

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique

Université MOULOUD MAMMERY - Tizi-Ouzou



Faculté du Génie de la Construction
Département Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'Etudes en Vue de l'Obtention du Diplôme

'Master En Génie Mécanique'

Option : Génie des matériaux

Thème

Influence de la charge d'aluminium recyclé sur
le comportement mécanique de stratifié

Proposé et dirigé par :

M^{me} . MOHELLEBI Fadila

Co-promotrice

M^{me} MANSSOURI Lila

Etudié par :

YAHIAOUI Zohra

OUALI Safia

Promotion 2021-2022

REMERCIEMENTS

Nous remercions en premier lieu le Bon Dieu pour nous avoir donné le courage d'aller au bout de notre objectif.

Nous remercions profondément notre promotrice Madame MOHELLEBI Fadila, pour avoir accepté de diriger notre travail, par son soutien et ses conseils pertinents qui nous ont permis de travailler tranquillement.

Nous adressons nos plus vifs remerciements et reconnaissances à Madame MANSOURI Lila pour sa disponibilité et sa précieuse aide.

Nous remercions profondément les membres du jury qui nous ont fait l'honneur d'examiner notre travail.

Nous remercions les membres des laboratoires de l'université UMMTO, Laboratoires (GDM Génie Mécanique, RDM Génie Civil et le Hall Technologie Oued Aissi).

Nous remercions les membres des laboratoires de l'EI (AZAZGA).

Nous remercions les responsables de la société privée LORNCHIMICAL sise à la Gare Omar Bouira.

*Nous remercions les responsables de la société privée ZEMOURI MARINE
Nous remercions nos camarades de la promotion GDM 2021-2022 pour leur soutien.*

Nos sincères remerciements vont à tous nos enseignants.

Nos remerciements vont également à tous ceux et celles qui de près ou de loin, nous ont porté aide et encouragement.

DEDICACES

Je dédie ce travail :

*A mes chers parents qui m'ont toujours soutenue tout au long de mes
études.*

A mes très chers frères et sœurs ;

A mes chers grands parents ;

A toutes les personnes que j'aime ;

A tous mes ami(e)s.

ZOHRA

DEDICACES

Je dédie ce travail :

*A mes chers parents qui m'ont toujours soutenue tout au long de mes
études.*

A mes très chers frères et sœurs ;

A toutes les personnes que j'aime ;

A tous mes ami(e)s.

SAFIA

Liste des figures

Figure I.1. Schéma d'un composite.....	3
Figure I.2. Les constituants d'un matériau composite	5
Figure I.3. Les différents types des matrices	6
Figure I.4. Les différentes formes des renforts de verre	7
Figure I.5. Principaux matériaux de renforts.....	8
Figure I.6. Les différentes fibres	11
Figure I.7. Composite monocouche.....	13
Figure I.8. Composite stratifiés	13
Figure I.9. Constitution d'un sandwich.....	14
Figure I.10. Principe de moulage au contact.....	15
Figure I.11. Principe de moulage par protection	16
Figure I.12. Moulage sous vide	17
Figure I.13. Principe de moulage par injection de résine	17
Figure I.14. Principe de moulage par compression.....	18
Figure II.1 : a) Profilets d'aluminium pur b) recyclats d'aluminium.....	19
Figure III.3 : Traction hors axes.....	29
Figure III.4 : Courbe de traction conventionnelle.....	35
Figure III.5 : Essai de flexion trois points	36
Figure III.6 : Courbe de contrainte déformation en flexion	36
Figure III.7 : Mouton pendule de Charpy.....	37
Figure IV.1. La résine à l'état liquide.....	41
Figure IV.2. Le durcisseur	42
Figure IV.3. Les différents renforts utilisés ; a) Mat 600g/m ² ; b) Taffetas 800g/m ²	42
Figure IV.4. Les chutes d'aluminium : a)avant et b) après recyclage.....	42
Figure IV.5. La fraiseuse utilisée pour la fabrication de copeaux d'aluminium.....	43
Figure IV.6. Sélection de la charge d'aluminium	43
Figure IV.7. Elaboration du stratifié	44
Figure IV.10. Eprouvette de flexion.....	46
Figure IV.11. Une scie à disque diamanté.....	46
Figure IV.12. La polisseuse	46

Figure IV.12. Géométrie de l'éprouvette de l'essai de flexion trois points	47
Figure IV.13. a) La machine de flexion utilisée, b) Eprouvette prête à l'essai	48
Figure IV.14. Eprouvettes de flexion	49
Figure IV.15. Courbe de flexion	49
Figure IV.16. Mouton pendule (machine d'essai de résilience)	50
Figure V.1 : Courbe force/ flèche pour la résine seule.....	58
Figure V.2. Courbe force /flèche d'un composite constitué d'une couche en mat.....	59
Figure V.3. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué de deux couches en mat.....	60
Figure V.4. Courbe force / flèche d'un composite/trois couches (mat+ taffetas + mat).....	61
Figure V.5. Courbe force / flèche des éprouvettes en polyester chargés 5% AL G1	62
Figure V.6. Courbe force / flèche des éprouvettes en polyester chargés 10 % d'Al G1.....	63
Figure V.7. Courbe force / flèche des éprouvettes en polyester chargés 5% AL G2.....	64
Figure V.8. Courbe force / flèche des éprouvettes en polyester chargés 10% AL G2.....	65
Figure V.9. Courbe force / course d'un stratifié constitué d'une couche mat chargé 5% G1...	66
Figure V.10. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué de deux couches mat chargé 5% G1. ...	66
Figure V.11. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué de trois couches chargé 5% G1. ...	67
Figure V.12. Courbe force / course d'un stratifié constitué d'une couche mat chargé 10% G1.	68
Figure V.13. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué deux couches mat chargé 10% G1.	68
Figure V.14. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué trois couches chargé 10% G1	68
Figure V.15. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué d'une mat chargé 5% G2.	69
Figure V.16. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué deux couches mat chargé 5% G2. ...	70
Figure V.17. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué trois couches chargé 5% G2.....	70
Figure V.18. Courbe force / course d'un stratifié constitué d'une couche mat chargé 10% G2.	71
Figure V.19. Courbe force /flèche d'un stratifié constitué deux couches mat chargé 10% G2.	71
Figure V.20. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué trois couches chargé 10% G2.....	72
Figure V.21. Résilience des composites chargés des différentes granulométries.....	74
Figure V.22. Résilience des stratifiés chargés de différentes granulométries à 5%.	74
Figure V.23. Résilience des stratifiés chargés de différentes granulométries à 10%.	75
Figure V.24. Variation de la résilience des matériaux chargés en fonction de taux de charge pour G1.	76
Figure V.25. Variation de la résilience des matériaux chargés en fonction de taux de charge pour G2.....	76

Figure V.27. <i>Présentation comparative des propriétés mécanique.</i>	78
Figure V.28. <i>Propriétés mécanique en fonction de nombre de couches.</i>	79
Figure V.29. <i>Présentation comparative des propriétés mécanique pour 5% et 10% d'AL recyclé..</i> 80	
Figure V.30. <i>Variation des propriétés mécanique des composites en fonction de taux de charges d'Al recyclé.</i>	81
Figure V.31. <i>Présentation de la force maximale en flexion des stratifiés renforcés d'une couche de mat non chargé et chargé d'Al recyclé.</i>	82
Figure V.32. <i>Présentation de la flèche maximale en flexion des stratifiés renforcés d'une couche de mat non chargés et chargés d'AL recyclé.</i>	83
Figure V.34. <i>Présentation de la force maximale en flexion des stratifiés renforcés de deux couches de mat non chargés et chargés d'AL recyclé.</i>	83
Figure V.35. <i>Présentation de la flèche maximale en flexion des stratifiés renforcés deux couches de mat non chargés et chargés d'AL recyclé.</i>	84
Figure V.36. <i>Présentation de la force maximale en flexion des stratifiés renforcés de trois couches non chargés et chargés d'AL recyclé.</i>	84
Figure V.37. <i>Présentation de la flèche maximale en flexion des stratifiés renforcés de trois couches non chargé et chargé d'AL recyclé.</i>	85
Figure V.38. <i>Variation adimensionnelle de la force à rupture des différents composites.</i>	86
Figure V.39. <i>Variation adimensionnelle de la force à rupture des différents composites</i>	86
Figure V.40. <i>Caractéristiques de résilience et de flexion des différents composites chargés . 5% d'AL GI</i>	87

Liste des tableaux

Tableau I.1. Quelques compositions de verre E, D, R.....	9
Tableau I.2. Avantages et inconvénient de la fibre de verre E, D et R.....	9
Tableau II.1. Avantages et inconvénients de la matrice thermoplastique	22
Tableau II.2. Comparatif entre les résines.	23
Tableau IV.1. Présentation des matériaux de référence.....	45
Tableau IV.4. Fiche technique du mouton pendule	50
Tableau V.1. Valeurs de résilience pour polyester chargé 5% d'AL G1.....	52
Tableau V.2. Valeurs de résilience pour polyester chargé 5% d'AL G2.	52
Tableau V.3. Valeurs de résilience pour composite chargé 10% d'AL G1.	52
Tableau V.4. Valeurs de résilience pour polyester chargé 10% d'AL G2.	53
Tableau V.5. Valeurs de résilience d'un composite /1 couche de mat chargé 5% d'Al G1.	53
Tableau V.6. Valeurs de résilience d'un composite /1 couche de mat chargé 5% d'Al G2.	54
Tableau V.7. Valeurs de résilience d'un composite /1 couche de mat chargé 10% d'Al G1.	54
Tableau V.8. Valeurs de résilience d'un composite /1 couche de mat chargé 10% d'Al G2.	54
Tableau V.9. Valeurs de résilience d'un composite /2 couches de mat chargé 5% d'AL G1. ...	55
Tableau V.10. Valeurs de résilience d'un composite /2 couches de mat chargé 5% d'AL G2. .	55
Tableau V.11. Valeurs de résilience d'un composite /2 couches de mat chargé 10% d'AL G1.	56
Tableau V.12. Valeurs de résilience d'un composite /2 couches de mat chargé 10% d'Al G2..	56
Tableau V.13. Valeurs de résilience d'un stratifié (mat+ taffetas + mat) chargé 5% d'AL G1.....	57
Tableau V.14. Valeurs de résilience d'un stratifié (mat+ taffetas + mat) chargé 5% d'AL G2.	57
Tableau V.15. Valeurs de résilience d'un stratifié (mat+ taffetas + mat) chargé 10% d'AL G1.....	57
Tableau V.16. Valeurs de résilience d'un stratifié (mat+ taffetas + mat) chargé 10% d'AL G2.....	57
Tableau V.17. Propriétés mécaniques en flexion de la résine polyester seule.....	58
Tableau V.18. Propriétés mécaniques en flexion d'un composite constitué d'une couche en mat....	59
Tableau V.19. Propriétés mécaniques en flexion d'un stratifié constitué de deux couche en mat.....	60

Tableau V.20. Propriétés mécaniques d'une composite/trois couche (mat+ taffetas + mat).	61
Tableau V.21. Propriétés en flexion des éprouvettes en polyester chargés 5% d'AL G1.	62
Tableau V.22. Propriétés en flexion des éprouvettes en polyester chargés 10% d'AL G1	63
Tableau V.23. Propriétés en flexion des éprouvettes en polyester chargés 5% d'AL G2.	63
Tableau V.24. Propriétés en flexion des éprouvettes en polyester chargés 10% d'AL G2	64
Tableau V.25. Propriétés en flexion des stratifiés chargés 5% AL G1.	65
Tableau V.26. Propriétés en flexion des stratifiés chargés 10% d'AL G1.	67
Tableau V.27. Propriétés en flexion des stratifiés chargés 5% d'ALG2.	69
Tableau V.28. Propriétés en flexion des stratifiés chargés 10% AL G2.	70
Tableau V.29. Valeurs moyennes de la résilience de différents matériaux.	73
Tableau V.30. Propriétés mécaniques de différents lots	77
Tableau V.31. Propriétés mécaniques de différents stratifiés	78
Tableau V.32. Propriétés mécaniques de différents composites chargés d'aluminium recyclé .	80
Tableau V.33. Propriétés mécaniques de différents stratifiés contenant du recyclé	82

Sommaire

Introduction	1
--------------------	---

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

1. Introduction	3
2. Définition d'un matériau composite.....	3
3. Intérêt des matériaux composites	3
4. Classification des matériaux composites.....	4
4.1. Classification suivant la forme	4
4.1.1 Composite à fibres.....	4
4.1.2. Composites à particules.....	4
4.2. Classification suivant la nature	5
5. Les constituants d'un composite	5
5.1. La matrice.....	5
5.2. Les renforts.....	6
5.2.1. Différents types de renfort.....	6
5.2.2 : Différentes natures de renfort.....	7
5.2.2.1 : Avantages et inconvénients.....	9
5.3 Les charges et les additifs.....	11
5.3.1. Les charge	11
5.3.2. Les additifs	12
6. Architecture du composite	12
6.1. Monocouche	13
6.2. Stratifiés	13
6.3. Sandwichs.....	14
7. Les procédées de fabrication	15
7.1. Les technologies dites en moule ouvert	15
7.1.1 Moulage au contact	15
7.1.2 Moulage par projection simultané.....	16
7.2. Les technologies en moule fermé.....	17

7.2.1. Moulage sous vide.....	17
7.2.2. Moulage par transfert de résine (RTM- Resin Transfert Molding).....	18
7.2.3. Moulage par injection de compound BMC	18
7.2.4. Moulage par compression de mat pré imprégné SMC	18
8. Domaines d'utilisation des matériaux composites	19
Conclusion.....	20

Chapitre II : Résines et charges

1. Introduction	21
2. Les résines	21
2.1. Matrices thermoplastiques.....	21
2.2. Matrices thermodurcissables	22
2.2.1. Résine polyester	22
2.2.2. Résine époxyde	22
2.2.3. Résine phénolique	23
2.3. Les résines polyesters.....	24
2.3.1. Historiques	24
2.3.2. Les propriétés de la résine polyester	24
2.3.2.1. La mise en œuvre des résines polyesters.....	24
2.3.2.2. La résistance	25
2.3.3. Types de résines polyesters	25
2.3.3.1. Les résine orthophtaliques.....	25
2.3.3.2. Les résine isophtaliques	26
2.3.3.3. Les résines DCPD	26
2.3.3.4. Les résine bisphénol A-fumarate.....	26
2.4. Utilisation de la résine polyester	26
2.4.1. Résine sans renfort	26
2.4.2. Résines renforcées.....	27
2.5. Méthode d'élaboration	27
3. La charge d'aluminium	28

3.1. Généralité	28
3.2. Historique	28
3.3. Propriétés de l'aluminium	29
3.3.1. Propriété physicochimique	29
3.3.2. Propriétés mécaniques	29
3.4. Utilisation de l'aluminium	31
Conclusion.....	32

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composites

1. Introduction	33
2. Propriétés physique et mécaniques des composites	33
2.1. Propriétés physiques.....	33
2.1.1 Loi des mélanges	33
2.1.2. Densité des matériaux composites	33
2.2. Propriétés mécaniques.....	34
2.2.1. Essais de traction	34
2.2.2. Essai de flexion	38
2.2.3. La résilience	40
Conclusion.....	40

Chapitre IV : Techniques expérimentales

1. Introduction	41
2. Matériaux utilisés	41
2.1. Constituants.....	41
2.1.1 Résine et durcisseur	41
2.1.2 Les renforts	42
2.1.3. La charge	42
3. Techniques d'élaboration des stratifiés	43
4. Découpage des éprouvettes	45
4.1.Géométrie des éprouvettes de flexion	45

5. Techniques de caractérisation	47
5.1 Caractérisation mécanique	47
5.1.1. Essai de flexion	47
Conclusion.....	50

Chapitre V : Résultats et discussions

1. Introduction	51
2. Présentation des résultats	51
2.1. Pour l'essai de la résilience	51
2.1.1. Résine polyester chargée d'AL recyclé.....	51
2.1.2. Composites chargés d'Aluminium recyclé	53
2.2. Pour l'essai de flexion	58
2.2.1. Résultats de l'essai de flexion pour résine polyester.....	58
2.2.2. Résultats de l'essai de flexion pour les composites non chargés	59
2.2.3. Composite renforcés par l'aluminium recyclé	62
3. Discussion et interprétation des résultats	72
3. 1. Interprétation des résultats de la résilience.....	72
3.2. Interprétation des résultats de flexion	77
3.2.1. L'effet de renfort et de charge sur la résine polyester	77
3.2.2. Comportement des stratifiés en fonction de nombre de couches	78
3.3. Influence de la charge d'aluminium recyclé	79
3.3.1. Influence de la charge aluminium recyclé sur la résine polyester.....	79
3.3.2. Influence de la charge aluminium recyclé sur les stratifiés	81
Conclusion générale	88

Bibliographie

Introduction générale

Introduction générale

Le développement et l'utilisation de nouveaux matériaux est semi au besoin des constructeur ceci toujours des matériaux plus performant est plus économique qui dure très langue temps. De plus dans un souci de protection de l'environnement et de santé publique. P

Propriété physique, mécanique ne peuvent être obtenue dans des matériaux simple pris séparément pour atteindre cet objectif, les technologies moderne fond appeler a de nouveau matériaux douté de propriété que ne peuvent offrir de les matériaux traditionnelle (métaux, céramique polymère.

Les propriétés des matériaux composites dépendent de la nature, de la forme de renfort, de sa quantité introduite et de la qualité de l'interface matrice / renfort et enfin de procédé de mis en œuvre. Les matériaux constituants le composite sont généralement choisi en fonction de domaine d'application.

Les matériaux de bases utilisés dans notre travail sont des composites constitués d'une résine polyester insaturée utilisée pour la construction navale, renforcée en fibres de verre (mat 600 et roving). Nous nous sommes également intéressé à l'influence de la charge d'aluminium recyclé sur le comportement mécanique du matériau composite stratifié, d'où nous avons élaboré même composites, sauf que nous lui ajoutant de charge d'aluminium de différentes granulométries (G_1 et G_2) et taux de charges en masse. Par la suite nous avons essayé d'évaluer le comportement de nos composites par l'observation de la variation des propriétés mécanique en flexion, et en résilience selon plusieurs facteurs à savoir, nature de renfort et son architecte, le taux de charge et la granulométrie.

Afin de bien mené notre travail, nous l'avons organisé comme suit :

Le premier chapitre est consacré à une synthèse bibliographique, il comporte une présentation des matériaux composites. Il expose des généralités et des méthodes utilisées pour l'élaboration des matériaux qui font l'objet de notre étude.

Le deuxième chapitre est consacré à une recherche bibliographique sur les résines en général et sur la résine Polyester en particulier, nous avons aussi présenté l'Aluminium, qui

est la charge utilisée dans notre étude, dans le but du recyclage et de la récupération de la menuiserie Aluminium.

Dans le troisième chapitre, nous donnons quelques outils mathématiques nécessaires pour la compréhension des comportements mécaniques des composites en traction et flexion.

Le quatrième chapitre, est une présentation des techniques et procédures expérimentales utilisées pour l'élaboration et la caractérisation de nos échantillons

Dans le dernier chapitre, on présente les résultats obtenus lors de la caractérisation et l'interprétation de ces derniers. Nous avons terminé le travail par une conclusion et des perspectives.

Chapitre I

Généralités sur les matériaux composites

1. Introduction

Le développement de nouveaux matériaux est basé sur les besoins des utilisateurs (fabricants). Ils veulent toujours des matériaux plus performants, plus économiques et qui durent plus longtemps. Les chercheurs sont souvent guidés pour optimiser des solutions déjà utilisées, mais dans certains cas, ils doivent repenser complètement le problème et envisager de ‘nouveaux matériaux’. En fait, nous ne découvrons plus de nouveaux matériaux, avec des différentes constituants d’un composites.

2. Définition d’un matériau composite

Un composite est l’assemblage de deux ou plusieurs matériaux non miscibles de natures différentes, et dont les qualités se complètent afin d’obtenir un matériau hétérogène et fortement anisotrope dont les performances sont supérieurs à celle de ses constituants de base, ou mieux encore, par effets de synergie, les matériaux composites ne sont alliés, mais associés [2]. ([2] Pierre JACQUINET)

Un matériau composite nécessite l’association intime d’au moins deux composants : le renfort et la matrice, qui doivent être compatibles entre eux et se solidariser (Fig I.1), ce qui introduit la notion d’un agent de liaison, l’interface assure la compatibilité renfort matrice, transmet les contraintes d’un constituant à l’autre sans déplacement relatif.

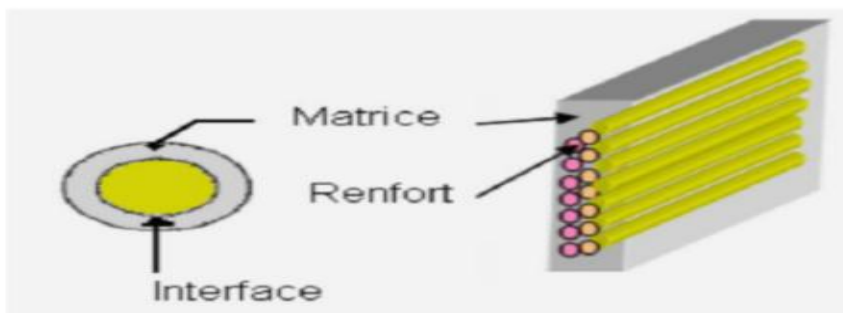


Figure I.1 : Schéma d’un composite

3. Intérêt des matériaux composites

L’utilisation des matériaux composites est générée par leur principale caractéristique :

- ❖ Les composites à matrices organique ;
- ❖ Les composites à matrices métallique ;

❖ Les composites à matrices minérales.

4. Types de matériaux composites

On distingue, généralement, deux grandes familles :

4.1. Les composites à grande diffusion (G_0)

En fonction de la forme des constituants, on distingue deux grandes classes.

4.1.1 Composite à fibres

Un matériau composite est dit à fibre, si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres se présentent sous forme continue ou discontinue. L'arrangement des fibres et leur orientation permettent de moduler les propriétés mécaniques des matériaux.

Deux grandes catégories peuvent être distinguées [2]

a) Composite à hautes performances(HP)

Sont surtout des matériaux composites à résine époxy renforcées par des fibres de verre, de carbone ou d'aramide. Ils possèdent des caractéristiques mécaniques très élevées.

b) Composites à grandes diffusions (GD)

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.

4.1.2. Composites à particules

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

Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût de matériau, sans en diminuer les caractéristiques [3]

4.2. Les composites à hautes performances (HP)

Selon la nature de la matrices, les matériaux composites sont classés en trois catégories ;

a) Composites à matrices organiques (CMO)

Ils constituent, de loin, les volumes les plus importants aujourd'hui à l'échelle industrielle

b) Composite à matrice (minérales) céramiques (CMC)

Réservés aux applications de très haute technicité et travaillant à haute température comme dans les domaines spatial, nucléaire et militaire, ainsi que le freinage (freins carbone) :

c) Composites à matrices métalliques (CMM)

Bonne ductilité, bonne résistance à certains solvants et bonne tenue en température.

5. Les constituants d'un composite

Les composites sont constitués principalement d'une phase continue appelée matrice, blindée en renfort par une phase discontinue, sont reliées à l'interface, assurant la liaison entre elles, en plus de charges qui améliorent certaines propriétés du composite. [5]

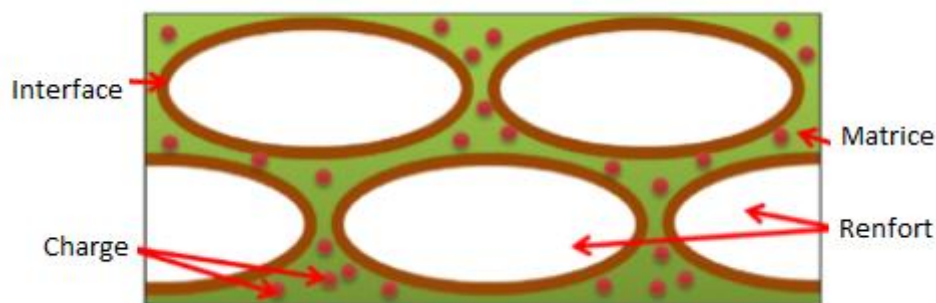


Figure I.2 : Les constituants d'un matériau composite

5.1. La matrice [6]

La matrice est la phase continue dont les fonctions sont :

- De réaliser la liaison entre les renforts de manière à répartir les sollicitations et ainsi de prévenir les ruptures catastrophiques ;
- D'assurer la protection de ces renforts vis-à-vis des agents agressifs ;

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

- De donner la forme à la pièce et garantir ses caractéristiques géométriques.

Les matrices utilisées dans les matériaux composites se divisent en deux grandes familles : les matrices organiques et les matrices inorganiques (minérales).

La **figure I.3** présente les différents types de matrices.

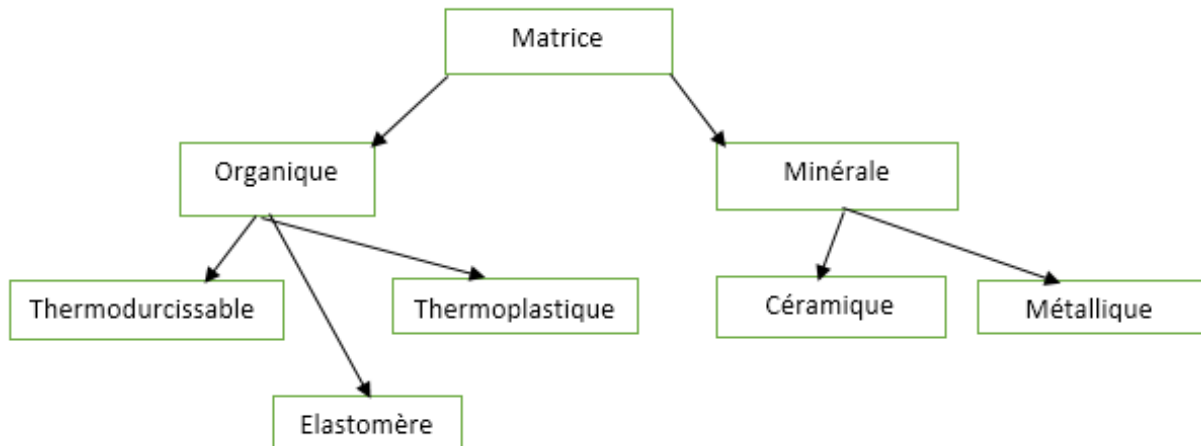


Figure I.3 : Les différents types des matrices

5.2. Les renforts

Les renforts contribuent à améliorer la résistance mécanique à la traction et à la rigidité des matériaux composites et se présentent sous forme de filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques). [7]

5.2.1. Différents types de renfort [7]

Les renforts les plus utilisés se présentent sous forme de fibres ou forme dérivées et constituent une fraction volumique de matériau composite.

Les renforts fibres se présentent sous diverses formes commerciales.

Sous forme de roving (fil, mèche, etc. ...) le roving est un assemblage de fils de bases parallèles groupés sans torsion.

Sous forme de tissus (tissus taffetas, toiles, serge, etc...) le tissu est formé par l'entrecroisement perpendiculaire des roving.

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Sous forme de mat (à fil coupé, à fil continu) : le mat est un matelas de fil coupés ou continu à ensimage plastique, agglomérés par un liant à solubilité rapide ou lente dans la résine.

