

République Algérienne Démocratique Et populaire
Ministère De L'enseignement Supérieur Et De La Recherche Scientifique
Université Mouloud Mammeri De Tizi-Ouzou
Faculté Du Génie De La Construction
Département De Génie Mécanique



MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDES

*En vue de l'obtention du diplôme académique de
Master en génie mécanique
Option : Génie Des Matériaux*

THEME :

*Elaboration et caractérisation d'un matériau composite
« matrice polyester chargé en PET recyclé »*

Proposé et dirigé par

Mme. MOHELLEBI F

Co-encadreur :

Mr. MOHELLEBI Mouloud

Présenté par :

Mr. HAMOUDI Anis

2019/2020

REMERCIEMENTS

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

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à mes parents et toute ma famille, qui grâce à leurs aides, mon travail a vu le jour.

Je remercie profondément ma promotrice Madame MOHELLEBI F, d'avoir accepté de diriger mon travail, par son soutien et ses conseils pertinents qui m'ont permis de travailler tranquillement.

*J'adresse mes plus vifs remerciements et reconnaissances à Mr MOHELLEBI M pour sa disponibilité et aide précieuse.
Je remercie les membres du jury qui me font l'honneur d'examiner mon travail.*

Je remercie profondément Madame MANSOURI L, de m'avoir guidé tout le long de mon mémoire ainsi pour son aide et ses conseils.

Je remercie les membres des laboratoires de : l'université UMMTO, Laboratoire Matériaux, Procédés et Environnement (Boumerdes) l'EI(AZAZGA), SISCOPLAST(DEM) pour leur aide précieuse.

Je remercie les membres de la société AZEFFOUN MARINE, en particulier son PDG.

Je remercie mes camarades de promotion pour leur soutien.

*Mes sincères remerciements vont à tous mes enseignants.
Mes remerciements vont également à tous ceux et celles qui de, près ou de loin, mon porté aide et encouragement.*

HAMOUDI Anis

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 sœur ;

A mes chers grands parents ;

A tous les personnes que j'aime ;

A tout mes amis et mes collègues

En particulier au groupe C21

HAMOUDI Anis

LISTE DES FIGURES

Figure I.1: Matériau composite.

Figure I.2 : les constituants d un matériau composite.

Figure I.3 : les différents types de renforts de base.

Figure I.4 : Bobine de fibre carbone.

Figure I.5 : Types de matrice.

Figure I. 6: Moulage au contact.

Figure I.7 : Méthode de projection simultanée.

Figure I.8 : Méthode de moulage par compression.

Figure I.9 : Méthode du moulage sous vide.

Figure I.10 : Principe du moulage par injection de résine.

Figure I.11 : composite monocouche.

Figure.1.12 : composite stratifié.

Figure.1.13 : Composite sandwichs.

Figure I.14 Construction des navires en bois.

Figure I.15 : Construction des navires en acier

Figure II.1. Motif de répétition du polyéthylène téréphtalate.

Figure II.2. Procédé d'injection d'une préforme et de soufflage (bi-étirage) de la bouteille PET.

Figure II.3.Principales transitions thermiques du PET.

Figure II. 4 Courbe contrainte-allongement de différents polymères.

Figure II.5. Courbes contrainte-déformation en traction obtenues pour le PET semi- cristallin et aux différentes températures.

Figure II.6.courbes contraintes déformation en traction obtenue a la température ambiante pour le PET.

Figure II.7.Exemple des phases du recyclage mécanique du PET dans le cas d'une post-Condensation pour fabriquer de nouvelles bouteilles alimentaires.

Figure II.8 Domaines d'utilisation des paillettes de PET recyclé.

Figure II 9. Dégradation hydrolytique du PET.

Figure.10. Dégradation thermique par rupture ionique.

Figure III.1 : traction longitudinale

Figure III.2 : traction transversale

Figure III.3 : Traction hors axes

Figure III.4 courbe de traction conventionnelle

Figure III.5 : essai de flexion trois points

Figure III.6 : courbe de contrainte déformation en flexion

Figure IV.1 : Résine à l'état liquide.

Figure IV.2 : La résine utiliser.

Figure IV.3 :P.E.T broyeur.

Figure IV.4 : La cire utilisée lors du moulage.

Figure IV.5 : Balance.

Figure IV.6 : les moules utilisée.

Figure IV.7 : L'étuve.

Figure IV.8 : Machine d'analyse infrarouge.

Figure IV.9 : Machine de flexion trois points.

Figure IV.10 : Eprouvette de flexion.

Figure IV.11 : Machine de résilience (zwick).

Figure V.1 Courbe Force / flèche pour la résine seule

Figure V.2 Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 5% de PET G1

Figure V.3 Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 10 % de PET G1

Figure V.4 Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 15 % de PET G1

Figure V.5. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 20 % de PET G1

Figure V.6. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 5 % de PET G2

Figure V.7. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 10 % de PET G2

Figure V.8. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 15 % de PET G2

Figure V.9. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 20 % de PET G2

Figure V.10. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée à 5 % de PET G3

Figure V.11. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée à 10 % de PET G3

Figure V.12. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée à 15 % de PET G3

Figure V.13. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée à 20 % de PET G3

Figure V.14. Courbe Force / flèche pour la résine traitée

Figure V.15. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 5% PET G1

Figure V.16. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 10% PET G1

Figure V.17. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 15% PET G1

Figure V.18. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 20 % PET G1

Figure V.19. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 5 % PET G2

Figure V.20. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 10 % PET G2

Figure V.21. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 15 % PET G2

Figure V.22. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 20 % PET G2

Figure V.23. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 5 % PET G3

Figure V.24. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 10 % PET G3

Figure V.25. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 15 % PET G3

Figure V.26. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 20 % PET

Figure V.27. Photo des éprouvettes rompues en flexion

Figure V.28. Superposition des courbes Force / flèche pour la résine seule

Figure V.29. Représentation comparative des caractéristiques mécanique de la résine seule.

Figure V.30. Représentation comparative des caractéristiques mécanique de M.C.G1.

Figure V.31. Variation des caractéristiques mécaniques en fonction du taux de charge
M.C.G1.

Figure V.32. Représentation comparative des caractéristiques mécanique de M.C.G2.

Figure V.33. Variation des caractéristiques mécanique en fonction du taux de charge du composite
M.C.G2

Figure V.34. Représentation comparative des caractéristiques mécanique de M.C.G3.

Figure V.35. Variation des caractéristiques mécanique en fonction du taux de charge du composite
M.C.G3.

Figure V.36. Variation de la contrainte à la rupture en fonction du taux de charge et de la

Figure V.37. Variation du module apparent en fonction du taux de charge et de la granulométrie.

Figure V.38. Variation de la déformation en fonction du taux de charge et de la granulométrie

Figure V.39. Variation de la résilience en fonction du taux de charge et de la granulométrie

Figure V.40. Spectre infra rouge de la résine seule

Figure.41. Spectre infra rouge de la résine chargée

Figure.42. Superposition des spectres infra rouge de la résine seule et de la résine chargée

LISTE DES TABLEAUX

Tableau I.1 : Caractéristiques des fibres de verre.

Tableau II.1.: Fiche technique de la résine.

Tableau II.2. : Avantages et inconvénients des résines polyesters.

Tableau II.3. Applications du PET en fonction de sa viscosité.

Tableau II.4.Stabilité de la teinture de fibres PET en fonction de leur section et de la présence d'un absorbeur ultraviolet.

Tableau II.5.: paramètres de la maille du PET.

Tableau II.6.: Propriétés mécaniques d'échantillons de PET vierge et recyclé obtenues par injection.

Tableau IV.1 : dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points, selon ISO 14125

Tableau V.1.Valeurs de la résilience de la résine seule traitée

Tableau V.2. Valeurs de résilience de la résine seule traitée chargée à 5% PET G1

Tableau V.3. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 10% PET G1

Tableau V.4. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 15% PET G1

Tableau V.5. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 20 % PET G1

Tableau V.6. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 5% PET G2

Tableau V.7. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 10% PET G2

Tableau V.8. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 15% PET G2

Tableau V.9. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 20% PET G2

Tableau V.10. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 5% PET G3

Tableau V.11. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 10% PET G3

Tableau V.12. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 15% PET G3

Tableau V.13 Valeurs moyennes des caractéristiques mécanique de la résine seule

Tableau V.14 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G1non traité

Tableau V.15 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G1traité

Tableau V.16 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G2non traité

Tableau V.17 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G2traité

Tableau V.18 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G3 non traité

Tableau V.19 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G3 traité

SOMMAIRE

Introduction générale

CHAPITRE I : GENERALITES SUR LES MATERIAUX COPOSITES

I-INTRODUCTION.....	3
I. 1. Généralités sur les composites	3
I. 1. 1. Définition	3
I.2. Différents types de matériaux composites.....	4
I.3. Classification suivant la forme des constituants.....	4
I.3.1. Composites à fibres	4
I.3.2.Composites à particules.....	5
I.4. Classification suivant la nature des constituants	5
I. 5. Les constituants d'un matériau composite	6
I. 5. 1. Les renforts.....	7
I.5.2.Différents types de renforts	8
1.5.2.1. Renfort en fibres discontinues.....	8
1.5.2.2. Renfort continue.....	8
I.6. Les charges et les additifs.....	10
I.6.1. Les charge.....	10
I.6.2. les additifs	10
I.6.3. La matrice.....	10
I. 7. Mise en œuvre des composites	11
I. 7. 1. Moulage au contact	11
I. 7. 2. Moulage par projection	12
I. 7. 3. Moulage par compression	12
I. 7. 4. Moulage sous vide.....	13
I. 7. 5. Moulage par transfert de résine (RTM- Resin Transfert Molding).....	14
I.8 Architecture du composite.....	14
I.8.1.Monocouches	14
I.8.2.Stratifiés	15

I.8.3.Sandwichs.....	16
I.9. Caractéristiques des matériaux composites.....	16
I.9.1. Domaines d'utilisation des matériaux composites.....	17
I.10. Les matériaux composites dans la construction navale.....	17
I.10.1.Introduction : Généralités sur la construction navale.....	17
I.10.2. Activités de la construction navale.....	18
I.10.3. Les matériaux de construction d'un navire.....	18
Conclusion.....	21

CHAPITRE II: LE POLYESTER ET LE POLYETHYLENE TEREPHTALATE

Introduction.....	23
II.1. Résine polyester.....	23
II.2. La charge Polyéthylène Téréphtalate (PET).....	24
II.2.1. Présentation de Polyéthylène Téréphtalate (PET).....	24
II.2.2. Synthèse du PET.....	24
II.2.3. Mode de transformation.....	25
II.2.3.1. Transformation du PET / Mise en forme des bouteilles.....	25
II.3. Utilisation du P.E.T.....	26
II.4. Propriétés du P.E.T.....	26
II.4.1.Propriétés physique du PET.....	26
II.4.2. Propriétés chimiques.....	28
II.5. Propriétés mécaniques.....	29
II.5.1. Cristallisation.....	29
II.6. Comportement mécanique du P.E.T.....	30
II.6.1. Influence de la température de déformation.....	30
II.6.2. Influence de la vitesse de déformation.....	31
II.7. Recyclage du PET.....	32
II.7.1. Les différents modes de recyclage ou valorisation.....	33
II.7.1.1. La valorisation énergétique.....	33
II. 7.1. 2. La valorisation matière.....	33
II.8. utilisation du PET recyclé.....	38

II.9. Dégradation.....	40
II.9.1. Dégradation hydrolytique	40
II.9.2. Dégradation thermique.....	40
II.9.3. Dégradation thermo-oxydative	41
II.10. La morphologie du PET	41
Conclusion	41

CHAPITRE III: COMPORTEMENT MECANIQUE DES MATERIAUX COMPOSITES

Introduction.....	43
III.1 Propriétés physique et mécaniques des composites.....	43
III.1.1. Propriétés physiques	43
III.1.2. Propriétés mécaniques	43
III.1.2.1. Essais de traction.....	43
III.1.2.2. Essai de flexion.....	48
III.1.2.3. La résilience	51

CHAPITRE IV: TECHNIQUES D'ELABORATION ET DE CARACTERISATION

Introduction.....	53
IV.1. Matériaux et Matériels Utilisés	53
IV.1.1. Matériaux.....	53
IV.1.1.2. Le matériels	55
IV.1.1.3. Etapes suivi pour l'élaboration du matériau à étudié.....	56
IV.2. Techniques de caractérisation.....	57
IV.2.1. caractérisation physique	57
IV.2.1.1. Infra rouge.....	57
IV.2.1.2. principe	57
IV.2.2. caractérisation mécanique	58
IV.2.2.1. Essai de flexion.....	58

III.2.2.2. Essai de résilience	60
--------------------------------------	----

CHAPITRE V: RESULTATS ET DISCUSSIONS

Introduction.....	62
V.1.Présentation des résultats pour l'essai de flexion	62
V.1.1 Présentation des résultats des essais de flexion des matériaux composites non traités	62
V.1 .1.1. Courbes force /flèche pour la Résine seule	62
V .1.1.2. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 5% P.E.T granulométrie G1	64
V .1.1.3 Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 10 % P.E.T granulométrie G1:	64
V .1.1.4 Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 15 % P.E.T granulométrie G1:	65
V .1.1.5. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 20 % P.E.T granulométrie G1	66
V .1.1.6. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 5 % P.E.T granulométrie G2	67
V .1.1.7. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 10 % P.E.T granulométrie G2	68
V .1.1.8. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 15 % P.E.T granulométrie G2	69
V .1.1.9. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 20 % P.E.T granulométrie G2	70
V .1.1.10. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 5 % P.E.T granulométrie G3	70
V .1.1.11. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 10 % P.E.T granulométrie G3.....	71
V .1.1.12. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 15 % P.E.T granulométrie G3.....	72
V .1.1.13. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 20 % P.E.T granulométrie G3.....	73
V.1.2 Présentation des résultats des essais de flexion des matériaux composites traités.....	74
V .1.2.1. Courbes force /flèche pour la Résine traitée.....	74
V .1.2.2. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 5% PET granulométrie G1	75
V .1.2.3. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 10% PET granulométrie G1	76
V .1.2.4. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 15% PET granulométrie G1	77
V .1.2.5. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 20% PET granulométrie G1	78

V .1.2.6. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 5 % PET granulométrie G2.....	78
V .1.2.7. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 10% PET granulométrie G2.....	79
V .1.2.8. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 15% PET granulométrie G2.....	80
V .1.2.9. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 20% PET granulométrie G2.....	81
V .1.2.10. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 5% PET granulométrie G3.....	82
V .1.2.11. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 10% PET granulométrie G3...	82
V .1.2.12. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 15% PET granulométrie G3...	83
V .1.2.13. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 20% PET granulométrie G3...	84
V.2.Présentation des résultats pour l'essai de résilience	84
V.2.1. Présentation des résultats de l'essai de résilience pour les matériaux traités.....	84
V.2.1.1. Résultats de l'essai de résilience pour la résine traitée.....	85
V.2.1.3. Résultats de l'essai de résilience pour la résine traitée chargée à 10 % PET G1	85
V.2.1.4. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 15% PET G1	85
V.2.1.5. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 20% PET G1	86
V.2.1.6. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 5% PET G2	86
V.2.1.7. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 10 % PET G2	86
V.2.1.8. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 15 % PET G2	87
V.2.1.9. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 20 % PET G2.....	87
V.2.1.10. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 5 % PET G3	87
V.2.1.11. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 10 % PET G3	88
V.2.1.12. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 15 % PET G3	88
V.2.1.13. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 20 % PET G3	88
V.2 Discussion des résultats	89
V.2.1. Discussion des résultats de l'essai de flexion.....	89
V.2.1 .1. Discussion des résultats de l'essai de flexion pour la résine seule	89
V.2.1 .2. Discussion des résultats de l'essai de flexion pour la résine chargée.	91
V.2.1 .3. Comparaison des caractéristiques mécanique	97
V.2.2. Discussion des résultats de l'essai de résilience.....	98
V.2.3. Discussion des résultats de l'infra rouge à transformée de Fourier	99
Conclusion	102
Conclusion générale et perspectives.....	103

Introduction générale

Les matériaux composites sont des matériaux à hautes performances mécaniques, façonnables à volonté au gré du concepteur et donc doué d'un potentiel illimité

Ces matériaux se développent aujourd'hui dans pratiquement tous les domaines et sont à l'origine de formidables challenges dans diverses réalisations de haute technologie. Ils sont devenus indispensables pour la construction dans plusieurs domaines comme l'aérospatiale, la construction navale, l'automobile, etc.... Comme leur nom l'indique, ils sont composés de plusieurs constituants qui se présentent principalement en deux phases: la matrice et le renfort. Par ailleurs, les matériaux composites, peuvent être choisis et utilisés en fonction d'impératifs techniques et économiques à satisfaire en agissant principalement sur la nature, la proportion, et la composition des constituants, et également sur le mode d'élaboration.

Les ingénieurs en aéronautique recherchent de plus en plus des matériaux de construction légers, robustes, rigides et capables de résister aux chocs, à l'abrasion et à la corrosion: une combinaison de propriétés assez exceptionnelle. Les matériaux résistants sont souvent relativement denses et une augmentation de la résistance et de la rigidité fait généralement diminuer la résilience.

