine, la rupture est semi ductile.

1.2.3. Résultat de l'essai de flexion du matériau composite tricouches

On note que le comportement mécanique des éprouvettes en flexion du matériau composite tricouches (résine polyester renforcée avec deux couches de mat600 plus une couche de roving), est semblable au comportement mécanique du matériau composite, bicouches. La rupture s'est faite par étapes (dents de scie).

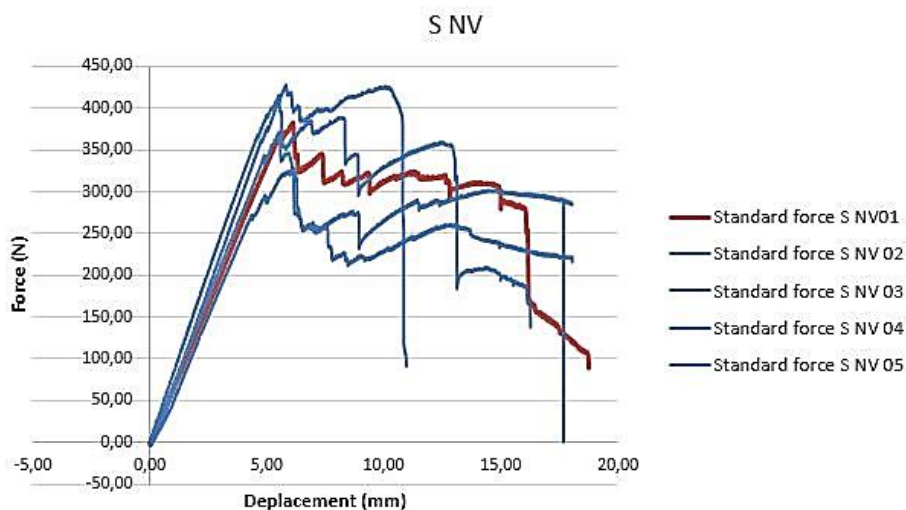


Figure IV.8 Essai de flexion du matériau composite tricouches, non vieilli

Les valeurs de force maximales supportées par nos éprouvettes dans ce cas sont inférieures aux valeurs supportées par les composites, monocouche et bicouches.

On observant les éprouvettes rompues du matériau composite tricouches, en flexion, on remarque (figure IV.9a) qu'elles ont rompu avec un délaminage entre la couche du mat 600 et la couche du roving. Ceci explique la faible valeur de la force maximale du tricouches comparativement à celle des deux autres matériaux composites élaborés (le monocouche et le bicouches).

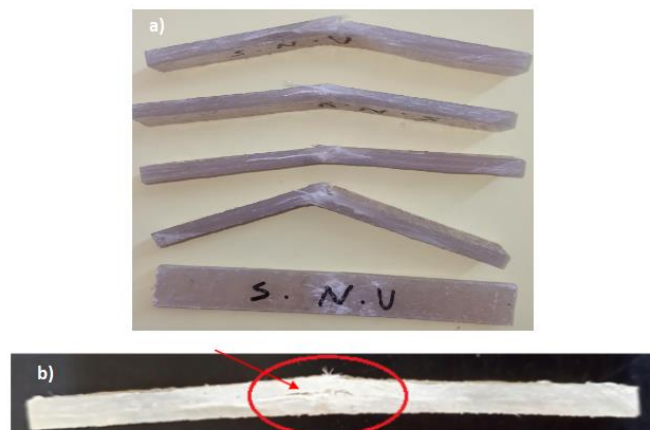


Figure IV.9: Rupture du tricouches non vieilli

a) Éprouvettes rompues après essais de flexion, b) zone de délaminage du stratifié

2. Résultats de l'essai de flexion pour matériaux vieillis

2.1. Résultats du vieillissement thermique pour la résine seule

Les éprouvettes de résine ont subi des vieillissements respectivement : 24h, 48h, 72h et 96h.

2.1.1. Résultats du vieillissement thermique pour la résine seule 24h

Sur la figure IV.10, nous regroupons les résultats des courbes Force- Course pour nos cinq éprouvettes en résine vieilles à la température de 60° C pendant 24h.

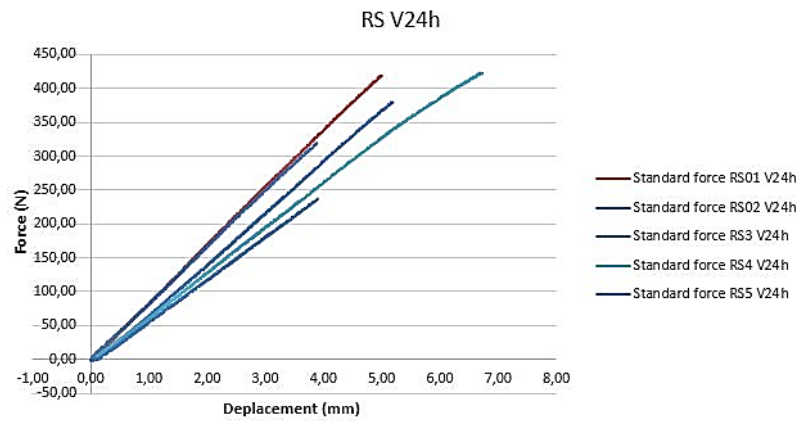


Figure IV.10: Courbe Force – Flèche de la résine vieillie 24h

Après 24h de vieillissement à 60° C, la résine garde son comportement fragile.

Les valeurs, de la force moyenne et du déplacement moyen, des éprouvettes en résine vieillie 24h sont presque égales à celles de la résine non vieillie.

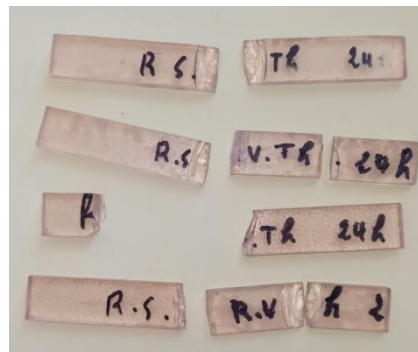


Figure IV.11: Rupture des éprouvettes en résine vieilles 24h

2.1.2. Résultats du vieillissement thermique pour la résine seule 48h

La figure IV.12 représente les courbes force- déplacement des éprouvettes résine polyester vieilles 48h.

La force moyenne de la résine vieillie 48 h est supérieur à celle de la résine non vieillie et à celle de la résine vieillie 24h.

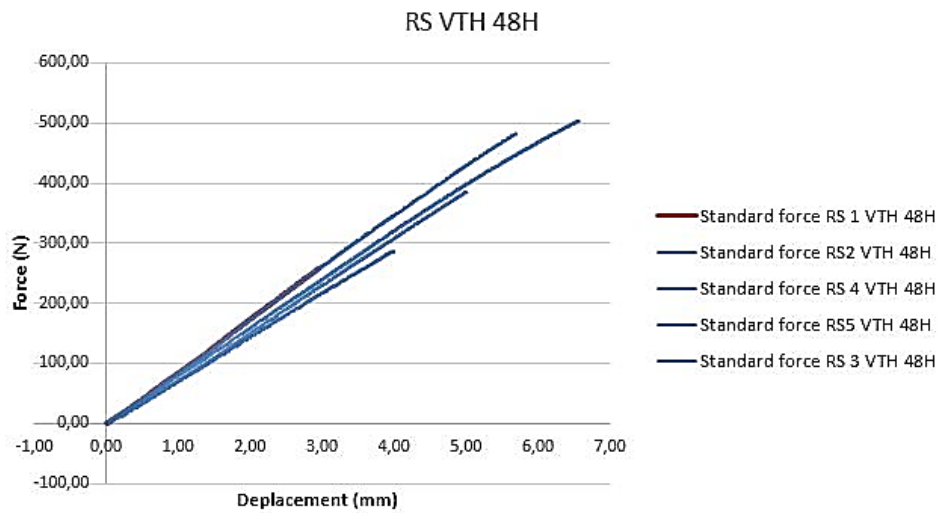


Figure IV.12: Courbe Force – Flèche de la résine vieillie 48h

La figure IV.13 est une photo montrant la rupture fragile de la résine polyester vieillie 48h.



Figure IV.13: Rupture des éprouvettes en résine vieilles 24h

2.1.3. Résultats du vieillissement thermique pour la résine seule 72h

La figure IV.13 donne les résultats de l'essai de flexion trois points des éprouvettes en résine vieilles 72h à la température de 60°C.

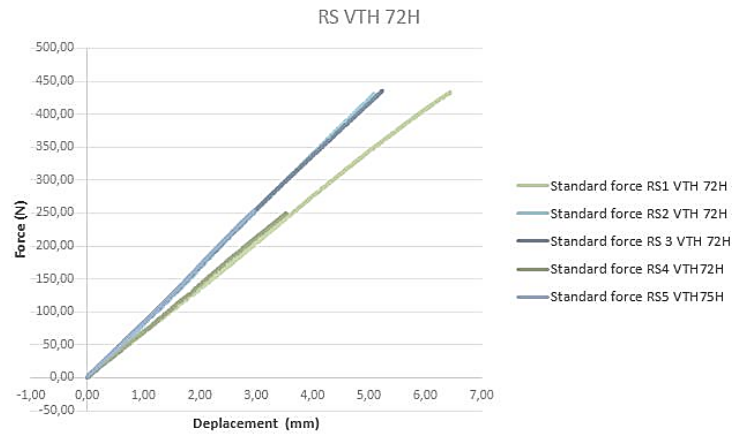


Figure IV.14: Courbe Force – Flèche de la résine vieillie 72h

La rupture des éprouvettes de flexion de la résine polyester vieilles 72 h est représentée dans la figure IV.15, la rupture est toujours fragile avec fragmentation de l'éprouvette pendant l'essai.