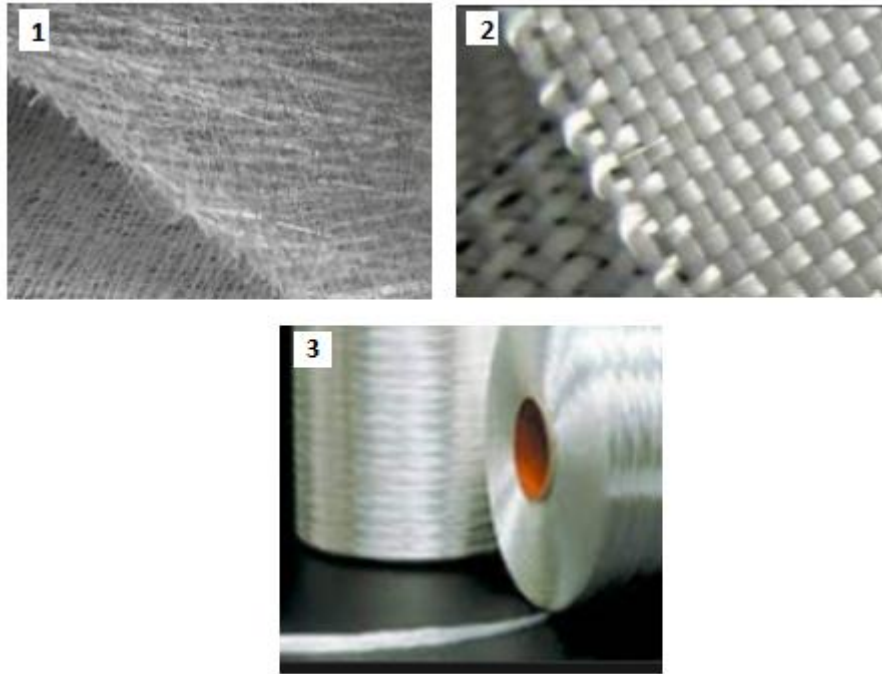


Figure I.4 : *Les différentes formes des renforts de verre*

1) mat de verre 2) tissu de verre 3) roving de verre

5.2.2 : Différentes natures de renfort [7]

Les renforts peuvent être de natures différentes, comme illustré sur la figure (I.5) qui récapitule les diverses origines des matériaux constituant les renforts.

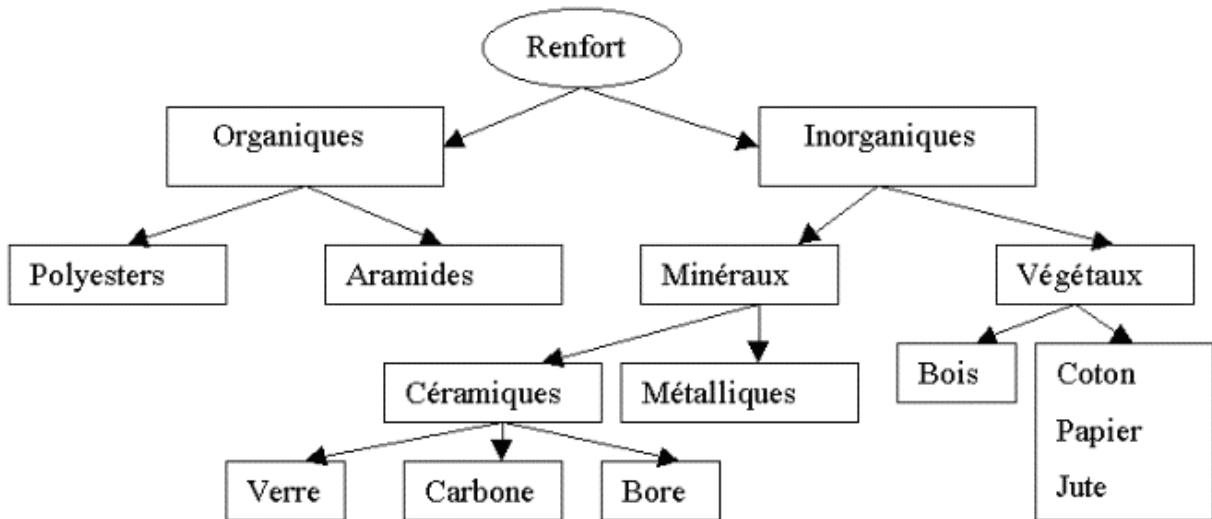


Figure I.5. Principaux matériaux de renforts

- **Les fibres de verre :**

Les fibres de verre constituent le renfort le plus utilisé actuellement pour les composites (dans plus de 95%). Elles offrent pour un prix raisonnable une bonne adhérence, de bonnes propriétés mécaniques (mais inférieures à celles de la fibre de carbone) et des propriétés d'isolation électrique acceptables pour la plupart des applications. Cependant, leurs faibles modules d'élasticité (et leurs densités qui sont supérieures à celle des fibres de carbone) limitent leurs utilisations pour la fabrication des pièces structurales (en aéronautique par exemple).

Les fibres de verre sont obtenues à partir de l'oxyde minéral (Silice, Alumine, Chaux, Magnésie, Oxyde de bore,...), on distingue plusieurs types :

- **Verre E :** à usage général avec de bonnes propriétés électriques.
- **Verre D :** il a de bonnes propriétés diélectriques pour l'utilisation en électronique (circuit imprimé).
- **Verre C :** il a une bonne résistance chimique, pour les couches superficielles des structures sur le plan chimique.
- **Verre R et S :** ont une haute résistance mécanique pour la réalisation des pièces structurales.

Les fibres de verre **E** sont les plus utilisées, le tableau suivant représente quelque composition de verre **E**, **D** et **R** :

Chapitre I : Généralités sur les matériaux composites

Tableau I.1 : *Quelques compositions de verre E, D, R*

Constituants		Composition		
		E	D	R
Silice	SiO ₂	53-54	73-74	60
Alumine	Al ₂ O ₃	14-15.5	-	25
Chaux	CaO	20-24	0.5-0.6	9
Magnésie	Mg	20-24	0.5-0.6	6
Oxyde de bore	B ₂ O ₃	6.5-9	22-23	-
Fluor	F	0-0.7		-
Oxyde de fer	Fe ₂ O ₃	<1	0.1-0.2	
Oxyde de titane	TiO ₂	<1	0.1-0.2	
Oxyde de potassium	K ₂ O	<1	1.5	
Oxyde de sodium	Na ₂ O	<1	1.3	

5.2.2.1 : Avantages et inconvénients :

On donne certaines caractéristiques des fibres de verre que nous résumons dans le tableau 4.

Tableau I.2 : *avantages et inconvénient de la fibre de verre E, D et R*

avantages	inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> -bon rapport de performance mécanique -bonne résistance spécifique (rapport résistance à la traction /densité.) -bonne adhérence avec toutes les résines (existence d'ensimage) -incombustibilité -dilatation et conductivité thermiques faibles 	<ul style="list-style-type: none"> -faible module d'élasticité (par rapport aux fibres de carbone et l'aramide). -vieillessement au contact de l'eau (problème pour les navires)

- **Les fibres de carbone**

Les fibres de carbone sont élaborées à partir d'un polymère de base appelé précurseurs, se présentant lui-même sous forme de fibres orientées et réticulées. Le plus utilisé de ces précurseurs est le Poly Acrylonitrile(PAN).

Les fibres de carbone possèdent de très bonne caractéristiques mécaniques d'autant plus que leurs masse volumique est faible (généralement inférieure à 2000Kg/m^3). En outre, il faut noter que les fibres de carbone ont une excellente tenue en température en atmosphère non oxydante.

Il est important de noter que les fibres de carbone sont sensibles à l'oxygène des 400°C (pour des applications en atmosphère oxydante, dans le domaine spatiale, ces matériaux sont revêtus d'une couche protectrice anti-oxydante). Les fibres de carbone présentent une mauvaise résistance aux chocs. Le prix de ces fibres est relativement élevé, d'ailleurs, elles sont réservées principalement pour les utilisées dans des applications structurales.

Afin d'améliorer la liaison fibre/résine, les fibres de carbone sont soumis à un traitement de surfaces. Ce dernier est suivi par un procédé d'ensimage textilo-plastique qui facilite l'accrochage de la matrice.

- **Les autres fibres**

Les autres fibres sont peu utilisées par ce que leurs caractéristiques sont moins performantes par rapport aux deux premières. On peut citer

- **Les fibres d'aramide**

Elles sont généralement connues sous le nom de **kevlar**. Elles ont une bonne résistance aux chocs, à l'impact et à l'abrasion, mais leur utilisation est limitée par leur faible résistance à la compression, à la flexion, au flambement, et elles sont sensibles au cisaillement inter laminaire (l'adhérence entre matrice et fibre est mauvaise ou moyenne).

- **Les fibres naturelles**

Comme le chanvre et le lin, ces fibres ont de bonne propriétés mécanique (module de Young peu atteindre celui du verre) pour un prix modeste, elles sont particulièrement écologique puisque ce sont des produits naturels ; mais ces fibres, présentent plusieurs verrous

techniques : elles ne sont pas fabriquées par un processus industriel, la quantité et la qualité des fibres produites dépendent de l'environnement, les fibres naturelles sont difficilement calibrable et plus difficilement manipulables.

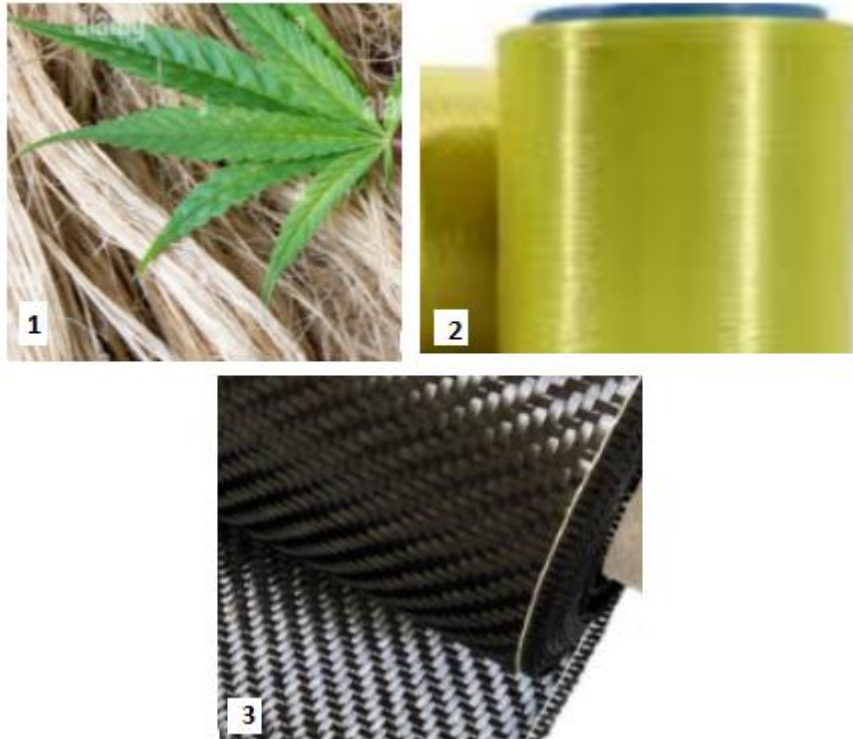


Figure I.6 *Les différentes fibres*

1) *fibre naturel (chanvre)* 2) *fibre d'aramide* 3) *fibre de carbone*

5.3 Les charges et les additifs

5.3.1. Les charge [8]

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale, ou végétale qui ajoutée à un polymère de bas, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé.

A l'inverse des matières thermoplastique, les matières thermodurcissables ont toujours contenu des charges de nature et de forme variées, à des taux souvent élevés.

Pour un matériau donné, le choix d'une charge est déterminé en fonction des modifications recherchées pour le produit fini. Mais, d'une manière générale, les substances

utilisables comme charges des matières plastiques devront d'abord satisfaire à un certain nombre d'exigences :

Compatibilité avec la résine de bas ;

- Mouillabilité ;
- Uniformité de qualité et de granulométrie ;
- Faible action abrasive ;
- Bas prix de revient.

5.3.2. Les additifs [9]

Un des additifs de grande importance est d'interface assure la cohésion et l'adhérence entre les différents constituants. Et en générale l'interface assurant la continuité entre deux matériaux, un défaut d'adhérence en genre des problèmes mécanique de la mesure où l'interface remplir une double fonction de protection des fibres contre les agressions extérieurs.

Les additifs s'ajoutent en faible quantité et interviennent comme :

- Lubrifiants et agents de démoulage ;
- Pigments et colorants ;
- Agents anti-retrait ;
- Agents anti-ultraviolets ;
- Des catalyseurs ;
- Des accélérateurs de polymérisations.

6. Architecture du composite

Les structures des composites peuvent être classées en trois types :

- Les monocouches ;
- Les stratifiées ;
- Les sandwiches.

6.1. Monocouche [10]

Représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles UD, réparties aléatoirement), à fibres tissées, à fibres courtes.

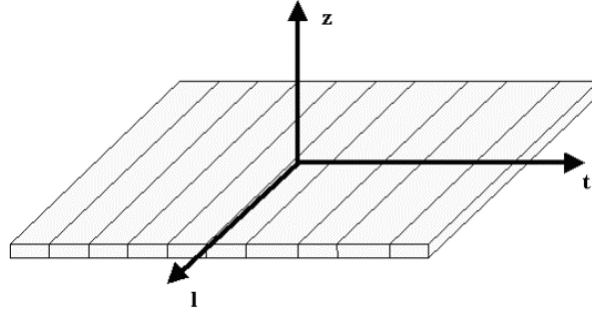


Figure I.7. Composite monocouche.

6.2. Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

En jouant sur l'ordre et l'orientation de ces couches. Il est possible d'adapter finement les propriétés mécanique du stratifié aux sollicitations extérieures, et donc d'atteindre un haut niveau d'optimisation en mettant la matière là où elle est le plus utile.

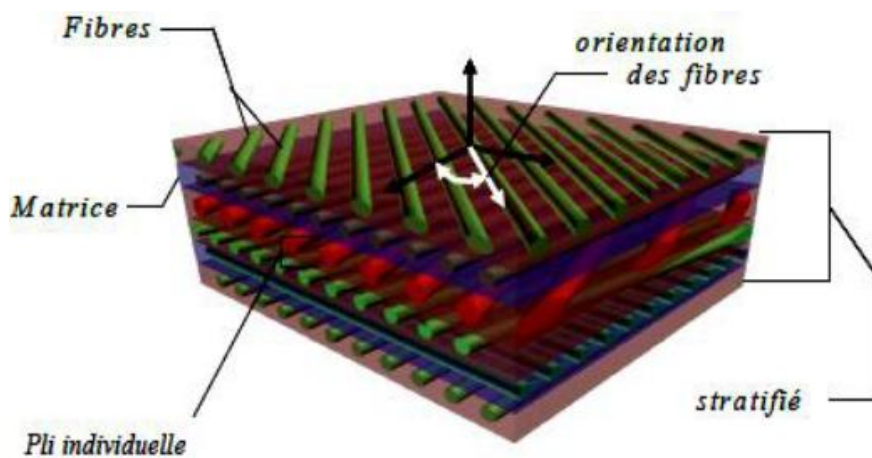


Figure I.8. Composite stratifiés [11]

Les stratifiés pouvant être de trois types des matériaux caractérisés :

a) Equilibrés

Le stratifié contient autant de couches orientées suivant la direction $+45$ que de couches suivant la direction -45

b) Symétriques

Les couches du stratifié sont disposées symétriquement par rapport à un plan moyen (miroir)

c) Orthogonaux

Le stratifié comporte autant de couches à 0° que de couches à 90° .

Lorsque la symétrie miroir est réalisée, elle entraîne la symétrie des contraintes et empêche ainsi l'apparition des déformations d'ensembles de la pièce (voilement, Gauchissement).

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.

6.3. Sandwichs

Matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande légèreté en flexion et c'est un excellent isolant thermique.

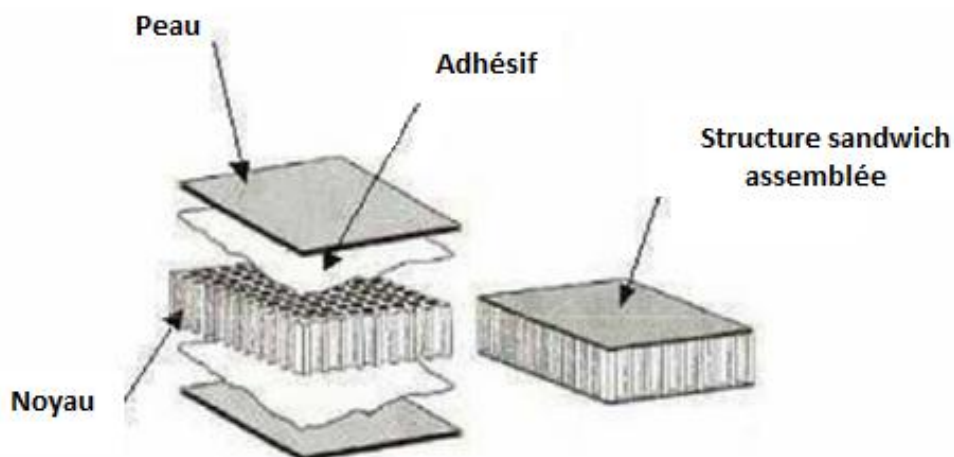


Figure I.9 : Constitution d'un sandwich.

7. Les procédés de fabrication (moulage en contact) [12]

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

De nombreuses méthodes de fabrication ont été développées pour répondre aux besoins, et leurs choix dépendent surtout des caractéristiques mécaniques dérivées et de la géométrie du produit. On peut citer :

7.1. Les technologies dites en moule ouvert

7.1.1 Moulage au contact

Le principe est de procéder manuellement à la réalisation des pièces à partir des résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression.

Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée.

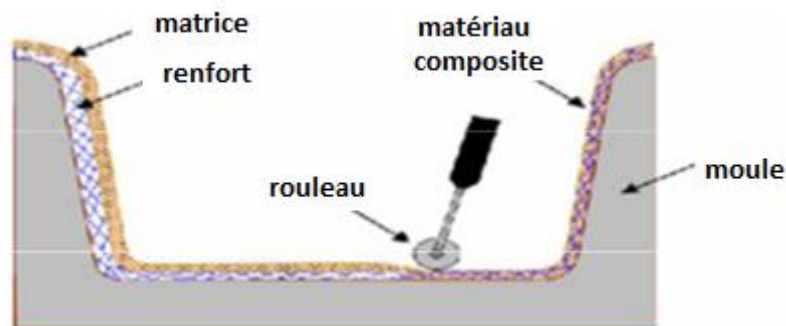


Figure I.10. Principe de moulage au contact.

Ce type de moulage représente des avantages tel que :

1. Très larges possibilités de forme
2. Pas de limite dimensionnelle
3. Une surface lisse gelcoatée (aspect, tenue à la corrosion)
4. Propriétés mécanique moyennes à bonnes

5. Investissements spécifiques très faibles
6. Moule simple, peu onéreux, rapide à réaliser en interne.

Mais aussi il se limite à :

1. Une seule face lisse
2. Nécessité de finition (détourage, perçage, etc.)
3. Qualité tributaire de la main d'œuvre
4. Faible cadence de production par moule
5. Espace de travail important

7.1.2 Moulage par projection simultané

Les matières premières sont mises en œuvre à l'aide d'une machines de projection

Comprenant :

- Un dispositif de coupe.
- Projection du renfort (roving).
- Un ou deux pistolets projetant simultanément la racine.

Les fils coupés et la résine sont projetés sur la surface du moule puis compactés et ébullés à l'aide de rouleaux et d'ébulleurs. La résine préaccélérée est catalysée en continu lors de sa projection.

Parmi les avantages associés à ce type de moulage on retrouve :

- Très larges possibilités de forme et dimensions
- Travail simplifié, suppression de la mise en forme obtenue directement par la projection
- Investissements très modérés
- Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne.

En plus des limites rencontrées par le moulage au contact, celui-ci se limite à des propriétés mécaniques moyennes.

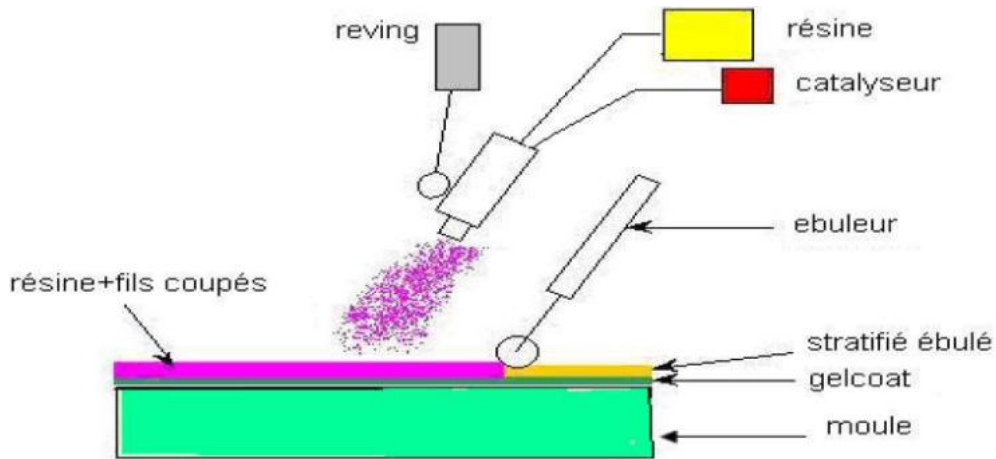


Figure I.11. Principe de moulage par protection [12]

7.2. Les technologies en moule fermé

7.2.1. Moulage sous vide

Le moulage sous vide s'effectue en utilisant un moule ouvert sur lequel on dispose les couches de renfort imprégné. Le renfort est placé à l'intérieur du moule et la résine catalysée est versée sur ce dernier, une feuille de plastique souple vient couvrir le tout hermétiquement, l'étanchéité est assurée au moyen d'un joint placé sur le périmètre. Le vide est fait sous la feuille de plastique des bulles d'air, fluage de l'excédent de résine qui est absorbé par un tissu de pompage.

L'ensemble est ensuite soumis à polymérisation en étuve ou en autoclave. La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive au vide. On utilise ce type de moulage dans le cas d'une production en petites séries de pièces nécessitant deux faces lisses

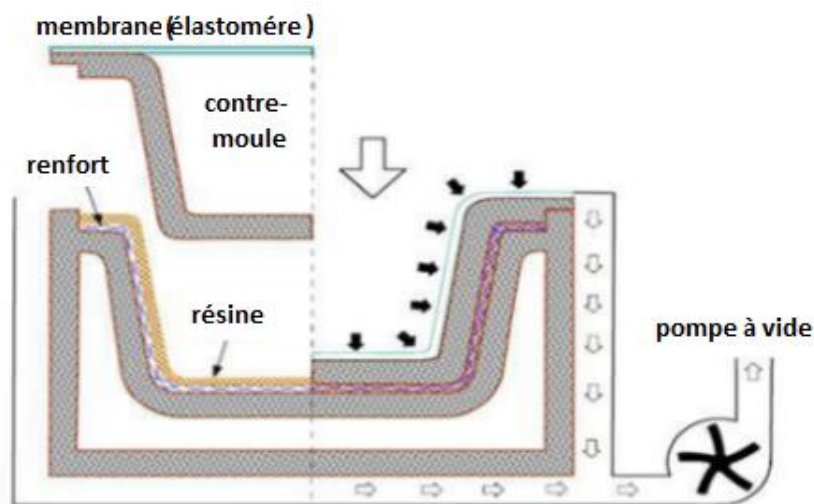


Figure I.12. Moulage sous vide [13]

7.2.2. Moulage par transfert de résine (RTM- Resin Transfert Molding)

Le moulage par transfert de résine consiste à imprégner un renfort placé à l'intérieur d'un ensemble moule et contre-moule très rigide et fermé. L'alimentation des résines est réalisée par le vide ou par l'injection de la résine. Cette méthode permet d'atteindre des taux volumiques élevés des fibres, d'où l'obtention de pièces à caractéristiques mécaniques élevées. Ce procédé de moulage convient à la réalisation de pièces profondes et de formes complexes.

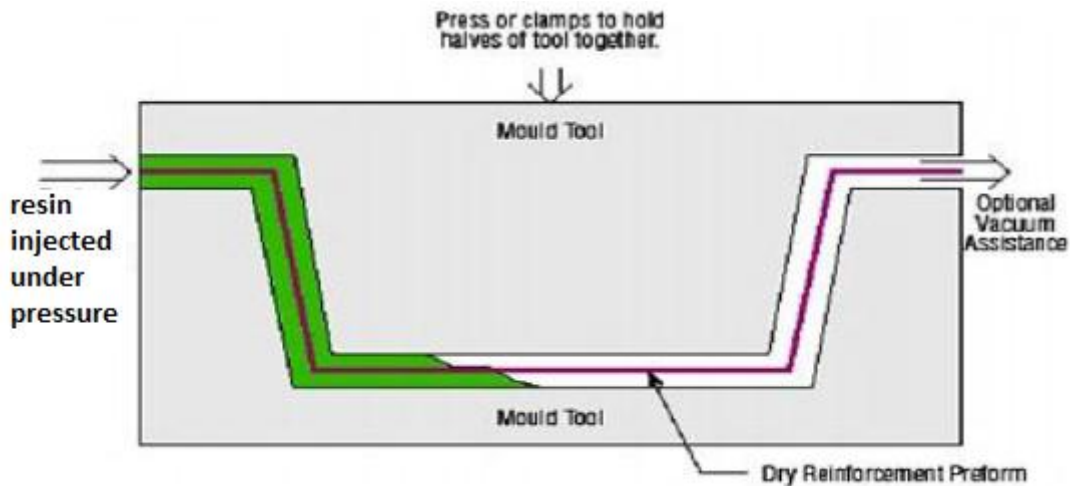


Figure I.13. Principe de moulage par injection de résine [14]

7.2.3. Moulage par injection de compound BMC

Le compound (Bulk Molding Compound), est une masse à mouler constituée de résine, de charges et d'adjuvants divers, renforcé par des fils de verre coupés. Cette masse est préparée dans un malaxeur. Le moulage se fait à chaud (130-150 °C) par injection (principalement) entre moule et contre moule en acier usiné. La pression (50 à 100 bars) de fermeture du moule entraîne le fluage de la matière préalablement dosée et le remplissage de l'empreinte. Le temps de durcissement très court permet un démoulage rapide. On utilise ce type de moulage pour une production en grandes séries, et pour des pièces de taille petite et moyenne, plus ou moins épaisses.