L'étude du comportement des matériaux composites vis-à-vis de l'environnement et la connaissance de leurs caractéristiques mécaniques nécessite de nouvelles notions et techniques plus au moins complexes par rapport à celle utilisés pour les matériaux conventionnels homogènes et isotropes.

Il est absolument nécessaire, avant de lancer un matériau pour une utilisation dans un domaine donné, de faire une étude sur ce matériau.

Notre étude consiste en l'élaboration d'un matériau composite par moulage par contact, résine thermodurcissable, polyester, chargée en un polymère thermoplastique, PET.

La charge est un PET recyclé, obtenu par broyage des bouteilles d'eau. Des paillettes de PET sont partagées en trois granulométries $G1 > 5\text{mm}$, $2,5\text{mm} < G2 < 5\text{mm}$ et $G3 < 2,5\text{mm}$.

La résine est chargée à des taux de 5%, 10%, 15% et 20%.

Nous allons analyser l'effet du taux de charge ainsi que l'effet de la granulométrie sur le comportement mécanique en flexion et résilience de nos différents échantillons ainsi élaborés. Un traitement thermique de relaxation est effectué pour une partie des éprouvettes

Introduction générale

élaborées, une étude comparative des matériaux ainsi traités et des matériaux non traités est effectuée.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR LES MATERIAUX COMPOSITES

I-INTRODUCTION

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

I. 1. Généralités sur les composites

I. 1. 1. Définition

Au sens large, le mot "composite" signifie littéralement "constitué de deux ou plusieurs matériaux non miscibles". Les matériaux composites se constituent d'une ou plusieurs phases discontinues réparties dans une phase continue, appelée matrice. La phase discontinue est appelée le renfort ou matériau renforçant [1].

Le renfort apporte au matériau composite ses performances mécaniques, alors que la matrice a pour rôle de transmettre aux fibres les sollicitations mécaniques extérieures et de protéger les fibres vis-à-vis des

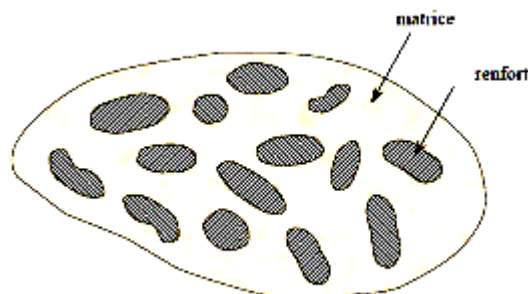


Figure I.1: Matériau composite [2].

I.2. Différents types de matériaux composites

On distingue deux types de composites: les composites de grandes diffusions et les composites hautes performances.

➤ **Les composites à grande diffusion (GD)** : peu coûteux et largement utilisés dans l'industrie (près de 95% des CMO), souvent utilisées les résines polyesters renforcées les fibres de verre avec un taux de renfort avoisinant 30 % Dans 90 % des cas [3].

➤ **Les composites à hautes performances (HP)** : beaucoup plus onéreux, ont un emploi restreint mais d'excellentes propriétés mécaniques, les renforts utilisés sont plutôt des fibres longues, avec un taux de renfort supérieur à 50 % [3].

4. TYPE DE MATERIAUX COMPOSITES :
Les composites peuvent être classés suivant la forme des composants ou suivant la nature des composants. [4].

I.3. Classification suivant la forme des constituants

En fonction de la forme des constituants, les composites sont classés en deux grandes classes : les matériaux composites à particules et les matériaux composites à fibres.

I.3.1. Composites à fibres

Un matériau composite est un composite à fibres si le renfort se trouve sous forme de fibres. Les fibres utilisées se présentent soit sous forme de fibres continues, soit sous forme de fibres discontinues : fibres coupées, fibres courtes, etc. L'arrangement des fibres, leur orientation permettent de moduler à la carte les propriétés mécaniques des matériaux composites, pour obtenir des matériaux allant de matériaux fortement anisotropes à des matériaux isotropes dans un plan.

Le concepteur possède donc là un type de matériau dont il peut modifier et moduler à volonté les comportements mécanique et physique en jouant sur :

- La nature des constituants,
- La proportion des constituants,
- L'orientation des fibres, suivant le cahier des charges imposées

L'importance des matériaux composites à fibres justifie une étude exhaustive de leurs comportements mécaniques. En conséquence, le présent ouvrage sera essentiellement

consacré par la suite à l'étude de ce type de matériaux.

I.3.2. Composites à particules

Un matériau composite est un composite à particules lorsque le renfort se trouve sous forme de particules. Une particule, par opposition aux fibres, ne possède pas de dimension privilégiée.

Les particules sont généralement utilisées pour améliorer certaines propriétés des matériaux ou des matrices, comme la rigidité, la tenue à la température, la résistance à l'abrasion, la diminution du retrait, etc. Dans de nombreux cas, les particules sont simplement utilisées comme charges pour réduire le coût du matériau, sans en diminuer les caractéristiques.

Le choix de l'association matrice-particules dépend des propriétés souhaitées. Par exemple, des inclusions de plomb dans des alliages de cuivre augmenteront leur facilité d'usinage. Des particules de métaux fragiles tels le tungstène, le chrome et le molybdène, incorporé dans des métaux ductiles, augmenteront leurs propriétés à températures élevées, tout en conservant le caractère ductile à température ambiante.

Les cermets sont également des exemples de composites métal-céramique à particules, adaptés à des utilisations à températures élevées. Par exemple, les cermets à base d'oxydes sont utilisés pour les outils de coupe à vitesse élevée, et pour les protections à hautes températures.

Également, des particules d'élastomère peuvent être incorporées dans des matrices polymères fragiles, de manière à améliorer leurs propriétés à la rupture et au choc, par diminution de la sensibilité à la fissuration.

Ainsi, les composites à particules recouvrent un domaine étendu dont le développement s'accroît sans cesse.

I.4. Classification suivant la nature des constituants

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

Divers renforts sont associés à ces matrices. Seuls certains couples d'association sont actuellement un usage industriel, d'autres faisant l'objet d'un développement dans les laboratoires de recherche. Parmi ces composites, nous pouvons citer

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

- ✓ Des fibres minérales : verre, carbone, etc.

CHAPITRE I : Généralités sur les Matériaux composites

- ✓ Des fibres organiques : Kevlar, polyamides, etc.
- ✓ Des fibres métalliques : bore, aluminium, etc.
- ✚ **Composites à matrice métallique (alliages légers et ultra-légers d'aluminium, de magnésium, de titane), avec:**
 - ✓ Des fibres minérales : carbone, carbure de silicium(SiC),
 - ✓ Des fibres métalliques : bore,
 - ✓ Des fibres métallo-minérales : fibres de bore revêtues de carbure de silicium (BorSiC).
- ✚ **Composites à matrice minérale (céramique), avec:**
 - ✓ Des fibres métalliques : bore,
 - ✓ Des particules métalliques : cermets,
 - ✓ Des particules minérales : carbures, nitrures, etc.

Les matériaux composites à matrice organique ne peuvent être utilisés que dans le domaine des températures ne dépassant pas 200 à 300 °C, alors que les matériaux composites à matrices métallique ou minérale sont utilisés au-delà jusqu'à 600 °C pour une matrice métallique, jusqu'à 1000 °C pour une matrice céramique. [5]

I. 5. Les constituants d'un matériau composite

Le matériau composite est constitué principalement d'une phase continue appelée la matrice qui est blindée avec une phase discontinue est le renforcement, ces deux phases sont liées au niveau d'une interface qui assure l'adhésion entre eux, en outre de la charge qui améliore certaines propriétés du composite figure (I.3) [6,7].

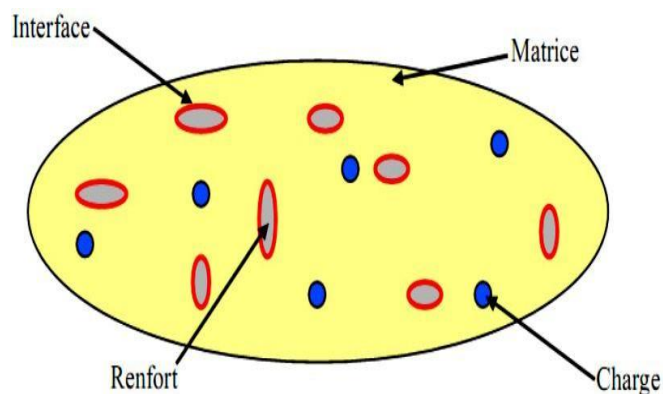


Figure I.2 : les constituants d un matériau composite [7].

I. 5. 1. Les renforts

Renforcer les constituants dans les composites, comme le mot l'indique, fournir la force nécessaire pour le composite, le but des renforts dans les matériaux composites est essentiellement d'accroître leurs propriétés mécaniques (rigidité, résistance à la rupture, dureté, etc.) et d'améliorer certaines des propriétés physiques, tels les comportements au feu et à l'abrasion, la tenue en température ou les propriétés électriques. Les caractéristiques recherchées dans les renforts sont une masse volumique faible, une compatibilité avec les matrices et une facilité de mise en œuvre [8].

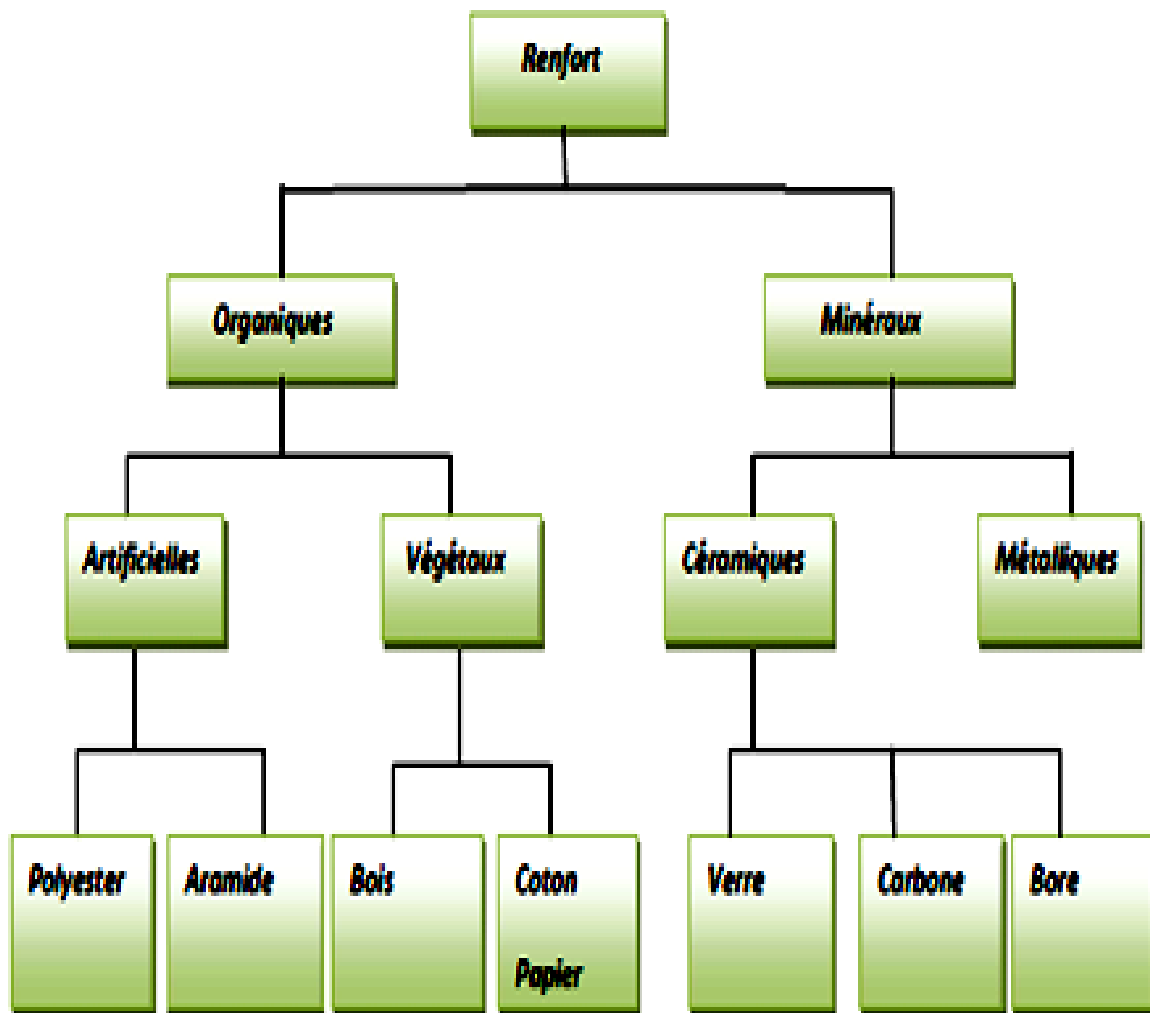


Figure1.3 : les différents types de renforts de base [9]

I.5.2. Différents types de renforts

1.5.2.1. Renfort en fibres discontinues

Des fibres courtes, ou particules (charges sous forme de microbilles, de fibres broyées, d'écaillés ou de poudre), permettent d'améliorer

Certaines propriétés de la matrice (résistance à l'usure, propriétés thermiques, poids). Celle-ci reste l'élément de base et on obtient alors un « polymère renforcé ».

1.5.2.2. Renfort continue

Sous forme de fibres longues qui sont généralement utilisées pour des composites HP. Cette forme fibreuse offre une résistance à la rupture et souvent un module d'élasticité beaucoup plus élevée que ceux du même matériau massif, avec une augmentation de la longueur de 10000 fois, ou bien pour le même volume, la surface est multipliée par 100 dans le cas des fibres de verre [10]

Les renforts les plus utilisés aujourd'hui dans l'industrie sont les fibres de carbone et les fibres de verre, ces derniers ont de bonnes caractéristiques mécaniques.

❖ Les fibres de verre

Les fibres de verre ont un excellent rapport performance-prix. C'est les renforts les plus utilisés actuellement dans la construction de structures composites. On distingue trois types de fibres de verre [11] :

- ✓ Verre E : pour les composites à grande diffusion.
- ✓ Verre S : pour les applications d'électricité.
- ✓ Verre R : pour les composites à haute performance.

❖ Avantages de la fibre de verre

- ✓ Compatibilité avec les matrices organiques.
- ✓ Bonnes propriétés diélectriques.
- ✓ Faible coût.

❖ Inconvénients de la fibre de verre :

- ✓ Faible module d'élasticité (par rapport aux fibres de carbone et l'aramide).
- ✓ Vieillessement au contact de l'eau.

CHAPITRE I : Généralités sur les Matériaux composites

Tableau I.1 : Caractéristiques des fibres de verre [12]

Caractéristiques	Verre E	Verre A	Verre S
Resistance a la rupture (MPA)	3400 à 3500	4400	4600
Module d'Young (GPA)	73	86	87
Allongement a la rupture (%)	4.6 à 4.8	5.2	5.4
Masse volumique (g/cm ³)	2.54	2.55	2.54

❖ Fibres de carbone [13]

C'est la fibre la plus utilisée dans les applications hautes performances. Elle est obtenue par carbonisation de la fibre de PAN (Polyacrylonitrile).



Figure I.4 : Bobine de fibre carbone

❖ 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).

❖ **Fibres naturelles**

Comme le chanvre et le lin, ces fibres ont de bonnes propriétés mécaniques (module de Young peu atteindre celui du verre) pour un prix modeste, elles sont particulièrement écologiques 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.

I.6. Les charges et les additifs

I.6.1. Les charge

Les composites peuvent être renforcés par un autre matériau se présentant sous forme de fines particules, ce sont les charges.

Elles ont pour but de modifier les caractéristiques du produit : dureté superficielle, résistance à la contrainte en flexion ou en choc ou encore diminution du pouvoir calorifique, amélioration du comportement au feu et souvent baisse de prix de revient. Les plus employées sont le carbone de calcium pulvérulent (craie broyée), le kaolin, la silice, le mica, l'hydrate d'alumine et les microbilles de verre [14].

I.6.2. les additifs

Un des additifs de grande importance est l'agent d'interface qui assure la cohésion et l'adhérence entre les différents constituants. Cet agent est en général déposé sur les fibres de renfort (ensimage du verre) ou sur les charges (carbonate de calcium enrobé) [15].

Les additifs se trouvent en faible quantité et interviennent comme :

- ✓ Lubrifiants et agents de démoulage.
- ✓ Pigments et colorants.
- ✓ Agents anti-retrait.
- ✓ Agents anti-ultraviolets.

I.6.3. La matrice [16]

Dans un grand nombre de cas, la matrice constituant le matériau composite est une *résine polymère*. Les résines polymères existent en grand nombre et chacune à un domaine

CHAPITRE I : Généralités sur les Matériaux composites

particulier d'utilisation. Dans les applications où une tenue de la structure aux très hautes températures est requise, des matériaux composites à *matrice métallique*, *céramique* ou *carbone* sont utilisés. Dans le cas des matériaux en carbone des températures de 2200°C peuvent être atteints. La classification des types de matrices couramment rencontrées est donnée sur la figure I. 2.