Figure IV.15: Rupture des éprouvettes en résine vieilles 72h

2.1.4. Résultats du vieillissement thermique pour la résine seule 96h

La figure IV.16 est la superposition des courbes Force- déplacement de l'essai de flexion des éprouvettes de résine vieilles 96h.

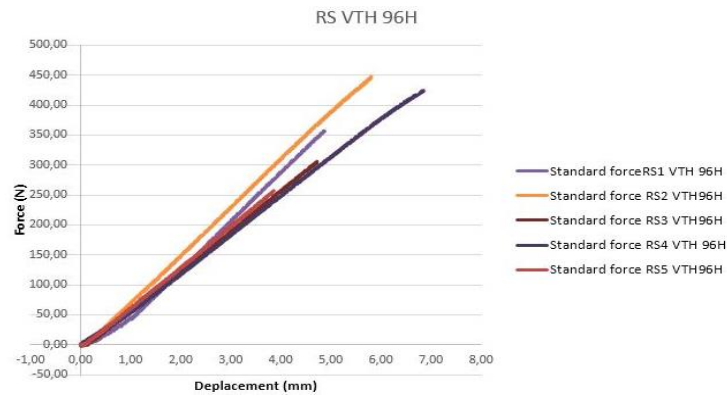


Figure IV.16: Courbe Force – Flèche de la résine vieillie 92h



Figure IV.17: Rupture des éprouvettes en résine vieilles 96h

2.1.5. Histogramme de la force moyenne et du déplacement moyen de la résine

A partir de l’histogramme de la figure IV.18, nous constatons que la résine vieillie 48h est la plus résistante que les autres résines. Pour le déplacement, la plus grande flèche est observée pour la résine vieillie 96h.

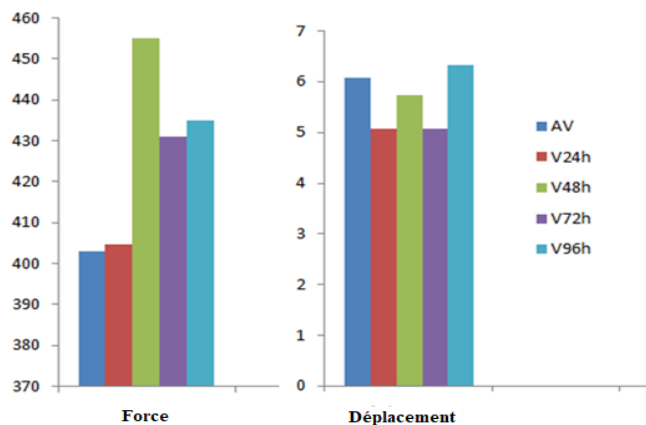


Figure IV.18: Histogramme de la force moyenne et du déplacement moyen de la résine

2.2. Résultats de l'essai de flexion pour les matériaux composites monocouche vieillis

Nous allons exposer les résultats de l'essai de flexion des matériaux composites, résine polyester chargée avec une couche de fibre de verre mat 600.

2. 2. 1. Résultats du vieillissement thermique du monocouche 24h

Les courbes résultantes de l'essai de flexion trois points du matériau composite monocouche, sont regroupées dans la figure IV.19.

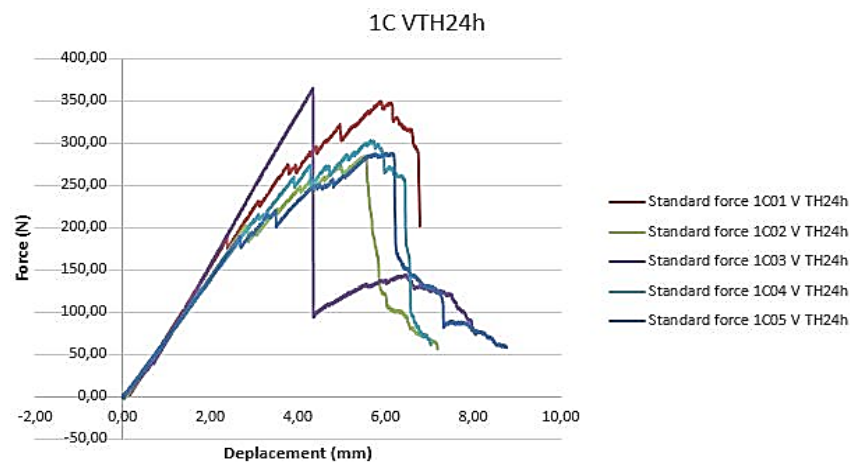


Figure IV.19: Courbes Force – déplacement du monocouche vieilli 24h

De la figure IV. 19, nous remarquons que la résistance du monocouche vieilli 24h, se relâche, alors que le déplacement augmente.



Figure IV.20 : Rupture des éprouvettes du monocouche vieilli 24h

2.2. 2. Résultats du vieillissement thermique du monocouche 48h

La rupture des éprouvettes mono couche, vieilli 48h, est une rupture semi fragile, les courbes présentent des dents de scie avant la rupture.

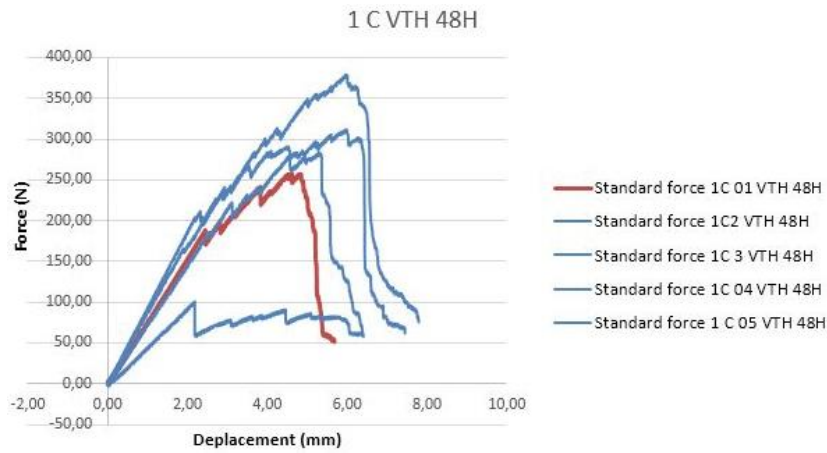


Figure IV.21: Courbes Force – déplacement du monocouche vieilli 48h



Figure IV.22: Rupture des éprouvettes du monocouche vieilli 48h

2.2.3. Résultats du vieillissement thermique du monocouche 72h

La rupture des éprouvettes monocouche, vieilli 72, est une rupture semi fragile, les courbes présentent des dents de scie avant la rupture.

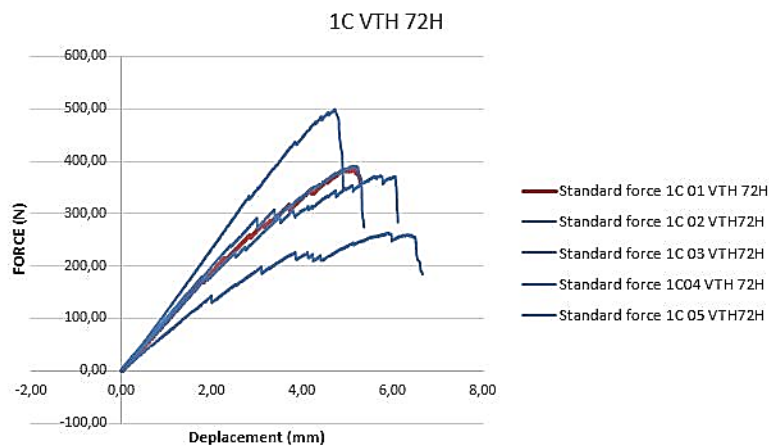


Figure IV.23: Courbes Force – déplacement du monocouche vieilli 72h

Les éprouvettes rompues du matériau composite monocouche vieilli 72h sont représentées sur la figure IV.24, la rupture se fait sans défragmentation de l'éprouvette.



Figure IV.24: Rupture des éprouvettes du monocouche vieilli 72h

2.2. 4. Résultats du vieillissement thermique du monocouche 96h

Selon la figure IV. 25, la rupture des éprouvettes du monocouche vieilles 96h est presque fragile.