7.2.4. Moulage par compression de mat pré imprégné SMC

Le mat pré imprégné (Sheet Molding Compound) est une nappe de fils coupés ou continus, imprégné par un mélange de résine polyester, de charges et d'adjuvants spécifiques divers. Découpé en flans de masse et dimensions déterminées, le mat pré imprégné est moulé à chaud (140 à 160°C) par compression entre un moule et un contre moule en acier usiné

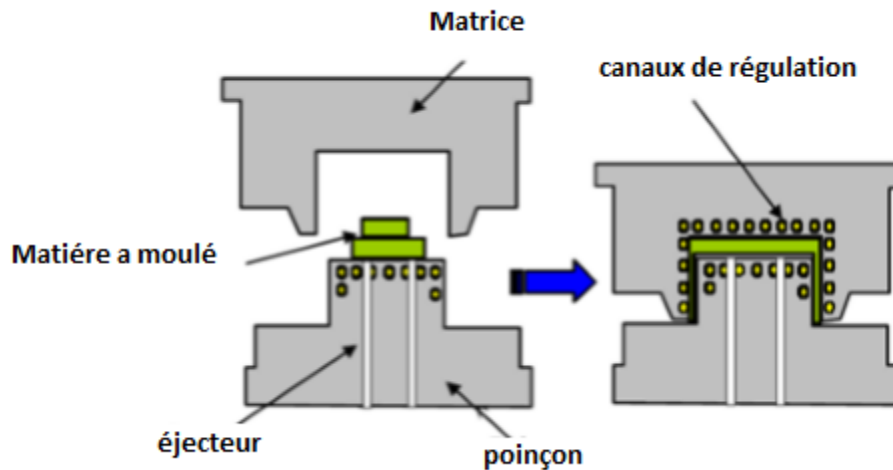


Figure I.14. Principe de moulage par compression

8. Domaines d'utilisation des matériaux composites [15]

Les excellentes performances mécaniques des matériaux composites fibres résine en termes de caractéristiques spécifiques en font des matériaux attrayants pour l'utilisation dans les structures. En outre, l'intérêt de ces matériaux réside dans leur anisotropie aisément contrôlable par le concepteur qui peut ainsi ajuster la rigidité et la résistance en fonction des sollicitations extérieures. Ainsi l'immense avantage des matériaux composites est de pouvoir être optimisé pour chaque application : on peut placer le renfort exactement où il est nécessaire. Cette optimisation résulte en une grande performance de ces matériaux, qui sont souvent de loin les plus légers pour résistance mécanique spécifiée. Cependant ils restent très chers à fabriquer ! D'où leurs domaines d'application :

- Electricité et électronique ;
- Bâtiment et travaux publics ;
- Transports routiers, ferroviaires, maritimes, aériens et spatiaux (notamment militaire),
- Santé (instrumentation médicale) ;
- Sports et loisirs (skis, raquette de tennis, planche à voile, surf, club de golf,...) ;
- Construction navale Ainsi, on note que les matériaux composites sont surtout utilisés pour les applications où une haute performance est recherchée et où le prix n'est pas facteur primordial.

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons un objectifs qui à apporter une connaissance de leurs description et de ces constituants et de leurs structure.

Notre matériau composite étudié, est un stratifié dont la matrice est une résine polyester chargée en particules d'aluminium recyclé. Dans le chapitre suivant nous allons donner plus d'information sur cette résine polyester et sur cette charge.

Chapitre II

Résines et charges

1. Introduction

Nous présentons dans ce chapitre la matrice et la charge utilisées pour nos matériaux composite.

La matrice de notre étude est une résine polyesters, largement utilisée dans la construction navale, est une résine ayant de bonnes propriétés mécaniques, elle est aussi bon marché.

La charge ajoutée aux matériaux composites est une charge d'aluminium recyclé de l'industrie menuiserie aluminium. [1]

2. Les résines

Les résines doivent être assez déformables et présenter une bonne compatibilité avec les fibres. En outre, elles doivent avoir une masse volumique faible de manière à conserver aux matériaux composites des caractéristiques mécaniques spécifiques élevées. Compte tenu de ses contraintes, les résines utilisées sont des polymères modifiées par différents adjuvants et additifs.

Les résines sont livrées en solutions sous forme de polymères non réticulés en suspension des solvants qui empêchent le pontage entre les macromolécules pré polymérisées sous l'action de la chaleur, des liaisons se développent entre les chaînes du pré polymère pour constituer un polymère réticulé suivant une structure tridimensionnel.

Deux grandes familles de résines polymères existent : les résines thermoplastiques et des résines thermodurcissables, ces deux types de résines possèdent la faculté de pouvoir être moulées ou mis en forme, pour donner soit un produit fini soit un produit semi fini dont la forme peut être modifiée.

2.1. La différence entre Matrices thermoplastiques et thermodursisables

Les matrices thermoplastiques présentent la propriété de passer de façon réversible de l'état solide à l'état pâteux exemple :

Résine Polypropylène, Polyamide...

Tableau II.1 : *Avantages et inconvénients de la matrice thermoplastique*

Avantages	Inconvénients
-Mise en œuvre -Possibilités de retransformations -Meilleure ténacité	-Une faible tenue en température -Peu de résistance aux solvants

2.2. Matrices thermodurcissables

Ces résines possèdent la propriété de passer de façon irréversible d'un état liquide à l'état solide ; elles durcissent après un cycle de chauffage appelé « cycle de polymérisation » ou « cycle de réticulation ».

Les résines thermodurcissables principalement utilisées dans la fabrication des matériaux composites sont :

2.2.1. Résine polyester

Présente un bon accrochage sur les fibres, un prix bas, mais un retrait important et une tenue réduite à la chaleur humide.

2.2.2. Résine époxyde

Se présentent sous la forme de plusieurs ingrédients à mélanger :

- *Une résine principale* portant les terminaisons époxydes ; c'est un liquide plus ou moins visqueux ou un solide qui est, dans certaines conditions, soluble ou fusible ;
- *Un diluant* réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif (solvants organique, en général) ; c'est un liquide très fluide, dont le rôle est d'abaisser la viscosité du système lorsque le mélange est effectué ;
- *Un flexibilisant* réactif (avec des terminaisons époxydes, en général) ou non réactif ; c'est un liquide plus ou moins visqueux, dont le rôle est de rendre la résine durcie plus flexible ;

- *Un durcisseur* portant les terminaisons chimiques qui réagissent sur les terminaisons époxydes des autres ingrédients pour constituer, en fin de cycle de polymérisation, un solide, c'est un liquide ou un solide (poudre, paillettes, blocs solubles ou fusibles).

2.2.3. Résine phénolique

Ayant de moins bonnes propriétés mécaniques que les résines époxydes, elle n'est utilisée que lorsqu'il y a des exigences vis-à-vis de tenu au feu.

La proportion de chaque produit entrant dans la composition du système de résine dépend des conditions de mise en œuvre à obtenir et des propriétés recherchées.

On donne une comparaison entre les différentes résines dans le tableau I.2 ci-dessous.

Tableau II.2. Comparatif entre les résines.

	Polyesters	Phénoliques	Epoxydes	Polyamides
Caractéristiques Mécanique	Moyennes	Faibles	Très bonne	Excellentes
Température Maxi d'utilisation	140°C	130°C	190°C	260°C
Tenue aux chocs	Très bonne	Très faible	bonne	Très bonne
Tenue en fatigue	faible	Faible	Moyenne	Bonne
Durés de polymérisation	Courte	Courte	Longue	Moyenne
Retrait	Important	Faible	Très faible	Très faible
Tenue au feu	Mauvaise	Bonne	Moyenne	Très bonne
Pouvoir adhésif	Moyenne	Moyenne	Très bonne	Très bonne

2.3. Les résines polyesters

2.3.1. Historiques [16]

Le poly-téréphtalate d'éthylène a été découvert en 1941 par deux chimistes britanniques de Manchester ; John Rex Winfield et James Tannant Dickson. Ces chimistes participèrent aussi à l'invention du Térylène en 1941, marque de fibre textile du groupe ICI dont les brevets furent rachetés en 1945 par le groupe Américain du Pont Du Nemours .ce dernier créa ensuite le Dracron (1950) et le Mylar (1952).

Au début des années 1950, sont apparues les résines polyester liquides utilisées dans les fabrications de pièces composites (polyesters thermodurcissable). la grande application industrielle a été la réalisation de pièce de carrosserie des voitures de modèle Corvette.

Les polyesters insaturés se situent au deuxième rang des résines thermodurcissables les plus utilisés. La consommation mondiale annuelle de résines polyester insaturées (UP) augmente de jour en jour, elles représentent environ soit 20 % des résines thermodurcissables, derrière les polyuréthanes, environs 50 %.

2.3.2. Les propriétés de la résine polyester

Les résines polyester comme tous produits à l'état naturel ou composé ont diverses propriétés, physique, chimique, mécanique et électrique.

Elles sont souvent combinées avec d'autres éléments ; la résine polyester renforcée avec des fibres peut approcher une résistance proche de celle de l'acier avec un rapport poids/résistance nettement plus favorable. Ces résines résistent bien mieux aux basses températures que les thermoplastes et présentent une très bonne stabilité de forme à la chaleur.

Les résines renforcées avec de la fibre de verre ont également une grande capacité d'isolation et un comportement diélectrique très favorable.

2.3.2.1. La mise en œuvre des résines polyesters

Quand elles sont associés à des renforts de fibre, les résines sont mises en œuvre, manuellement, en projection, en application sous vide, en injection sous vide, sous presse froid ou chaude, en rotation, bobinage (pour des corps creux) éventuellement sous vide, ou en centrifugation, etc.

2.3.2.2. La résistance

Les résines polyester ont une résistance de qualité, contre les effets chimiques, à la chaleur et à la rigidité ; c'est pour ces raisons qu'elles sont largement utilisées dans des domaines très variés.

Sans renfort de fibres, elle est essentiellement utilisée en coulée dans l'industrie électronique ou pour des inclusions didactiques ou décoratives.

Elles peuvent être chargées de produits pulvérulents ou fibres de verre coupées, les résines polyester sont employées comme mastics ou colles.

2.3.3. Types de résines polyesters

Il existe différentes catégories de polyesters insaturés en fonction de leurs structures. Chaque catégorie possède des propriétés physico-chimiques et mécaniques différentes.

Les principales catégories de résines sont :

- Résines orthophtaliques ;
- Résines isophtaliques ;
- Résines DCPD ;
- Résines bisphénol A-fumarate ;
- Résines halogénées.

2.3.3.1. Les résine orthophtaliques

Sont des résines de grande commodité, peu chères et sont synthétisées à partir d'anhydrides orthophtaliques et maléïques.

Cependant, ces résines ont des résistances thermiques et chimiques limitées.

Toutfois, elles sont largement utilisés, le marché des résines orthophtaliques a enregistré un, une croissance importante ; tiré par le secteur des composites renforcés avec des fibres.

2.3.3.2. Les résine isophtaliques

Les résines isophtaliques sont synthétisées à partir d'acide isophtalique. Ces dernières, sont plus chères et plus visqueuses que les résines orthophtaliques, elles possèdent une meilleure résistance chimique et à l'hydrolyse.

Ces résines sont majoritairement utilisées dans le domaine nautique, du pétrole et gaz, du transport, de la construction et de l'industrie.

2.3.3.3. Les résines DCPD

Sont des résines polyesters modifiées par incorporation de dicyclopentadiène. Ces résines possèdent des propriétés de séchage améliorées lorsque la résine est en contact avec l'air, de hautes températures de fléchissement sous charge (HDT), des viscosités faibles ainsi que de meilleures résistances chimiques.

2.3.3.4. Les résine bisphénol A-fumarate

Sont synthétisées à partir de bisphénol A éthoxylé ou propoxylé et d'acide fumarique. La structure aromatique apportée par le bisphénol A amélioré les résistances thermique et chimique de la résine ainsi que sa température de fléchissement sous charge.

Plus chères, ces résines ont toutefois une meilleure résistance à l'hydrolyse par rapport aux autres résines polyesters insaturées.

La résistance à la flamme peut être apportée aux résines polyesters insaturées avec l'introduction de monomères halogénés et plus particulièrement chlorés ou bromés. Les acides saturés d'une résine sont ainsi remplacés partiellement avec de l'anhydride tétrabromophtalique, de l'anhydride tétrachlorophtalique ou de l'anhydride chlorendique. Du brome peut être également incorporé avec l'utilisation de dibromonéopentyl glycol.

2.4. Utilisation de la résine polyester

Elle peut être appliquée de deux façons, selon le besoins, les contraintes et les objectifs recherchés par son application.

2.4.1. Résine sans renfort

- Inclusion d'éléments électriques ou électroniques ;

- Réalisation de motifs décoratifs ;
- Réalisation de modèles et tableaux.

2.4.2. Résines renforcées

Son utilisation concerne plusieurs types et couvrant une large gamme de structure et d'outillage ; notamment :

- La construction de véhicules, elles sont utilisées pour les carrosseries et pièces de carrosserie: pare-chocs, capots, camion-magasin, spoilers, agrandissement, superstructure de poids lourds, coques de bateaux, habillages d'avions, avant de locomotives, containers, etc ;
- La construction de bâtiment, tel que les panneaux transparents, plats, ondulés, lanterneaux, toitures pour constructions légères ;
- La machine et outillage pour l'habillage, capots, outils de reprographisme ;
- Le meuble et accessoires domestiques ; tables, sièges et canapés, mobilier de jardin, etc ;
- Le moulage électronique, mécanique fine, corps de pompe, rails de contacts, boîtier de distribution, pieds de lampe, boîtier pour appareils ménagers etc ;
- Dans l'agroalimentaire pour le réservoir pour fioul, produits alimentaires, cuves de transport, cuves à boissons, tuyauteries, réservoirs et bacs de rétention.

2.5. Méthode d'élaboration

Plusieurs méthodes sont utilisées pour l'application de la résine. Elle peut être appliquée avec des procédés simples, pour une utilisation classique ou par des procédés industriels ; utilisation de machines pour des utilisations très complexes.

La mise en œuvre manuelle: elle reste la méthode classique de base pour des moulages et des recouvrements en polyester et fibre de verre.

Le pistolage permet une mise en œuvre plus rapide, les fibres de verre étant projetées simultanément avec la résine polyester.

3. La charge d'aluminium [17]

3.1. Généralité :

La présence d'aluminium dans l'environnement est naturelle et anthropique. L'aluminium est un métal relativement jeune par rapport à des métaux comme le fer et le cuivre.

L'aluminium est l'élément métallique naturel le plus abondant de l'écorce terrestre dont il est le 3^e élément constitutif le plus important, il représente environ 8%. Il n'y est présent que combiné avec l'oxygène, le silicium, le fluor ou autres éléments. On le trouve sous forme : d'alumine Al_2O_3 (corindon α Al_2O_3 , émeri, rubis, saphir, émeraude, etc.), ou hydratée (hydrargillite ou Gibbsite γ $Al(OH)_3$, boehmite γ $AlO(OH)$, diaspore α $AlO(OH)$).

La bauxite qui constitue le principal minerai contient de 40 à 60% d'alumine (oxyde d'aluminium). De la famille des Latérites, la Bauxite est une roche sédimentaire principalement composée d'hydroxydes d'aluminium (Gibbsite, Boehmite, Diaspore), associés à des oxydes de fer et des impuretés (Silice, Calcite). Elle ressemble à de l'argile dure mais qui ne fait pas de pâte avec l'eau.

3.2. Historique

En 1821, un dénommé Blavier avait envoyé au minéralogiste et ingénieur des Mines français Pierre Berthier, professeur à l'école des Mines de Paris, un échantillon, pour analyse, d'un minerai trouvé près des Baux de Provence (proche de Marseille en France), pour savoir si on pouvait l'utiliser comme minerai de fer ; auquel il donnera le nom de bauxite. En 1827, le scientifique allemand Friedrich Wöhler obtient des particules d'aluminium impur.

En 1886, Paul Héroult en France et Charles Martin Hall aux États-Unis découvrent, indépendamment, que l'oxyde d'aluminium ou alumine se dissout dans la cryolite et peut être décomposé par l'électrolyse pour donner du métal brut en fusion.

En 1854, en France, Henri Sainte-Claire Deville parvient à fabriquer, pour la première fois de l'histoire, un petit lingot d'aluminium dans un laboratoire de l'École normale supérieure de Paris, où il occupe la chaire de chimie et met au point le premier procédé de fabrication industriel.

3.3. Propriétés de l'aluminium

L'aluminium peut exister à l'état pur ou mélangé à d'autres métaux pour former des alliages, qui ont presque les mêmes caractéristiques.

Il n'existe presque aucune différence visuelle entre l'aluminium à l'état pur ou recyclé. C'est à travers des dispositifs complexes et testes physico-chimiques qu'on peut déterminer si le produit est issu du processus de recyclage.



Figure II.1 : a) Profils d'aluminium pur b) recyclats d'aluminium

3.3.1. Propriété physicochimique

L'aluminium est un excellent conducteur de chaleur et d'électricité. C'est un métal blanc brillant, de densité 2,7 fondant à 660°C. Il est assez mou et malléable. C'est entre 100 et 150°C qu'il se laisse le mieux travailler, ce qui permet de confectionner avec facilité les pièces de profilés les plus variées et très compliquées.

L'aluminium est pratiquement inaltérable à l'air car il est recouvert d'une fine couche protectrice d'alumine. L'eau distillée, l'eau de pluie, la vapeur d'eau n'ont aucune action sensible sur l'aluminium. En revanche, l'eau de Mer l'attaque.

Les acides ont peu d'action sur l'aluminium de même que l'eau oxygénée. Par contre, la soude en solution, le carbonate de soude, le chlorure de magnésium et le chlorure de calcium l'attaquent fortement.

3.3.2. Propriétés mécaniques

La résistance à la rupture de l'aluminium est de l'ordre de 80 MPa pour l'aluminium ordinaire et de 60 MPa pour l'aluminium extra pur. La dureté de l'aluminium est accrue par la présence d'impuretés (cuivre, nickel, argent, phosphore, etc.).

Le défaut de l'aluminium est donc sa faible résistance mécanique, ce qui ne permet pas de l'utiliser pour la réalisation d'éléments porteurs dans la construction. Cependant, les qualités mécaniques de l'aluminium sont fortement améliorées lorsqu'on lui ajoute du cuivre, du manganèse et du magnésium pour se présenter sous forme d'alliages légers.

D'autres propriétés font de l'aluminium un produit très présent dans de nombreux domaines ; notamment :

- **Légèreté** : L'aluminium est un métal très léger dont la densité spécifique est de 2,7 g/cm³, soit environ un tiers de celle de l'acier (7-8 g/cm³) ou du cuivre (8,96 g/cm³).
- **Résistance mécanique** : L'aluminium est utilisé très majoritairement sous forme d'alliages dont le constituant principal est l'aluminium, les éléments d'addition pouvant représenter jusqu'à 15% de son poids. La résistance de l'alliage d'aluminium est adaptée à l'application requise.

A titre d'exemple, on considère qu'un kilogramme d'aluminium peut remplacer deux kilogrammes d'acier dans des applications automobiles.

- **Résistance à la corrosion** : L'aluminium génère naturellement une couche d'oxyde qui le protège de la corrosion. Différents types de traitement de surface peuvent encore améliorer cette résistance (anodisation, laquage,...).
- **Conductivité thermique et électrique** : L'aluminium est un excellent conducteur de la chaleur et de l'électricité. La conductivité thermique de l'aluminium est utilisée dans de nombreuses applications d'évacuation de la chaleur, c'est-à-dire de refroidissement (comme les systèmes d'air conditionné dans les véhicules).
- A poids égal, l'aluminium offre une conductivité électrique deux fois supérieure à celle du cuivre, ce qui explique son emploi privilégié dans les applications de transport d'électricité à haute tension sur grande distance.
- **Ductilité, malléabilité** : L'aluminium peut être facilement travaillé à basse température et déformé sans se rompre, ce qui permet de lui donner des formes très variées.
- **Recyclabilité** : L'aluminium est recyclable à 100% sans dégradation de ses propriétés. Son recyclage ne nécessite que peu d'énergie : 5% seulement de l'énergie utilisée pour la production de métal primaire.
- **Imperméabilité et effet barrière** : Même à très faible épaisseur, une feuille d'aluminium est totalement imperméable et ne laisse passer ni lumière, ni micro-

organismes, ni odeurs. De plus le métal lui-même ne libère ni odeur ni goût, ce qui en fait un élément de choix pour l'emballage alimentaire ou pharmaceutique.

- **Propriétés réfléchissantes :** L'aluminium possède un pouvoir réfléchissant élevé de la lumière ainsi que de la chaleur ce qui, ajouté à son faible poids, en fait un matériau idéal pour les réflecteurs dans les matériels d'éclairage ou les couvertures de survie

3.4. Utilisation de l'aluminium

L'aluminium est un excellent matériau d'emballage, en raison de son innocuité, de son imperméabilité et de son opacité aux rayons ultraviolets. Il est surtout utilisé dans la fabrication de profilés laminés : cornières, profils en U, en double T, tubes de sections ronde ou rectangulaire.

Une grande quantité d'alliages d'aluminium est dépensée à la fabrication de rivets et de boulons.

Dans le bâtiment, l'aluminium présente de nombreux atouts en termes de développement durable ; sa légèreté permet d'alléger les structures, la rigidité et sa facilité de mise en forme permettent des réalisations techniques performantes pour longtemps : profilés à coupure thermique, fenêtres ou menuiseries durablement étanches, garantissant une parfaite isolation thermique et acoustique, intégration aux façades de châssis de panneaux solaires pour la production d'électricité renouvelable, etc.

Sa résistance à la corrosion réduit les travaux de maintenance et étend la durée de vie des constructions, ininflammable, non toxique au contact, non émetteur de poussière ni de vapeur, l'aluminium dans le bâtiment est un matériau sain et sûr.

Du point de vue du développement durable, le recyclage de l'aluminium représente donc des avantages décisifs ; il permet une importante économie de ressource, il n'utilise que 5% de l'énergie nécessaire à la production primaire, il émet 95% de gaz à effet de serre en moins.

Conclusion

La résine polyester utilisée dans notre étude a de bonnes caractéristiques de mécanique, l'ajout de copeaux d'aluminium recyclé s'est fait dans le but d'améliorer la rigidité et la propriété mécanique de ce matériau composite (stratifié). La caractérisation mécanique des matériaux ainsi élaborés s'est déroulée via des essais de flexion et de résistance aux chocs, dans le chapitre suivant nous présentons les outils théoriques permettant de déterminer les paramètres de résistance à la flexion et aux chocs de nos matériaux composites chargés en aluminium recyclé.

Chapitre III

Comportement mécanique des matériaux composites

1. Introduction

Les facteurs déterminants dans le choix des matériaux est la connaissance de leur comportement mécanique et évaluation numérique de ces propriétés est fait par les différents essais mécanique tel que la traction flexion résilience..., dans ce chapitre on va aborder les essais de bases utilisés pour la caractérisation des matériaux.

2. Propriétés physique et mécaniques des composites

Les propriétés physiques est différente que les propriétés mécaniques des composites car ils sont directement liées au comportement d'un mélange fortement anisotrope.

2.1. Propriétés physiques [18]

2.1.1 Loi des mélanges

La loi des mélanges permet sous certaines conditions de déterminer certaines caractéristiques du composite en fonction de la fraction volumique du renfort. Par exemple si on prend :

- P_M Propriétés de la matrice ;
- P_R Propriétés du renfort ;
- P_C Propriétés du composite ;
- V_C Fraction volumique(%) du renfort.

La propriété du composite est :

$$\frac{1}{E_C} = \frac{V_f}{E_f} + \frac{V_m}{E_m} + \frac{V_i}{E_i} \rightarrow a$$

$$E_C = E_f V_f - E_m V_m + E_i V_i$$

$$P_C = V_R P_R + (1-V_R) P_M \quad (\text{III.1})$$

2.1.2. Densité des matériaux composites

À partir de la loi énoncé ci-dessus on peut calculer la densité moyenne du composite.

Si : ρ_M densité de la matrice et ρ_R densité du renfort, alors la densité du composite ρ_C est :

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composites

$$\rho_C = V_R \rho_R + (1 - V_R) \rho_M \quad (\text{III.2})$$

2.2. Propriétés mécaniques

2.2.1. Essais de traction

C'est l'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.

a) Le module de Young du composite E_c , R_{ec} et R_m .

Lorsqu'on mélange deux matériaux au comportement élastique linéaire et de module de Young différent, le produit est encore élastique et linéaire.

Le calcul de module de Young est possible à partir de la loi des mélanges si la force est parallèle aux fibres. Dans ce cas sous l'effet d'une force F , la matrice, les fibres et le composite subissent une déformation unitaire identique, ce qui se traduit par :

$$\varepsilon_C = \varepsilon_M = \varepsilon_R \quad (\text{III. 3})$$

Par application de la loi des mélanges on obtient :

➤ Pour le module de Young :

$$E_C = V_R E_R + (1 - V_R) E_M \quad (\text{III.4})$$

De la même manière on peut déterminer :

-La limite d'élasticité du composite

$$R_{ec} = V_R R_{eR} + (1 - V_R) R_{eM} \quad (\text{III.5})$$

-La résistance maximale à la traction du composite :

Pour une force perpendiculaire au sens des fibres, les contraintes dans la matrice, dans les renforts et dans le composite sont identiques. Cela se traduit par :

$$\sigma_R = \sigma_M \quad (\text{III.6})$$

b. Traction longitudinale : [19]

L'effort F est appliqué dans la direction des fibres (composite unidirectionnel), comme le montre la figure (III.1)

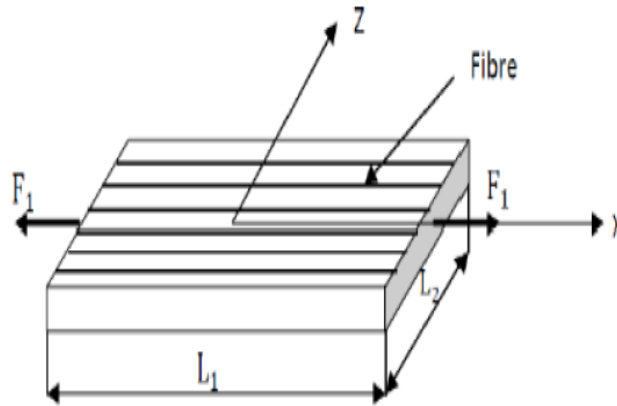


Figure III.1. *Traction longitudinale*

Les caractéristiques tirées sont :

La contrainte normale :

$$\sigma_{xx} = \frac{F1}{S1} \longrightarrow \text{(III.7)}$$

Avec S1 : section droite du matériau

Les déformations longitudinales et transversales :

$$\epsilon_{xx} = \frac{\Delta L1}{L1} \longrightarrow \text{(III.8)}$$

$$\epsilon_{zz} = \frac{\Delta L2}{L2} \longrightarrow \text{(III 9)}$$

Le module de Yong E :

$$E = \frac{\sigma_{xx}}{\epsilon_{xx}} \longrightarrow \text{(III10)}$$

c. Traction transversale

L'effort F est appliqué suivant le sens de trame (direction transverse aux fibres).