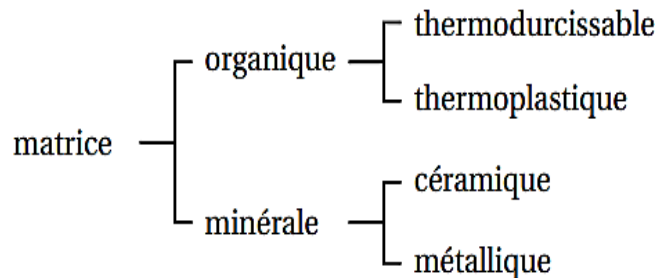


Figure I.5 : Types de matrice

Les résines utilisées dans les matériaux composites ont pour rôle de transférer les sollicitations mécaniques aux fibres et de les protéger de l'environnement extérieur. Les résines doivent donc 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.

I. 7. Mise en œuvre des composites

Pour la fabrication des composites, il existe plusieurs méthodes. On en présente ici quelques-unes avec leurs principes. Ces méthodes sont généralement faciles à exécuter et demandent un coût d'investissement faible en matériels.

I. 7. 1. Moulage au contact

C'est la méthode la plus simple qui demande le moins d'équipements. On utilise des moules en bois vernis, en métal, etc., sur lesquels on dépose successivement : un agent de démoulage, une couche de surface (optionnelle) et des couches successives de renforts imprégnés au rouleau d'une résine polymérisant à l'ambiante.

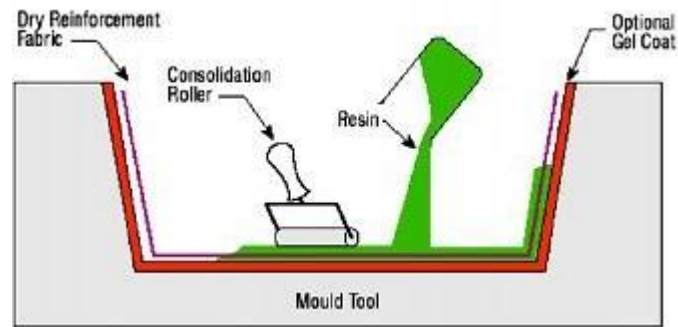


Figure I. 6: Moulage au contact [17]

I. 7. 2. Moulage par projection

Dans cette méthode, la résine et les fibres de renfort coupées sont projetées simultanément au moyen d'un pistolet sur une forme.

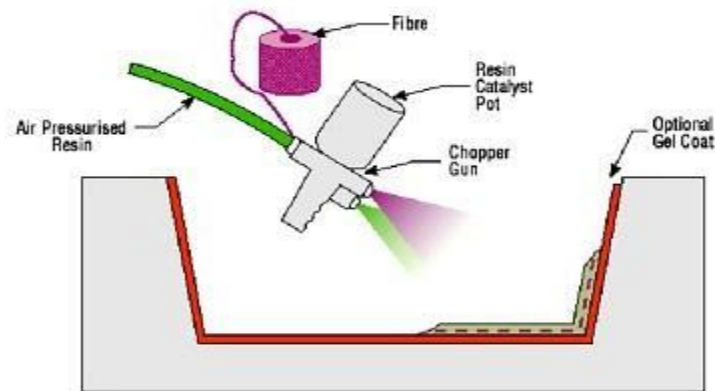


Figure I.7 : Méthode de projection simultanée [18]

I. 7. 3. Moulage par compression

Le moulage par compression est l'un des procédés les plus économiques pour la production de grandes séries de pièces de petites et de moyennes dimensions. Dans ce procédé, on place une préforme de compound de moulage (résine, renfort, catalyseur et additifs déjà pré mélangés dans des proportions optimales) dans la cavité d'un moule chauffé, et ensuite on la presse aux dimensions finales. On utilise des pressions qui vont de 0.5 à 15 MPa.

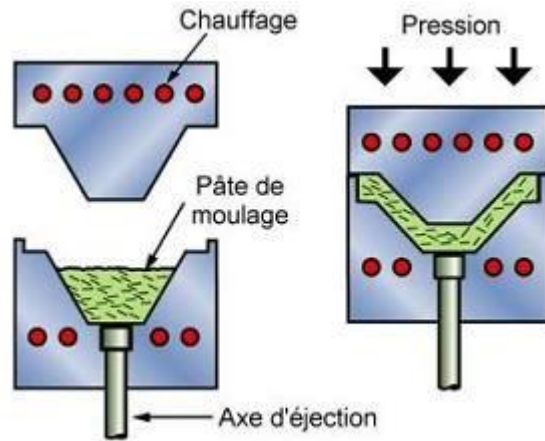


Figure 1.8 : Méthode de moulage par compression [19]

I. 7. 4. Moulage sous vide

Les renforts fibreux sont placés à sec sur un film démoulant qui épouse les formes du moule. Une membrane souple joue le rôle de contre-moule et assure l'étanchéité. Le vide créé permet à la résine de se diffuser dans les renforts fibreux et cavités. Cette méthode pourrait être combinée avec un système de chauffage qui servirait à polymériser la résine. Aux conditions ambiantes, la pression qui fait couler la résine est égale à la pression atmosphérique.

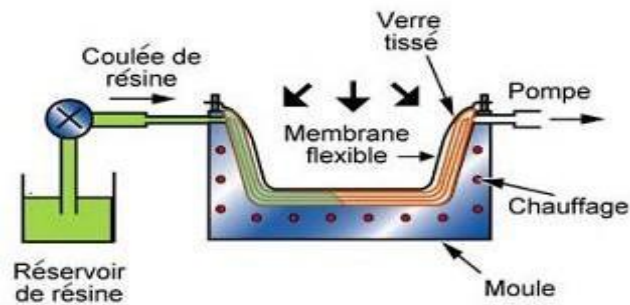


Figure I.9 : Méthode du moulage sous vide [19]

I. 7. 5. 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.

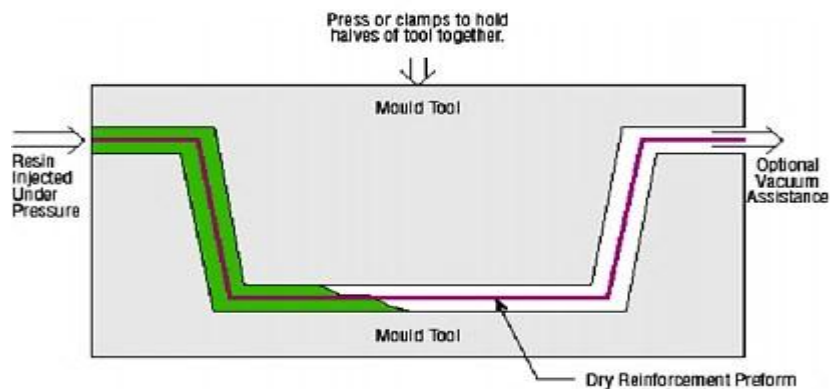


Figure I.10 : Principe du moulage par injection de résine [20]

I.8 Architecture du composite

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

- ✓ Les monocouches
- ✓ Les stratifiées
- ✓ Les sandwichs

I.8.1. Monocouches

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.

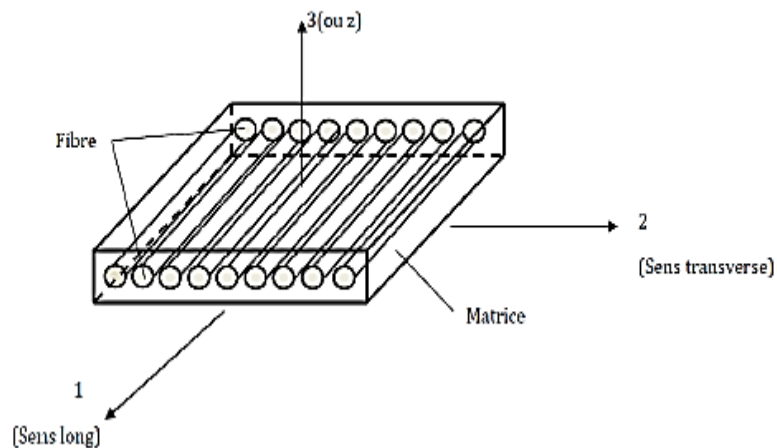


Figure I.11 : composite monocouche. [21]

I.8.2.Stratifiés

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacun une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié. Le choix de l'empilement et plus particulièrement des orientations permettra d'avoir des propriétés mécaniques spécifiques [21].

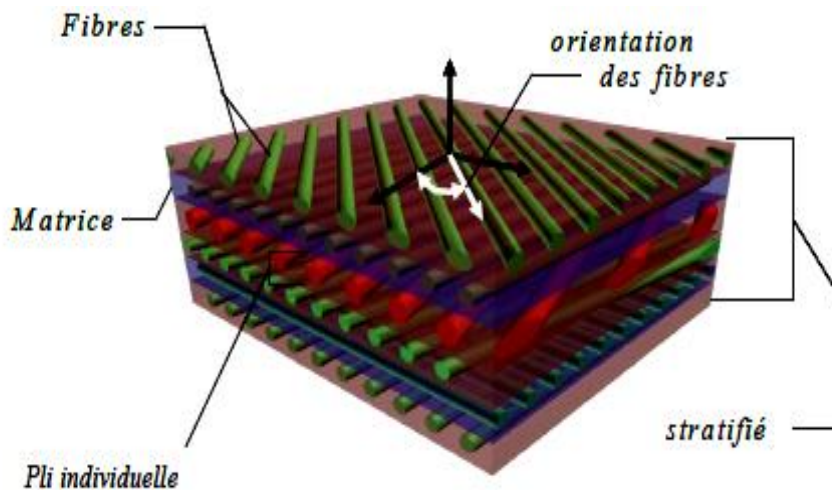


Figure.1.12 : composite stratifié [22]

CHAPITRE I : Généralités sur les Matériaux composites

Les stratifiés peuvent être de trois types :

1) **Equilibrés :**

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

2) **Symétriques :**

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

3) **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.

I.8.3.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.

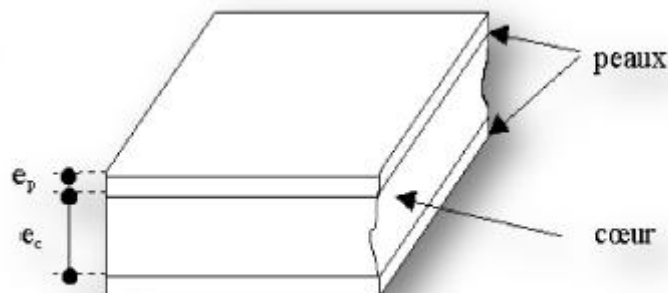


Figure.1.13 : Composite sandwichs [23]

I.9. Caractéristiques des matériaux composites [24]

Les propriétés des matériaux composites dépendent de beaucoup de facteurs et sont différentes selon les divers types de matériaux composites. Ces propriétés résultent :

- des propriétés, de la nature et de la quantité des matériaux constitutifs.
- des constituants, de la géométrie et de la distribution du renfort

CHAPITRE I : Généralités sur les Matériaux composites

- de leurs interactions, de la nature de l'interface matrice-renfort, etc.

Les principales caractéristiques des pièces fabriquées en matériaux composites sont :

- Faible masse,
- Bonne tenue en fatigue (durée de vie augmentée),
- Absence de corrosion,
- Absence de plasticité (leur limite élastique correspond à la limite de rupture)
- Vieillessement sous l'action de l'humidité et de la chaleur,
- Inertie à certains produits chimiques courants (solvants, peinture, huiles, Pétroles,...),
- Tenue aux impacts et aux chocs très moyenne,
- Très forte anisotropie

I.9.1. Domaines d'utilisation des matériaux composites

Les matériaux composites de nos jours prennent une place prépondérante dans différents domaines de par leur simplicité d'élaboration, leur légèreté ainsi que leurs caractéristiques mécaniques. Contrairement aux matériaux classiques qui présentent des caractéristiques mécaniques intrinsèques, les matériaux composites peuvent répondre aux exigences des différents types de contraintes à partir d'une élaboration et d'un choix judicieux de matrice et renfort, et ceci, dans différents domaines.

Les matériaux composites ont été introduits progressivement dans les automobiles, à la suite des matériaux polymères dont certains sont utilisés comme matrices. De nos jours, les matériaux composites ont pris une place importante dans divers domaines : aéronautique, transport, bâtiment, loisirs etc. Du point de vue écologique, les fibres naturelles utilisées comme renforts dans les composites prennent une place croissante et sont de nouveau d'actualité.

I.10. Les matériaux composites dans la construction navale

I.10.1. Introduction : Généralités sur la construction navale

Les matériaux composites disposent d'atouts importants par rapport aux matériaux traditionnels. Ils apportent de nombreux avantages fonctionnels : légèreté, résistance mécanique et chimique, maintenance réduite, liberté de formes. Ils permettent d'augmenter la durée de vie de certains équipements grâce à leurs propriétés mécaniques et chimiques. Ils contribuent au renforcement de la sécurité grâce à une meilleure tenue aux chocs et au feu. Ils

offrent une meilleure isolation thermique ou phonique et, pour certains d'entre eux, une bonne isolation électrique. Ils enrichissent aussi les possibilités de conception en permettant d'alléger des structures et de réaliser des formes complexes, aptes à remplir plusieurs fonctions. Dans chacun des marchés d'application (automobile, bâtiment, électricité, équipements industriels,...), ces performances remarquables sont à l'origine de solutions technologiques innovantes

I.10.2. Activités de la construction navale

La construction navale est devenue progressivement une véritable industrie. L'activité de construction de la construction navale est, en majeure partie, orientée vers la satisfaction des besoins de la flotte de commerce et de la pêche. Elle s'exerce également pour le compte des marines militaires. Elle est complétée par l'activité de réparation navale, parfois menée par les mêmes chantiers.

En dépit de fluctuations conjoncturelles souvent importantes, ce marché se caractérise sur le long terme par une tendance expansionniste due en particulier à l'augmentation continue de la population, à l'élévation de son niveau de vie ou encore au développement du phénomène de mondialisation.

Parallèlement, les produits de cette industrie se diversifient, par exemple dans l'offshore pour l'exploitation des hydrocarbures ou des énergies marines renouvelables (éoliennes offshore), et ils intègrent de plus en plus de nouvelles technologies. Le travail des chantiers s'en trouve évidemment modifié, les méthodes de conception et les procédés de fabrication des navires faisant de leur côté appeler aux technologies les plus élaborées.

Le métier de la construction navale consiste donc essentiellement à concevoir le navire, puis à intégrer des éléments techniques très divers en vue de réaliser le système complexe que constitue tout navire moderne.

I.10.3. Les matériaux de construction d'un navire

La construction d'un navire est un processus complexe d'une haute technicité. Elle demande la collaboration étroite de nombreux personnels qualifiés et d'une main-d'œuvre contractuelle qui travaille en général sous la direction d'un entrepreneur principal. On construit des bateaux à des fins commerciales ou militaires. C'est une activité à caractère international, où quelques grands chantiers navals se battent pour conquérir leur part d'un marché relativement restreint. La coque est l'enveloppe extérieure du navire, elle est constituée du bordé, est étanche pour la partie immergée (œuvres vives) et a, généralement, des formes étudiées pour que le bateau puisse se déplacer assez facilement dans l'eau. Jusqu'à une époque relativement récente, les

CHAPITRE I : Généralités sur les Matériaux composites

coques étaient exclusivement réalisées en bois. Grâce à l'évolution des sciences et des techniques, les coques sont maintenant construites en matériaux très variés, chacun étant plus ou moins adapté à tel ou tel type de construction.

a) la construction des navires en bois :

Il s'agit du matériau de construction historique, mais aussi du moins résistant lorsqu'il est utilisé en construction classique (bois massif). Par contre, en lamellé-collé, sa résistance est équivalente voire supérieure au composite pour un poids proche. Différents types de constructions existent tels que :

Le bois classique : utilisé pendant des siècles, Il donne des bateaux très solides mais aussi très lourds. Sa mise en œuvre nécessite un véritable savoir-faire.

Le contreplaqué-époxy : le contreplaqué a, grâce à l'époxy (100% étanche), retrouvé un réel intérêt dans la construction de bateaux moderne. Sa mise en œuvre est très simple, grâce à l'utilisation de machines de découpe modernes. Au risque de devoir convaincre les sceptiques, à masse égale, une construction en contreplaqué-époxy renforcé de tissus de verre multiaxiaux, serait équivalente voire supérieure à une construction en aluminium ou en acier, On obtient des bateaux légers, très solides y compris à l'impact, grâce à l'adjonction de renforts stratifiés (verre, carbone, ou kevlar). Leur résistance à la fatigue est excellente, leur entretien réduit au minimum et il est facile de les rénover au bout de quelques années. Par ailleurs ils ne subissent pas les détériorations dues à l'osmose, l'électrolyse ou l'oxydation, types de réactions induites par l'eau.



Figure I.14 Construction des navires en bois

b) la construction des navires en acier :

Du fait de son poids, l'utilisation de ce matériau est réservée à la construction des unités de plus de 15m. L'acier est actuellement le matériau le plus répandu (en considérant le tonnage de la flotte mondiale). C'est aussi le plus durable et solide, avec notamment une énorme résistance aux chocs. Sur certains voiliers de plaisance, on utilise également l'acier inoxydable, peu utilisé car cher. Le coût est raisonnable, quoiqu'il s'agisse d'un argument de moins en moins vrai. Sa mise en œuvre demande un véritable savoir-faire, les réparations peuvent se faire partout, même en dehors d'un chantier.