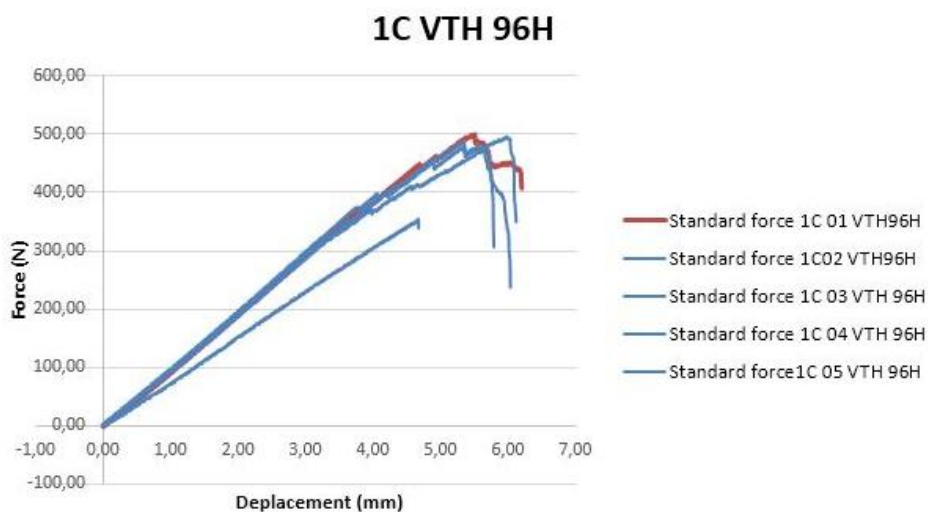


Figure IV.25: Courbes Force – déplacement du monocouche vieillie 96h

La figure IV.26 présente les éprouvettes du monocouche vieillie 96h après rupture par essai de flexion

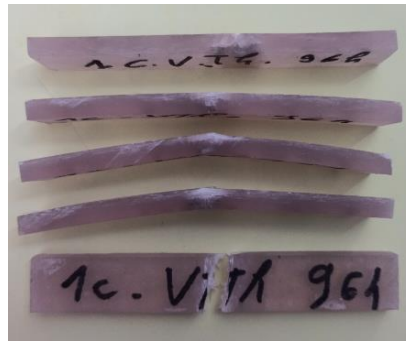


Figure IV.26: Rupture des éprouvettes du monocouche vieilli 96h

2.2.5. Histogramme de la force moyenne et du déplacement moyen du monocouche

A partir de l'histogramme de la figure IV.18, nous constatons que la force moyenne du monocouche chute dès le premier vieillissement de 24h puis augmente progressivement durant le vieillissement de 48h, 72h et 96h. Nous remarquons aussi que le vieillissement améliore le déplacement.

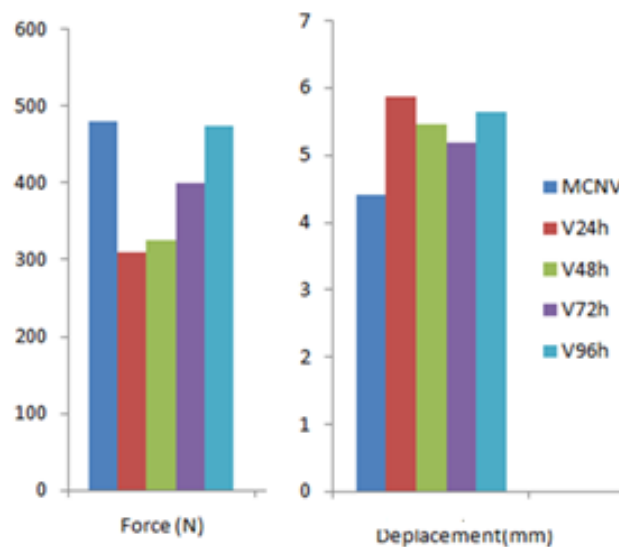


Figure IV.27: Histogramme de la force moyenne et du déplacement moyen du matériau composite monocouche

2.3. Résultats de l'essai de flexion pour les éprouvettes vieilles matériaux composites bicouches

On donne dans ce qui suit les résultats de l'essai de flexion du bicouches pour les différents vieillissements.

2.3.1. Résultats du vieillissement thermique du bicouches vieilli 24h

La courbe représentée sur la figure IV.28, est le résultat des essais de flexion des éprouvettes de matériau composite, résine polyester renforcée avec deux couches de fibre de verre mat 600, les éprouvettes sont vieilles 24h à 60° C.

Le comportement mécanique de ce matériau vieilli est très ressemblant au comportement mécanique du matériau non vieilli.

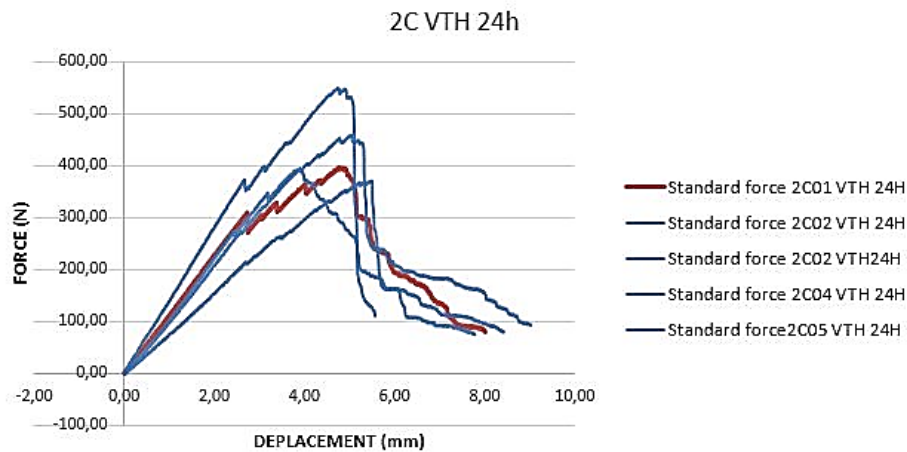


Figure IV.28: Courbes Force – déplacement du bicouches vieilli 24h



Figure IV.29: Rupture des éprouvettes du bicouches vieilli 24h

2.3.2. Résultats du vieillissement thermique du bicouches vieilli 48h

La figure IV.30 présente les courbes de flexion Force- Déplacement pour les éprouvettes en matériau composite bicouches, vieilli 48h.

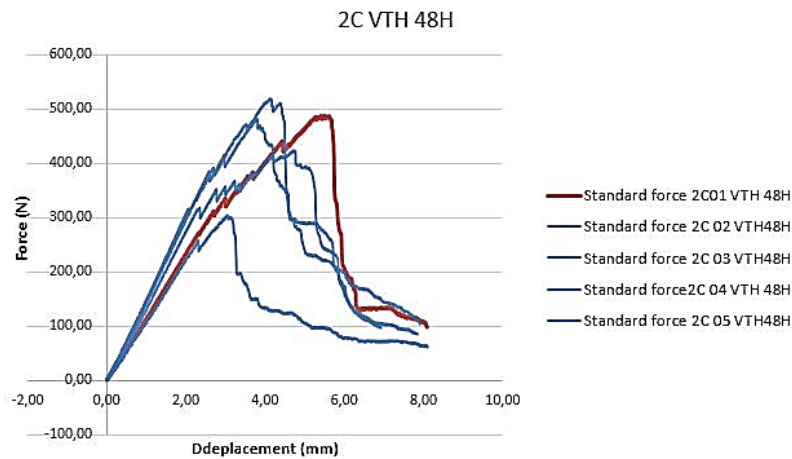


Figure IV.30: Courbes Force – déplacement du bicouches vieillie 48h

La figure IV. 31 représente les éprouvettes du bicouches après rupture.



Figure IV.31: Rupture des éprouvettes du bicouches vieilli 48h

2.3.3. Résultats du vieillissement thermique du bicouches, vieilli 72h

La figure IV. 32 est la superposition des courbes Force- Déplacement résultant de l’essai de flexion du matériau composite bicouches, vieilli 72h. la résistance du bicouches diminue par rapport à celle du bicouche non vieilli et vieilli 24h et 48h.

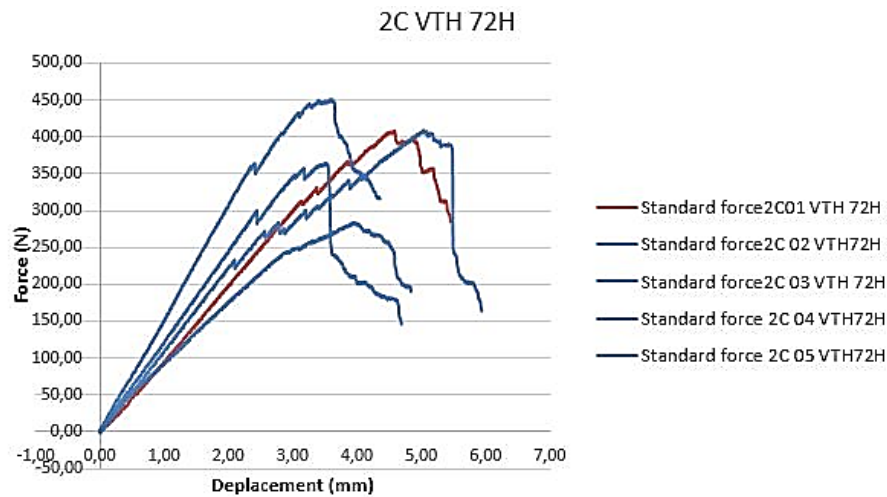


Figure IV.32: Courbes Force – déplacement du bicouches vieillie 72 h

L'état des éprouvettes après rupture en flexion est donné par la figure IV.33.



Figure IV.33: Rupture des éprouvettes du bicouches vieilli 72 h

2.3.4. Résultats du vieillissement thermique bicouches vieilli 96h

La figure IV. 34 est la superposition des courbes Force- Déplacement résultant de l'essai de flexion du matériau composite bicouches, vieilli 96 h. Le comportement mécanique de force et du déplacement est presque identique au comportement mécanique du matériau vieilli 72h.