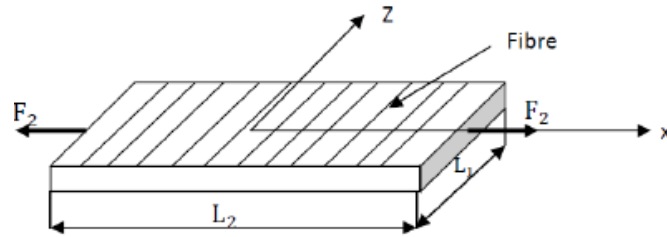


Figure III.2. Traction transversale

La contrainte normale est :

$$\sigma_{xx} = \frac{F_2}{SZ} \quad (III.11)$$

Avec SZ : section droite du matériau sur laquelle s'exerce la charge

Le module de Yong :

$$E = \frac{\sigma_{zz}}{\varepsilon_{zz}} \quad (III.12)$$

d Traction hors axe

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

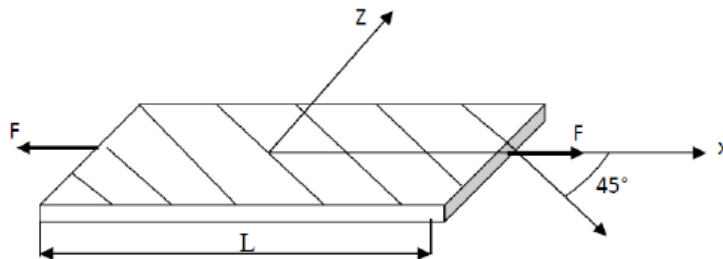


Figure III.3. Traction hors axes

La contrainte normale est :

$$\sigma_{xx} = \frac{F_2}{SZ} \quad (III.13)$$

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composites

Avec SZ : section droite du matériau sur laquelle s'exerce la charge

Le module de Yong :

$$E = \frac{\sigma_{ZZ}}{\varepsilon_{ZZ}} \quad (\text{III.14})$$

L'essai de traction ne permet pas toujours d'avoir les caractéristiques exactes à cause de la présence des contraintes de contact qui sont dû à la fixation de l'éprouvette.

Lors de l'essai de traction, il faut y'avoir un désalignement entre la direction d'application de la charge et celle des fibres, sinon les valeurs mesurées seront nettement plus faibles que les valeurs réelles du module d'Yong (cas d'un composites unidirectionnel).

Un problème qui n'est pas aussi critique dans le cas d'un essai de traction transversale

e. Courbe conventionnelle

La courbe de traction d'un matériau composite est donnée par figure III.4.

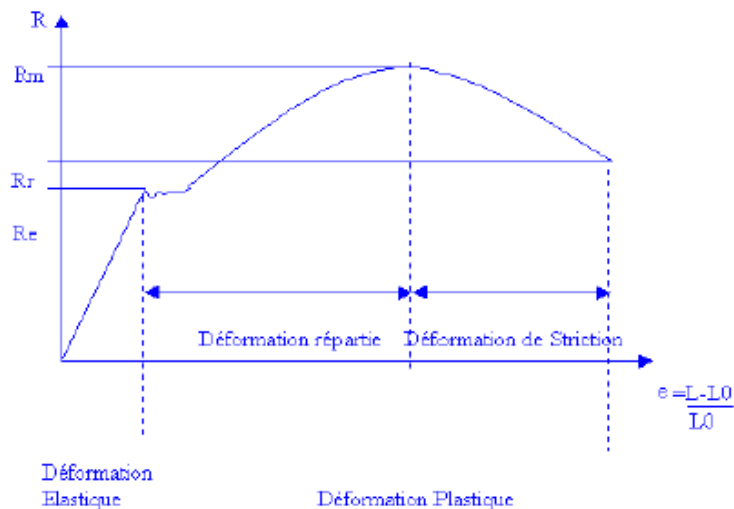


Figure III.4. Courbe de traction conventionnelle

L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

- Le module de Young E ou module d'élasticité longitudinale ;
- La limite élastique Re ou σ_e qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;
- La limite à la rupture Rm ou σ_m ;

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composites

- L'allongement à la rupture A , qui mesure la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture, propriété intéressante dans certaines applications ;
- Le coefficient de Poisson, qui chiffre la variation de volume induite par la déformation des matériaux dans le domaine élastique.

2.2.2. Essai de flexion [20]

L'essai de flexion est un test mécanique statique qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps. La simplicité du montage de l'éprouvette et de sa géométrie, le rend facile à mettre en oeuvre. Il nous permet d'extraire la contrainte et la flèche à la rupture, et, le module de Young. Pour cet essai deux configurations qui peuvent être retenues : essai de flexion trois points et essai de flexion quatre points.

a) essais de flexion trois points

L'essai de flexion 3 points permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à la rupture.

L'essai de flexion est surtout adapté aux matériaux fragiles. Cet essai se caractérise par la simplicité du montage de l'éprouvette et sa géométrie simple (peu ou pas d'usinage). Lors du test, la partie supérieure est en compression et la partie inférieure en traction.

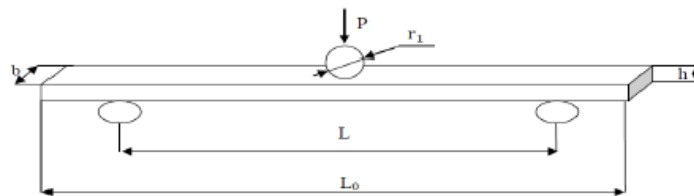


Figure III.5. Essai de flexion trois points

Avec :

P : charge appliquée(N).

h : hauteur de l'éprouvette (mm).

b : largeur de l'éprouvette (mm).

L : distance entre les axes (mm).

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composites

L_0 : Longueur de l'éprouvette (mm).

r_1 : Rayon de la panne centrale (mm).

En d'autre terme les éléments de volume de l'éprouvette ne sont pas soumis à la même sollicitation mécanique contrairement à l'essai de traction et de compression.

Il y a aussi une autre contrainte qui atteint le maximum au niveau de la fibre neutre dite contrainte de cisaillement.

On enregistre la courbe contrainte déformation

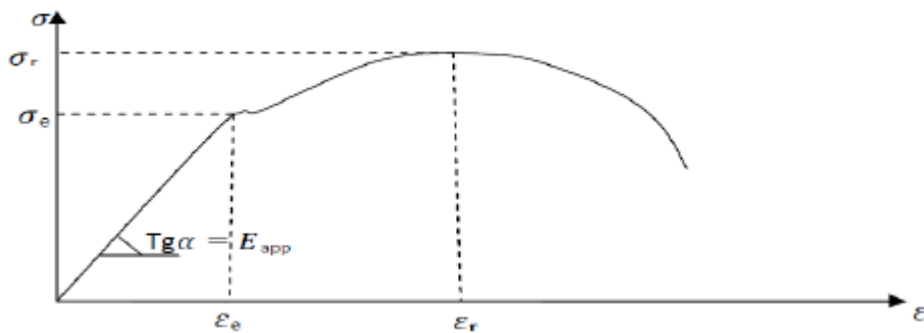


Figure III.6. Courbe de contrainte déformation en flexion

L'analyse de cette courbe permet l'évaluation des caractéristiques principales du matériau :

Module apparent :

$$E_{PP} = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta p}{\Delta y} \quad (\text{III.15})$$

Contrainte à rupture :

$$\sigma_r = \frac{3P_{max}L}{2bh^2} \quad (\text{III.16})$$

Déformation à rupture :

$$\varepsilon_r = \frac{6hf}{l^2} \quad (\text{III.17})$$

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composites

Contrainte de cisaillement :

$$\tau = \frac{3p}{4bh} \quad (\text{III. 18})$$

1.2.3. La résilience

Les essais au choc ont pour objectif de déterminer l'énergie de rupture. Le principe de mesure de la résistance aux chocs (résilience) consiste en la sollicitation rapide d'une éprouvette polymérique pour qu'elle casse et de mesurer l'énergie dissipée dans la rupture (J/Cm²).

La fragilité d'un matériau ne dépend pas seulement de lui, elle est également influencée par des données extérieures telles que la température ou l'état de contrainte



Figure III.7. *Mouton pendule de Charpy.*

Conclusion

Pour connaître le comportement mécanique des matériaux composites nous avons accès à la caractérisation par plusieurs essais (statiques et dynamiques). L'essai de traction et contrainte de flexion est l'essai mécanique le plus utilisé pour la caractérisation des matériaux d'une manière général.

Chapitre IV

Techniques expérimentales

1. Introduction

L'objectif envisagé dans cette partie, est l'étude du comportement mécanique de différents matériaux composites (stratifiés) et leurs réponses vis à vis des sollicitations statiques par le biais des essais de flexion trois points, et de résilience et de suivre l'influence de plusieurs paramètres tels que : le taux de charge et leur granulométrie ainsi que le nombre de couche et leur architectures sur la variation des propriétés mécaniques.

2. Matériaux utilisés

Nous allons présenter les éléments constitutifs de nos matériaux composites élaborés ainsi que le mode d'élaboration.

2.1. Constituants

Les matériaux composites à élaborer sont constitués : d'une résine, de renforts en fibres de verre et d'une charge d'aluminium recyclé.

2.1.1 Résine et durcisseur

Nous avons utilisé une résine thermodurcissable synthétique en polyester de formulation ortho phtalique, destinée pour la construction navale, construction de piscine, pièces industrielles....



Figure IV.1. *La résine à l'état liquide*

Pour la polymérisation de la résine et sa transformation d'un état liquide à un réseau tridimensionnel rigide, on lui ajoute jusqu'à 2% de durcisseur, 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.



Figure IV.2. *Le durcisseur*

2.1.2 Les renforts

Nous avons utilisé des fibres de verre type E, sous différentes architectures (voir figure IV.3) à savoir : un mat 600 g/m² et taffetas 800 (roving 800).

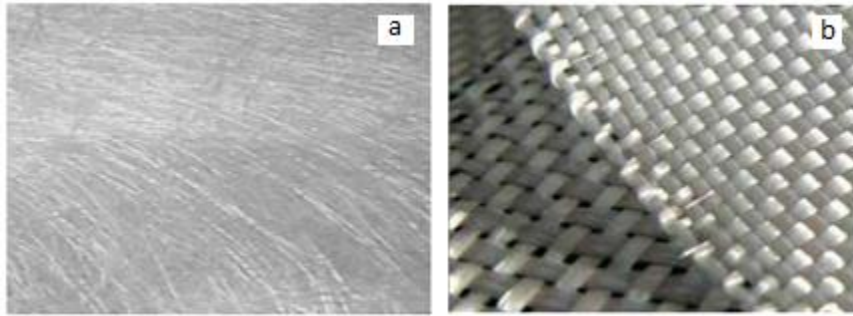


Figure IV.3. *Les différents renforts utilisés ; a) Mat 600g/m² ; b) Taffetas 800g/m²*

2.1.3. La charge

La charge utilisée (additif), est une charge d'aluminium, obtenue par fraisage, enlèvement de matière (coupeaux d'aluminium) de déchets industriels (figure IV.4 a), utilisés dans la menuiserie aluminium.

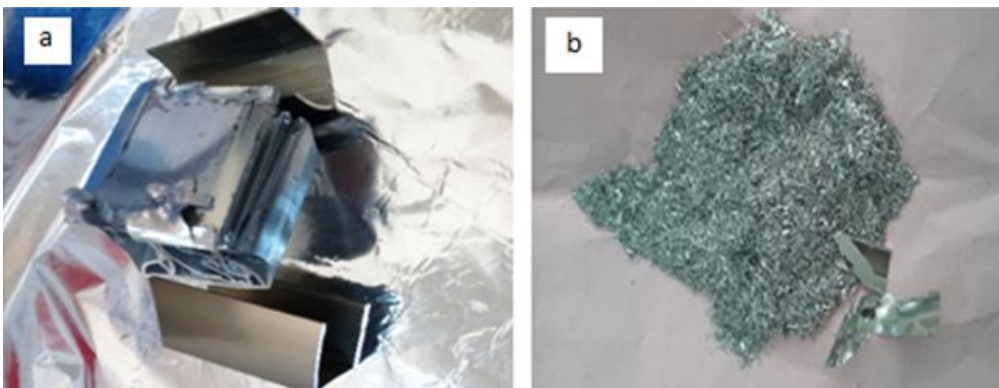


Figure IV.4. *Les chutes d'aluminium : a) avant et b) après recyclage.*



Figure IV.5. La fraiseuse utilisée pour la fabrication de coupeaux d'aluminium

Les coupeaux d'aluminiums récupérés sont constitués de granulométries différentes. Pour séparer nos coupeaux d'aluminium, en deux granulométries G_1 et G_2 , nous avons utilisé des tamis comme présentés à la figure IV.6.

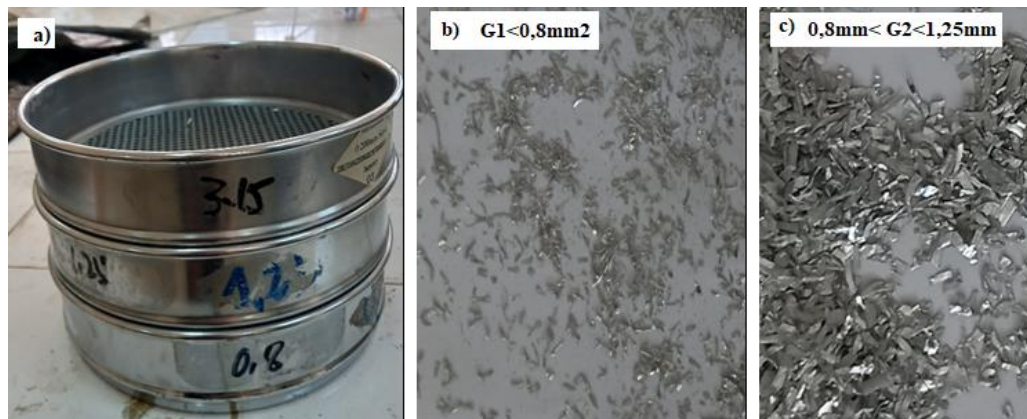


Figure IV.6. Sélection de la charge d'aluminium

a) Les tamis utilisés b) charge d'aluminium G_1 et c) charge d'aluminium G_2

3. Techniques d'élaboration des stratifiés

Les composites utilisés dans notre étude sont obtenues par le même procédé (le moulage au contact (figure IV.7), qui est un procédé manuel, il consiste :

- a) Elaboration du moule en silicone (Figure IV.7 a). aux dimensions 230 mm sur 290 mm ;
- b) Nettoyer le moule (figure IV.7 b), pour enlever toutes traces de poussière et d'impureté ;

- c) Nous appliquons à l'aide d'un pinceau une couche de résine sur le moule.
- d) Nous posons les différentes couches de fibres de verres imbibées de résine mélangée à du durcisseur (stratifiés sans charge).
- e) Nous utilisons un débulleur, figure IV.7d), pour chasser les bulles d'air et pour permettre une bonne interpénétration des différentes couches de fibres entre elles.
- f) Pour les stratifiés chargés en particules d'aluminium recyclées, la charge est mélangée à la résine avant stratification (figure IV.7c)

Après conditionnement à température ambiante pendant 24 heures, les plaques sont démoulées.

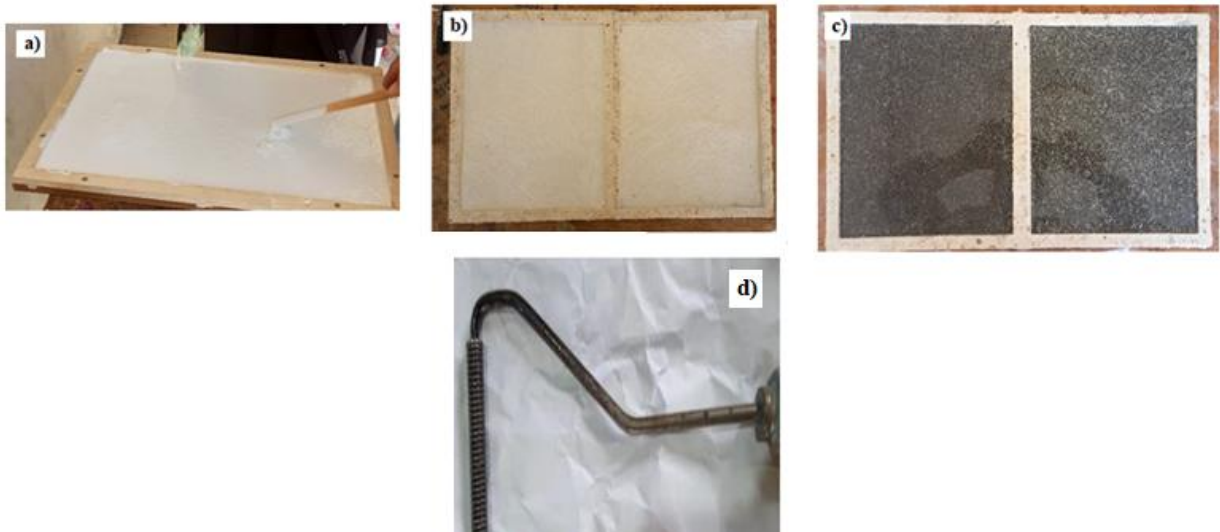


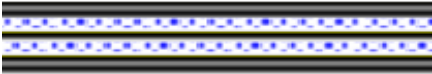



Figure IV.7. *Elaboration du stratifié*

- a) Elaboration du moule en silicone, b) Le moule prés à utilisation*
- c) Plaques de stratifié chargée en aluminium dans le moule et d) le débulleur*

Les matériaux de bases élaborés sont schématisés dans le tableau IV.1 ci-dessous, les stratifiés chargés ont la même constitution que les stratifiés non chargés.

Tableau IV.1. Présentation des matériaux de référence.

Matériaux	Constitution	Présentation
Résine seule	Polyester insaturé	
Composite	Polyester+ une couche de mat 600	
Stratifié 1	Deux couches de mat 600	
Stratifié 2	Mat + taffetas+ mat 600	

4. Découpage des éprouvettes

Les éprouvettes à caractériser sont découpées des plaques de stratifiés à l'aide d'une scie à disque diamanté sous un jet d'eau. Après la découpe, les éprouvettes sont nettoyées.

4.1. Géométrie des éprouvettes de flexion

Les dimensions des éprouvettes utilisées pour les essais de flexion trois points ont été choisies selon la norme NFT 51-120. C'est-à-dire :

$$l = 100 \text{ mm} \pm 1 \quad 13 < b \leq 15 \text{ mm pour } h \leq 4 \text{ mm}$$

L: longueur de l'éprouvette;

b : largeur ;

h : épaisseur.

Les dimensions utilisées dans les calculs, sont les valeurs moyennes

$$h_m = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 h_i \quad (IV.1)$$

$$b_m = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 b_i \quad (IV.2)$$

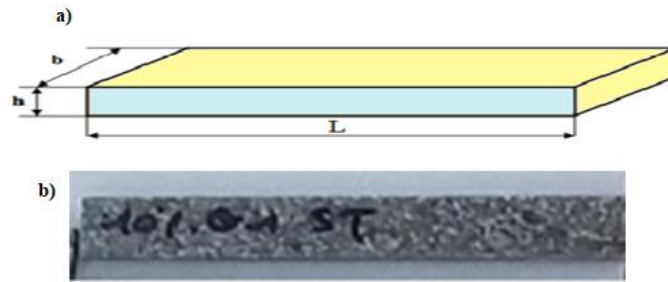


Figure IV.10. *Eprouvette de flexion*

a) *Shéma de l'éprouvette*, b) *Eprouvette réalisée*

Le découpage est assuré à l'aide d'une tronçonneuse d'établi réglable équipée d'un disque diamanté Figure IV.11 avec lubrification abondante (selon les dimensions largeur et longueur prédéfinies).



Figure IV.11. *Une scie à disque diamanté*

Pour enlever plus de matière, les bavures, les éprouvettes obtenues sont polies par la polisseuse présentée par la figure IV12.



Figure IV.12. *La polisseuse*

5. Techniques de caractérisation

5.1 Caractérisation mécanique

Pour connaître le comportement mécanique de notre matériau composite, pour évaluer ces caractéristiques de résistance et de déformation on lui subit plusieurs tests :

- L'essai de flexion pour déterminer le module élastique en flexion et la flèche ;
- L'essai de la résilience nous informe sur la capacité que possèdent nos échantillons à résister aux chocs.

5.1.1. Essai de flexion [21]

L'essai de flexion est un test mécanique statique, qui fait partie de la famille des essais indépendants du temps (comme le choc, la dureté...). Il est facile à mettre en œuvre (absence de système de fixation d'éprouvette, géométrie simple de l'échantillon), et il reproduit assez bien les sollicitations courantes auxquelles sont soumises les pièces industrielles. Cet essai est très souvent pratiqué pour mesurer des caractéristiques telles que le module d'Young et la résistance en flexion, la flèche maximale... Deux configurations peuvent être retenues pour les essais : la flexion trois points et la flexion quatre points, ce dernier cas permettant de bénéficier d'une zone centrale dans laquelle le «moment de flexion» est uniforme.

- **Essai de flexion trois points [21]**

Le principe de cet essai consiste à déformer une éprouvette parallélépipédique reposant sur deux appuis, par l'intermédiaire d'un poinçon (ou panne) située à égale distance des appuis et se déplaçant à vitesse constante ; l'essai s'est déroulé au laboratoire de résistance des matériaux du département de génie civil.

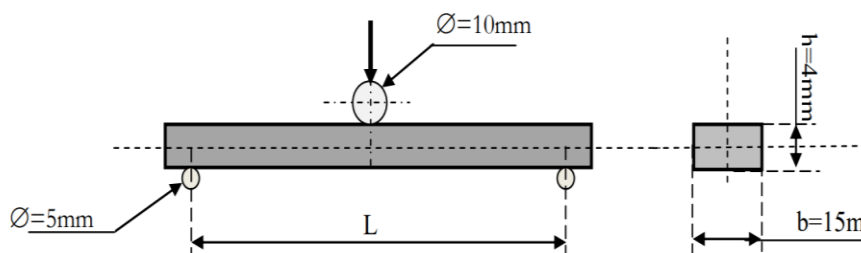


Figure IV.12. Géométrie de l'éprouvette de l'essai de flexion trois points

Avec :

- F : charge appliquée (10% ou 5%).
- r_1 : rayon de cylindre de la panne (= 5mm).
- r_2 : rayon des cylindres d'appuis (= 2.5mm).
- L : longueur entre appuis (L).
- L_0 : longueur totale de l'éprouvette (L)
- h : hauteur de la poutre (4mm).
- b : largeur de la poutre (15m).

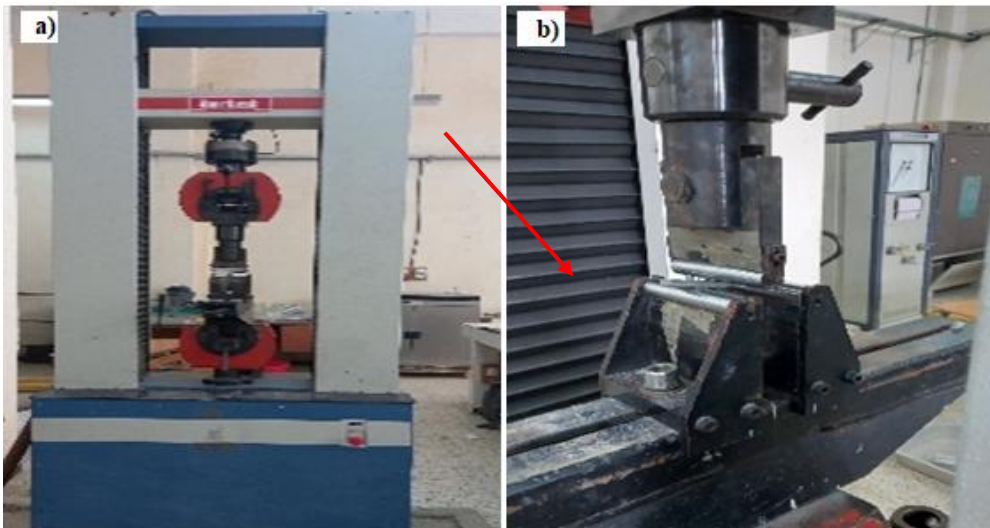


Figure IV.13.

a) La machine de flexion utilisée, b) Eprouvette prête à l'essai

Les dimensions des éprouvettes de flexion ont été choisies selon la norme NFT 51-120. (Figure IV. 12). Avec $l = 100 \text{ mm} \pm 1$; b est en fonction de h ; $10 < b \leq 15 \text{ mm}$ et $h \leq 5 \text{ mm}$. Sur la figure IV. 14, nous représentons l'éprouvette élaborée avant et après l'essai de flexion.

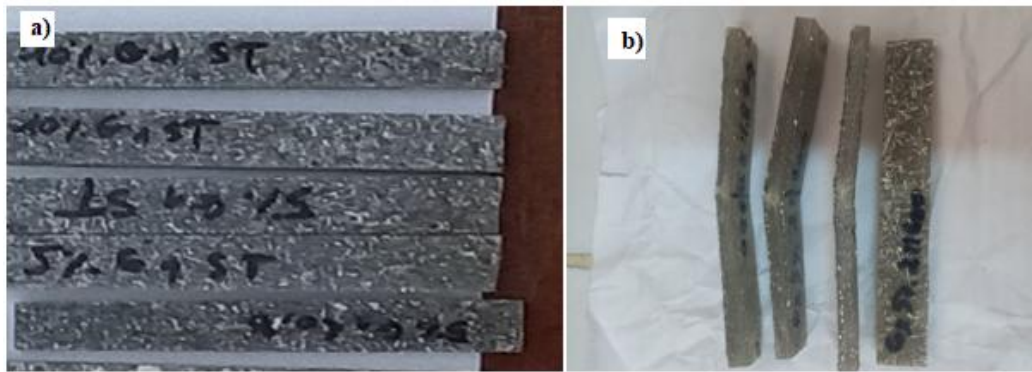


Figure IV.14. Eprouvettes de flexion

a) avant l'essai, b) après l'essai

Les résultats obtenus lors de ces essais sont donnés sous formes de Courbes Force/courses présentée par la figure IV.15.

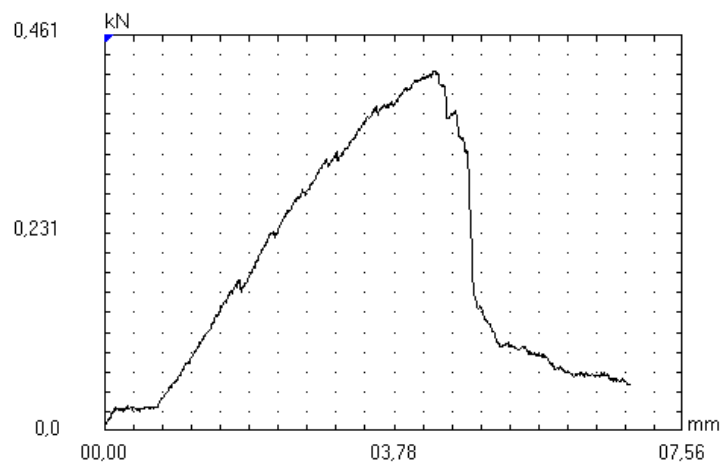


Figure IV.15. Courbe de flexion

- **Essai de résilience (choc) [22]**

L'essai Charpy a pour but de déterminer la résistance aux chocs des matériaux. Il consiste à rompre d'un seul coup à l'aide d'un mouton pendule, une éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis.

L'énergie consommée pour rompre l'éprouvette est mesurée en faisant la différence entre la hauteur de chute du mouton et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience. Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace. La résilience est l'énergie nécessaire pour produire la rupture de l'éprouvette, est exprimée en joules par cm² (J /cm²).