Figure I.15 : Construction des navires en acier

c) la construction des navires en Aluminium

L'aluminium plus moderne, il reprend la plupart des qualités de l'acier, en éliminant les défauts. Les avantages qui le font préférer à l'acier sont la légèreté, la résistance à la corrosion (traitements par réaction du zinc silicate en phase aqueuse), le non magnétisme, donc l'absence d'interférence avec le matériel de bord (compas). Par ailleurs, on constate une grande résistance mécanique, surtout pour les constructions en fortes épaisseurs types «Strongall », qui perd par contre en légèreté donc en performances. C'est aujourd'hui le résolu au détriment de l'esthétique, en laissant la coque brute.

d) la construction des navires en matériaux composites

Les matériaux composites modernes permettent la construction en série de bateaux, et donc l'abaissement des coûts de production. Ce type de construction actuelle est réalisé à partir d'un moule sur lequel on superpose des couches de fibre de verre et de résine. Ils comprennent le ferrociment, le polyester stratifié, les plastiques, les sandwichs. Pour les bateaux de course, on remplace la fibre de verre par de la fibre de carbone, plus résistante.

Conclusion

L'objectif des producteurs des matériaux composites est de concurrencer et de surpasser les métaux qui, de leur côté, ne cessent d'optimiser leurs propres caractéristiques. La diversité des matériaux composites et leur souplesse, qui permet de fabriquer ou de composer des caractéristiques à la carte, rendent cet objectif légitime. Pour atteindre ces objectifs, ce secteur doit se développer par l'innovation.

Dans les composites les fibres se trouvent sous formes organiques et naturelles, ces dernières peuvent donner une bonne résistance au matériau grâce à leurs propriétés ce qu'on va le voir dans le deuxième chapitre.

CHAPITRE II

LE POLYESTER ET LE POLYÉTHYLENE TEREPHTALATE

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

Introduction

Dans ce chapitre nous allons présenter les matériaux de base de notre matériau composite ce dernier est composé d'une résine polyester et d'une charge en polyéthylène téréphtalate (P.E.T).

II.1. Résine polyester

La résine utilisée est une résine polyester ortho phtalique de stratification de couleur bleu opaque, moyenne réactivité, nommée LORNESTER H511 TA, dont la fiche technique est donnée dans le tableau II.1

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

Tableau II.1: Fiche technique de la résine

L'utilisation de ce type de résine offre plusieurs avantages dont la facilité de mise en œuvre. Pour bien intégrer ce type de matrice aux matériaux composites, il est nécessaire d'en connaître les caractéristiques répertoriées au tableau II.2

Avantages	Inconvénients
Bonne adhérence sur les fibres de verres Transparent Durcissement rapide Bonne résistance chimique Facile à mettre en œuvre Bonne tenue en température Bas prix Bonne résistance à la traction	Mauvaise tenue au feu et dégagement de fumée important Retrait au moulage important (6-15%) Faible résistance à la fatigue Conservation limitée due à l'évaporation de styrène Mauvaise performance en température

Tableau II.2 : Avantages et inconvénients des résines polyesters.

II.2. La charge Polyéthylène Téréphtalate (PET)

Le PET est un thermoplastique polyester. C'est un matériau dur, rigide, solide, avec une bonne stabilité dimensionnelle et un faible taux d'absorption d'eau. Il présente de bonnes propriétés de protection contre les gaz et une bonne résistance chimique globale.

II.2.1. Présentation de Polyéthylène Téréphtalate (PET)

Polymère de synthèse produit par polycondensation de l'éthylène glycol avec l'acide téréphtalique. Cette matière plastique est principalement utilisée pour la fabrication de bouteilles, flacons, pots, films et feuilles, fibres, ... De la famille des thermoplastiques, il est recyclable.

II.2.2. Synthèse du PET

Le PET est un polyester linéaire dont l'unité de répétition est représentée par la figure suivante :

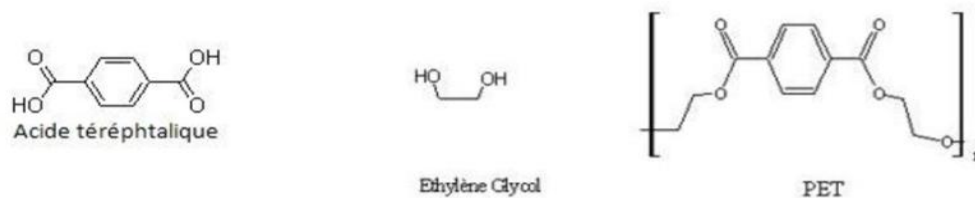


Figure II.1 : Motif de répétition du polyéthylène téréphtalate [25].

Industriellement, le PET est majoritairement obtenu par un procédé continu appelé voie d'estérification directe [26] ., Il s'agit dans un premier temps de la réaction de l'acide téréphtalique et de l'éthylène glycol avec élimination de l'eau jusqu'à l'obtention d'un degré de polymérisation moyen en nombre, DP_n , de l'ordre de 5 à 10 monomères/chaîne. Cette estérification a lieu à chaud (260°C à 280°C) et sous pression (de 2 à 6 bars).

La polycondensation elle-même se poursuit alors sous vide. Compte tenu de la compétition entre les réactions de dégradation et de polycondensation, un catalyseur doit être utilisé. Les catalyseurs sont variés [27]

II.2.3. Mode de transformation

II.2.3.1. Transformation du PET / Mise en forme des bouteilles

Dans toute transformation du PET, il est nécessaire d'étuver soigneusement les matières premières (granulés, chips) pour minimiser l'hydrolyse. La reprise d'humidité par adsorption superficielle est rapide (moins de 15 minutes) à température ambiante. En pratique, juste avant la transformation, le PET est séché dans un courant d'air ou d'azote sec et chaud (120 à 135°C) pendant 2 à 6 heures (2 à 3 h pour la résine vierge, 3 à 4 h pour la résine ré-broyée recyclée et 4 à 6 heures pour la résine humide) dans des trémies asséchantes [28].

Le procédé s'effectue en deux étapes (Figure II.2) : le moulage (ou injection) et le soufflage :

- Injection du PET fondu dans un moule pour former une préforme très amorphe. Au cours de l'injection, on procède à une transformation par passage à l'état fondu où la température est donc supérieure à la température de fusion. Les réactions de dégradations citées auparavant peuvent alors se produire.

- Soufflage de la préforme (bi-étirement radial et axial) à 110-125°C [28].

Il convient de distinguer deux types de cristallinité ne diffusant pas la lumière de la même façon :

- la cristallinité assurée par des sphérolites ;

- la cristallinité induite par l'orientation [29] La préforme est amorphe (0 % de cristallinité,

$D = 1,33 \text{ g/cm}^3$), alors que la bouteille est partiellement cristallisée (20-25 % de cristallinité, $1,33 < d \leq 1,36 \text{ g/cm}^3$).

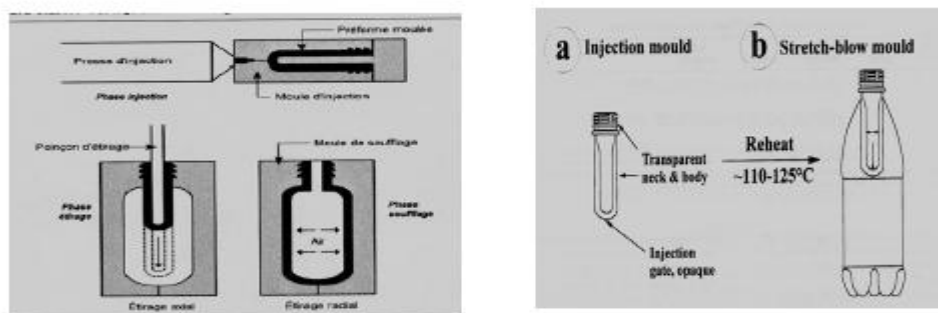


Figure II.2 : Procédé d'injection d'une préforme et de soufflage (bi-étirage) de la bouteille PET [29].

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

Des procédés de traitement permettent d'améliorer les propriétés barrières des bouteilles à l'oxygène, au gaz carbonique ou aux arômes :

- Dépôts plasma à l'intérieur des bouteilles. Ces procédés tendent à réduire aussi la migration,
- Revêtements époxy à l'extérieur,
- Formulations nano-composites à base de nano-charges lamellaires (argiles) [29].

II.3. Utilisation du P.E.T

Suivant son application, le PET doit être plus ou moins cristallin. Ainsi pour des applications d'emballage alimentaire (film, bouteille), le taux de cristallisation sera généralement faible. En revanche, pour des applications plus techniques (automobile, isolant,...), le taux de cristallisation est généralement plus élevé [30] Sur le marché, le PET se présente sous de très nombreuses formes.

Il peut être fourni sous forme de films, de plaques, de tissus ou de tiges de longueurs, épaisseurs (ou diamètres) et compositions très variables. Il peut être livré amorphe ou cristallin, parfois métallisé par de l'aluminium, du cuivre, du titane etc. En raison de ses bonnes propriétés thermomécaniques, optiques et électriques, il est utilisé dans de nombreux secteurs industriels tels les domaines électriques (bobinages de moteurs électriques, condensateurs, câblerie, disquettes), électroniques, ou bien dans l'audiovisuel (bandes magnétiques des cassettes vidéos et audio), les arts graphiques, les fournitures de bureaux (films transparents, papiers carbonés), les emballages divers (bouteilles, rubans adhésifs, boîtes thermoformées), etc.

Ainsi, la sélection du grade approprié pour telle ou telle application est déterminée par la mesure de sa viscosité intrinsèque, dont la valeur est directement liée à la masse moléculaire du matériau.

II.4. Propriétés du P.E.T

II.4.1. Propriétés physique du PET

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

a) La viscosité

L'une des propriétés les plus importantes du PET est sa viscosité intrinsèque. Elle dépend de la longueur des chaînes de polymère. Plus les chaînes sont longues, plus le matériau est dur et donc sa viscosité augmente. Selon sa viscosité, le PET ne va pas être utilisé dans le même domaine. Le Tableau 2 représente les applications du PET en fonction de sa viscosité.

Tableau II.3 Applications du PET en fonction de sa viscosité [31].

Applications	Indices de viscosité (ml/g)
Fibres	55- 68
Films	57- 66
Bouteilles	72- 85
Fils industriels	80-90

Le PET peut se trouver sous la forme amorphe ou semi-cristalline. Sa densité varie de 1,30 à 1,40. L'analyse thermique du PET permet de montrer la présence de trois transitions principales, comme l'indique la figure I.4.

La première est la transition vitreuse. Elle est réversible et correspond à une variation de la mobilité moléculaire des chaînes de la phase amorphe. En dessous de la température de transition vitreuse (T_g), située généralement vers 80°C , le polymère est figé par des interactions physiques fortes. Au-dessus, la mobilité moléculaire augmente (phénomène endothermique) et il devient caoutchoutique; ses propriétés élastiques augmentent et il devient moins rigide.

Cette seconde transition apparaît vers 145°C et correspond à une recristallisation du PET amorphe dont le maximum du pic de cristallisation correspond à la température de cristallisation (T_c). Cette transition exothermique apparaît pour des matrices dont le taux de cristallinité initial est relativement faible et disparaît progressivement lorsqu'il augmente.

Enfin, la troisième transition est endothermique et se situe vers $260\text{-}270^\circ\text{C}$. Elle correspond à la fusion des cristallites à la température de fusion (T_f) du PET [32-33].

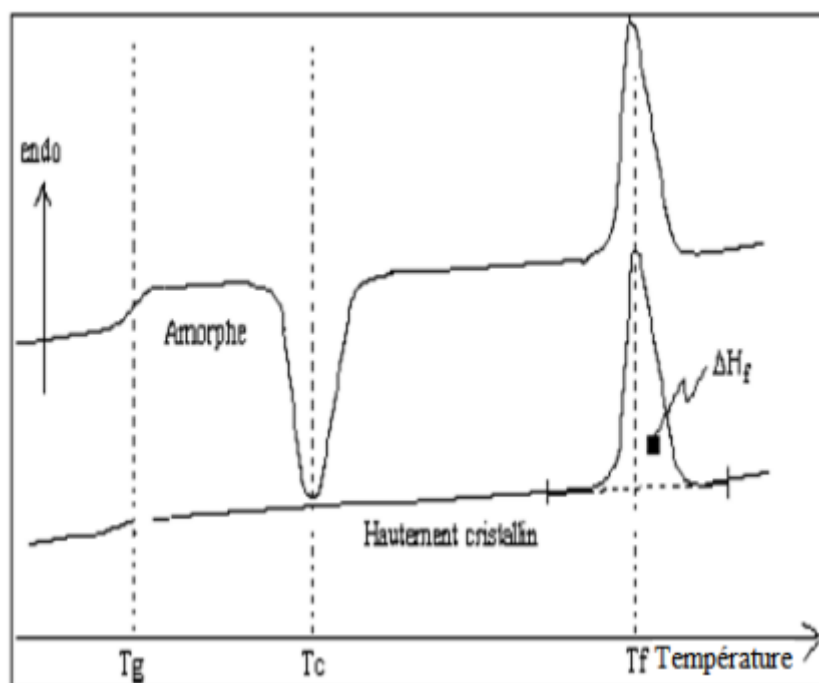


Figure II.3 : Principales transitions thermiques du PET [33]

II.4.2. Propriétés chimiques

Le PET absorbe naturellement l'eau à hauteur de 0,16 %, Ce phénomène est d'importance lorsque l'on dépasse la température de transition vitreuse du polymère ($T_g = 75^\circ\text{C}$) : il se produit des réactions d'hydrolyse de la fonction ester au sein du polymère ce qui entraîne une chute du poids moléculaire et de la viscosité, et donc la dégradation partielle du PET.

Tableau II.4. Stabilité de la teinture de fibres PET en fonction de leur section et de la présence d'un absorbeur ultraviolet [34]

TEST	Dégradation de la teinte (diminution de la valeur)	
	PET NORMAL 5.6 dtex Absorbeur UV : 2 %	PET MICROFIBRE 0.76 dtex Absorbeur UV : 4 %
ISO*		
Sans absorbeur UV	7 - 8	7
Avec absorbeur UV	7 - 8	7 - 8
FAKRA*		
Sans absorbeur UV	3 - 4	1 - 2
Avec absorbeur UV	4 - 5	2 - 3
SAE*		
Sans absorbeur UV	3	1 - 2
Avec absorbeur UV	4	2 - 3

Lorsque les produits à base de polymères sont exposés au rayonnement ultraviolet, ils peuvent se dégrader en raison de l'absorption de l'énergie lumineuse par des groupes chimiques

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

présents, soit dans le polymère même, soit dans ses additifs ou ses impuretés. Cette absorption peut provoquer une photolyse qui correspond à la rupture des liaisons chimiques et à la création de radicaux libres. La longueur d'onde à partir de laquelle ce phénomène est observé dépend de la structure chimique du polymère (polypropylène : 330 nm, polyamide : 340 nm, polyéthylène téréphtalate : 310 nm) [35]. La photolyse peut déclencher un processus de photo-oxydation de nature radicalaire, en chaîne.

II.5. Propriétés mécaniques

II.5.1. Cristallisation

La température de cristallisation du PET est un autre facteur qui a son importance pour La fabrication de fibres. En effet, on cherche à élever cette température au maximum. La température de cristallisation du PET est variable (160 – 180°C) et peut dépendre de certains facteurs Li [36] a montré par exemple, que la température de cristallisation augmentait si le PET est branché, en comparaison avec un PET linéaire, et peut alors atteindre 190°C.

D'autre part, les propriétés barrière du PET augmentent avec le taux de cristallinité, qui se situe en général autour de 20-50 %. Il est cependant possible d'obtenir des taux de cristallinité allant jusqu'à 90 % grâce à des traitements sous pression [37].

$a = 4.56 \text{ nm}$	$\alpha = 98.6^\circ$
$b = 5.94 \text{ nm}$	$\beta = 118^\circ$
$c = 10.75 \text{ nm}$	$\gamma = 112^\circ$

Tableau II.5.paramètres de la maille du PET [38]

Tableau II. 6. Propriétés mécaniques d'échantillons de PET vierge et recyclé obtenues par injection [39,40].

Propriétés	PET vierge	PET recyclé
Module d'Young (MPa)	2140- 1610	3000-1430
Contrainte à la rupture (MPa)	50-47	30-24
Allongement à la rupture (%)	40-32	270-57
Force à l'impact (J/m, ASTM D256)	90-12	20-15

II.6. Comportement mécanique du P.E.T

Les propriétés mécaniques des matériaux sont d'un grand intérêt, puisqu'elles conditionnent non seulement les problèmes de mise en forme des matériaux, mais également leur comportement en service dans des applications industrielles extrêmement diversifiées.