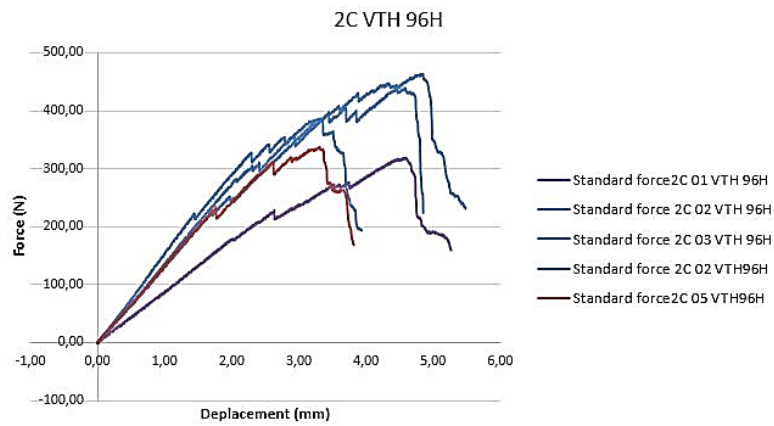


Figure IV.34: Courbes Force – déplacement du bicouches vieilli 96h

Les éprouvettes après rupture en flexion sont données dans la figure IV.35.



Figure IV.35: Rupture des éprouvettes du bicouches vieilli 96h

2.3.5. Histogramme de la force moyenne de du déplacement moyen bicouches

Selon l’histogramme de la figure IV.36, nous notons que l’influence du vieillissement sur la force n’est pas constante. Après 24h de vieillissement la force chute, mais après 48h la force augmente et ainsi de suite pour les autres vieillissements.

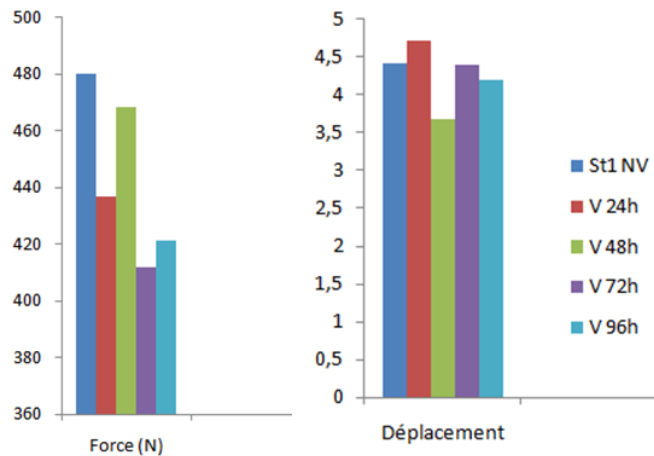


Figure IV.36: Histogramme de la force moyenne et du déplacement moyen du matériau bicouches

2.4. Résultats de l'essai de flexion du matériau composite tricouches

2.4. 1. Résultats de l'essai de flexion du matériau composite tricouches vieilli 24h

La figure IV.37 est la superposition des courbes Force- Déplacement résultant de l'essai de flexion du matériau composite tricouches, vieilli 24h

On remarque que le comportement mécanique de résistance chute, par contre la déformation augmente considérablement. Nous observons un grand délaminage des éprouvettes au niveau du point d'application de la force.

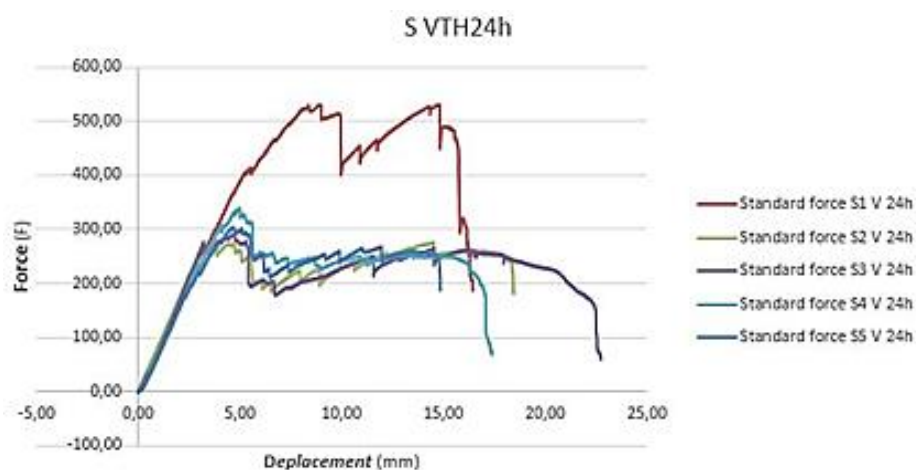


Figure IV.37: Courbes Force – déplacement du tricouches vieillie 24h

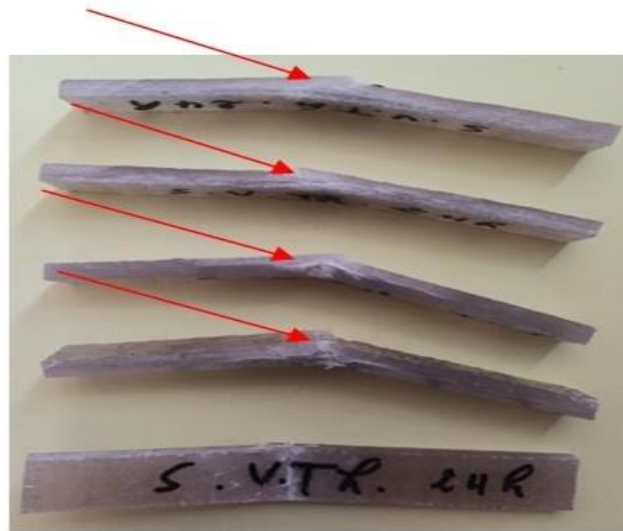


Figure IV.38 Rupture des éprouvettes du tricouches vieilli 24h

Les éprouvettes du tricouches, ainsi testées, n'ont supporté que de faibles valeur de force, le délaminage (figure IV.38) qu'a subi la couche médiane (roving) est la cause de cette défaillance.

2.4. 2. Résultats de l'essai de flexion du matériau composite tricouches vieilli 48h

La figure IV.39 est la superposition des courbes Force- déplacement du tricouches vieilli 48h.

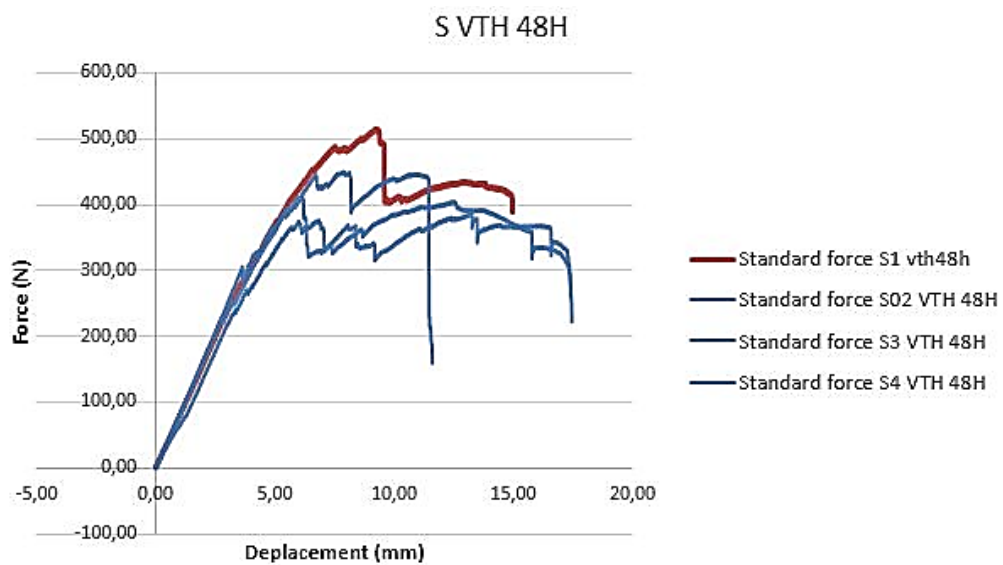


Figure IV.39: Courbes Force – déplacement du tricouches vieilli 48h

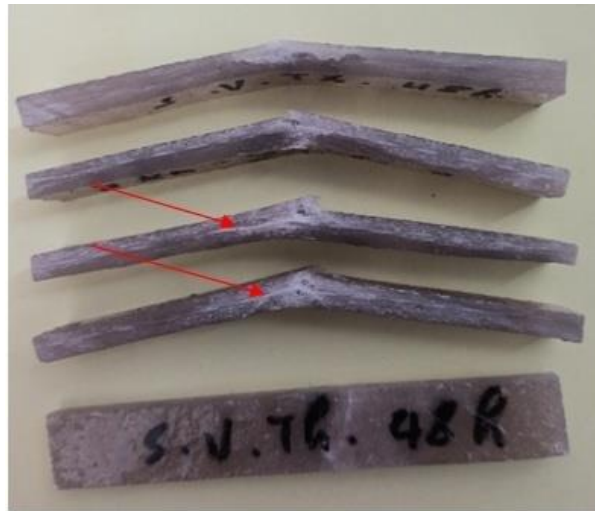


Figure IV.40: Rupture des éprouvettes du tricouches vieilli 48h

Après 48h de vieillissement, le délaminage qu’ont subi les éprouvettes du tricouches est moins important que dans le cas du vieillissement 24h, c’est pour cela que la force moyenne supportée par les éprouvettes est plus importante.