Tableaux IV.4. Fiche technique du mouton pendule

Données techniques	Petit model	Grand model
Numéro modèle	Zwick 5102	Zwick 5101
Longueur de pendule	225mm	390mm
Capacité de travail	0.5 /1/2/4 Joule	7.5/15/25/50 Joule
Vitesse d'impact	2.92m/s	3.85m/s

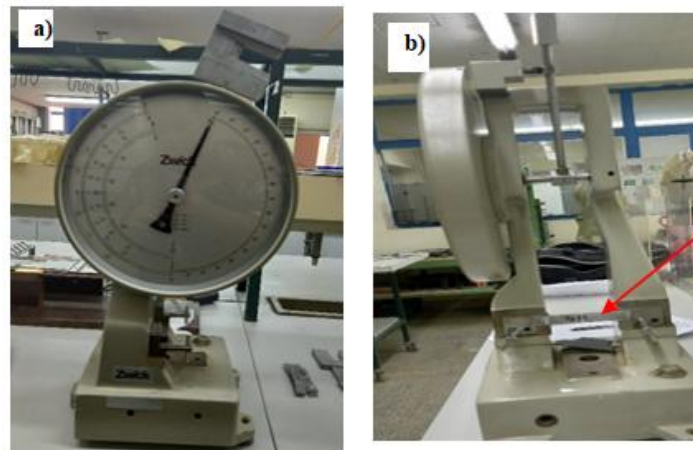


Figure IV.16. Mouton pendule (machine d'essai de résilience)

a) Le mouton charpy, b) l'éprouvette prête à l'essai

Conclusion

Pour chacune des caractéristiques d'un matériau, plusieurs méthodes sont disponibles pour la déterminer ; chaque 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 V

Résultats et discussions

1. Introduction

Durant cette partie, nous allons présenter et discuter les différents résultats obtenus par le biais des essais de résilience et de flexion trois points. Notre étude s'articule sur deux parties essentielles :

➤ **Première partie**, consiste à déterminer les caractéristiques mécaniques des matériaux de base afin de les utiliser comme référence, ainsi que de bien connaître et comprendre leur comportement sous plusieurs facteurs.

➤ **Deuxième partie**, consiste à étudier et suivre la variation des caractéristiques mécaniques des différentes variantes des composites sous plusieurs paramètres à savoir : l'architecture du renfort, le nombre de couche, le taux de charge en aluminium recyclé et la granulométrie. Par la suite, comparer avec ceux obtenus en premier afin de voir si le comportement des composites a été influencé.

2. Présentation des résultats

En premier lieu, nous allons présenter les résultats des différents essais expérimentaux réalisés dans le cadre de notre étude. Nous commençons tout d'abord par la présentation des résultats de résilience, et suivi par la suite les résultats de la flexion. Une étude comparative sera suivie afin d'évaluer et de comprendre le comportement de nos stratifiés selon certain nombre de paramètres tels que : le nombre de pli, le taux de charges et la granulométrie. Les différents résultats obtenus sont discutés dans ce qui suit

2.1. Pour l'essai de la résilience

Pour les résultats de l'essai de résilience, nous nous sommes intéressé uniquement à connaître la résilience des différents matériaux rechargés du recyclé. Les résultats obtenus sont présentés dans les tableaux ci-après.

2.1.1. Résine polyester chargée d'AL recyclé

Les tableaux V.1, V.2, V.3 et V4 regroupent les résultats de la résilience des résines polyesters chargées (5%, 10%) d'aluminium recyclé en fonction de différentes granulométries.

Chapitre V : Résultats et discussions

Tableau V.1. Valeurs de résilience pour polyester chargé 5% d'AL G1.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience J/cm ²	La moyenne J/cm ²
1	1.57	0.45	0,10	0.141	0.125
2	1.41	0.45	0,075	0.117	
3	1.57	0.46	0.085	0.117	
4	1.56	0.56	0.11	0.126	
5	1.56	0.44	0.085	0.124	

Tableau V.2. Valeurs de résilience pour polyester chargé 5% d'AL G2.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience J/cm ²	La moyenne J/cm ²
1	1.53	0.45	0.095	0.137	0.118
2	1.53	0.49	0.07	0.093	
3	1.53	0.49	0.11	0.146	
4	1.59	0.44	0.065	0.092	
5	1.55	0.44	0.085	0.124	

Tableau V.3. Valeurs de résilience pour composite chargé 10% d'AL G1.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience J/cm ²	La moyenne J/cm ²
1	1.52	0.42	0,1	0.156	0.157
2	1.55	0.43	0,085	0.126	
3	1.58	0.44	0,13	0.186	
4	1.55	0.42	0,125	0.192	
5	1.58	0.45	0,09	0.126	

Tableau V.4. Valeurs de résilience pour polyester chargé 10% d'AL G2.

Eprouvette	L Cm	E Cm	Energie J	Résilience J/cm²	La moyenne J/cm²
1	1.53	0.43	0.07	0.106	
2	1.53	0.44	0.1	0.148	
3	1.53	0.42	0.1	0.155	
54	1.53	0.41	0.09	0.143	

2.1.2. Composites chargés d'Aluminium recyclé :

Nous présentons les différents résultats obtenus des différents composites chargés de 5% et 10% d'aluminium selon deux granulométries G1, G2 définies précédemment.

- **Composite polyester/ une couche de mat chargé d'aluminium :** Les résultats de différents composites chargés de différents taux de charge et granulométries sont regroupés aux tableaux V.5, V.6, V.7 et V.8.

Tableau V.5. Valeurs de résilience d'un composite /1 couche de mat chargé 5% d'Al G1.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience (J/cm²)	La moyenne
1	1.56	0.52	3.9	4.7923	3.976
2	1.69	0.52	3.45	3.9142	
3	1.69	0.53	3.3	3.6842	
4	1.68	0.55	3.08	3.3234	
5	1.44	0.47	2.82	4.1666	

Chapitre V : Résultats et discussions

Tableau V.6. Valeurs de résilience d'un composite /1 couche de mat chargé 5% d'Al G2.

Eprouvettes	L cm	E cm	Energie J	Résilience (J/cm ²)	La moyenne J/cm ²
1	1.47	0.58	2.94	3.41880	3.701
2	1.46	0.55	2.98	3.69841	
3	1.49	0.51	2.86	3.76365	
4	1.52	0.45	2.34	3.38345	

Tableau V.7. Valeurs de résilience d'un composite /1 couche de mat chargé 10% d'Al G1.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience (J/cm ²)	La moyenne J/cm ²
1	1.26	0.39	2.04	4.0988	2.608
2	1.54	0.52	1.88	2.3252	
3	1.55	0.48	1.9	2.52743	
4	1.52	0.52	1.78	2.24464	
5	1.52	0.54	1.52	1.84578	

Tableau V.8. Valeurs de résilience d'un composite /1 couche de mat chargé 10% d'Al G2.

Eprouvettes	L cm	E cm	Energie J	Résilience (J/cm ²)	La moyenne J/cm ²
1	1.52	0.58	1.52	1.72413	2,279
2	1.45	0.57	2.2	2.63868	
3	1.59	0.53	1.72	2.03466	
4	1.54	0.52	1.74	2.15213	
5	1.58	0.58	2.62	2.84999	

Chapitre V : Résultats et discussions

- **Composite polyester/ deux couches de mat chargé d'aluminium** : Les résultats de la résilience de différents taux de charges et granulométrie sont donnés aux tableaux V.9, V.10, V.11 et V.12

Tableau V.9. Valeurs de résilience d'un composite /2 couches de mat chargé 5% d'AL G1.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience	La moyenne J/cm ²
1	1.61	0.52	3.48	4.15671	3.978
2	1.61	0.59	3.82	4.02147	
3	1.61	0.59	3.5	3.68459	

Tableau V.10. Valeurs de résilience d'un composite /2 couches de mat chargé 5% d'AL G2.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience	La moyenne J/cm ²
1	1.56	0.62	6.3		5.253
2	1.58	0.59	4.8	5.13286	
3	1.59	0.61	5.1	5.25827	
4	1.56	0.56	4.75	5.43727	

Chapitre V : Résultats et discussions

Tableau V.11. Valeurs de résilience d'un composite /2 couches de mat chargé 10% d'AL G1.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience (J/cm ²)	La moyenne J/cm ²
1	1.61	0.68	3.5	3.19693	3.678
2	1.61	0.67	3.9	3.61546	
3	1.61	0.65	3.92	3.74581	
4	1.61	0.63	3.9	3.84501	
5	1.61	0.61	3.92	3.99144	

Tableau V.12. Valeurs de résilience d'un composite /2 couches de mat chargé 10% d'Al G2.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience (J/cm ²)	La moyenne J/cm ²
1	1.49	0.55	3.45	4.20988	4.717
2	1.56	0.61	4	4.20344	
3	1.59	0.54	3.15	3.66876	
4	1.52	0.57	5.5	6.34810	
5	1.47	0.44	3.35	5.16178	

- **Composite polyester/trois couches (mat+ taffetas + mat) chargé d'aluminium :**
Les résultats sont regroupés aux tableaux V.13, V.14, V.15et V.16.

Tableau V.13. Valeurs de résilience d'un stratifié (mat+ taffetas + mat) chargé 5% d'AL G1.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience (J/cm ²)	La moyenne J/cm ²
1	1.57	0.61	8.4	8.7710	10.043
2	1.63	0.61	12.5	12.5716	
3	1.58	0.58	10	10.9122	
4	1.65	0.61	7.2	7.1535	
5	1.63	0.63	11.1	10.8092	

Tableau V.14. Valeurs de résilience d'un stratifié (mat+ taffetas + mat) chargé 5% d'AL G2.

Tableau V.15. Valeurs de résilience d'un stratifié (mat+ taffetas + mat) chargé 10% d'AL G1.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience	La Moyenne J/cm ²
1	1.57	0.56	9.2	10.4640	8.146
2	1.58	0.55	7.5	8.6306	
3	1.58	0.57	4.4	4.8856	
4	1.57	0.64	9	8.9570	
5	1.56	0.59	7.2	7.7976	

Tableau V.16. Valeurs de résilience d'un stratifié (mat+ taffetas + mat) chargé 10% d'AL G2.

Eprouvette	L cm	E cm	Energie J	Résilience (J/cm ²)	La moyenne J/cm ²
1	1.57	0.61	8.2	8.5621	9.954
2	1.57	0.61	10.5	10.9637	
3	1.57	0.55	8.8	10.1910	

4	1.55	0.55	8.6	10.0879	
5	1.55	0.55	8.5	9.9706	

2.2. Pour l'essai de flexion

Dans ce qui suit nous exposons les résultats obtenus suite aux essais de flexion trois points. Nous présentons si après les courbes Force/ flèche.

2.2.1. Résultats de l'essai de flexion pour résine polyester

La figure V.1 regroupe toutes les courbes force/ flèche en flexion trois points de différentes éprouvettes en résine non chargée. Les valeurs obtenues sont regroupées au tableau V.17.

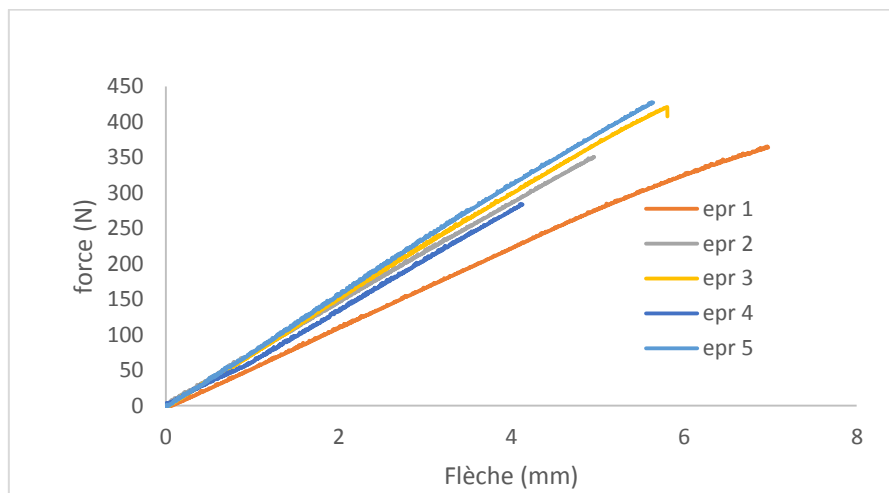


Figure V.1 : Courbe force/ flèche pour la résine seule.

Tableau V.17. Propriétés mécaniques en flexion de la résine polyester seule.

Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Force [N]	364,34	354,75	407,62	282,95	426,10	367,15
Flèche (mm)	6,97	4,79	5,81	4,12	5,63	5,464

D'après la figure V.I, nous constatons que toutes les courbes présentes un seul domaine correspond à la partie linéaire, caractérise le comportement fragile des matériaux. Le maximum de la courbe correspond à la force maximale à rupture de la résine. Nous avons également remarqué, une légère dispersion des résultats pour le même lot cela est dû peut être à la présence des défauts.

2.2.2. Résultats de l'essai de flexion pour les composites non chargés

- Composite polyester/ une couche de mat

Les résultats de flexion des stratifiés constitués d'une couche en mat de fibres de verre sont regroupés au tableau V.18 et présentés en figure V.2.

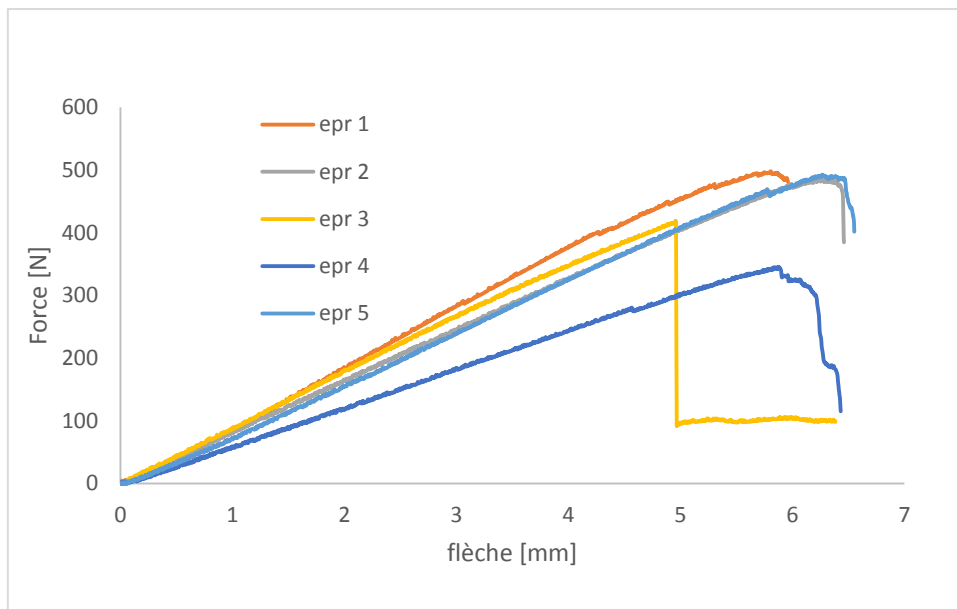


Figure V.2. Courbe force /flèche d'un composite constitué d'une couche en mat

Tableau V.18. Propriétés mécaniques en flexion d'un composite constitué d'une couche en mat.

Éprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Force [N]	492,96	486,77	407,50	341,38	486,77	443,076
Flèche (mm)	5,65	6,32	4,99	5,90	6,32	5,84

Selon la figure V.2, nous avons remarqué que l'allure des courbes n'est pas vraiment influencée par l'introduction de la couche en mat de fibres de verre.

- **Composite polyester/ deux couches de mats**

Les résultats de flexion des stratifiés constitués de deux couches en mat de fibres de verre sont regroupés au tableau V.19 et présentés en figure V.3.

Tableau V.19. Propriétés mécaniques en flexion d'un stratifié constitué de deux couche en mat.

Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Force [N]	478,60	477,95	410,91	505,91	446,49	463,97
Flèche (mm)	4,09	4,12	4,73	4,55	5,48	4,60

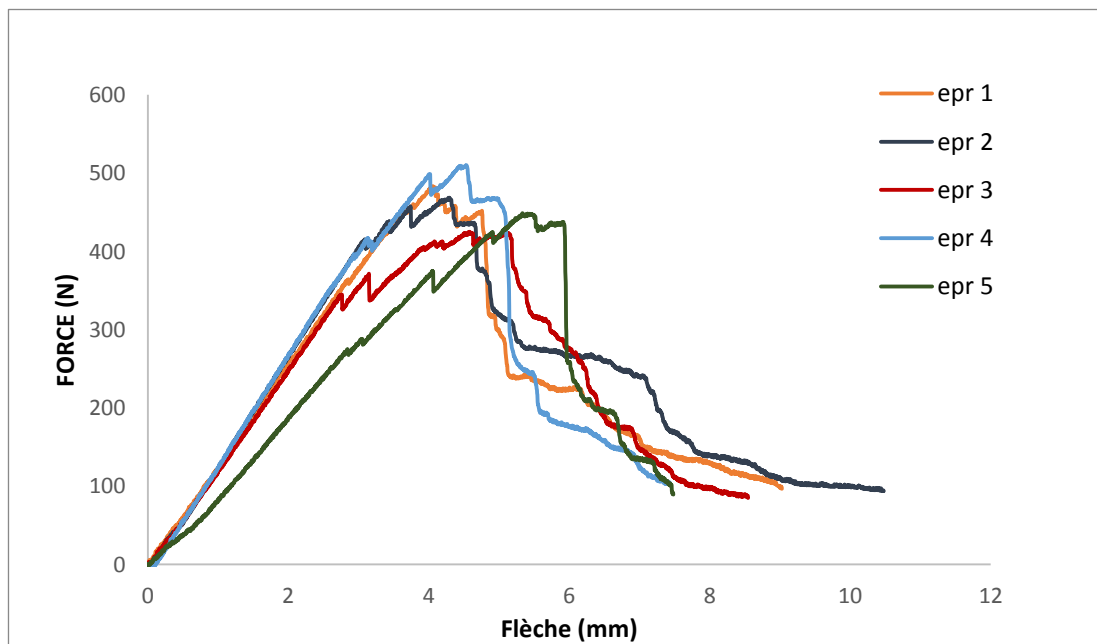


Figure V.3. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué de deux couches en mat.

La figure V.3 montre que le comportement du stratifié a changé, où nous avons remarqué l'apparition d'une deuxième partie, courte non linéaire qui correspond au domaine plastique.

- **Composite polyester/ trois couches (mat+ taffetas + mat)**

Les résultats de flexion des stratifiés constitués de trois couches (mat+ taffetas + mat) de fibres de verre sont regroupés au tableau V.20 et présentés en figure V.4.

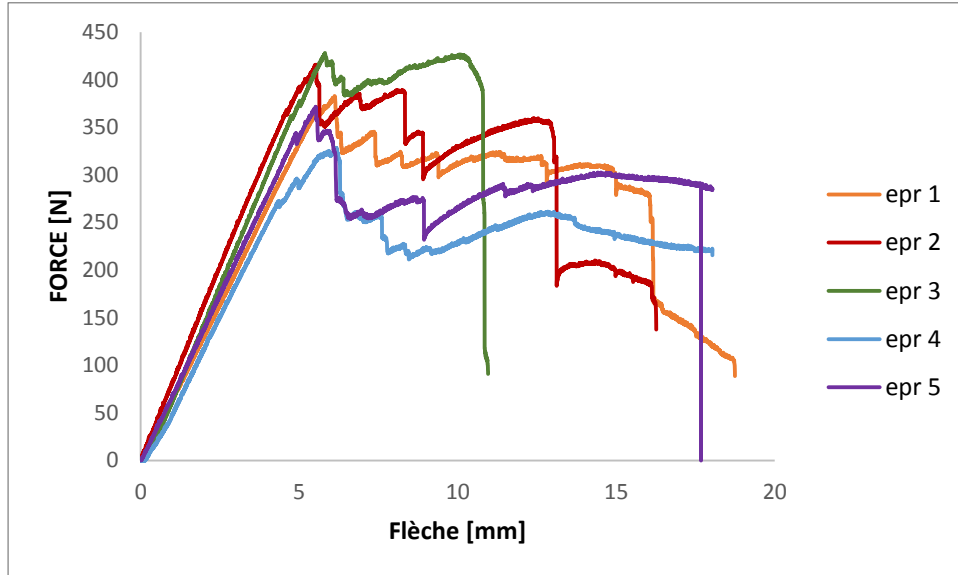


Figure V.4. Courbe force / flèche d'un composite/trois couches (mat+ taffetas + mat).

Tableau V.20. Propriétés mécaniques d'une composite/trois couche (mat+ taffetas + mat).

Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Force [N]	384,63	411,76	418,29	323,04	368,11	381,17
Flèche (mm)	6,41	5,55	5,94	6,13	5,53	5,85

D'après la figure V.4, nous remarquons que l'allure des différentes éprouvettes a été modifié par rapport aux courbes des figures V.2 et V.3. Les courbes des stratifiés à trois couches se composent de deux parties. La première partie de la réponse correspond à la partie linéaire, qui représente le comportement élastique. La deuxième partie non linéaire, correspond au comportement plastique jusqu'à rupture.

La comparaison de différentes figures nous permet de conclure, que le nombre de couche et l'architecture du renfort peuvent influencer significativement sur le comportement des composites. L'utilisation de mat et de taffetas dans un stratifié se complètent en lui donnant la résistance.

Afin de suivre l'influence de ces paramètres sur la variation des propriétés mécanique en flexion. Une étude comparative sera menée par la suite.

2.2.3. Composite renforcés par l'aluminium recyclé

Dans cette partie, nous aborderons un autre point important, qui est le recyclage des déchets d'aluminium. Pour ce faire, nous avons élaboré d'autres composites en respectant la même constitution, sauf que nous les avons chargés de l'aluminium recyclé par différents pourcentages (5%,10%) et granulométries (G1, G2).

- **Résine polyester chargée d'AL recyclé**

Les figures V.5, V.6, V.7 et V.8 présentent le comportement en flexion trois points des matériaux composites chargés successivement de 5% et 10% du l'aluminium selon la granulométrie G1 et G2. Les résultats obtenus seront regroupés aux tableaux V.21, V.22, V.23 et V.24.

Tableau V.21. Propriétés en flexion des éprouvettes en polyester chargés 5% d'AL G1.

Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Force [N]	111.2	93.08	93.02	108.26	63.96	93.90
Flèche (mm)	2.23	1.55	1.97	2.62	2.24	2.12

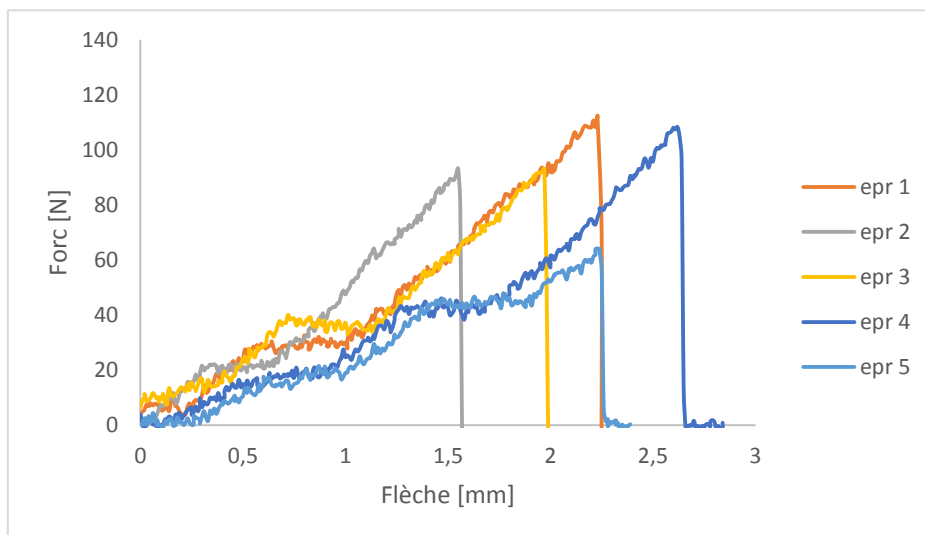


Figure V.5. Courbe force / flèche des éprouvettes en polyester chargés 5% AL G1.

Tableau V.22. Propriétés en flexion des éprouvettes en polyester chargés 10% d'AL G1

Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Force [N]	83.52	85.60	81.29	105.03	91.88	89.46
Flèche (mm)	2.12	2.12	1.67	1.54	1.27	1.74

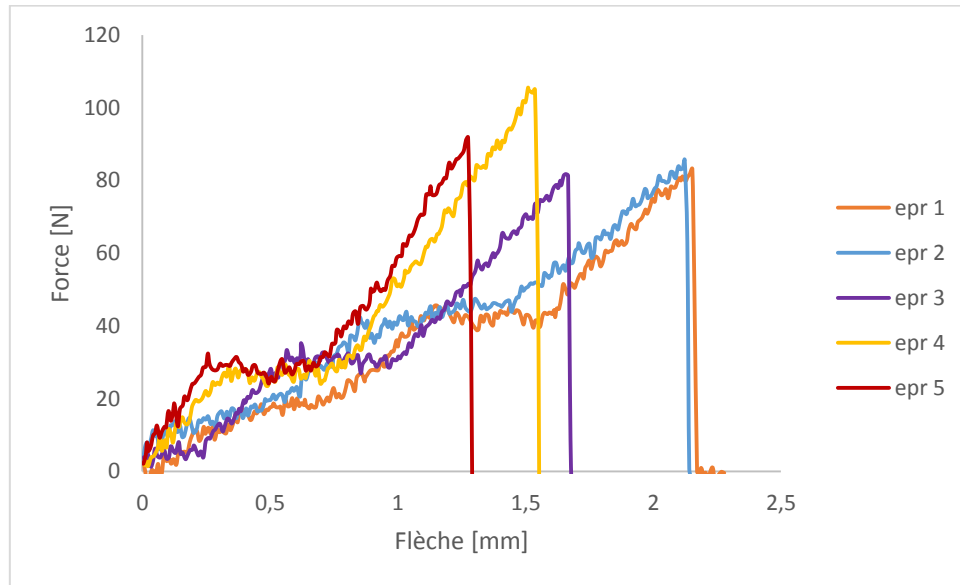


Figure V.6. Courbe force / flèche des éprouvettes en polyester chargés 10 % d'Al G1.

Tableau V.23. Propriétés en flexion des éprouvettes en polyester chargés 5% d'AL G2.

Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Force [N]	137.18	104.27	77.38	115.90	101.48	107.24
Flèche (mm)	2.07	1.94	1.92	1.39	2.16	2.00

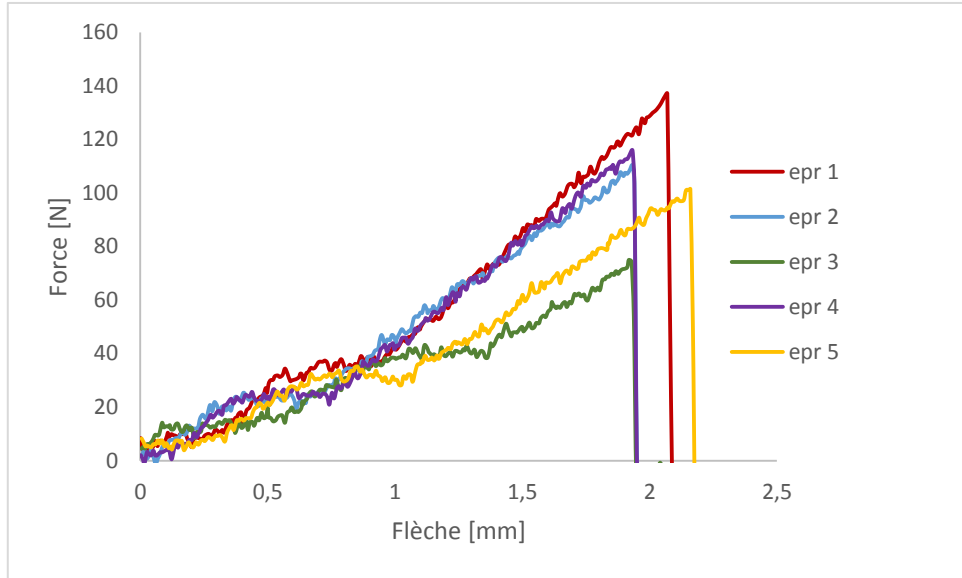


Figure V.7. Courbe force / flèche des éprouvettes en polyester chargés 5% AL G2.