L'essai de traction est le procédé expérimental le plus largement utilisé dans l'étude du comportement mécanique des matériaux, il permet de déterminer qualitativement si un matériau est fragile ou ductile rigide ou souple. Il aide aussi à quantifier certaines propriétés mécaniques, telles que le module d'élasticité, la résistance maximale ou la contrainte et l'allongement à la rupture en traction, suivant la nature du matériau (Figure II- 4)

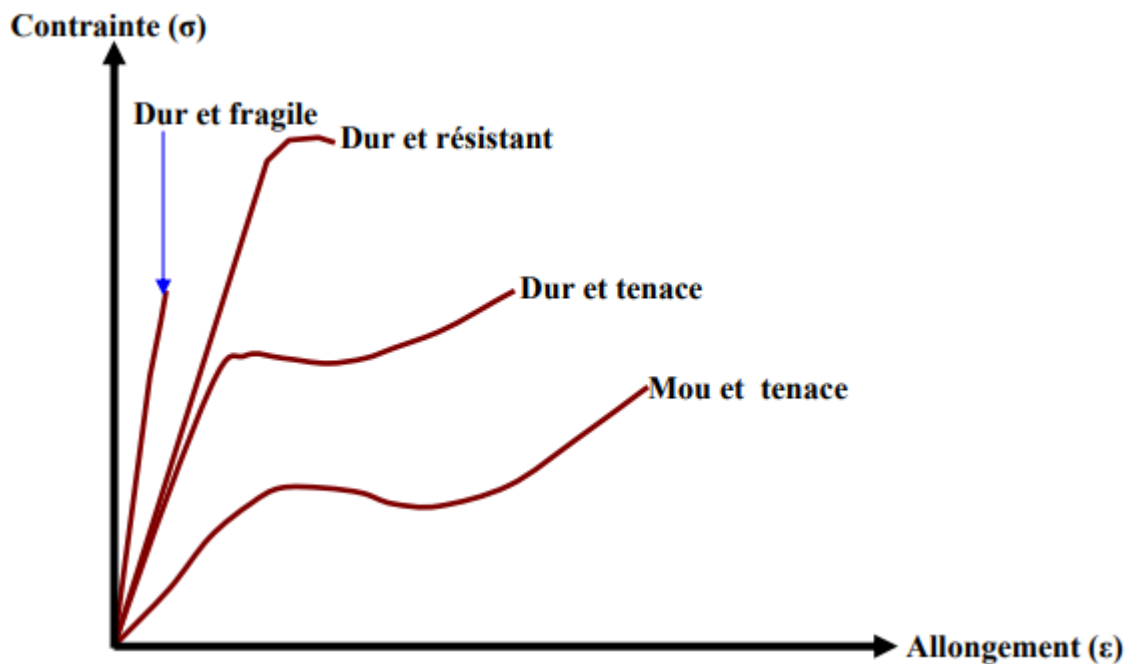


Figure II- 4: Courbe contrainte-allongement de différents polymères.

II.6.1. Influence de la température de déformation

Les essais de traction dont les conditions sont utilisées dans cette simulation ont été réalisés sur un matériau pour une valeur fixée de la vitesse de déformation $10^{-3} \cdot s^{-1}$. Le domaine de température choisi est compris entre 20°C et 100°C .

Les résultats d'essais aux différentes températures sont reportés à la figure II.10 qui montre les variations de la contrainte nominale vraie en fonction de la déformation nominale vraie

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

pour le matériau PET semi-cristallin pour une vitesse de déformation nominale $\varepsilon_n = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ [41].

On observe nettement à la figure II-5 un domaine de transition. Le comportement en traction est toujours marqué par un seuil d'écoulement plastique mais la limite élastique devient très faible et n'est plus accompagnée par un crochet.

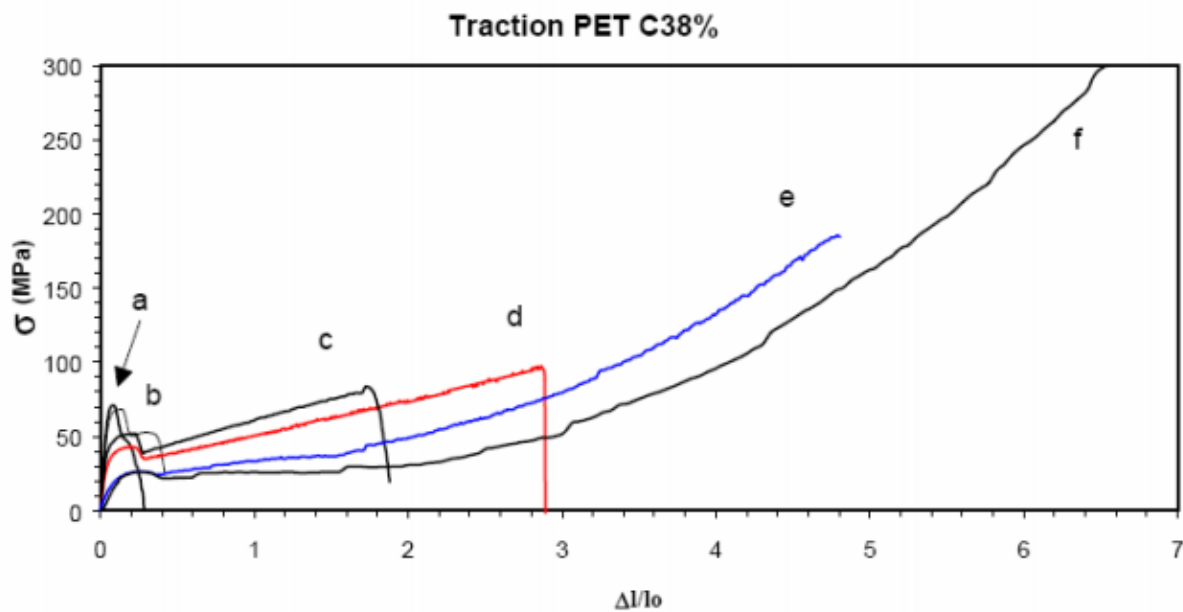


Figure II.5. : Courbes contrainte-déformation en traction obtenues pour le PET semi- cristallin (XC=38%), $\varepsilon_n = 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ et aux différentes températures: a=298°K, b=313°K, c=333°K, d=343°K, e=358°K et f=373°K. [41].

II.6.2. Influence de la vitesse de déformation

De plus cet essai est bien adapté pour les matériaux se présentent sous formes épaisse. Les courbes contrainte-déformation obtenus à la température ambiante qui sont représentés dans la figure II-6 pour des vitesses de déformation nominale comprises entre $1,68 \cdot 10^{-2}$ et $4 \cdot 10^{-5} \text{ s}^{-1}$. On observe un stade initial élastique et un comportement viscoélastique avec un accroissement non linéaire de la contrainte en fonction de la déformation.

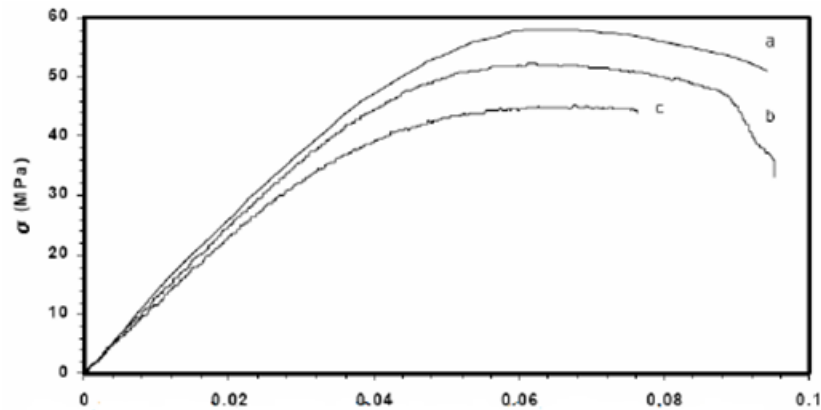


Figure II.6. courbes contraintes déformation en traction obtenue a la température ambiante pour le P.E.T, (a) : $\dot{\epsilon}_n = 1.6.10^{-2}.s^{-1}$, (b) : $\dot{\epsilon}_n = 8.4.10^{-4}.s^{-1}$, et (c) : $\dot{\epsilon}_n = 4.10^{-5}.s^{-1}$. [41].

II.7. Recyclage du PET

Les matières plastiques constituent la catégorie de matériaux sur laquelle la pression pour augmenter le taux de recyclage est la plus forte. Des statistiques ont montrés que trois plastiques : le PET, les polyamides et le polystyrène; ont plus particulièrement fait l'objet de travaux de recherches dans le domaine de recyclage [42].

La valorisation des matières plastiques est devenue un enjeu à la fois écologique, puisque le volume des déchets, produits par an et par habitant dans les pays développés, n'a cessé d'augmenter au cours de ces dernières années, créant une véritable problématique écologique par la pollution de l'air et des sols [30], elle est aussi un enjeu industriel et économique important puisque le gisement des emballages ménagers mondial représente des millions de tonnes dans la partie majeure sont des bouteilles de plastiques à recycler.

La production de déchets étant en croissance constante, le traitement des matériaux plastiques est devenu une évidence. Que ce soit par élimination ou transformation, les techniques de valorisation font l'objet de nombreuses recherches.

En Europe par exemple, des lois précisent que les déchets plastiques doivent être valorisés par élimination ou recyclage, respectant ainsi un calendrier d'action déterminé. Chaque pays membre de l'Union Européenne doit rendre un bilan d'action tous les trois ans [43].

Le PET, grâce à son comportement technologique et à son importance quantitative sur le marché, est un bon candidat au recyclage. Actuellement le débouché principal du PET recyclé

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

est le textile, mais cette industrie a presque atteint la quantité maximum qu'elle peut absorber. Les bouteilles pour boisson étant fabriquées essentiellement en PET, le recyclage des matériaux en PET destinés et utilisés pour le contact alimentaire permettrait d'accroître notablement la capacité de recyclage des emballages ménagers et d'une manière plus générale celui des emballages plastiques (ménagers, industriels et commerciaux) [44].

II.7.1. Les différents modes de recyclage ou valorisation

Il existe deux types de valorisation à savoir : la valorisation énergétique et la valorisation matière.

II.7.1.1. La valorisation énergétique

La valorisation énergétique consiste à utiliser les matières plastiques comme combustibles et à récupérer ainsi l'énergie dégagée. Cette opération se déroule dans une unité d'incinération de déchets de matières plastiques. Compte tenu du pouvoir calorifique élevé des polymères, le recyclage énergétique est très efficace pour des déchets plastiques souillés ou non triés qui ne sont donc pas réutilisables.

Pour le cas du PET et étant donné qu'il est produit uniquement à partir de gaz naturel ou de pétrole, sa combustion complète (800 - 1000°C) a pour effet de produire de l'oxygène, de l'eau et du dioxyde de carbone. Le pouvoir calorifique inférieur (PCI) du PET varie entre 13 MJ/Kg (déchets d'emballage) et 45 MJ/Kg (matériau pur), contre 44 MJ/Kg pour le fuel et 29 MJ/Kg pour le charbon. De nombreux pays ont adapté ce mode de valorisation car il constitue une solution à la valorisation de PET fortement contaminés. Mais cette technique est vivement critiquée car elle contribue à l'effet de serre par émission de dioxyde de carbone comme il a été mentionné, et génère des produits solides tels que des mâchefers (20 à 30 % en poids) et des cendres volantes (3 à 4 % en poids) [45].

II. 7.1. 2. La valorisation matière

➤ Le recyclage chimique :

Cette méthode consiste à dépolymériser le PET afin de récupérer ses monomères qui sont principalement l'acide téréphtalique (TPA), le diméthyle téréphtalate (DMT) et le monoéthylène glycol (MEG). La méthode permet aussi d'obtenir des monomères ou des oligomères par une dépolymérisation partielle ou complète du polymère. Ces produits de dégradation sont ensuite réutilisés pour la synthèse d'un nouveau PET ou d'autres polymères comme les polyuréthanes ou les polyesters insaturés.

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

Le recyclage chimique du PET peut se faire suivant plusieurs procédés: l'hydrolyse, la méthanolyse, la glycolyse ou la diolyse. [42,46] L'hydrolyse et la méthanolyse permettent de régénérer les monomères (acide téréphtalique, diméthyle téréphtalate et éthylène glycol) tandis que la glycolyse et autre solvolysse permettent simplement de produire des oligomères. Il est également possible de convertir chimiquement les déchets en modifiant leur structure pour des applications particulières, telle que la production de polyuréthanes (aminolyse) ou de polyesters insaturés. L'aminolyse consiste à dépolymériser le PET à l'état solide dans une solution aqueuse contenant des amines primaires, et permet la formation de diamides, d'acide téréphtalique et d'éthylène glycol. Les diamides formés sont ensuite utilisés comme monomères pour la production de poly (ester amides) ou polyuréthanes via des réactions avec des iso cyanates. L'utilisation du PET comme source de monomères (par dépolymérisation et modification chimique) pour la production d'intermédiaires chimiques est limitée en volume. Toutefois, la commercialisation de ces intermédiaires semble connaître une augmentation relativement importante selon de récentes études économiques [47]. Après dépolymérisation, les monomères et/ou oligomères sont purifiés par distillation sous vide et repolymérisés avec de l'éthylène glycol pour donner du PET. Le polymère obtenu peut ensuite être utilisé pour la fabrication d'emballages alimentaires. L'avantage est qu'il n'est pas nécessaire de trier le PET avant transformation, et qu'il est possible d'utiliser différents grades de PET sans que cela n'ait d'influence sur les produits obtenus. Mais le procédé de transformation génère un coût élevé [43].

➤ **Recyclage mécanique :**

La valorisation des plastiques par voie fondue est une méthode simple, peu endommageable pour l'environnement et demandant peu d'investissements par rapport au recyclage chimique. Elle a pour but l'utilisation des matières plastiques usagées dans la production d'un nouvel objet.

L'inconvénient majeur du recyclage mécanique du PET est la présence d'eau et de contaminants dans le matériau pendant la mise en oeuvre, qui comme nous l'avant décrit auparavant engendre ou catalyse les réactions de dégradation responsables de la diminution de la masse molaire de la résine recyclée. Les scissions de chaînes sont responsables de la diminution de viscosité du matériau et donc de la perte de ses propriétés mécaniques (tableau I.3), de la production d'oligomères cycliques et linéaires, de l'augmentation du taux de cristallinité du polymère pour un même procédé de transformation, du jaunissement de la

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

résine et parfois même du blocage de l'extrudeuse dû à l'oxydation en température des chaînes dans certaines conditions de mise en œuvre [30,43].

Le processus du recyclage mécanique consiste à identifier les différentes sources de déchets du plastique à recycler, à les collecter et à les trier. Concernant les bouteilles en PET, elles sont regroupées en balles, puis transporter vers une usine de recyclage où elles sont broyées en paillettes. Les impuretés constituées de différents polymères, papiers, métaux et souillures (bagues sécurité de bouchons, étiquettes, colle, terre, ...) présentes avec les bouteilles sont éliminées par des lavages successifs à l'eau, par aimantation (métaux ferreux) et par différence de flottaison (polyoléfines...).

En effet, le PET ayant une densité supérieure à 1,3 (amorphe) à 1,4 (cristallin), il pourra être séparé dans l'eau de polymères tels que les polyoléfines (densités inférieures à 1). La partie se trouvant sous l'eau est constituée en très grande partie de PET dans laquelle on peut trouver du PVC (densité 1,3 environ) en faible quantité. Ce PVC peut être écarté de la filière de recyclage par des buses pneumatiques après détection par des systèmes électroniques (détection de la couleur, RX...). Si cette quantité est inférieure à 1%, le PET collecté est généralement considéré comme apte au recyclage [48].

Il est alors transformé en produits finis ou bien en granules ou billes ayant une qualité homogène et en fin commercialisés en concurrence avec les granulés de la résine vierge. Malheureusement cette valorisation a ses limites car le matériau concerné ne peut être indéfiniment recyclé à cause de sa dégradation accélérée par la présence de contaminants et perd progressivement ses propriétés [43].

❖ Exemple de recyclage du PET de bouteille à bouteille :

L'organigramme suivant explique les phases du recyclage mécanique du PET dans le cas d'une post-condensation pour fabriquer de nouvelles bouteilles alimentaires. [44]

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

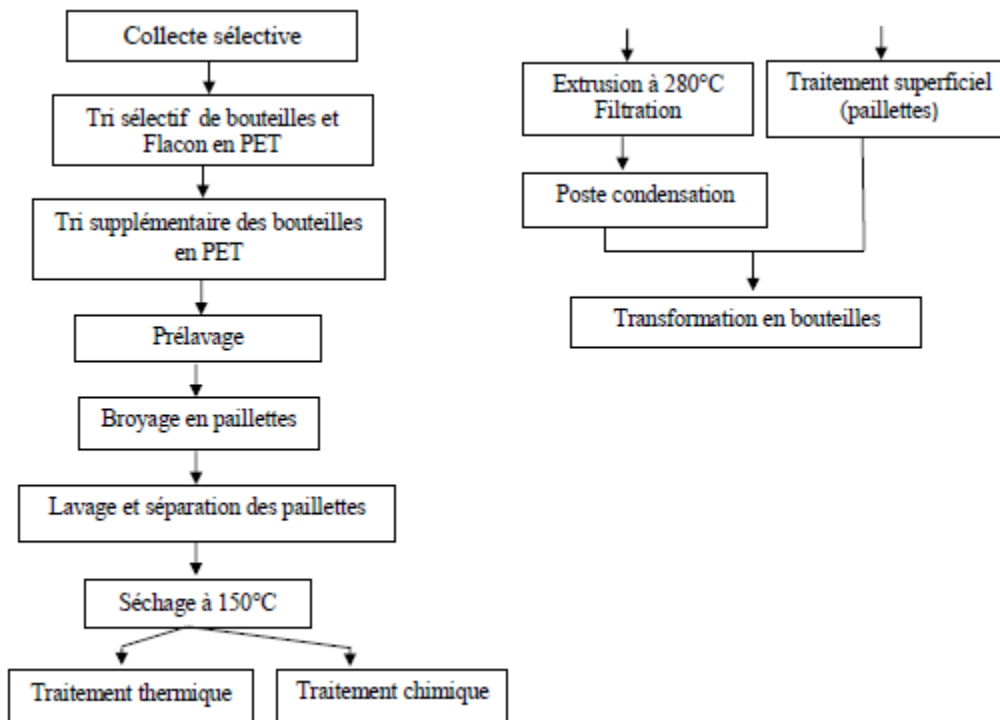


Figure II.7: Exemple des phases du recyclage mécanique du PET dans le cas d'une post-Condensation pour fabriquer de nouvelles bouteilles alimentaires [44].