2.4. 3.Résultats de l’essai de flexion du matériau composite tricouches, vieilli 72h

La figure IV.41 est la superposition des courbes force –Déplacement du matériau composite tricouches, vieilli 72h. la résistance du matériau chute après ce vieillissement.

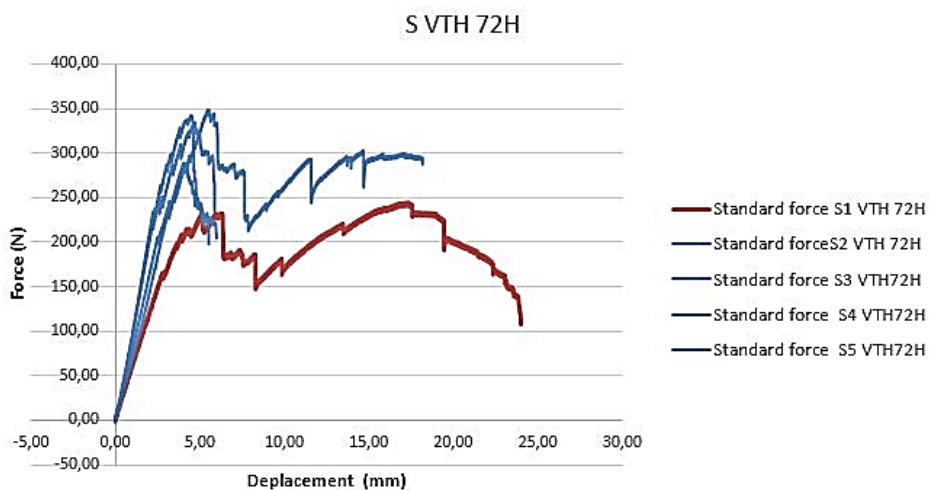


Figure IV.41: Courbes Force – déplacement du tricouches vieilli 72h



Figure IV.42: Rupture des éprouvettes du tricouches vieilli 72h

2.4.4. Résultats de l'essai de flexion du matériau composite tricouches vieilli 96h

La figure IV.43 est la superposition des courbes force –Déplacement du matériau composite tricouches vieilli 96h.

Une grande disparité des résultats apparait sur la figure IV.43 dû aux délaminages de la couche de roving.

La figure IV.44 montre le délaminage de la couche du roving, placée au milieu du tricouches, les deux couches de fibre se désolidarisent de la couche de roving.

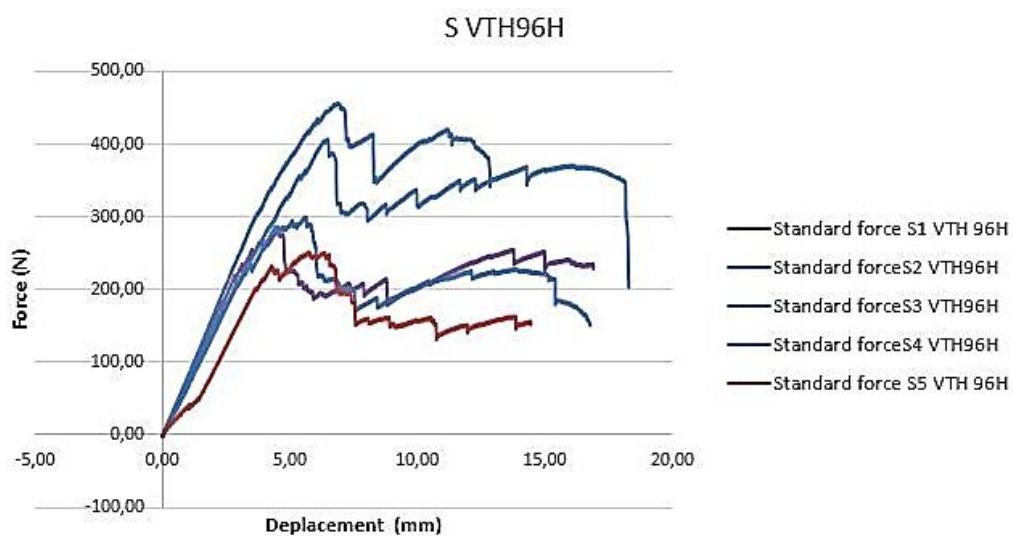


Figure IV.43: Courbes Force – déplacement du tricouches vieilli 96h

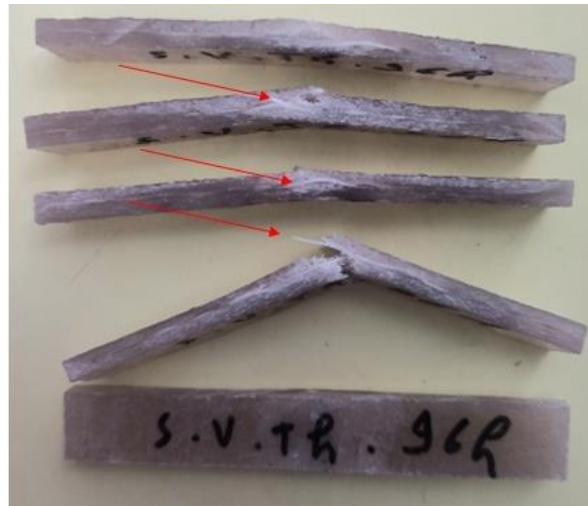


Figure IV.44: Rupture des éprouvettes du tricouches vieilli 96h

3. Paramètres influençant le comportement mécanique en flexion de nos matériaux composites

Nous allons observer dans ce qui suit l'incidence du nombre de couche ainsi que du vieillissement thermique sur le comportement mécanique des matériaux composites élaborés.

Dans le tableau IV.1, nous regroupons les résultats des forces moyennes et des déplacements moyens obtenus à partir des courbes forces – déplacements dans le tableau IV.1 ci-dessus

Tableau IV.1 Variation de la force moyenne et du déplacement du composite en fonction du nombre de couches et de la durée du vieillissement.

Nombre de couche	Force (N)				
	Non vieilli	Vieilli 24h	Vieilli 48h	Vieilli 72h	Vieilli 96h
0	403,6	404,62	455	431,44	435
1	483,5	310	326,59	400,28	473,56
2	480,3	436,96	468,29	411,88	421,45
3	396,45	292,67	433,42	325,18	365,49
Nombre de couche	Déplacement (mm)				
	Non vieilli	Vieilli 24h	Vieilli 48h	Vieilli 72h	Vieilli 96h
0	6,07	5,6	5,73	5,6	6,32
1	6,22	5,86	5,46	5,17	5,63
2	4,4	4,7	3,67	4,38	4,18
3	7,67	5,33	6,88	4,88	5,73

A partir des données du tableau ci-dessus nous traçons les courbes de la figure IV.45, ce sont des courbes normalisées de force- nombre de couche et déplacement- nombre de couche.