Tableau V.24. Propriétés en flexion des éprouvettes en polyester chargés 10% d'AL G2.

Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Force [N]	115.58	160.28	174.18	81.98	98.35	126.07
Flèche (mm)	2.34	1.42	1.99	1.55	1.70	1.80

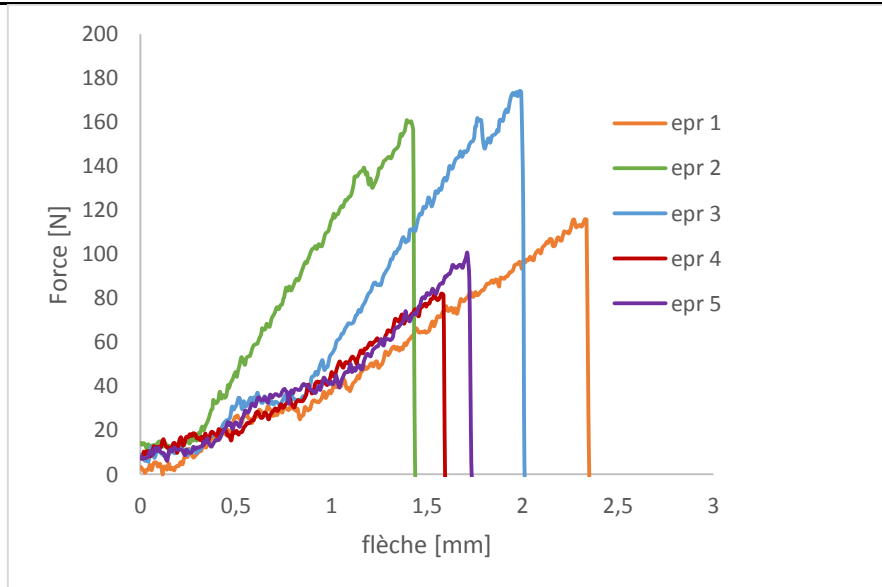


Figure V.8. Courbe force / flèche des éprouvettes en polyester chargés 10% AL G2.

Selon les figures V.5, V.6, V.7 et V.8, nous constatons que l'introduction de la charge d'aluminium recyclé influe négativement sur le comportement des composites. Des chutes importantes des valeurs des propriétés mécaniques ont été observées. Cela peut être expliqué aux problèmes l'adhérence entre la résine polyester et l'aluminium (l'interface) ou bien, à cause de la quantité insuffisante des charges dans la résine induisant des défauts au niveau du matériau.

• **Résultats des composites stratifiés à différents nombre de couches chargés d'aluminium (AL) recyclé**

Les figures de V.9 jusqu'à V.20 présentent toutes les courbes force/ flèche en flexion trois points des différentes éprouvettes en stratifiés constitués successivement d'une couche de mat, deux couches de met et trois couches (mat+teffetas+mat) chargés de 5 % et 10% du l'aluminium selon la granulométrie G1 et G2. Les valeurs obtenues sont regroupées aux tableaux V.25, V. 26, V.27 et V.28 pour les stratifiés chargés successivement 5% AL G1, 10% AL G1, 5% AL G2 et 10% AL G2.

Tableau V.25. *Propriétés en flexion des stratifiés chargés 5% AL G1.*

	Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Une couche	Force [N]	291.90	218.12	199.34	193.75	421.65	222.77
	Course [mm]	3.74	3.21	2.32	3.29	3.87	3.14
Deux couches	Force [N]	522.64	415.09	420.58	358.96	324.51	408.35
	Course [mm]	4.32	4.22	3.92	3.90	3.98	3.52
Trois couches	Force [N]	520.46	772.55	750.96	909.42	-	738.34
	Course [mm]	3.97	5.20	4.20	4.51	-	4.47

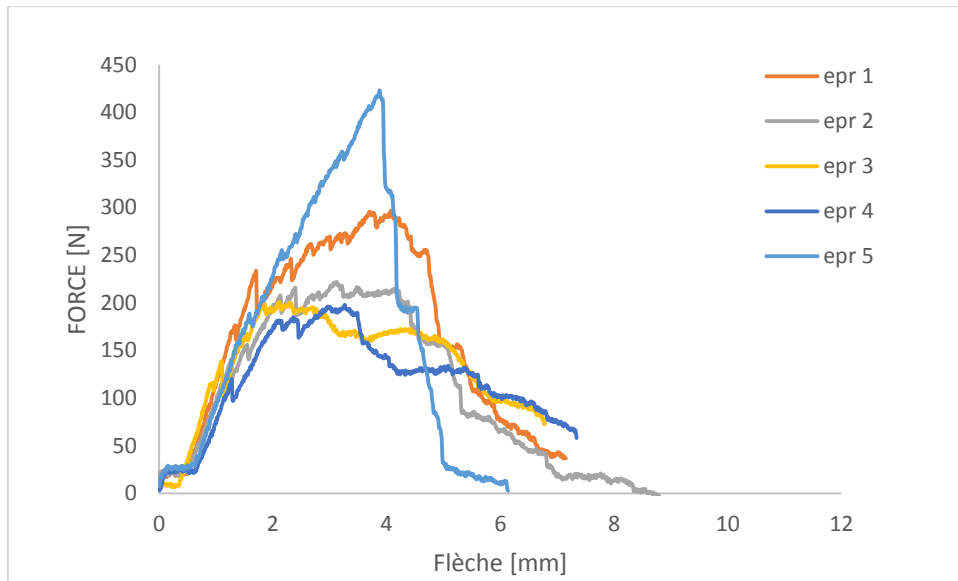


Figure V.9. Courbe force / course d'un stratifié constitué d'une couche mat chargé 5% G1.

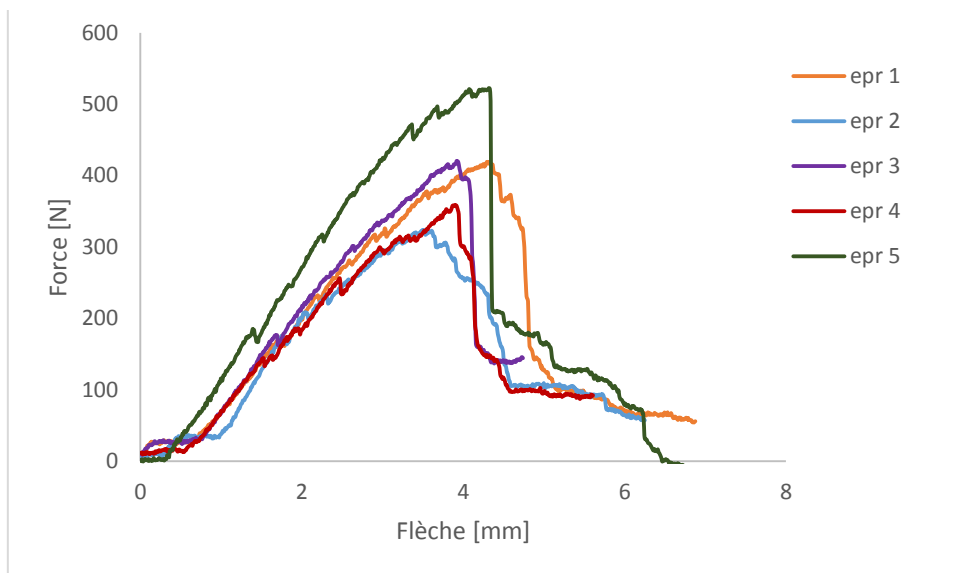


Figure V.10. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué de deux couches mat chargé 5% G1.

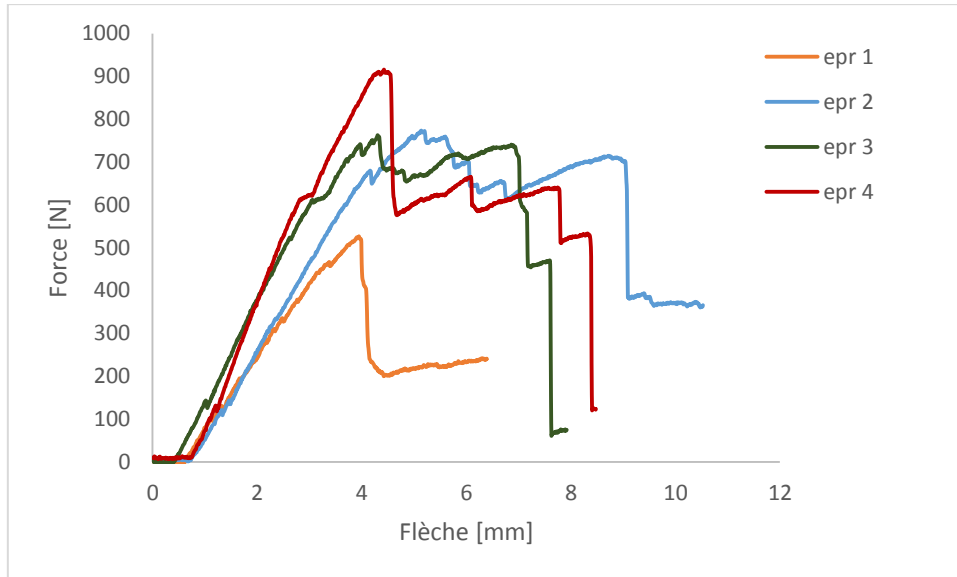


Figure V.11. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué de trois couches chargé 5% G1.

Tableau V.26. Propriétés en flexion des stratifiés chargés 10% d'AL G1.

	Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Une couche	Force [N]	127.85	200.44	247.46	300.02	216.28	241.05
	Course [mm]	1.60	4.44	4.60	4.39	3.69	4.28
Deux couches	Force [N]	251.92	366.91	290.63	390.91	285.43	317.16
	Course [mm]	2.98	3.50	3.12	5.13	2.90	2.52
Trois couches	Force [N]	658.7	746.27	616.33	743.58	745.25	686.41
	Course [mm]	4.78	4.01	4.34	4.02	4.01	4.31

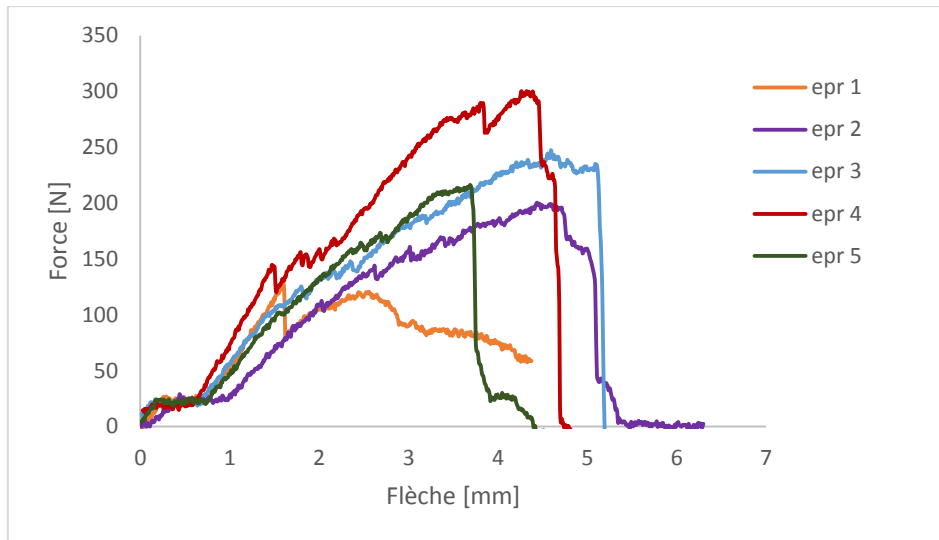


Figure V.12. Courbe force / course d'un stratifié constitué d'une couche mat chargé 10% G1.

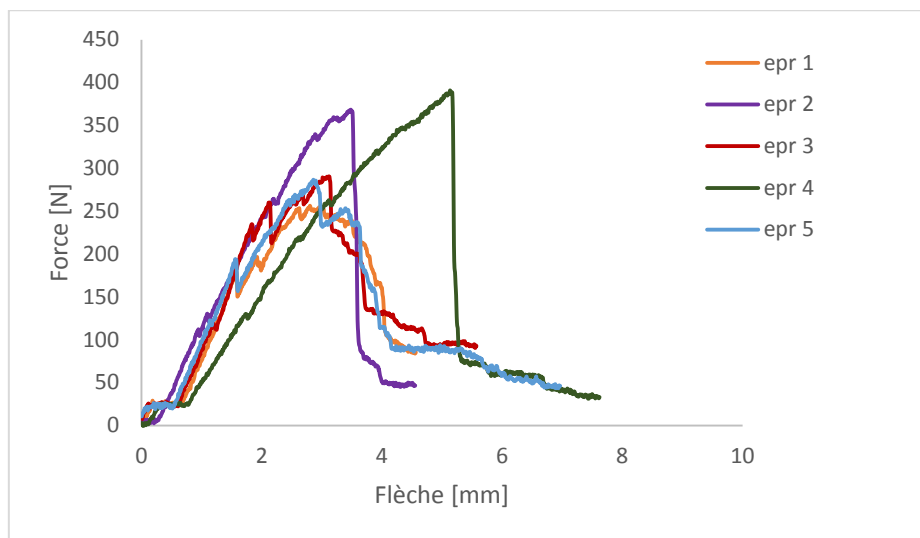


Figure V.13. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué deux couches mat chargé 10% G1.

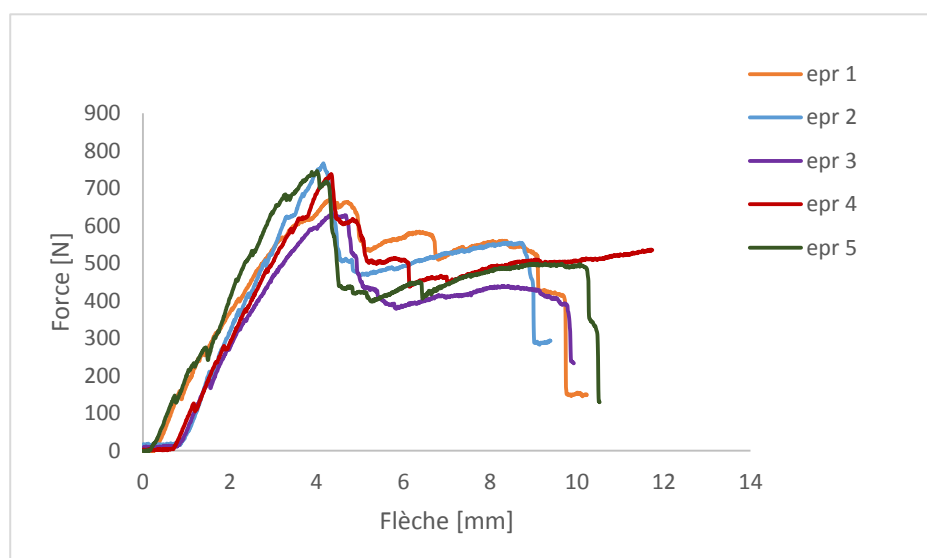


Figure V.14. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué trois couches chargé 10% G1.

Tableau V.27. Propriétés en flexion des stratifiés chargés 5% d'ALG2.

	Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Une couche	Force [N]	260.93	303.42	227.83	146.97	-	234.78
	Course [mm]	6.05	5.13	4.02	4.03	-	4.80
Deux couches	Force [N]	514.36	444.00	370.79	440.00	-	442.28
	Course [mm]	3.09	2.93	4.30	3.81	-	3.53
Trois couches	Force [N]	608.85	761.97	509.91	560.10	-	610.20
	Course [mm]	4.54	4.28	3.58	4.65	-	4.26

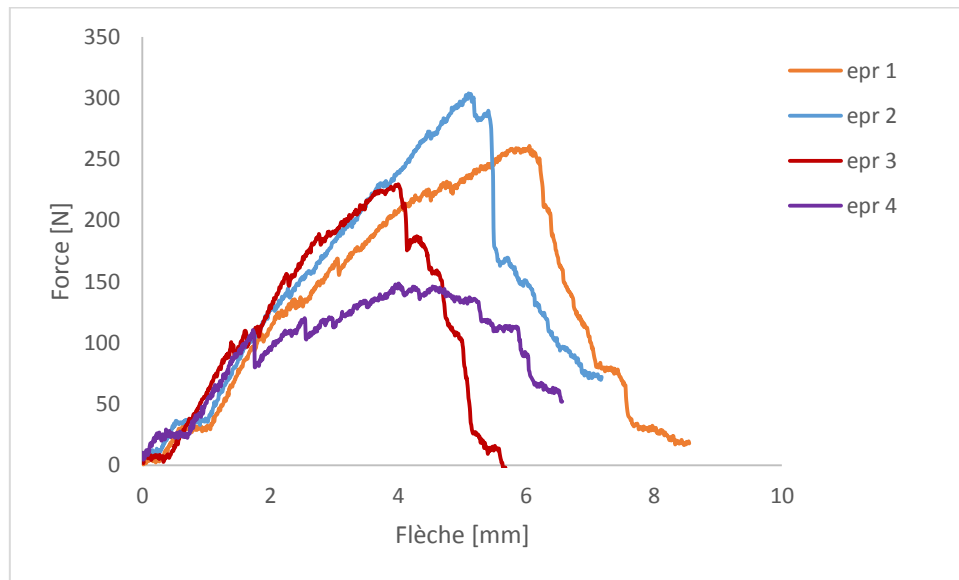


Figure V.15. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué d'une mat chargé 5% G2.

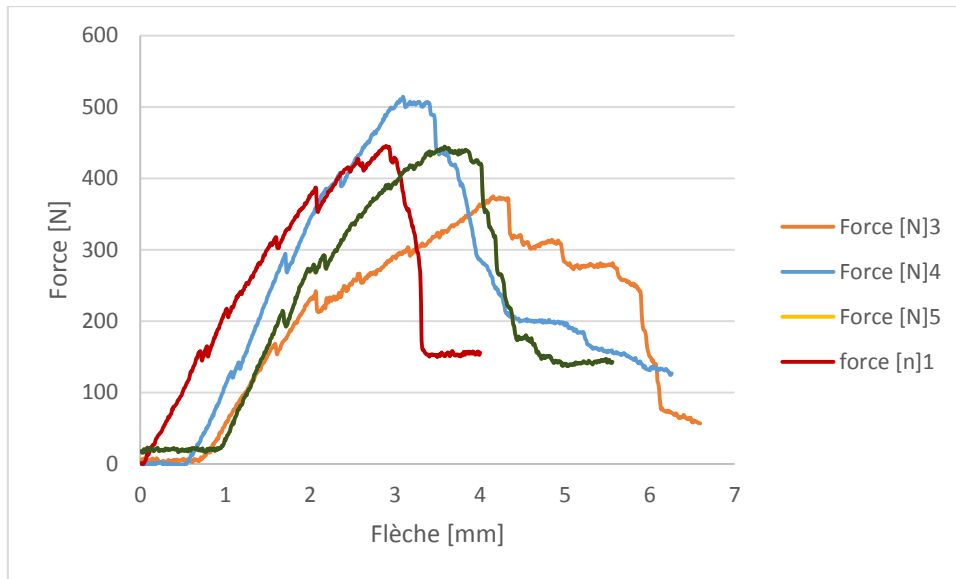


Figure V.16. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué deux couches mat chargé 5% G2.

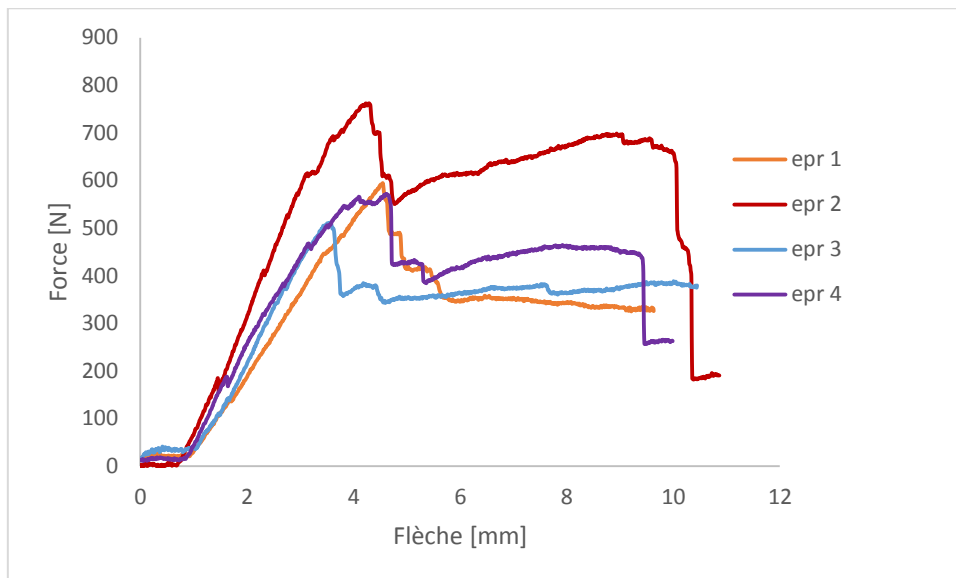


Figure V.17. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué trois couches chargé 5% G2.

Tableau V.28. Propriétés en flexion des stratifiés chargés 10% AL G2.

	Eprouvette	Ep1	Ep2	Ep3	Ep4	Ep5	Moyenne
Une couche	Force [N]	136.80	167.88	111.74	239.45	248.91	180.95
	Course [mm]	5.01	3.07	2.93	5.09	3.62	3.94
Deux couches	Force [N]	546.52	557.31	299.15	471.20	-	468.54
	Course [mm]	2.80	4.71	4.68	3.78	-	3.99
Trois couches	Force [N]	651.62	640.13	759.75	775.23	760.56	717.45
	Course [mm]	4.79	4.40	4.32	3.63	3.38	4.10

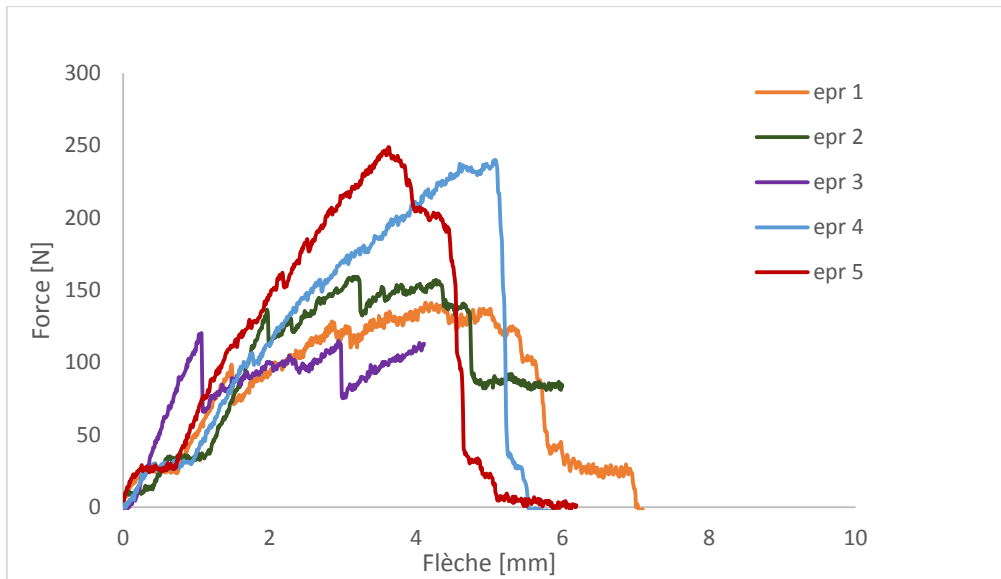


Figure V.18. Courbe force / course d'un stratifié constitué d'une couche mat chargé 10% G2.

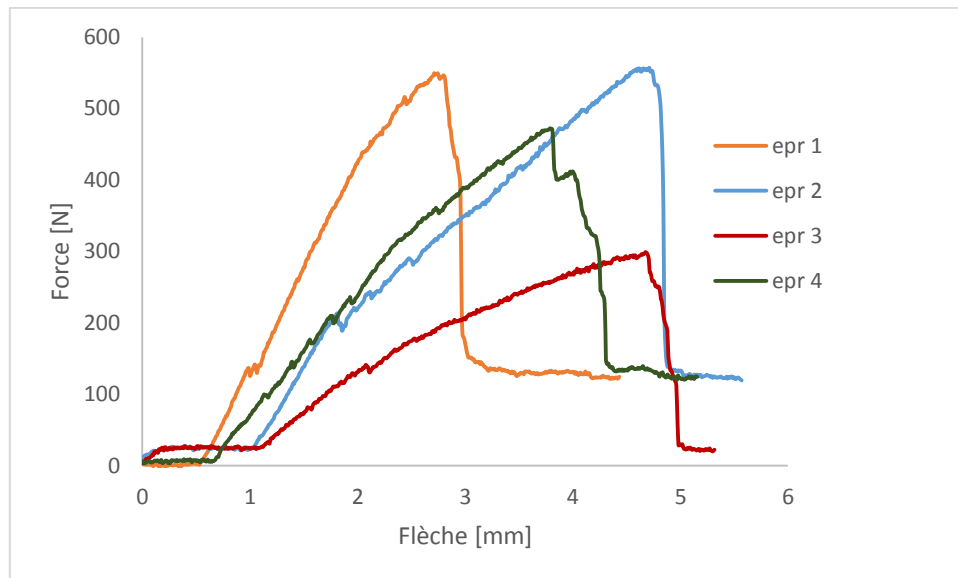


Figure V.19. Courbe force /flèche d'un stratifié constitué deux couches mat chargé 10% G2.