Phase1: Collecte et tri sélectifs des déchets d'emballages ménagers recyclables.

Élimination grossière d'objets et de bouteilles non en PET.

Phase 2 : Tri affiné des bouteilles en PET.

Élimination de bouteilles non compatibles avec le recyclage du PET (dont PVC, PEHD).

Phase 3 : Régénération.

Élimination d'étiquettes, de bouchons, colles et impuretés.

Phase 4 : Procédés de traitement avec décontamination du PET.

Après le séchage, plusieurs grandes voies de traitement sont envisageables. (deux ici), traitement thermique ou chimique.

Élimination de l'eau et de polluants volatils, lors du séchage et d'insolubles en sortie d'extrudeuse.

Phase 5 : Transformation du PET recyclé.

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

Phase 1 : Collecte sélective des déchets d'emballages ménagers recyclables :

A l'exception des chutes industrielles collectées et traitées, la seule collecte organisée à ce jour en France porte sur les bouteilles et flacons plastiques ménagers (en PET, PEHD, PP et PVC) qui représentent 40 % des emballages plastiques ménagers. Les emballages plastiques ménagers représentent quant à eux 55 % du gisement total des emballages plastiques (incluant les emballages industriels et commerciaux en plus des emballages ménagers). Le décret du 1er avril 1992 impose aux producteurs, aux importateurs ou à toute autre personne responsable de la mise sur le marché d'un emballage ménager de pourvoir à son élimination, notamment en recourant aux services d'un organisme agréé [44].

Des collectes sélectives [30] sont mises en place par les collectivités locales (de la collecte des déchets chez l'habitant jusqu'au centre de tri). La collecte chez l'habitant peut être réalisée en porte à porte ou en apport volontaire. En principe, la collecte sélective permet d'écarter du circuit de recyclage les bouteilles et flacons ayant contenu des produits toxiques ou phytosanitaires. Les déchets sont dirigés vers des centres de tri gérés par les collectivités locales ou leurs prestataires. Le tri s'effectue par objet, par type de polymère (les différents polymères étant incompatibles, ils ne peuvent être traités ensemble) et par couleur. Le tri peut être manuel ou automatisé selon les centres. Les bouteilles triées sont conditionnées en balles puis vendues à des régénérateurs.

Un cahier des charges fixe les conditions de reprise des matériaux recyclables triés à partir de la seule collecte sélective des emballages ménagers. [49].

Phase 2 : Tri supplémentaire affiné :

Un tri supplémentaire par matière et par couleur est réalisé par le régénérateur. Des tris automatiques, par exemple en proche Infrarouge ou par caméra dans le visible permettent de trier, à grande vitesse, des plastiques par type de polymère et par couleur (élimination PE, PVC). Ensuite, un affinage permet d'éliminer les bouteilles colorées et autres corps étrangers non repérés par les machines (éléments métalliques, cartons).

Phase 3 : Régénération du PET :

La régénération comporte plusieurs étapes de nettoyage et de purification. Les éléments résiduels non souhaités (bagues, poly-acrylonitrile notamment, car ces matériaux sont incompatibles avec la mise en œuvre du PET pour le recyclage au-delà de quelques centaines

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

de (ppm) sont éliminés par lavages et différence de densité (PE). Ces étapes sont plus ou moins poussées selon les applications visées. Pour les applications les plus exigeantes comme le flaconnage, le taux de pureté minimale des paillettes doit être de 99,95 % de PET [50] Les principales étapes sont :

❖ **Prélavage et broyage des bouteilles de PET destinées au recyclage ; Lavage des paillettes :**

La plupart des procédés de lavage utilisent des tensioactifs et/ou de la soude diluée portée à une température de l'ordre de 70 à 90 °C. Ceci pose le problème de pollution éventuelle du PET par les détergents mais améliore l'élimination des polluants organiques présents à la surface de paillettes [49] [51], [52]

❖ **Séparation :**

Les impuretés principales à ce stade sont les polyoléfines (des bouchons broyés), ainsi que du papier (résidus d'étiquettes), diverses souillures (terre, etc.) et dans une moindre mesure les métaux (bagues de sécurité de bouchons). Ces impuretés sont éliminées par des lavages successifs à l'eau et par différence de densité et flottation (densité inférieure à 1 pour les polyoléfines, supérieure à 1,3 pour le PET). Des procédés de friction, de centrifugation ou de cyclonage permettent d'améliorer également l'élimination des particules fines, de la colle, des étiquettes. Les paillettes sont ensuite séchées avant stockage ou reprises en vue d'une extrusion pour produire des granulés [44]

II.8. utilisation du PET recyclé

Le recyclage mécanique des bouteilles en plastique conduit à une régénération du PET sous forme de paillettes après purification. Ces paillettes peuvent être alors réutilisées pour l'élaboration d'un objet. Les différents domaines d'utilisation de ces paillettes sont présentés sur la figure II.14 [48].

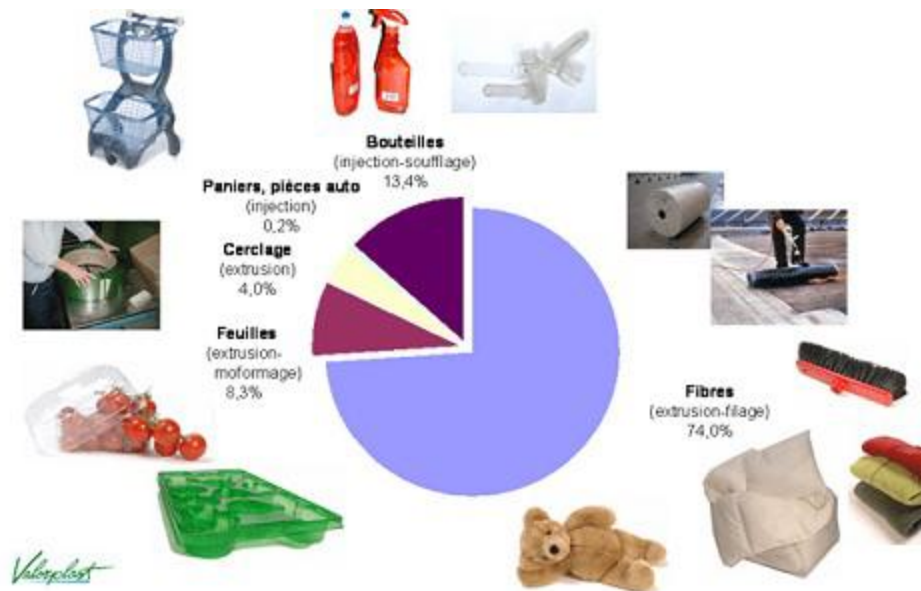


Figure II.8 : Domaines d'utilisation des paillettes de PET recyclé [48].

Les débouchés du PET recyclé sont donc importants. La première application, par ordre d'importance, est la fibre de polyester, utilisée dans l'industrie textile comme bourre pour les anoraks, les coussins et les sacs de couchage. Tout édredon, coussin ou veste chaude peut donc contenir du PET recyclé. En fonction des techniques de transformation, des paillettes de PET recyclé sont aussi utilisées pour les vêtements rembourrés, comme les bonnets, les anoraks, les gants et les pulls ou pour les tapis et l'habillement qui sont constitués à 100 % de PET recyclé. Parmi les autres applications, on citera entre autres les feuilles, les gobelets et les bouteilles. Ces dernières peuvent utiliser actuellement 25 % de matières recyclées au maximum de manière à éviter une couleur grise [48].

On est arrivé à des proportions de 33, 50 et même 100 %. En Europe, l'utilisation de produit de recyclage pour la production d'emballages alimentaires est interdite, sauf dans des conditions strictes et avec l'approbation du ministère de la Santé publique. Le recyclage interne constitue une exception à cet égard. En effet, le processus de production génère toujours des déchets comme des rognures et des chutes. Ces déchets purement industriels peuvent être réintroduits directement dans le processus de production interne.

Une autre solution possible consiste dans la réalisation d'emballages alimentaires en plusieurs couches, la couche extérieure ou la couche centrale étant constituée par exemple de produit de

CHAPITRE II : Le Polyester et le Polyéthylène Téréphtalate

recyclage comme pour la production de bouteilles pour boissons. Mais ici aussi, des exigences très strictes sont imposées en ce qui concerne la pureté du PET recyclé. [20_recyclage-plastique.pdf][48].

II.9. Dégradation

A des températures élevées (au dessus de la T_g), l'oxygène et l'humidité sont les principaux facteurs qui entraînent pour le PET la réduction de son poids moléculaire et la formation d'un plus grand nombre de groupements terminaux -OH et -COOH.

A l'état fondu, le PET subit des dégradations hydrolytiques ou thermiques [53].

II.9.1. Dégradation hydrolytique

La dégradation hydrolytique d'un polyester se produit par la scission de liaisons esters Par les molécules d'eau, entraînant la formation de groupements carboxyles et hydroxyles.

Les mécanismes généraux de la dégradation hydrolytique en milieu acide et basique des polyesters sont présentés en Figure II 10.

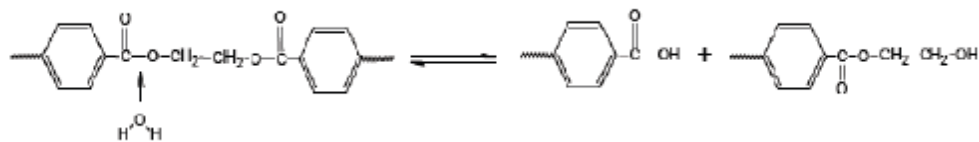


Figure II 9. Dégradation hydrolytique du PET.

II.9.2. Dégradation thermique

Ce type de dégradation est très souvent étudié sous vide ou en atmosphère neutre mais jamais en milieu oxygéné. Il s'agit d'une scission de la chaîne macromoléculaire au niveau des fonctions esters, qui a pour conséquence de former des fins de chaînes vinylesters et acides carboxyliques

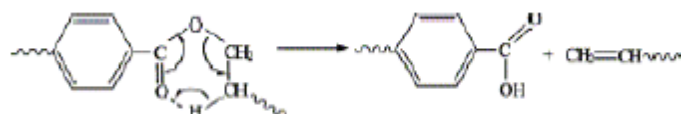


Figure.10. Dégradation thermique par rupture ionique [54].

II.9.3. Dégradation thermo-oxydative

Les réactions de dégradation thermo-oxydatives sont en outre compliquées par la participation de l'oxygène. Cette dégradation est un processus chimique en boucle fermée qui génère ses propres amorces (les hydro peroxydes). Zimmerman [55] et Mc Neil [56], ont suggérés que le processus commence par la formation d'un hydro peroxyde du groupement méthylène, suivie par une scission homolytique de la chaîne. Les hydro peroxydes jouent non seulement un rôle important dans l'induction de la dégradation thermique et thermo-oxydative du PET, mais ils sont également des intermédiaires importants dans ces réactions.

II.10. La morphologie du PET

La morphologie du PET a été largement étudiée afin d'expliquer son comportement thermique et ses propriétés mécaniques. La structure du PET comme on la mentionné peut être amorphe ou partiellement cristalline. Le taux de cristallinité a une forte influence sur les propriétés de ce matériau. En effet, cet état cristallisé améliore notablement certaines propriétés mécaniques (rigidité, résistance en traction et au déchirement) [57].

Conclusion

Le recyclage mécanique des bouteilles en PET est désormais largement privilégié. En effet, les techniques toujours plus efficaces de purification permettent d'obtenir des paillettes de PET provenant de bouteilles post consommées très homogènes. Malgré cela, les étapes de mise en œuvre d'un tel PET engendrent des dégradations inévitables qui font chuter la masse molaire de la résine et limitent alors ses applications. L'utilisation d'allongeurs de chaînes est préconisée afin d'apporter des solutions. Pour autant, aucune étude n'a mis en relation l'utilisation d'un allongeur de chaîne et les propriétés au feu des résines.

CHAPITRE III

COMPORTEMENT MÉCANIQUE DES MATÉRIAUX COMPOSITE

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composite

Introduction

Le facteur déterminant dans le choix des matériaux est la connaissance de leur comportement mécanique.

Les moyens qui permettent d'étudier le comportement mécanique et d'évaluer numériquement les propriétés des matériaux sont les essais mécaniques, dans ce chapitre on va aborder quelques essais qu'on a pu réaliser.

III.1 Propriétés physique et mécaniques des composites

III.1.1. Propriétés physiques [58]

Les propriétés physiques et mécaniques des composites sont complexes car ils sont directement liées au comportement d'un mélange fortement anisotrope.

a) 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 :

$$P_C = V_R P_R + (1 - V_R) P_M$$

b) la densité du composite

À partir de la loi énoncée 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 :

$$\rho_C = V_R \rho_R + (1 - V_R) \rho_M$$

III.1.2. Propriétés mécaniques

III.1.2.1. Essais de traction

Essai le plus classique, il consiste à exercer sur une éprouvette normalisée (pièce de dimensions normalisées fabriquée dans le matériau à tester), cylindrique ou parallélépipédique

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composite

(plate), deux actions mécaniques et opposées qui vont la déformer progressivement puis la rompre.

a) Le module de Young du composite E_c , R_{e_c} 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 :

$$\varepsilon_C = \varepsilon_M = \varepsilon_R$$

Par application de la loi des mélanges on obtient :

➤ Pour le module de Young :

$$E_c = V_R E_R + (1 - V_R) E_M$$

De la même manière on peut déterminer :

-La limite d'élasticité du composite

$$R_{e_c} = V_R R_{e_R} + (1 - V_R) R_{e_M}$$

-La résistance maximale à la traction du composite :

$$R_{m_c} = V_R R_{m_R} + (1 - V_R) R_{m_M}$$

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 :

$$\sigma_R = \sigma_M$$

b) Traction longitudinale [59]

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

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composite

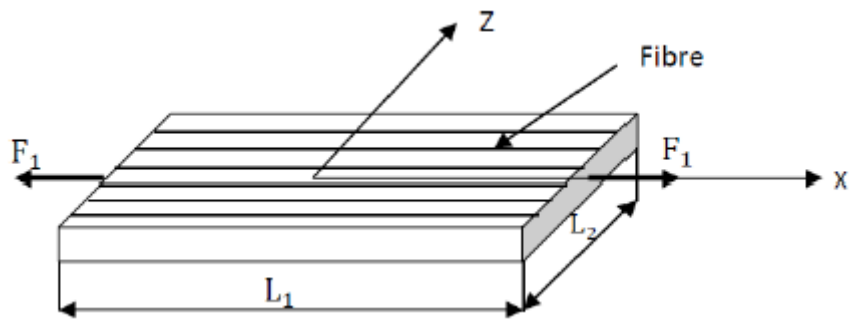


Figure III.1 : traction longitudinale

Les caractéristiques tirées sont :

La contrainte normale :

$$\sigma_{xx} = \frac{F_1}{S_1}$$

Avec S_1 : section droite du matériau

Les déformations longitudinales et transversales :

$$\varepsilon_{xx} = \frac{\Delta L_1}{L_1}$$

$$\varepsilon_{zz} = \frac{\Delta L_2}{L_2}$$

Le module de Young E :

$$E = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}}$$

c) Traction transversale

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

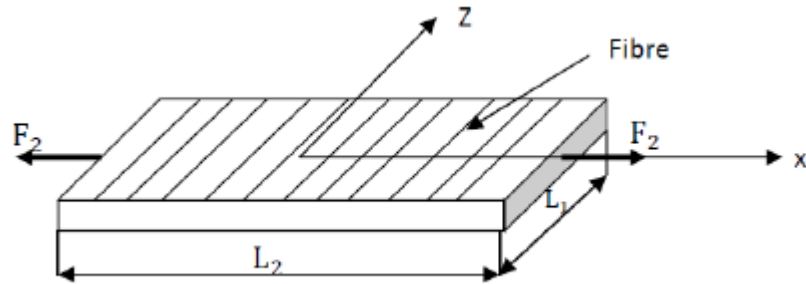


Figure III.2 : traction transversale

La contrainte normale est :

$$\sigma_{xx} = \frac{F_2}{SZ}$$

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

Le module de Yong :

$$E = \frac{\sigma_{zz}}{\varepsilon_{zz}}$$

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

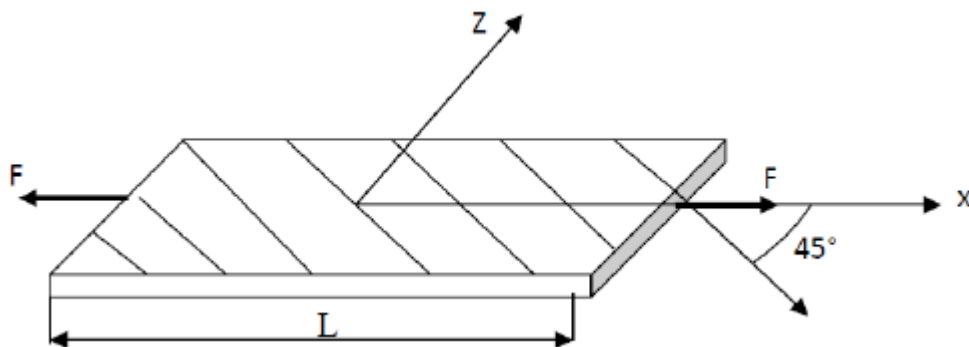


Figure III.3 : Traction hors axes

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composite

La contrainte normale est :

$$\sigma_{xx} = \frac{F}{S}$$

Le module de Yong est :

$$E_{45} = E_{xx} = \frac{\sigma_{xx}}{\varepsilon_{xx}}$$

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 composite unidirectionnel)