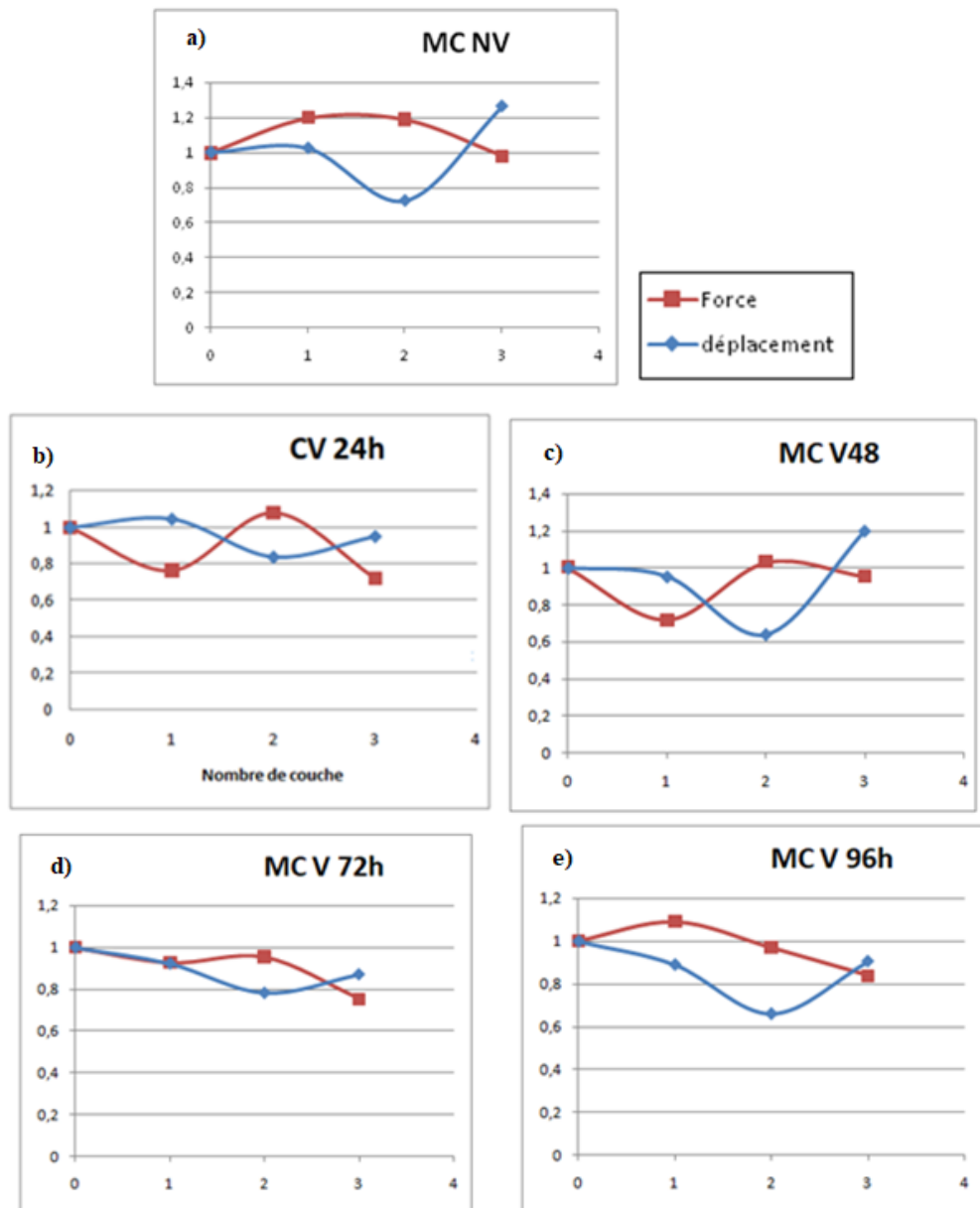


Figure IV.45: Influence du nombre de couche sur le comportement du MC

a) MC non vieilli, b) MC vieilli 24h, c) MC vieilli 48h, d) MC Vieilli 72h

et e) MC V 96h

➤ **Matériaux composites non vieillis :**

En comparant la valeur de la force des matériaux composites avec celle de la résine seule, figure IV.45 a), nous remarquons que la force augmente avec l'augmentation du nombre de couche de mat 600. L'ajout du roving (N=3) la force diminue à cause du délaminage.

Pour le déplacement, il est à l'inverse de la force, il diminue pour le composite bicouches, et augmente considérablement pour le composite tricouches.

➤ **Matériaux composites vieillis :**

- Pour les vieillissements de 24h, 48h et 72h (courbes: b), c) et d) de la figure IV.45) , nous remarquons que le matériaux composites monocouche a une force plus faible que celle de la résine, le vieillissement du monocouche est un traitement de relaxation des contraintes.
- Le matériau composite bis couches possède la plus grande force par rapport à la résine seule dans le cas du vieillissement 24h et 48 h.
- Pour le matériau composite vieilli 96h, c'est le matériau composite, le monocouche qui présente la plus grande force, celle ci diminue par la suite pour le matériau composite bicouches puis pour le matériau composite ttricouches.

4.Résultats de la calcination de nos matériaux composites

L'essai de calcination nous permet de connaitre le taux de renfort dans le matériau composite.

Nous calculons le pourcentage de fibre dans le matériau composite par la formule (IV.1) donnée ci-dessous :

$$M_f = \left(1 - \frac{Me - mf}{Me}\right) * 100 \quad (IV.1)$$

Dans les tableaux ci-dessous, Tableaux IV.2, IV.3, IV.4, IV.5 et IV.6, nous regroupons les résultats de l'essai de calcination des différents matériaux élaborés.

Tableau IV.2 Résultats des échantillons non-vieillis

Echantillon (E)	Poids de E	Poids E+Creuset	Poids C+F	Poids F	% de fibre
Monocouche 1	1,81822	19,29118	17,65526	0,18192	9.4335
Monocouche 2	1,86331	20,73977	19,03944	0,16251	
Bicouches 1	1,92021	19,43649	17,83672	0,32044	15.6745
bicouches 2	1,72941	18,82430	17,39197	0,29708	
Tricouches 1	1,63141	16,39639	15,20446	0,65143	32.522
Tricouches 2	1,64111	19,07017	17,84063	0,41212	

Tableau IV.3 Résultats des échantillons vieillis 24h

Echantillon (E)	Poids de E	Poids E+Creuset	Poids C+F	Poids F	% de fibre
Mono couche 1	1,31349	19,11786	17,93345	0,12898	10.3065
Mono couche 2	1,58322	20,45655	19,04411	0,17087	
S deux couches 1	1,66408	19,66542	18,31688	0,31516	18.5065
S deux couches 2	1,63514	19,84233	18,50771	0,29552	
S trois couches 1	1,27816	18,75092	17,78688	0,31354	23.5485
S trois couches 2	1,56976	20,44653	19,23115	0,35422	

Tableau IV.4 Résultats des échantillons vieillis 48h

Echantillon (E)	Poids de E	Poids E+Creuset	Poids C+F	Poids F	% de fibre
Monocouche 1	1,54838	16,30145	14,89876	0,14569	9.597
Monocouche 2	1,43373	18,86217	17,56878	0,14027	
Bicouches 1	1,83077	19,34745	17,84827	0,33199	17.8005
Bicouches 2	1,75633	18,85345	17,40166	0,30677	
Tri couches 1	1,61761	19,42173	18,22135	0,40903	23.6845
Tricouches 2	1,64578	20,51845	19,23666	0,36342	

Tableau IV.5 Résultats des échantillons vieillis 72h

Echantillon (E)	Poids de E	Poids E+Creuset	Poids C+F	Poids F	% de fibre
Monocouche 1	1,65789	19,87005	18,14901	0,14729	8.9065
Monocouche 2	1,68721	19,68890	18,36282	0,15063	
Bicouches 1	1,71489	19,18802	17,79126	0,31792	18.2125
Bicouches 2	1,67519	20,55175	19,17655	0,29962	
tricouches 1	1,95884	16,71178	15,16743	0,61440	26.7435
Tricouches 2	1,84077	19,26942	17,83570	0,40719	

Tableau IV.6 Résultats des échantillons vieillis 96h

Echantillon (E)	Poids de E	Poids E+Creuset	Poids C+F	Poids F	% de fibre
Monocouche 1	1,68043	19,19695	17,70027	0,18399	10.5875
Monocouche 2	1,71226	18,80873	17,26998	0,17509	
Bicouches 1	1,73390	20,60676	19,15232	0,27908	16.606
Bicouches 2	1,48794	15,74732	14,51405	0,25467	
Tricouches 1	1,65232	19,65396	18,38852	0,38680	24.293
Tricouches 2	1,48439	19,69633	18,58441	0,37222	

4.1. Résultats de la de calcination des matériaux composites non vieillis

- Le matériau composite monocouche possède une quantité de renfort de 9,43% en masse.
- Le matériau composite bicouches, possède une quantité de renfort de 15,67 % en masse.
- Le matériau composite tricouches, possède une quantité de renfort de 32,52 % en masse.

Sur l'histogramme de la figure IV. 46, on remarque que plus le nombre de couches augmente, plus la quantité de fibre augmente, mais la force ne suit pas la même progression que la quantité de fibre. Nous n'avons pas une bonne adhérence entre les couches du renfort (absence de solidarisation entre les couches du renfort)

Nous pouvons déterminer le taux du roving dans le tricouche, et cela en faisant la différence entre le taux de fibres du matériau composite tricouches et le matériau composite bicouches. Pour le matériau non vieilli, nous pouvons dire que le taux du roving est de 16,84%.