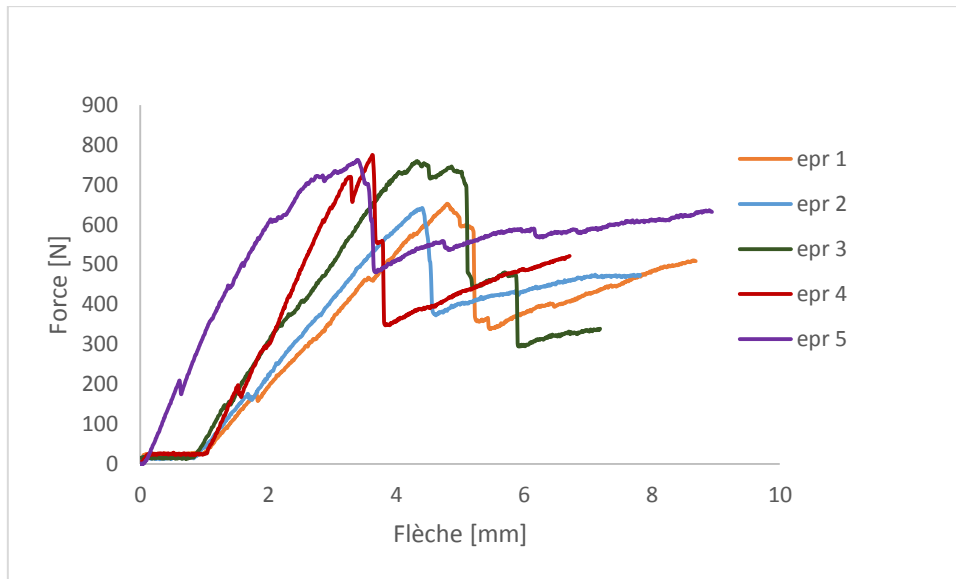


Figure V.20. Courbe force / flèche d'un stratifié constitué trois couches chargé 10% G2.

Les figures (V.9-V.20) montrent qu'une chute importante des propriétés mécaniques a été observée avec l'ajout de la charge d'aluminium. Cependant, l'inverse à signaler concernant les stratifiés constitués de trois couches. Une augmentation remarquable de la force maximale à rupture en fonction de la charge d'aluminium.

Pour que mieux évaluer l'effet de taux de charges et granulométries sur les caractéristiques d'usage de nos matériaux, une étude comparative de l'ensemble des résultats sera présentée et discutée par la suite.

3. Discussion et interprétation des résultats

Selon la qualité de l'ensemble des résultats obtenus nous avons constaté que le comportement de nos matériaux peut être modifié par plusieurs paramètres à savoir : l'architecte du renfort, le nombre de couches, le taux de chargement et la granulométrie. Les différents résultats seront regroupés et présentés selon ces paramètres.

3. 1. Interprétation des résultats de la résilience

La résilience des composites est un point primordial qui nous permet de caractériser la résistance au choc. A partir des résultats de la résilience précédents, les valeurs moyennes ont été rapportées dans le tableau V.29.

Tableau V.29. Valeurs moyennes de la résilience de différents matériaux.

	R+Al recyclé		Une couche		Deux couches		Trois couches	
	5%	10%	5%	10%	5%	10%	5%	10%
G1	0.125	2.608	3.976	2.608	3.978	3.678	10.043	8.146
G2	0.118	2.279	3.701	2.279	5.579	4.717	7.854	9.954

Les résultats obtenus sont présentés sous forme d’histogrammes afin de bien suivre l’influence des différents paramètres sur le comportement au choc.

- **Pour le composite chargé**

La figure V.21 illustre une présentation comparative de résilience d’un polyester chargé par 5% et 10% de l’AL recyclé de différente granulométrie G1 et G2. Nous avons remarqué que la résilience à 10 % est nettement supérieure à celle à 5% pour les deux granulométries. A 5%, les valeurs de résilience sont proches pour G1 et G2 et s’améliore avec l’augmentation de taux de charge d’Al. Nous avons également constaté que la résilience est supérieure beaucoup plus pour le composite à 10% de G1.

D’après des remarques, nous pouvons conclure que :

- L’évolution de la résilience est proportionnelle avec la variation de taux de charge D’AL ;
- La granulométrie peut améliorer la résilience ;
- Plus que la granulométrie est petite $G1 < G2$, le composite est plus résilient.

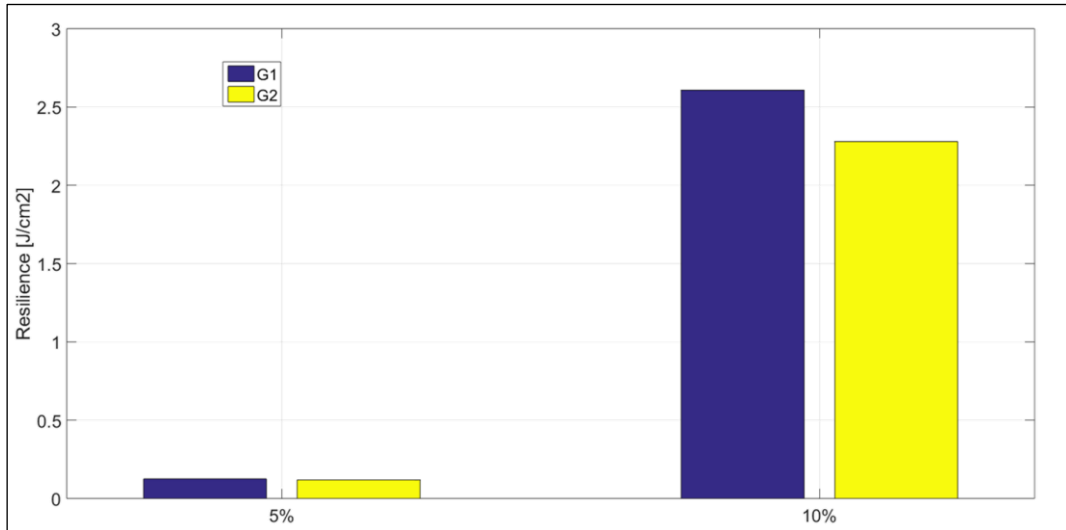


Figure V.21. Résilience des composites chargés des différentes granulométries.

Il serait important d'étudier la variation de la résilience avec plusieurs pourcentages et des granulométries inférieure à G1.

- **Pour stratifié**

Les figures V.22 et V.23 présentent une comparaison des valeurs de résilience entre les différents composites à une couche, deux couches et trois couches en fonction de la granulométrie G1 et G2 successivement à 5% PVC recyclé et 10%.

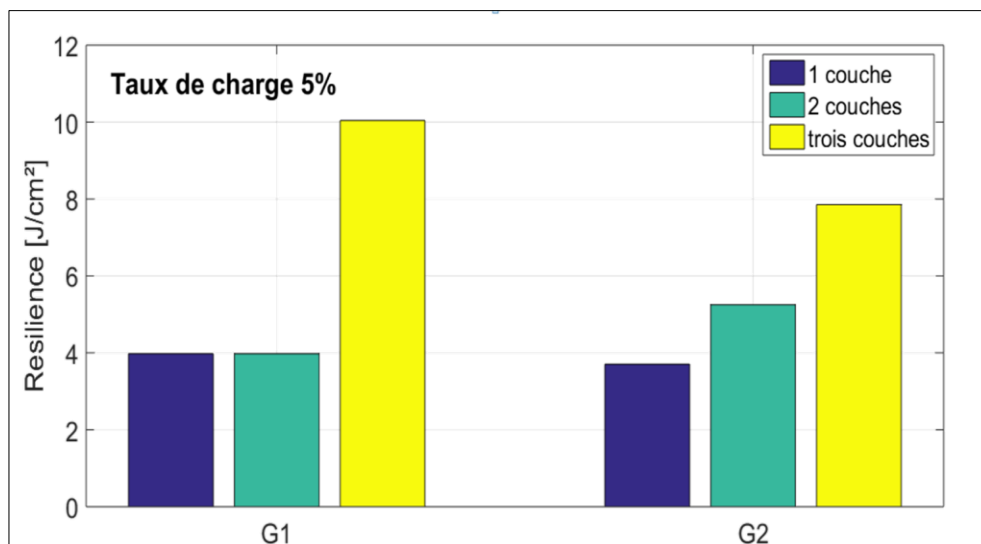


Figure V.22. Résilience des stratifiés chargés de différentes granulométries à 5%.

Chapitre V : Résultats et discussions

La figure V.22 montre que la résilience est influencée par le nombre de couche et la granulométrie. Plus que le composite est renforcé par plus de couche en fibres de verre plus que sa résilience est améliorée, la preuve elle est supérieure pour les stratifiés à trois couches.

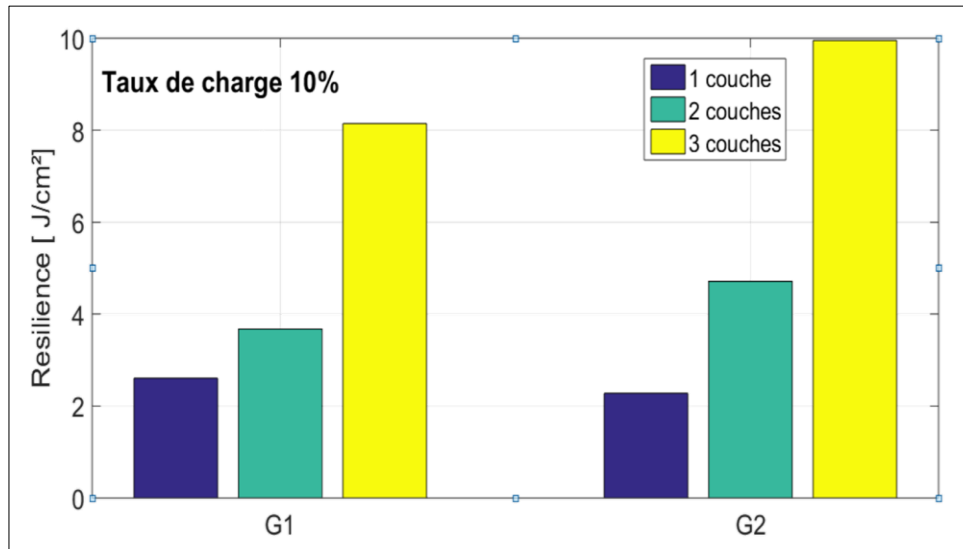


Figure V.23. Résilience des stratifiés chargés de différentes granulométries à 10%.

Même remarque pour l'effet de la granulométrie, toujours importante pour G1 sauf pour le stratifié constitué de deux couches en mat.

Pour la figure V.24, même remarque concernant les composites à trois couches. Toujours supérieure sauf que elle est importante pour la granulométrie G2 à l'inverse des composites chargés de 5% d'AL.

Afin de suivre la variation de la résilience en fonction de taux et faite une comparaison entre les différents matériaux nous avons tracé les courbes présentées par les figures V.24 et V.25.

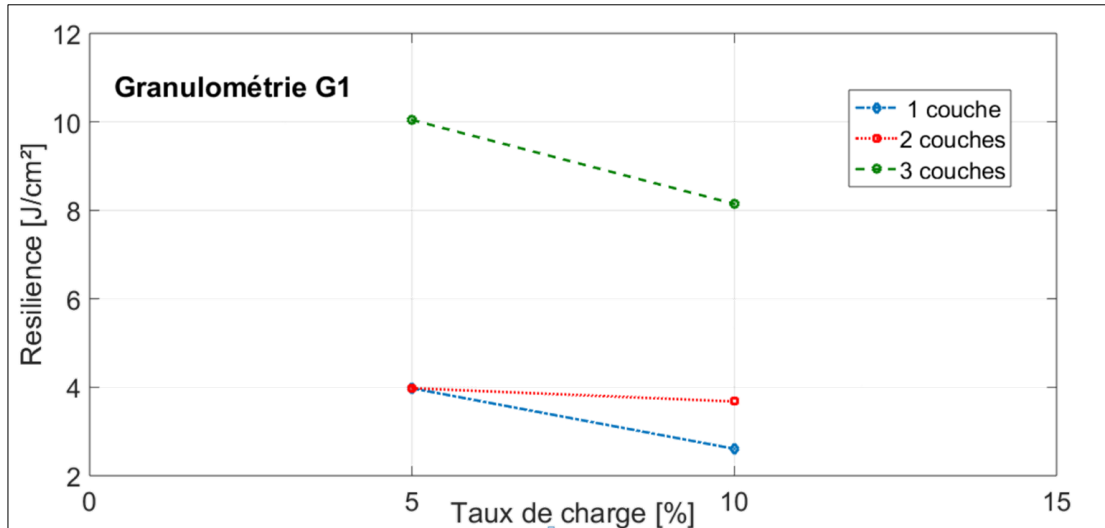


Figure V.24. Variation de la résilience des matériaux chargés en fonction de taux de charge pour G1.

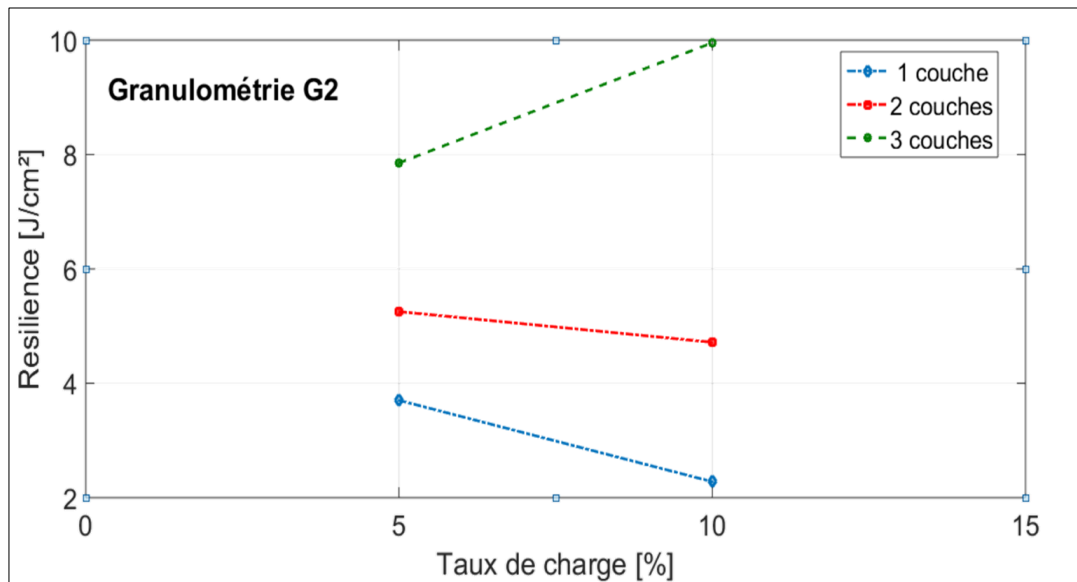


Figure V.25. Variation de la résilience des matériaux chargés en fonction de taux de charge pour G2.

D'après les figures V.24 et V.25, nous avons constaté que la variation de la résilience en fonction de taux de charges est la même pour les deux granulométries G1 et G2. Une diminution de la résilience avec l'augmentation de taux de charges pour les composites constitués d'une couche et deux couches de mat. Néanmoins, l'inverse à signaler pour les stratifiés constitués de trois couches où nous avons constaté que la variation de la résilience est décroissante avec le taux pour G1. Par contre, pour G2 elle a une variation croissante avec l'augmentation de taux d'AL.

Afin de bien comprendre et expliquer l'influence de l'ajout de la charge d'aluminium il est important de comparer ces résultats avec ceux des composites non chargés.

3.2. Interprétation des résultats de flexion

Dans cette section, nous allons regrouper tous les résultats obtenus afin de suivre la variation des propriétés mécaniques en flexion des différents matériaux en fonction de nombre de couche en tenu compte de l'effet de l'introduction de l'aluminium recyclé.

3.2.1. L'effet de renfort et de charge sur la résine polyester

Les valeurs moyennes des propriétés mécaniques de la résine seule et les différents composites en flexion sont regroupées dans le tableau V.30.

Tableau V.30. *Propriétés mécaniques de différents lots*

	Force [N]	Flèche [mm]
Résine seule	367.55	5.47
Renforcé par fibre de verre	453.51	5.36
Chargé d'aluminium G1	89.46	1.74
Chargé d'aluminium G2	126.07	1.8

Les résultats sont présentés sous forme des histogrammes illustrés par la figure V.27

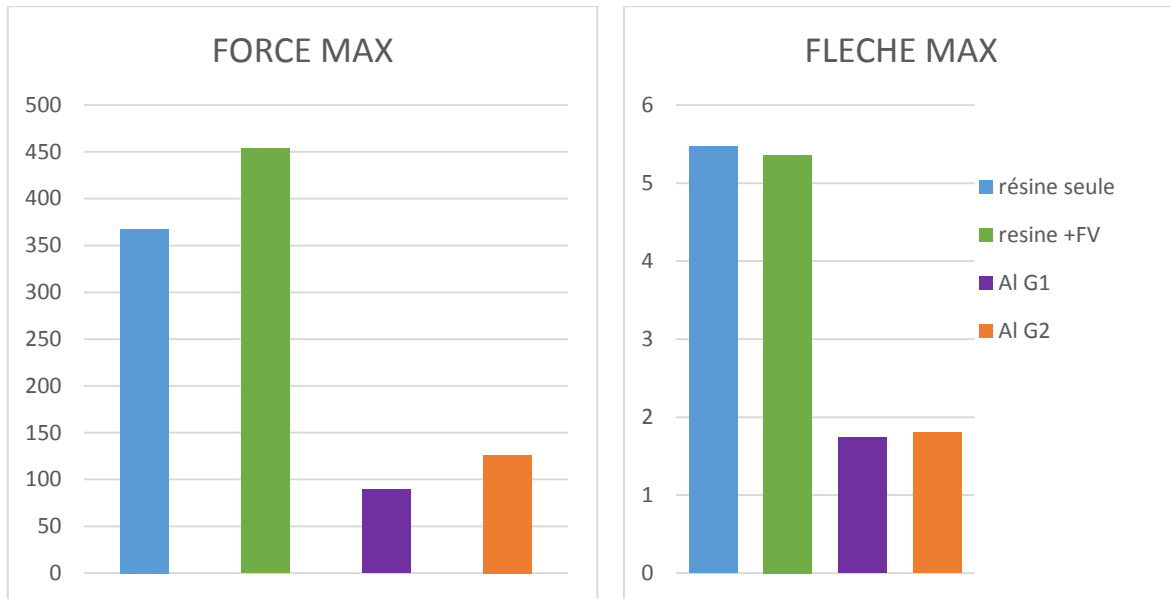


Figure V.27. *Présentation comparative des propriétés mécanique.*

Selon la figure V.27, nous avons constaté que les propriétés en flexion sont influencées par la fibre de verre et la charge d’Al recyclé. Le composite renforcé par la fibre de verre sa force maximale a été amélioré de 23.38% par rapport à celle de la résinée polyester. Contrairement aux matériaux chargés en Al recyclé, où nous avons remarqué une chute importante des forces 75.66% et 65.69 successivement pour les granulométries G1 et G2 ainsi que de la flèche (68.19 % pour G1 et 67.09% G2).

La différence des résultats entre les valeurs de la granulométrie G1 et G2 prouve que la taille des charges peuvent influencés le comportement des matériaux, Donc il serait important d’étudier l’influence de plusieurs granulométries sur l’évolution des composites.

3.2.2. Comportement des stratifiés en fonction de nombre de couches

Le tableau V.31 regroupe les caractéristiques mécaniques de différents stratifiés. Ces résultats sont illustrés par la figure V.28.

Tableau V.31. *Propriétés mécaniques de différents stratifiés*

	1 couche	2 couches	3 couches
Force max [N]	453.51	461.55	384.36
Flèche [mm]	5.36	5.16	5.88

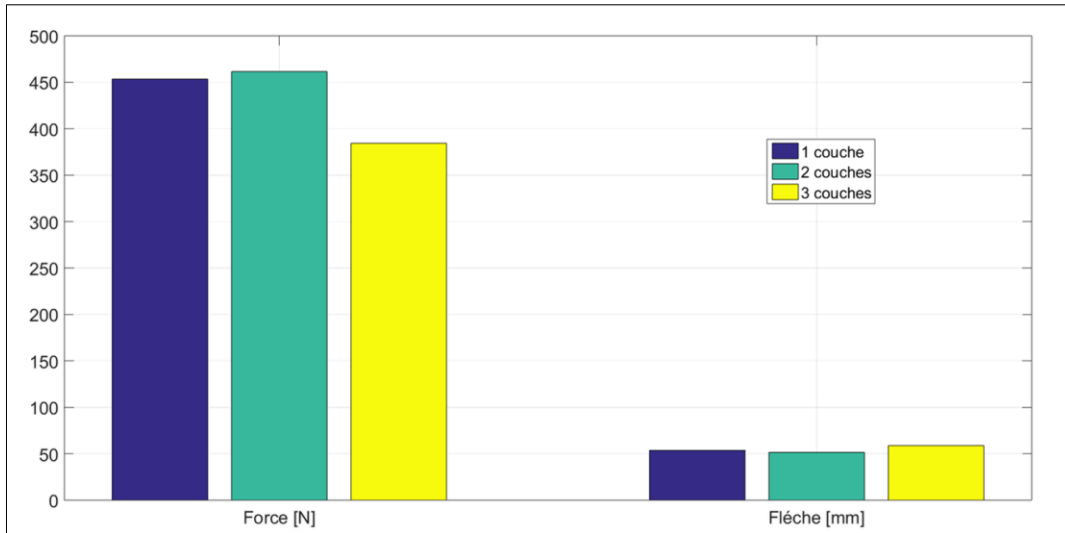


Figure V.28. Propriétés mécanique en fonction de nombre de couches.

La figure V.28 présentes les propriétés mécanique de différents stratifié. La comparaison des résultats couches que la force maximale à rupture est enregistrée pour le stratifiés constitués de deux couches en mats. Par contre, la flèche maximale est inférieure si nous la comparons aux autres stratifiés. Le composite constitué de deux couches de met et Taffetas, sa force maximale à rupture est réduite de 16,72% par rapport au composite de deux couches. Contrairement à la flèche, une amélioration de 13.95% a été observée.

3.3. Influence de la charge d'aluminium recyclé

Dans cette partie, nous nous sommes intéressés à l'effet de l'incorporation du l'aluminium recyclé sur le comportement de différents composites dans le but d'améliorer les propriétés mécaniques.

Deux paramètres importants ont été pris en considération, le taux de charge et la granulométrie où nous avons choisi deux taux de recyclé aluminium 5% et 10% pour les différentes granulométries nommées $G1 < 0.8$ et $0.8 < G2 < 1.25$ mm.

3.3.1. Influence de la charge aluminium recyclé sur la résine polyester

Les différents résultats sont regroupés dans le tableau V.32 et présentés par la figure V.29.

Tableau V.32. Propriétés mécaniques de différents composites chargés d'aluminium recyclé

	5%		10%	
	G1	G2	G1	G2
Force [N]	93.90	107.24	89.46	126.07
Flèche [mm]	2.12	2.00	1.74	1.80

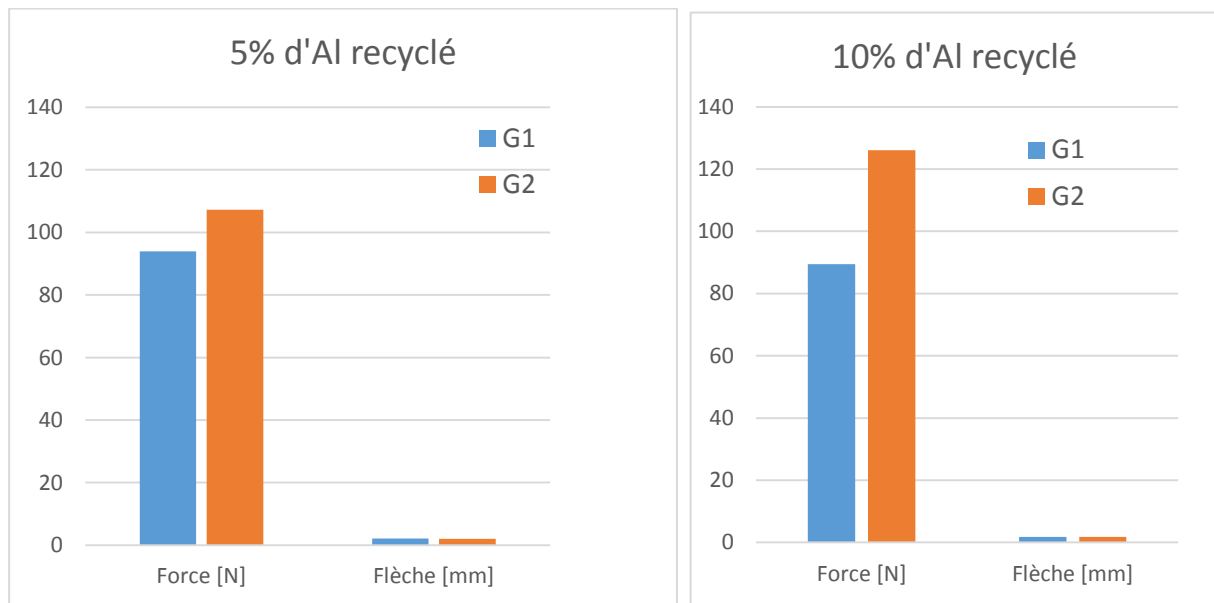


Figure V.29. Présentation comparative des propriétés mécaniques pour 5% et 10% d'AL recyclé.

D'après la figure V.29, nous avons remarqué que la force à rupture de la granulométrie G2 est nettement supérieure à la granulométrie G1 pour les deux pourcentages 5% et 10%. Une augmentation de 17,55% de la force maximale pour composite chargé de 10% G2. Contrairement à la granulométrie G1, une variation inversement proportionnelle de la force avec le pourcentage de charge d'AL.

La figure V.30. Présente la variation des propriétés mécaniques des différentes granulométries en fonction de pourcentage d'aluminium.

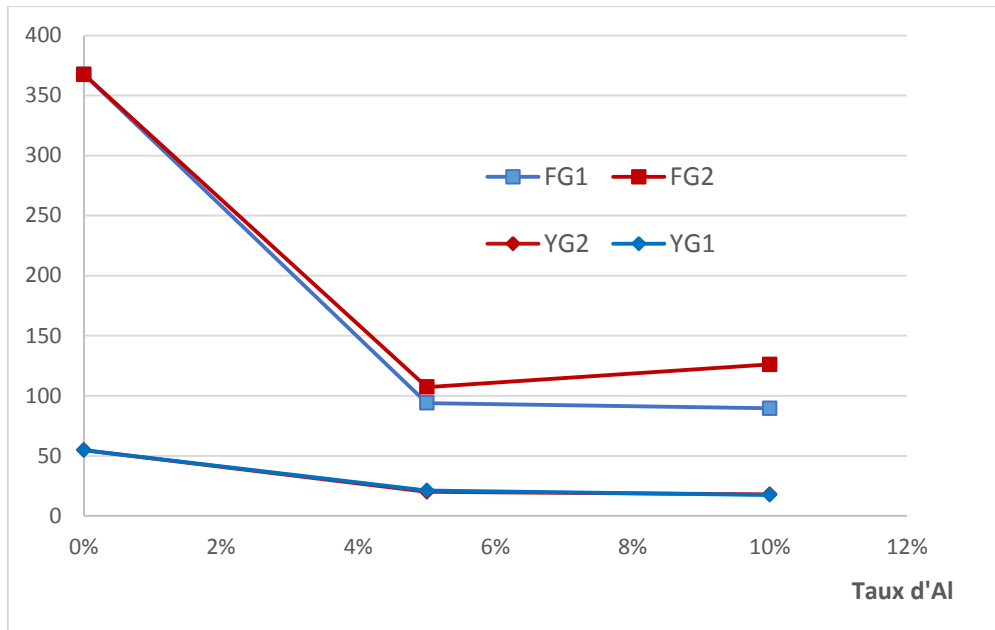


Figure V.30. *Variation des propriétés mécanique des composites en fonction de taux de charges d'Al recyclé.*

D'après les observations de la figure V.30. Nous pouvons constater que l'ajout de la charge dans une résine polyester influe négativement sur les caractéristiques mécaniques en flexion trois points de nos matériaux, où nous avons enregistré des chutes importantes.