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

e) Courbe conventionnelle

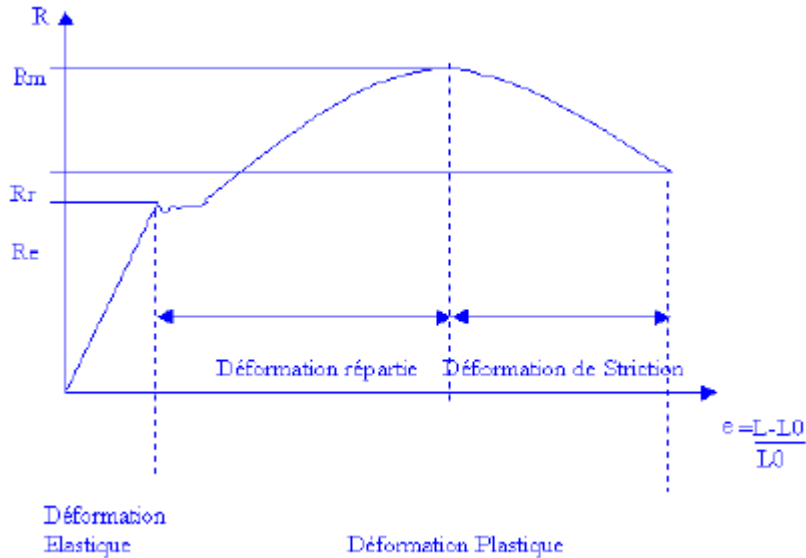


Figure III.4 courbe de traction conventionnelle

L'essai de traction donne plusieurs valeurs importantes :

Le module de Young E ou module d'élasticité longitudinale ;

La limite élastique R_e ou σ_e qui sert à caractériser un domaine conventionnel de réversibilité ;

La limite à la rupture R_m ou σ_m ;

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.

III.1.2.2. Essai de flexion [60]

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 œuvre. 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.

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composite

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.

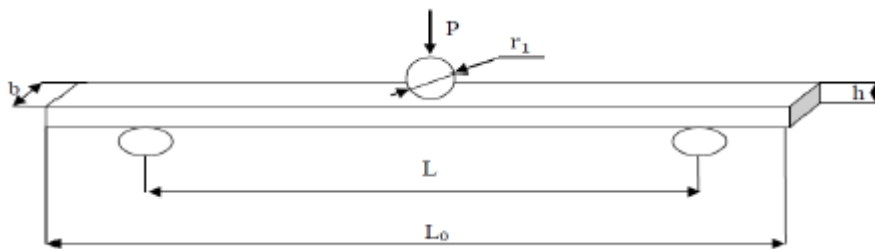


Figure III.5 : essai de flexion trois points

Avec :

P : charge appliquée(N).

h : hauteur de l'éprouvette (mm).

b : largeur de l'éprouvette (mm).

L : distance entre les axes (mm).

L_0 : Longueur de l'éprouvette (mm).

r_1 : Rayon de la panne centrale (mm).

La contrainte normale est nulle le long de l'axe neutre de l'éprouvette, alors elle va croissante en traction d'un coté de cette axe et croissante en compression de l'autre coté.

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

Chapitre III : Comportement mécanique des matériaux composite

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 :

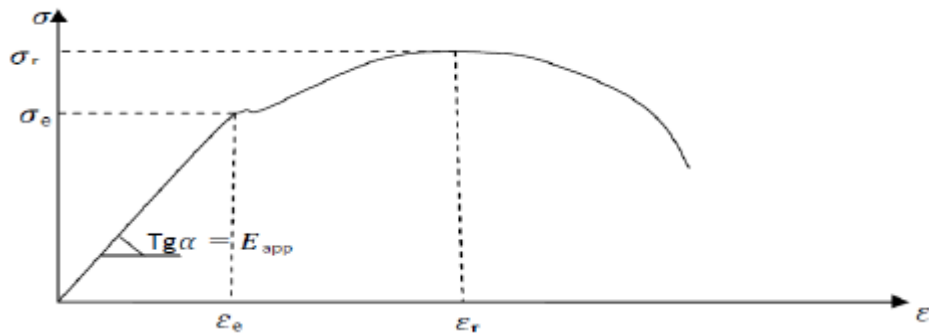


Figure III.6 : courbe de contrainte déformation en flexion

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

Module apparent :

$$E_{APP} = \frac{L^3}{4bh^3} \frac{\Delta p}{\Delta y}$$

Contrainte à rupture :

$$\sigma_r = \frac{3P_{max} L}{2bh^2}$$

Déformation à rupture :

$$\varepsilon_r = \frac{6hf}{l^2}$$

Contrainte de cisaillement :

$$\tau = \frac{3p}{4bh}$$

III.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/Cm^2).

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.

CHAPITRE IV

*TECHNIQUES D'ELABORATION ET
DE CARACTERISATION*

CHAPITRE IV : TECHNIQUES D'ELABORATION ET DE CARACTERISATION

Introduction

Dans cette partie, nous présentons les constituants choisis pour l'élaboration du matériau composite, le mode d'élaboration adopté et les techniques expérimentales utilisées pour la caractérisation physique, chimique et mécanique de notre matériau composite.

IV.1. Matériaux et Matériels Utilisés

L'élaboration de nos échantillons s'est effectuée au niveau de l'entreprise **MARINE AZEFOUN**

IV.1.1. Matériaux

Le matériau composite élaboré pour notre étude est constitué d'une matrice, résine polyester, chargé en P.E.T

a) Résine

La résine utilisée est une résine polyester ortho phtalique de stratification de couleur bleu opaque,



Figure IV.1 : Résine à l'état liquide.



Figure IV.2 : La résine utiliser.

CHAPITRE IV : TECHNIQUES D'ELABORATION ET DE CARACTERISATION

b) 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.

Le dosage à respecter pour ce catalyseur est de 1 à 2% en masse.

c) La charge

Dans cette étude nous avons utilisé le P.E.T broyer comme renfort avec différentes granulométries.



Figure IV.3 : P.E.T broyer.

d) La cire

Pour éviter que le matériau composite élaboré ne colle sur le moule, on enduit ce dernier d'une fine couche de cire.



Figure IV.4 : La cire utilisée lors du moulage.

CHAPITRE IV : TECHNIQUES D'ELABORATION ET DE CARACTERISATION

IV.1.1.2. Le matériels

a) La Balance

Nous avons utilisé une balance, pour peser nos mélanges.



Figure IV.5 : Balance.

b) Les moules

Les moules ont été fabriqués au laboratoire des sciences des matériaux de la faculté de génie mécanique pour les besoins de notre travail. Il est constitué d'une plaque de verre 450*450*5, un cadre en carton qui délimite latéralement le moule.

CHAPITRE IV : TECHNIQUES D'ELABORATION ET DE CARACTERISATION

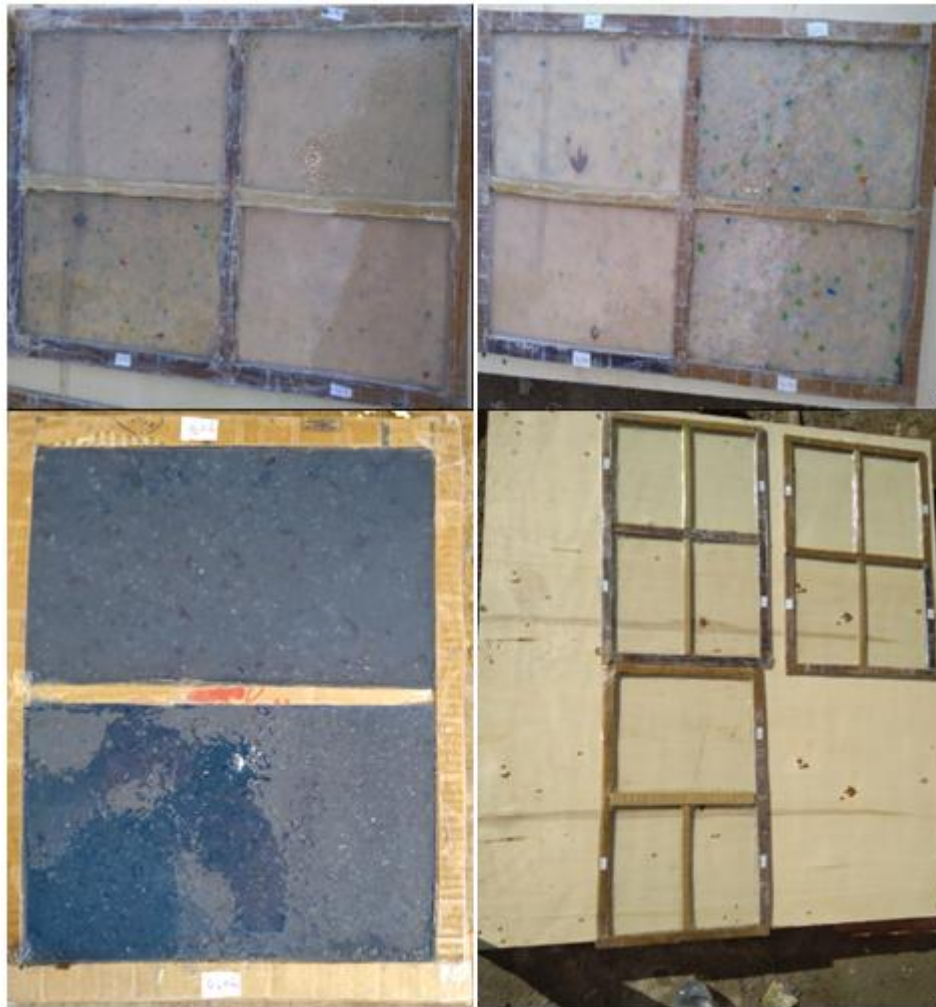


Figure IV.6 : Les moules utilisés.

IV.1.1.3. Etapes suivi pour l'élaboration du matériau à étudié

Pour la préparation de notre matériau, nous avons suivit les étapes mentionnées ci-dessous :

- Préparation des moules.
- Application de la cire.
- Versement d'une quantité de la résine avec 2% durcisseur pour le matériau composite sans renfort
- Mélangeage soigneux de la résine plus durcisseur
- Versement d'une quantité de résine avec durcisseur (1%) pour le matériau composite à différents granulométries et pourcentage de P.E.T
- Etalement du matériau composite à l aide du rouleau
- Laisser le matériau composite ainsi élaboré durcir le temps nécessaire.

CHAPITRE IV : TECHNIQUES D'ELABORATION ET DE CARACTERISATION

❖ Le traitement thermique

Une partie de nos éprouvettes ont subi un traitement thermique de relaxation à 80°C pendant 8 heures dans une étuve de marque (MEMMERT).



Figure IV.7 : L'étuve

IV.2. Techniques de caractérisation

Pour connaître le comportement mécanique du matériau, on lui fait subir plusieurs tests :

- *L'essai de traction* pour déterminer son module d'élasticité, sa résistance à la traction sa déformation en fonction de la contrainte de traction appliquée
- *L'essai de flexion* nous permet de déterminer le module élastique en flexion et la flèche
- *L'essai de dureté* pour connaître la dureté générale du matériau composite
- *L'essai de résilience* nous informe sur la capacité de résistance de notre matériaux lorsqu'il est soumis à un choc.

IV.2.1. caractérisation physique

IV.2.1.1. Infra rouge

C'est une technique très utilisée en industrie pour l'analyse des pollutions ou le contrôle en ligne des procès (également pour trier des matériaux en vue du recyclage)

Cette technique permet d'identifier les composés organiques quel que soit leurs état (liquide, solide ou gazeux).

CHAPITRE IV : TECHNIQUES D'ELABORATION ET DE CARACTERISATION

Cette technique a connu un renouveau au cours des années 70 avec l'apparition des appareils à transformée de Fourier.

IV.2.1.2. principe

Les molécules subissent des mouvements de vibration internes (d'élongation et de déformation). Quand une lumière IR traverse un échantillon, certaines liaisons absorbent de l'énergie pour changer de fréquence de vibration, faisant apparaître des bandes dans le spectre. On utilise pour identifier des liaisons chimiques dans les molécules organiques, ils permettent de déterminer les fonctions chimiques dans ces molécules.

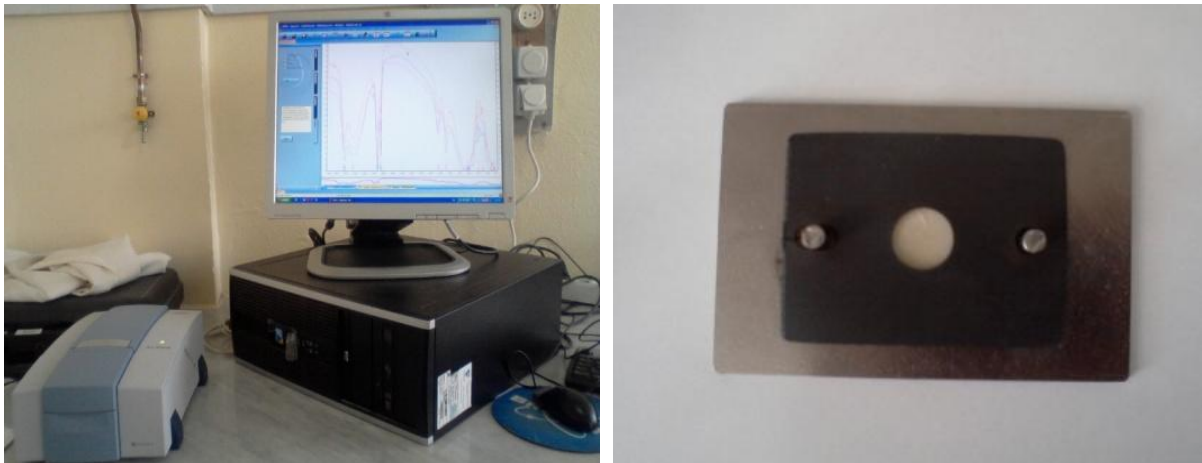


Figure IV.8 : Machine d'analyse infrarouge.

IV.2.2. caractérisation mécanique

IV.2.2.1. Essai de flexion [61]

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 œuvre. Il nous permet d'extraire la contrainte et la flèche à la rupture ainsi que le module de Young en flexion.

CHAPITRE IV : TECHNIQUES D'ELABORATION ET DE CARACTERISATION

Pour cet essai nous avons utilisé une machine de traction **zwick/Roell Z010** (laboratoire Boumerdes, Figure IV.10), l'essai s'est déroulé à une température ambiante.

Tableau IV.1 : dimensions (en mm) des éprouvettes de flexion trois points, selon ISO 14125

Longueur l	Distance entre appuis L	Largeur B	Epaisseur h
80	60	15	4



Figure IV.9 : Machine de flexion trois points.

CHAPITRE IV : TECHNIQUES D'ELABORATION ET DE CARACTERISATION



Figure VI.10 : Epreuve de flexion.

III.2.2.2. Essai de résilience [62]

Il arrive souvent que les matériaux, de très bonnes qualités plastiques sous les efforts statiques, deviennent très fragiles sous l'action du choc. La résilience caractérise la résistance au choc des matériaux. C'est une caractéristique mécanique importante.

L'énergie consommée pour rompre le barreau est mesurée en faisant la différence d'énergie potentielle entre la hauteur de chute du « mouton » et celle à laquelle il remonte après avoir rompu le barreau. Si ce dernier était complètement fragile, le « mouton » remonterait à la même hauteur que celle d'où il a chuté ; s'il était au contraire extrêmement tenace, il ne serait pas rompu et le pendule ne remonterait pas du tout.

L'énergie de rupture ainsi déterminée s'appelle la résilience J/cm^2 . Plus elle est élevée, plus le matériau est tenace.

CHAPITRE IV : TECHNIQUES D'ELABORATION ET DE CARACTERISATION



Figure IV.11. Machine de résilience (zwick).

CHAPITRE V

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Chapitre V. Résultats et discussions

Introduction

Après avoir élaboré nos matériaux composites, résine polyester chargé en paillettes de PET, à différents pourcentages et différentes granulométries.