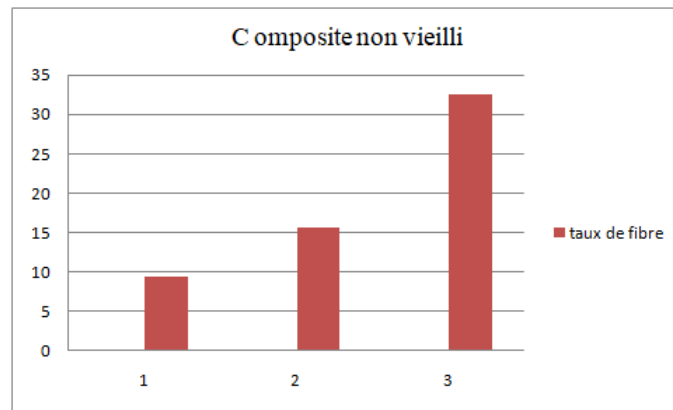


Figure IV.46: Variation du taux de fibres dans le composite non vieilli

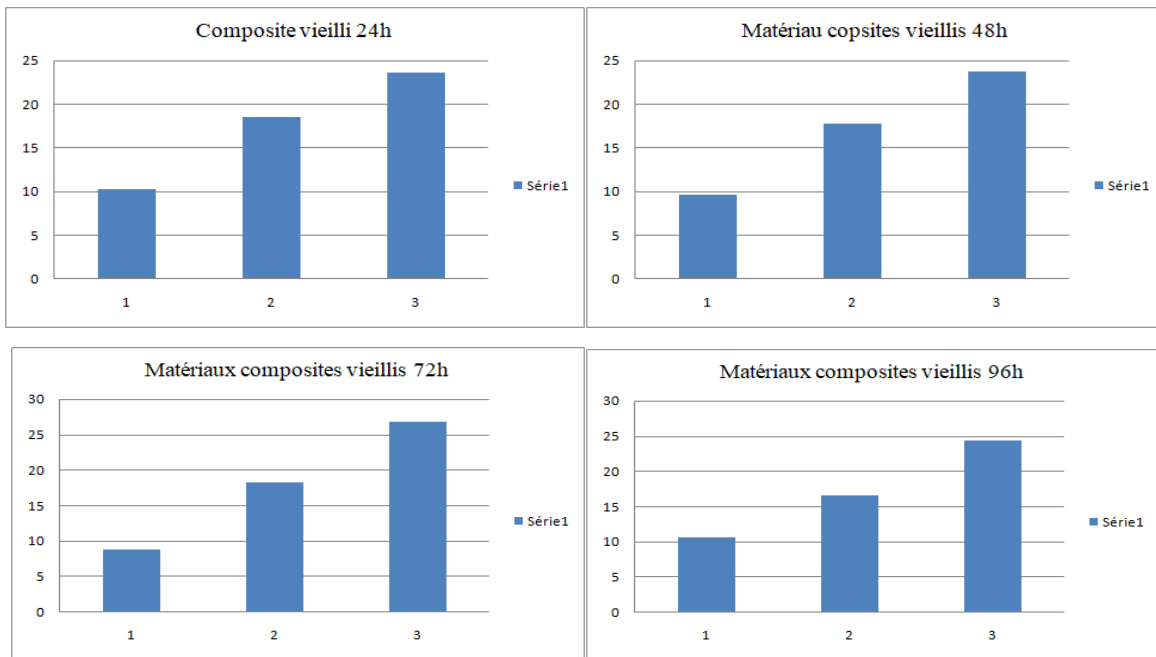
4.2. Résultats de la de calcination des matériaux composites vieillis

➤ A 24h de vieillissement

- Le pourcentage de fibre du monocouche, vieilli 24h, est de 10,30, c'est le plus grand taux de fibre pour les mono couches que nous avons élaborées.
- Le taux de renfort du bicouches est de 18,50%, la force (figure IV.45b)) dans ce cas augmente considérablement avec l'augmentation de la quantité de renfort.
- Le taux de renfort du tricouches est de 23,54%, la quantité de fibre a augmenté, mais la force supporté est plus faible que celle de la résine et des autres matériaux composites élaborés.

En comparant le taux de fibres dans le composite bicouches et le composite tricouches, nous remarquons que la couche roving dans ces cas est plus légère que pour le cas composite non vieilli.

NB : - l'influence de l'augmentation du taux de fibre dans le matériau composite n'est pas très observée, sauf dans le cas du monocouche vers le bicouches, où l'on constate l'augmentation de la force avec l'augmentation de la quantité de fibre et cela pour les composites : non vieillis, vieillis 24h, 24h et 72h, pour le vieillissement de 96h, plus la quantité de fibre augmente plus la force diminue.



- **Figure IV.47:** Variation du taux de fibres dans les composites vieilliss

5. Résultats de la micro dureté des matériaux composites

L'essai de micro dureté nous permet de connaître la dureté des phases existant dans un matériau hétérogène.

5.1. Résultats de la micro dureté de la résine

Dans le tableau IV.7 nous notons les résultats de la micro dureté de la résine en fonction du vieillissement.

Tableau IV.7 Valeur de la micro dureté des matériaux composites

Temps de vieillissement	Premier test (HV)	Moyenne (HV)
0h	22,40	28,66
	28,80	
	34,70	
24h	31.70	31,90
	28.40	
	35.60	
48h	33.70	31,6
	29.50	
	/	
72h	17.80	17,2
	19.90	
	14.00	
96h	11.60	10,81
	9.53	
	11.30	

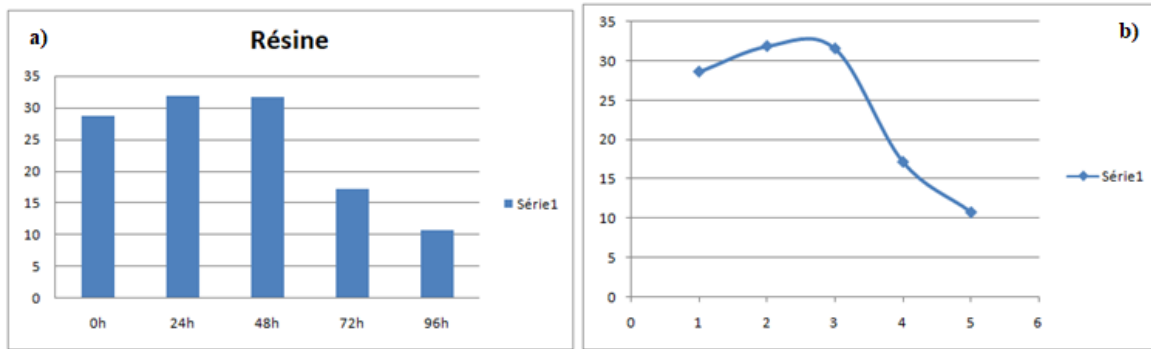


Figure IV.48: Variation de la micro dureté de la résine en fonction du vieillissement

a) L’histogramme, b) l’allure de variation

D’après la figure IV.48, la micro dureté augmente durant le premier vieillissement puis diminue pour 48h, 72h et 96h de vieillissement.

5.2. Résultats de la micro dureté des matériaux composites

5.2.1. Résultats de la micro dureté des matériaux composites monocouche

Dans le tableau IV.7 nous donnons les résultats de la micro dureté des matériaux composites mono couche.

Tableau IV.7 Valeurs de la micro dureté des matériaux composites monocouche vieilli

Temps de vieillissement	Premier test (HV)	Moyenne (HV)
0h	45.10	40,15
	35.20	
	/	
24h	/	/
	/	
	/	
48h	29,50	28,60
	27,20	
	29,10	
72h	9,16	13,55
	13,80	
	17,70	
96h	10.40	10,53
	10, 40	
	10,80	

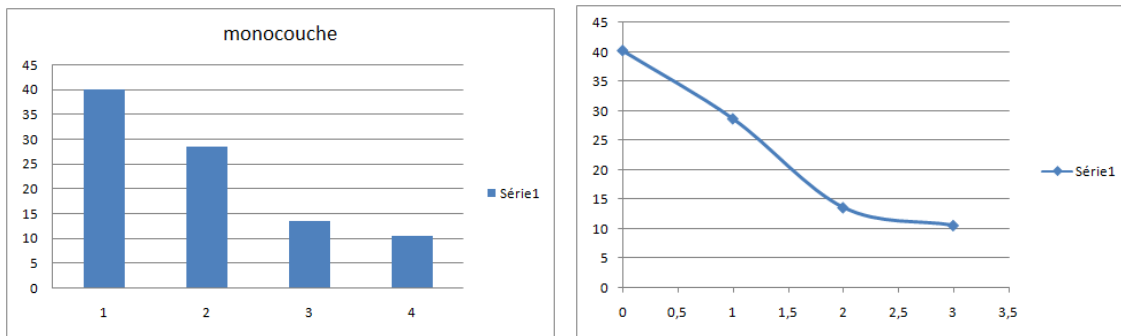


Figure IV.49: Variation de la micro dureté du matériau composite monocouche en fonction du vieillissement

La micro dureté du matériau composite monocouche évolue est décroissante avec le vieillissement.

5.2.2. Résultats de la micro dureté des matériaux composites bicouches

Nous regroupons les résultats de micro dureté des matériaux composites bicouches dans le tableau IV.8 ci-dessous.

Tableau IV.8 Valeurs de la micro dureté des matériaux composites bis couches vieilli

Temps de vieillissement	Résultats du test (HV)	Moyenne (HV)
0h	33.60	23,66
	16.90	
	20.50	
24h	/	/
	/	
	/	
48h	14.90	15,73
	16.50	
	15.80	
72h	16.80	15,6
	/	
	14.40	
96h	3.08	3,00
	3.08	
	2.85	

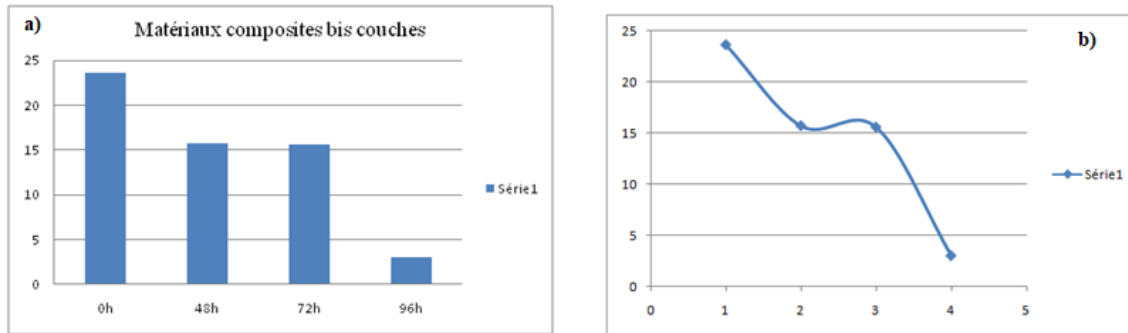


Figure IV.50: Variation de la micro dureté du matériau composite bicouches en fonction du vieillissement

La micro dureté des composites bicouches chute brusquement avec le vieillissement de 48h et 72h, elle atteint sa valeur la plus faible pour 96h de vieillissement.

5.2.3. Résultats de la micro dureté des matériaux composites tricouches (stratifié2)

Le tableau IV.9 donne la valeur moyenne de la micro dureté, une seule valeur moyenne a pu être déterminé, c’est celle du composite non vieilli, elle est de 6,90 HV.