Malgré que nous avons remarqué une légère amélioration des propriétés à 10%, mais reste toujours inférieures à la résine polyester seule, est cela s'explique par une mauvaise adhérence d'interface entre résine/Aluminium.

3.3.2. Influence de la charge aluminium recyclé sur les stratifiés

Dans cette section, nous allons présenter les résultats des propriétés mécanique de différents stratifiés constitués d'une couche, deux couche et trois couche (mat+taffetas +mat) regroupés selon la granulométrie $G1 < 0.8$ et $0.8 < G2 < 1.25$ dans le tableau V.4. En axant sur la variation de taux de recyclé.

Tableau V.33. Propriétés mécaniques de différents stratifiés contenant du recyclé.

		G1 (<0.8mm)		0.8<G2<1.25	
		F [N]	Y[mm]	F [N]	Y[mm]
Une couche	5%	225.77	3.14	234.78	4.80
	10%	241.05	4.28	180.95	3.94
Deux couches	5%	408.35	3.98	442.28	3.53
	10%	317.16	3.52	468.54	3.99
Trois couches	5%	738.34	4.47	610.2	4.26
	10%	686.41	4.31	717.45	4.10

Afin de bien comprendre et d'évaluer le comportement de nos stratifié en fonction de pourcentage. Une étude comparative a été faite selon chaque couche.

- **Une couche**

Les figures V.31 et V.32 présentent une comparaison des propriétés mécanique pour des stratifiés constitués d'une couche en mat chargés 5% et 10% d'AL recyclé et autre non chargé.

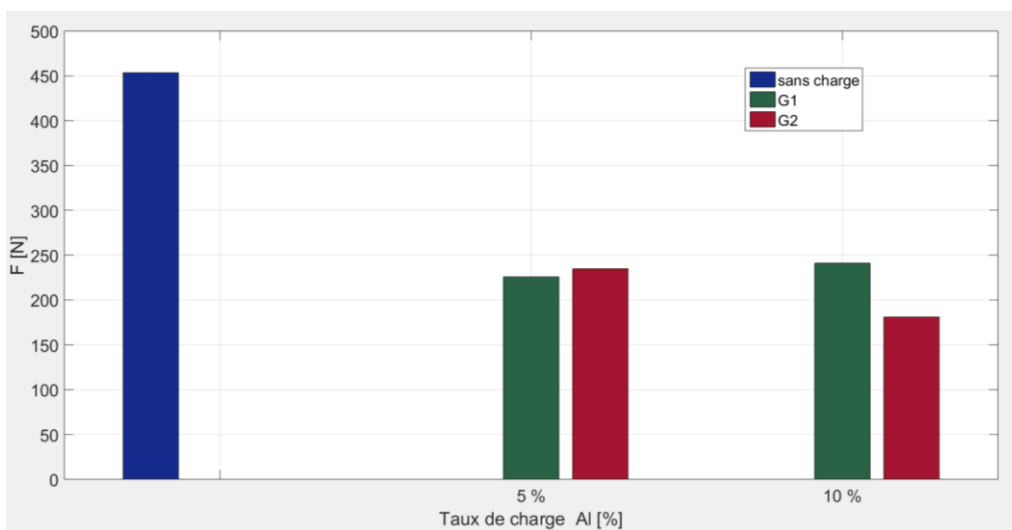


Figure V.31. Présentation de la force maximale en flexion des stratifiés renforcés d'une couche de mat non chargé et chargé d'Al recyclé.

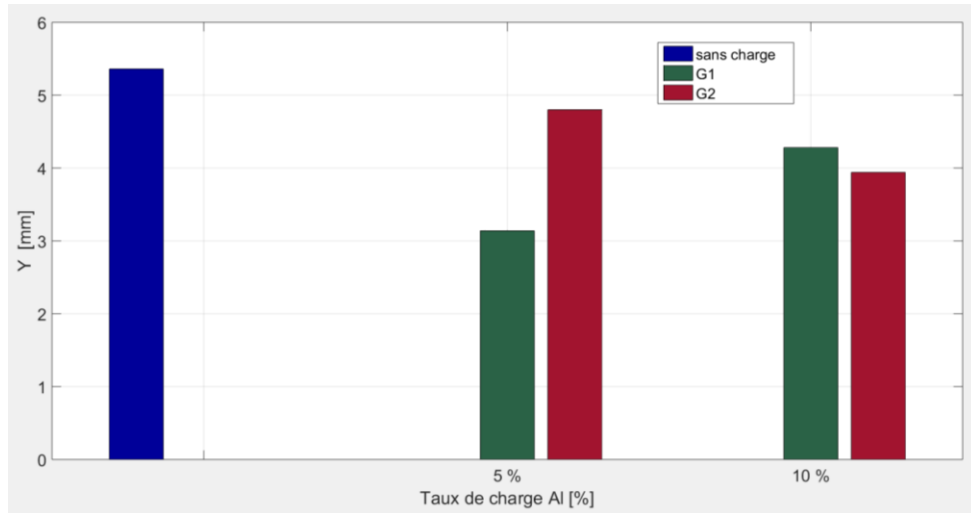


Figure V.32. *Présentation de la flèche maximale en flexion des stratifiés renforcés d'une couche de mat non chargés et chargés d'AL recyclé.*

La comparaison des résultats des caractéristiques en flexion de quatre composites constitués d'une couche de mat 600 g/m^2 chargés selon deux pourcentages différents 5% et 10% et deux granulométries G1 et G2 avec un composite non chargé montre que l'ajout de charge n'a apporté aucune amélioration. Selon la figure V.31, une chute importante de la force a été observée.

- **deux couches**

Les figures V.34 et V.35 présentent une comparaison des propriétés mécaniques pour des stratifiés constitués de deux couches en mat chargés 5% et 10% d'AL recyclé et autre non chargé.

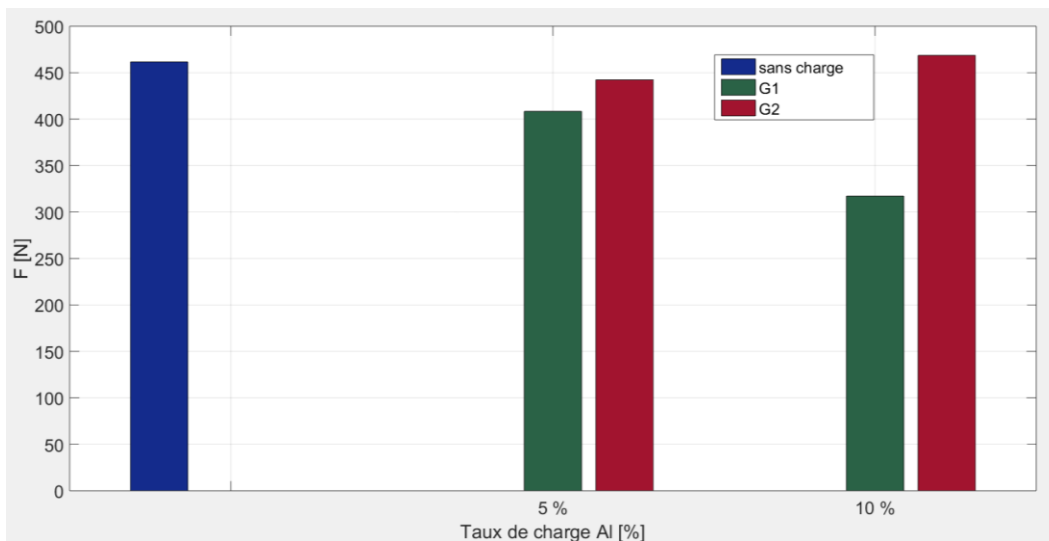


Figure V.34. *Présentation de la force maximale en flexion des stratifiés renforcés de deux couches de mat non chargés et chargés d'AL recyclé.*

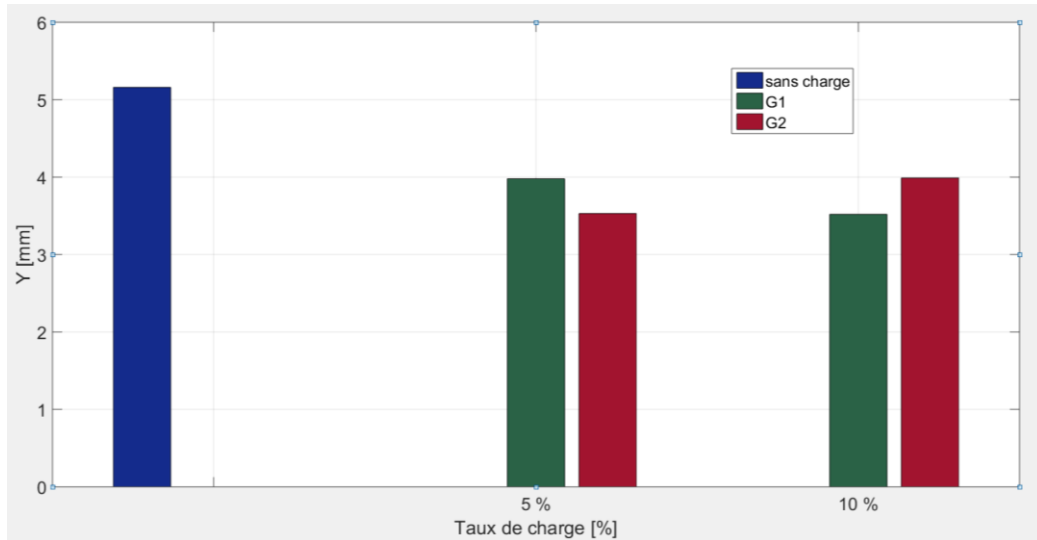


Figure V.35. Présentation de la flèche maximale en flexion des stratifiés renforcés deux couches de mat non chargés et chargés d'AL recyclé.

Les résultats présentés par les figures V.34 et V.35, montrent que l'ajout de l'aluminium recyclé n'influe pas de la même façon sur la force maximale par rapport au composite une couche. Nous avons remarqué une augmentation de 27,47% est enregistré pour le composite chargé à 10% G2. L'inverse à signaler concernant la flèche à rupture.

- **Trois couches**

Les figures V.36 et V.37 présentent une comparaison des propriétés mécanique pour des stratifiés constitués de trois couches chargés 5% et 10% d'AL recyclé et autre non chargé.

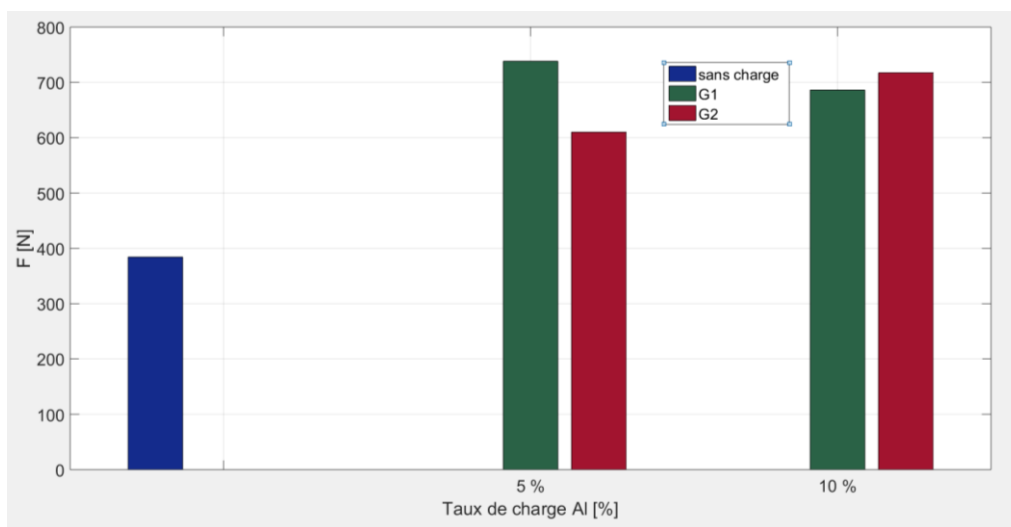


Figure V.36. Présentation de la force maximale en flexion des stratifiés renforcés de trois couches non chargés et chargés d'AL recyclé.

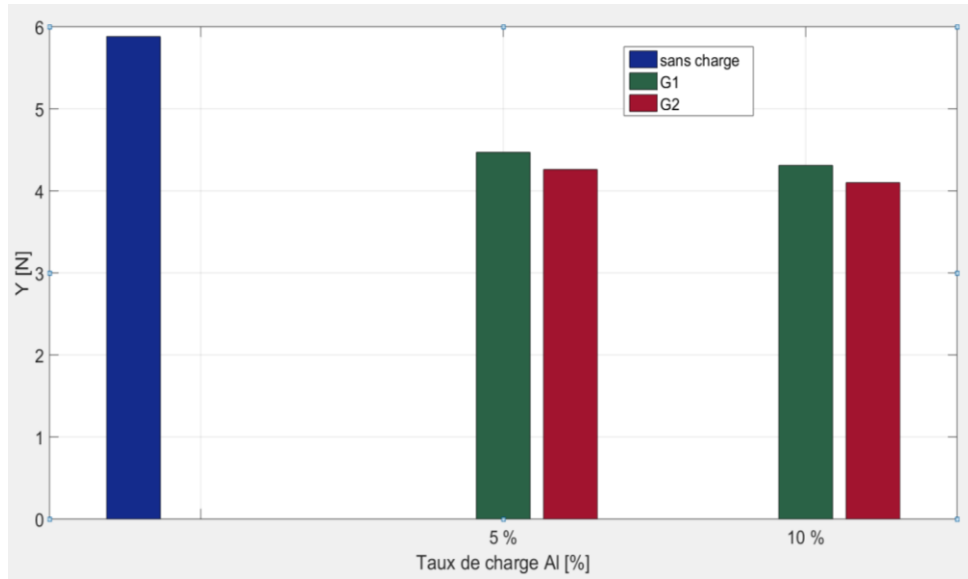


Figure V.37. Présentation de la flèche maximale en flexion des stratifiés renforcés de trois couches non chargé et chargé d'AL recyclé.

D'après les figures V.36 et V.37, nous avons remarqué que l'incorporation des charges d'aluminium influent uniquement la flèche, par contre la force maximale à rupture a été améliorée d'une manière significative. Une augmentation de 92.09 % pour le stratifié chargé 5% du recyclé granulométrie G1 et 86,66 % pour le stratifié chargé 10% du recyclé granulométrie G2. Ces résultats confirment que la granulométrie G1 confère au composite de meilleures propriétés que la granulométrie G2.

Selon l'ensemble des résultats des différents stratifiés nous avons constaté que les caractéristiques mécaniques en flexion de différentes granulométries ne réagissent pas de la même évolution avec la variation de taux de charges d'aluminium.

Afin de visualiser plus clairement la variation en fonction de pourcentage, une variation adimensionnelle des propriétés mécaniques de chaque granulométrie en fonction de pourcentage sera présentée en figure V.38 et V.39.

Nous avons constaté que les propriétés mécaniques à 5 % sont chutées pour tous les composites à différentes granulométries G1 et G2 .Néanmoins l'inverse a été observé pour les stratifiés à trois couches. La variation n'est pas la même nous ne pouvons pas généraliser l'évolution des propriétés des granulométries G1 et G2 avec les pourcentages et cela en raison des variations instables. Par exemple pour la granulométrie G1 (figureV.38), la force à rupture de 5% à 10% s'améliore pour composite une couche et diminue pour deux couches.

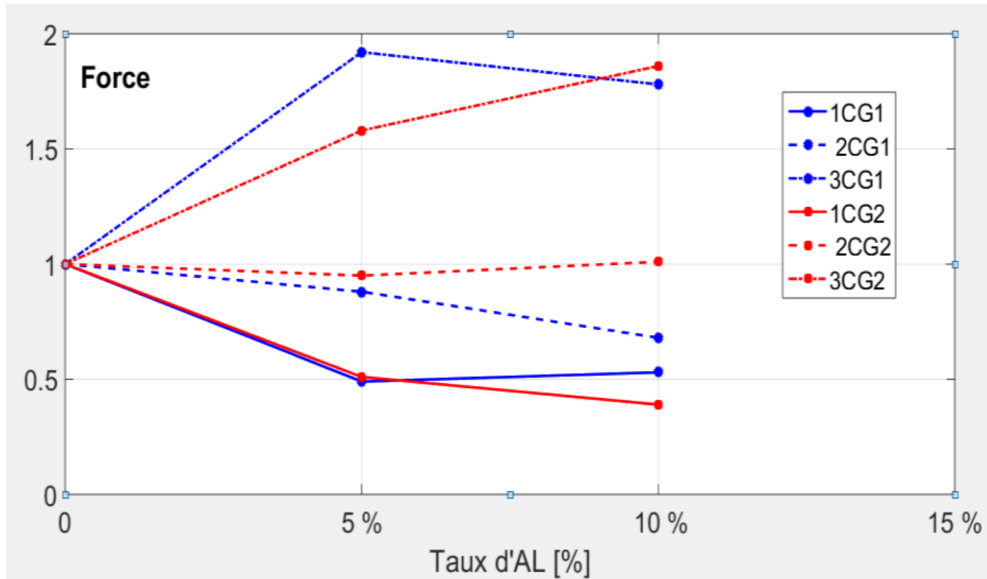


Figure V.38. Variation adimensionnelle de la force à rupture des différents composites.

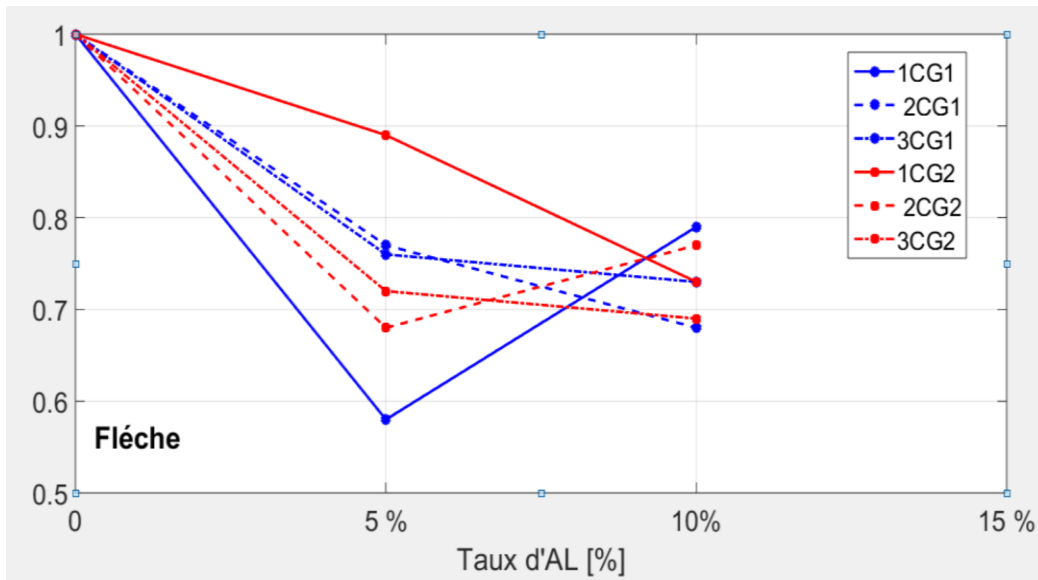


Figure V.39. Variation adimensionnelle de la force à rupture des différents composites.

Par contre en figure V.39, une augmentation importante de la flèche pour composite une couche. Afin de confirmer nos résultats, il serait important de suivre notre étude par plusieurs taux de charges ainsi que vérifier la qualité interface polyester/aluminium et aluminium /fibre de verre.

L'analyse de l'ensemble des résultats ainsi que les différentes comparaisons faites entre les différents composites nous nous ont permis de sélectionner le meilleur composite en tenant compte de la charge d'aluminium et la granulométrie.

D'après la figure V.40 qui regroupe les différentes caractéristiques de résilience et de flexion, le bon composite qui a des propriétés importantes est le stratifié constitué de trois couches chargé à 5% d'aluminium de granulométrie G1.

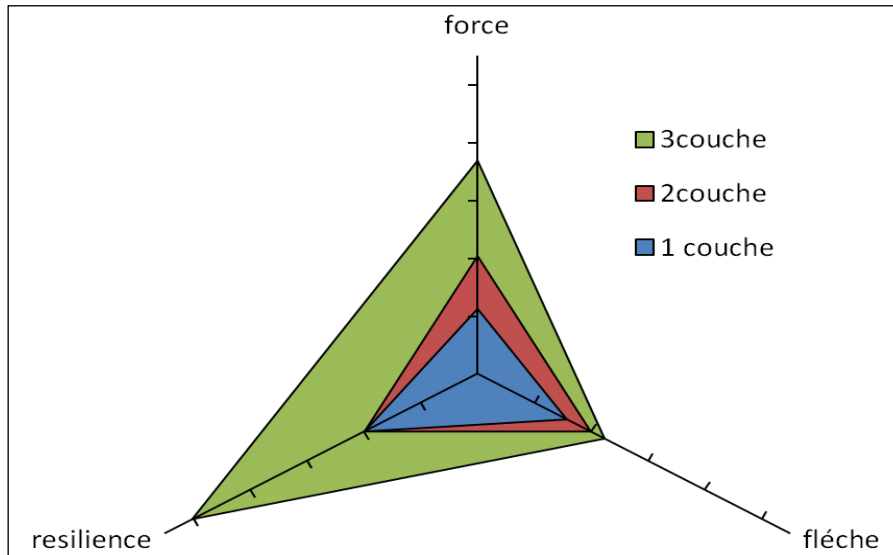


Figure V.40. *Caractéristiques de résilience et de flexion des différents composites chargés 5% d'AL G1*

En final, nous concluons que :

- Les composites sont des matériaux d'avenir en raison de leur facilité d'élaboration et à leurs propriétés intéressantes qui peuvent être modifiées et améliorées par le bon choix de leurs constituants (matrice, renfort et charge). Autant que leur comportement est influencé par le taux de renforcement, le nombre de couche et leur orientation nous pouvons les modeler à volonté selon le domaine d'utilisation d'une façon à répondre aux exigences pour lesquelles ils ont été conçus ;
- La caractérisation des stratifiés est vraiment complexe vu ses différents composants ;
- La matrice résine/renfort d'un composites assurer une bonne adhérence pour avoir une bonnes propriétés d'usage des composites ;
- La granulométrie de charge a une influence sur les propriétés mécaniques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les travaux de ce mémoire ont porté sur la caractérisation mécanique des matériaux composites stratifiés à matrice polyester renforcés par différentes fibres de verre (mat 600 et roving) chargé en aluminium recyclé en flexion trois points et aux chocs (résilience). Dans cette étude un vif intérêt a été porté sur l'effet du taux de charges d'aluminium recyclé et leur granulométrie ainsi l'architecte du renfort sur les propriétés mécaniques du composite.

Selon les résultats obtenus, nous avons montré qu'il existe une importante influence de ces paramètres cités ci-dessus sur les propriétés mécaniques et sont capables de modifier le comportement de nos matériaux. L'analyse et la comparaison des résultats nous fournissent des renseignements pertinents sur les matériaux élaborés qui seront utilisés comme référence pour des études plus approfondies.

En final, nous pouvons dire que nous avons atteint notre objectif et nous conduits aux conclusions suivantes :

- Résultats en flexion

a. Influence de fibre

b. Influence du taux de charge en flexion

L'ajout de pourcentage de charge de l'aluminium recyclé augmente globalement la force mais diminue la flèche du composite élaboré.

- Résultat de l'essai de résilience :

a. L'influence de fibre

Le matériau composite en fibre de mat600 est plus résilient que la matrice seule, aussi dans le cas de multicouche élaboré est plus résilience que la résine seule.

b. L'influence à la charge

La charge augmente la résilience des matériaux.

A noter aussi que la charge de 5% G1 est plus résistant qu'aux matériaux composites.

En perspectives, le travail qui a été présenté dans ce manuscrit peut être enrichi et développé encore plus. Il serait très intéressant :

- D'étudier le comportement des composites avec plusieurs pourcentages de charge en aluminium ;
- D'étudier le comportement des composites avec des granulométries inférieures à G_1 ;
- Faire des essais interlaminaires pour mieux comprendre les mécanismes de rupture engendrés dans les stratifiés ;
- l'effet de l'impact sur la réponse au choc.

Bibliographie

- [1] **Bahlouli, N.**, « Comportement mécanique en température du pli élémentaire d'un stratifié carbone/époxy », 1994, Cachan, Ecole normale supérieure
- [2] **Pierre JACQUINET** Utilisation des matériaux composites ; Edition HERMES, Paris 1991.
- [3] **Marie BERTHLOT Jean-** Matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures 4^{ème} édition, Ed TEC&DOC, Lavoisier, 2005.
- [4] **El Hadji Babacar LY.** Thèse doctorat Nouveaux matériaux composites thermoformables à Base de Fibres de Cellulose, institut national polytechnique de GRENOBLE, Janvier 2008.
- [5] **Klárová, M.**, Composite materials, 2015, VSB.
- [6] **Jean Marie Berthelot**, Matériaux composites, comportement mécanique et Analyse des structures, 4^{ème} Edition, Lavoisier 2005
- [7] **Djeboun Youcef**, Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des matériaux composites, Université de Biskra (2004).
- [8] **Jean Paul Bailon et Jean Marie Dorlot**, Des Matériaux ,3ème Edition, Ecole de Montréal, 2000.
- [9] **Zaidi A.** Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement). Mémoire de Magistère, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou.
- [10] **Hadadi. Manel**, « Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés » mémoire de magister, Université de Ferhat Abbas, Setif, Algérie.
- [11] **A. R. Blythe**, Electrical resistivity measurements of polymer materials, Poly Test,4 195-209, 1984
- [12] **Glossaire des matériaux composites**, EditionCARMA, octobre2006.
- [13] **Jean Marie Berthelot**, « matériaux composites, comportement mécanique et analyse des structures », 4ème édition, TEC &DOC, Le Mans Novembre 2010.
- [14] **R.P.C. Decathlon.** Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs. Congrès RFIS, 2005.

- [15] Daniel Gay, Matériaux Composites 4^{ème} Edition, Hermès 2009.
- [16] Article de Wikipédia « Dacron » et «Trevira»
- [17] (en) **David R.Lide**, CRC Handbook of chemistry and physics, TF-CRC, 2006, 87^e éd (ISBN 0849304873), p 10-202
- [18] **Michel Dequatremare Thierry Devers**, Matériaux parcours IUT, Dunod, Paris ,2012.
- [19] **J.P. Bailon, JU-M-Dorlot**, Des Matériaux, presses internationales polytechniques ,2007.
- [20] **M. Mezzo Aghiles**, Mémoire de Master, Etude d'une sollicitation Hors axes d'un composite unidirectionnelle (verre e/époxyde) : cas de la traction, 2012.
- [21] **A. ZAIDI**. Mémoire de magister « Etude du comportement de matériaux composites à matrice polymère en fatigue (effet du vieillissement) », 2014.
- [22] **F. Yahyaten ; M. Alilechene** ; Mémoire de fin d'étude <<influence des sollicitations hors axes sur les propriétés d'un stratifié à matrice polyester>>; 2013.