Tableau IV.9 Valeurs de la micro dureté des matériaux composites tricouches vieilli

Temps de vieillissement	N° Teste	Micro dureté (HV)	Moyenne (HV)
0h	1	6.01	6,90
	2	6.22	
	3	8.49	

6. Conclusion

Les matériaux composites sont des matériaux hétérogènes, constitués de résines de renforts et de charges. Les matériaux composites dans notre étude sont élaborés à partir d’une résine polyester renforcés de fibre de verre. L’influence du nombre de couche de renfort et le vieillissement dans l’enceinte climatique portée à 60°C. Différents stratifiés sont élaborés et caractérisés : un monocouche (mat de 600), un bicouche (deux mat de 600) et un tri couche (deux mat 600+ roving).

➤ **Résultats obtenus pour la résine**

- La résine polyester a un comportement fragile, sa rupture s'effectue avec fragmentation de l'éprouvette. Le vieillissement de la résine améliore sa résistance, surtout à 48h de vieillissement où la force supportée par la résine est maximale.
- la micro dureté de la résine augmente avec le vieillissement de 24h puis de 48h, mais elle est en diminution pour les vieillissements de 72h et de 96h.

➤ **Résultats obtenus pour le stratifié monocouche**

- Les courbes de l'essai de flexion du monocouche montre sont des droites se terminant avec une légère courbure, le comportement mécanique reste fragile, à la différence avec la rupture de la résine, cette fois nous n'observons de fragmentation des éprouvettes.
- L'influence du vieillissement sur la force et le déplacement du monocouche est variable, les valeurs recueillies sont fluctuantes. Dès les 24h de vieillissement la force supportée par l'éprouvette chute, puis s'améliore après 48h puis chute une deuxième fois à 72h de vieillissement et s'améliore à 96h de vieillissement.
- à partir de l'essai de calcination, nous avons évalué le taux du renfort mat 600 de notre monocouche entre 8,90% en masse et 10,58% en masse.
- La micro dureté du monocouche est une fonction décroissante avec le vieillissement, il ne suit pas la même progression dans le temps que la résine seule.

➤ **Résultats obtenus pour le stratifié bicouches**

- Les courbes de flexion présentent trois allures : premièrement, une droite reflétant un comportement linéaire élastique ; la deuxième courbure est sous forme de dents de sci représentant la rupture successive de la résine et des deux couches de fibres ; la troisième allure est une courbure à tangente négative jusqu'à la rupture totale de l'éprouvette.
- les résultats du vieillissement du composite bicouches sont semblables aux résultats de vieillissement du monocouche.
- à partir de l'essai de calcination, nous avons évalué le taux du renfort mat 600 de notre bicouche entre 15,67% en masse et 18,50% en masse.
- la micro dureté du matériau composite bicouches est une fonction décroissante avec le vieillissement.

➤ **Résultats obtenus pour le stratifié tricouches**

-l'allure des courbes forces –flèche du matériau composite tricouches est ressemblante à l'allure des courbes des matériaux composites bicouches, mais la force supportée est plus faibles et la déformation plus importante.

- Le vieillissement jusqu'à 96h du composite tricouches donne les mêmes résultats que le vieillissement des composites monocouches et du bicouches.

- - à partir de l'essai de calcination, nous avons évalué le taux du renfort mat 600 plus le roving de notre tricouches entre 32,52 % en masse et 23,54 % en masse.

- une seule valeur de la micro dureté du tricouches est déterminée, elle correspond à la micro dureté du matériau bicouches non vieilli, pour les matériaux vieilli la micro dureté tend vers zéro.

Conclusion Générale

Notre intérêt pour les matériaux composites nous a conduits à nous intéresser de plus près à leurs élaborations et leurs caractérisations pour essayer de cerner leurs comportements mécaniques. Plusieurs paramètres peuvent influencer ce comportement :

- Les constituants (la matrice, le renfort et la charge) ;
- l'environnement où ils évoluent (la température, les agents chimiques et les conditions de service) ;
- Le vieillissement qui peut être bénéfique, à court terme, en stabilisant les structures, mais à long terme les phénomènes ne sont pas très connus.

Notre étude, est une étude comparative entre des matériaux composites au cours du vieillissement.

Nous avons élaborés des stratifiés dont la matrice est une résine polyester insaturée, renforcée en fibre de verre (mat 600 et roving). Les éprouvettes de la résine et des différents stratifiés ont été vieillis à des durées de 24h, 48h 72h et 96h dans une étuve climatique à 60° C.

Nous concluons de notre étude que :

- Les Les matériaux composites sont des matériaux hétérogènes dont le comportement mécaniques est différent de celui d'un matériau homogène.
- La résine polyester a un comportement fragile, sa rupture s'effectue avec fragmentation de l'éprouvette. Le vieillissement de la résine améliore sa résistance, surtout à 48h de vieillissement où la force supportée par la résine est maximale.
- la micro dureté de la résine augmente avec le vieillissement jusqu'à 48h puis diminue.
- la stratification renforce la résine à condition qu'il y ait une bonne interpénétration fibres des différentes couches entre elles.
- Le comportement mécanique du monocouche reste fragile, à la différence avec la rupture de la résine, cette fois nous n'observons pas de fragmentation des éprouvettes.
- La rupture du matériau composite bicouches et du tricouches se fait par étapes,
- Le comportement mécanique des stratifiés vis-à-vis du vieillissement est différents.

Reference bibliographique

- [1], V.Pauchard, H.Boulharts, F.Grosjeani, P.Odru, A.Chateau Minois « Développement d'un modèle de durabilité de poutres composites unidirectionnelles renforcées par des fibres de verre », Rev, IFP, Vol.56, No.6, pp.581-595, 2001.
- [2] Jean Marie Berthelot. Matériaux composites, Comportement mécanique et analyse des structures, 4ème Edition. Lavoisier 2005.
- [3] Hajira Saadaoui, « Evaluation des endommagements thermiques et mécaniques du composite Graphite /Epoxyde par Emission Acoustique », Thèse, Ecole de Génie Mécanique, Université de Moncton, 1996.
- [4] M.Laarej, «Etude par spectroscopie RAMN et modélisation d'un Résine composite RTM», thèse de doctorat, Université Aboubakr Belkaid_tlemcen,2010.
- [5] Rouam Kamilia. Mémoire de Magister. Elaboration, caractérisation mécanique et hydrothermique d'un stratifié renforcé par des fibres naturelles, Université M'hamed Bougara, Boumerdes, 2014.
- [6] M. Geier ,D. Duedal (1985). Guide pratique des matériaux composites. Technique et Documentation, Paris.
- [7] J.Weiss et C.Bord, « les matériaux composites », (Tomes 1), éditions de l'usine, 1985.
- [8] Kjherbouche Laaziz. Mémoire de Magister, Introduction aux modélisations et aux méthodes de calcul des matériaux composites, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2010.
- [9] Yves.Perrot, « Influence des propriétés de la matrice sur le comportement mécanique de matériaux composites Verre/Polyester utilisés en construction navale de plaisance », Thèse, Université de Bretagne Sud, 2006.
- [10] F.Gouanvé, S.Marais, M. Métayer," Composites polyester insaturé renforcés par des fibres de lin", composites et matériaux avancées, Vol.16, pp.117.128 ,2006.
- [11] L. Berreur, B. d. Maillard, and S. Nösperger, "L'industrie française des matériaux .
- [12] Joel Cugnoni, « Identification par recalage modal et fréquentiel des propriétés constitutives de coques en matériaux composites », Thèse, Ecole Polytechnique fédérale de Lausanne, 2005.
- [13] Mark(C) et Taylor, « The fitting woven clothto surfaces », Journal of Text institut, 1956.
- [14] i. rts ng d elaborationg caractérisation mécanique et h grothermique d un strati fié renforcé par des fibres naturelles », Mémoire de Magister, université de M'Hamed AtsG r ,Aoumerdes ,2014.

- [15] fiéi. rts ng d elaborationg caractérisation mécanique et h grothermique d un strati renforcé par des fibres naturelles », Mémoire de Magister, université de M'Hamed ,Aoumerdes ,AtsG r 2014.
- [16] A.V.NGUYEN ,Matériaux composites à renfort végétal pour l'amélioration des performances des systèmes robotique », thèse de doctorat, université blaise pas calclermont II,2015.
- [17] MEZZOU Aghilas, mémoire de fin d'étude, étude d'une sollicitation hors axe d'un composite unidirectionnel (verre/époxyde) : cas de la traction, université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2012.
- [18] HAMMAL Lynda, étude du comportement mécanique d'un stratifié, université Mouloud MAMMERI de Tizi-Ouzou, 2009.
- [19] Techniques de l'Ingénieur, Essais des plastiques renforcés, 1997
- [20] Ibrahim Mohamed Haisam, Elaboration des matériaux composites modèles uni filaire à fibres longues et matrice silice sil-gel et caractérisations micromécaniques de l'interface, Thèse de doctorat Lyon 1997. Marc Moreau, Directeur de recherche CNRS, Université Paul Sabatier de Toulouse
- [21] GASMI Bouthayna, Mémoire de fin d'étude, Influence du vieillissement naturel et artificiel sur les propriétés mécaniques du polyamide PA 6-6, Université du 8 mai 1945 Guelma Faculté des Sciences et de la Technologie Département de Génie Mécanique, : Dr. BELBAH Ahmed, 2019/2020.