La charge PET est répartie en trois granulométries : $G1 > 5\text{mm}$, $5\text{mm} > G2 > 2.5\text{mm}$, $G3 < 2.5\text{mm}$, les taux de charges de PET sont de 5%, 10%, 15% et 20%

Des éprouvettes sont découpées des différents composites, des éprouvettes de flexion et de résilience, une moyenne de 6 éprouvettes sont analysées pour chaque composites.

Chaque lot d'éprouvettes des matériaux composites élaborés est divisé en deux parties. La première partie des éprouvettes est restée à l'état de l'élaboration et d'usinage (non traitée), la deuxième partie a subi un traitement thermique de relaxation, un séjour de 8 heures à la température de 80 °C dans une étuve (ces éprouvettes portent la mention traitée).

Notre analyse porte sous l'influence du taux de charge du composite en PET, ainsi que l'influence de la granulométrie de la charge. Nous avons effectué un traitement thermique de relaxation, des contraintes emmagasinées suite au découpage de nos éprouvettes par une scie diamantée, l'influence de ce traitement thermique est pris en considération dans l'analyse des résultats.

V.1.Présentation des résultats pour l'essai de flexion

Dans ce qui suit nous exposons les résultats obtenus suite aux essais de flexion et de résilience. Nous présentons ci-dessous les courbes Force/ flèche de nos éprouvettes de flexion pour tous les composites ainsi élaborés : en considérant les différents taux de charge, les différentes granulométries ainsi que le traitement thermique effectué.

V.1.1 Présentation des résultats des essais de flexion des matériaux composites non traités

Nous présentons les résultats des essais de flexion pour les éprouvettes non traitées.

V.1.1.1. Courbes force /flèche pour la Résine seule

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non chargée et non traitée sont regroupés dans la figure ci-dessous.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

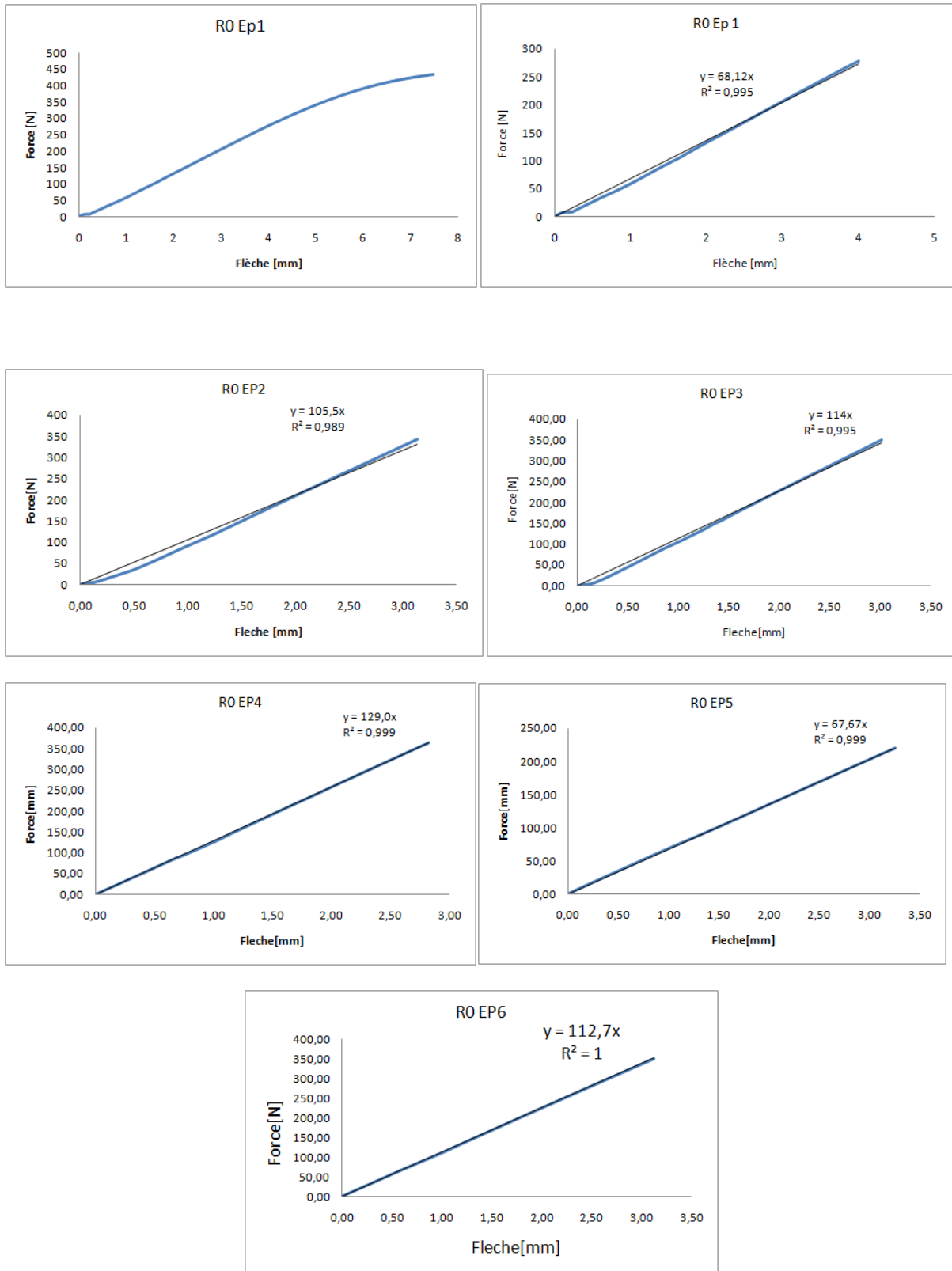


Figure V.1 Courbe Force / flèche pour la résine seule

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1.1.2. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 5% P.E.T granulométrie G1

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée en 5% de PET G1 sont regroupés dans la figures ci-dessous.

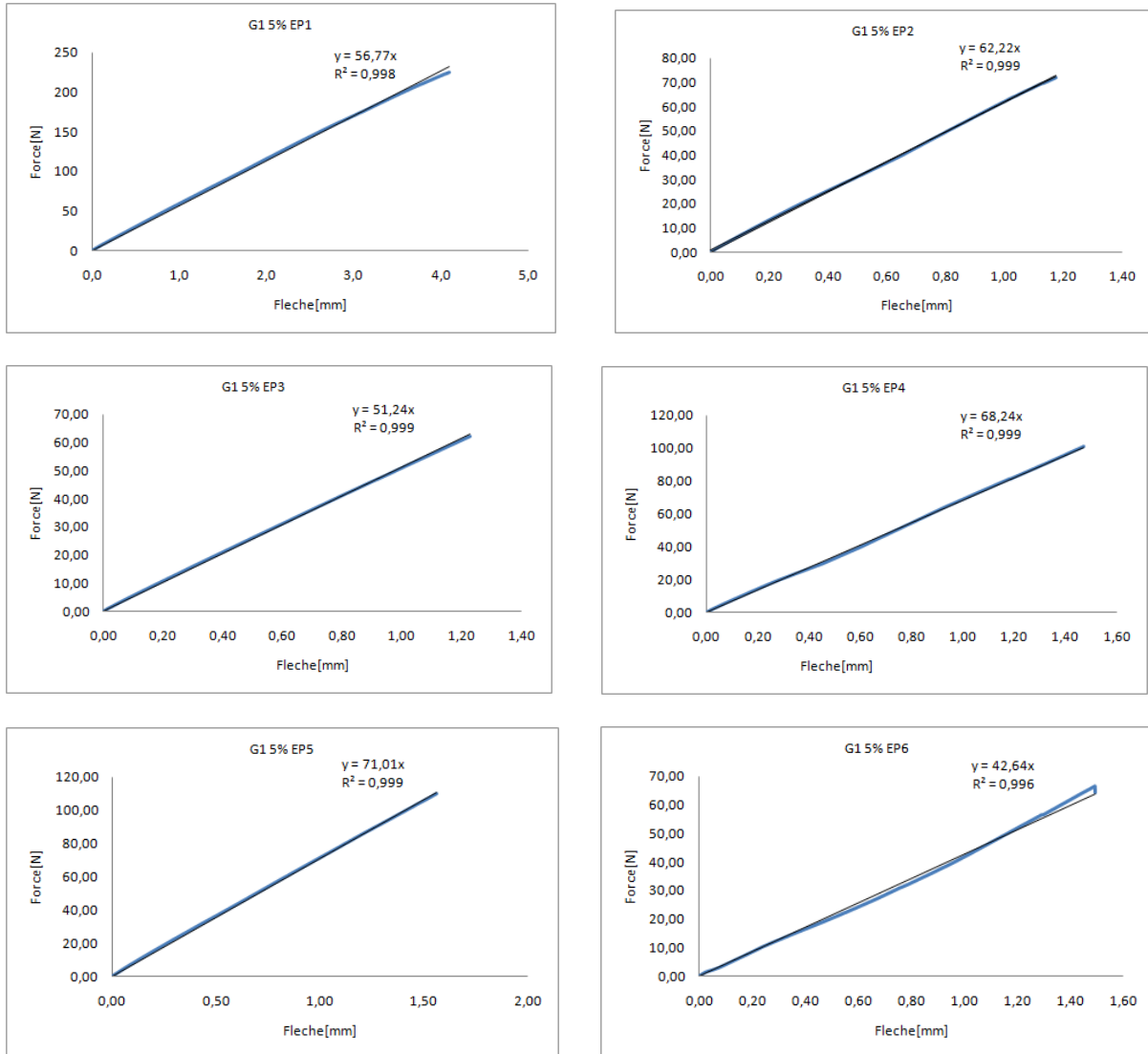


Figure V.2 Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 5% de PET G1

V.1.1.3 Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 10 % P.E.T granulométrie G1:

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée en 10% de PET G1 sont regroupés dans la figures ci-dessous.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

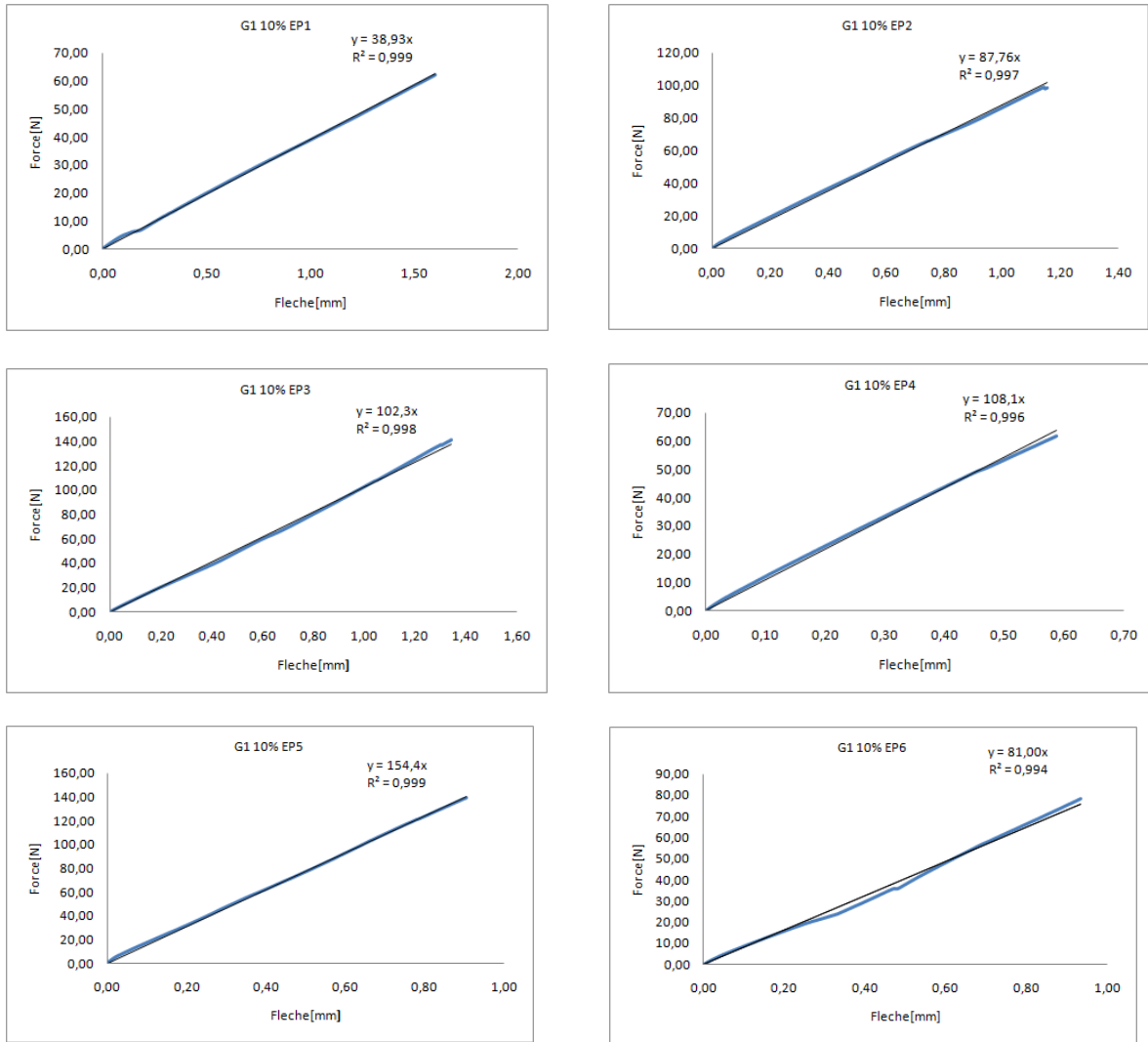
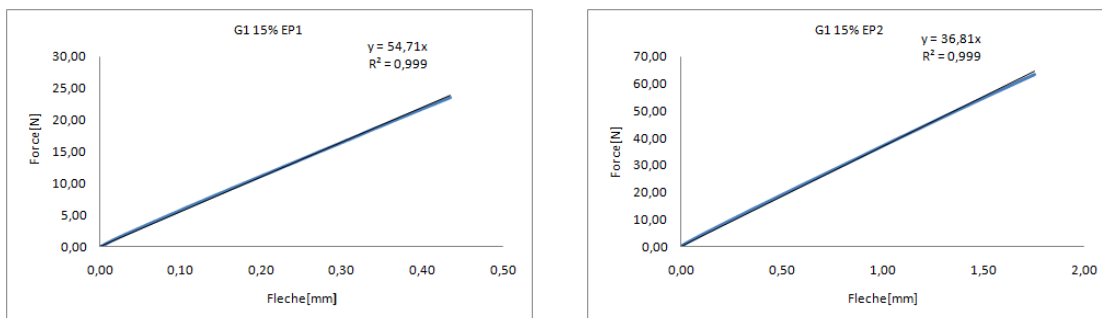


Figure V.3 Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 10 % de PET G1

V.1.1.4 Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 15 % P.E.T granulométrie G1:

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée en 15 % de PET G1 sont regroupés dans la figures ci-dessous.



CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

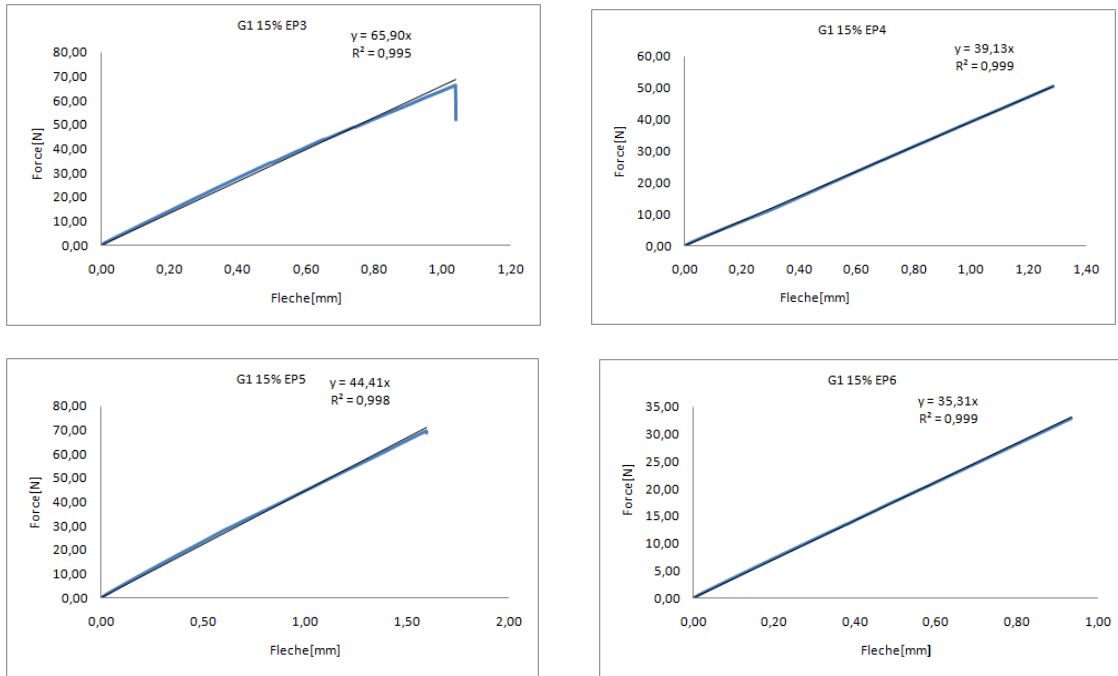
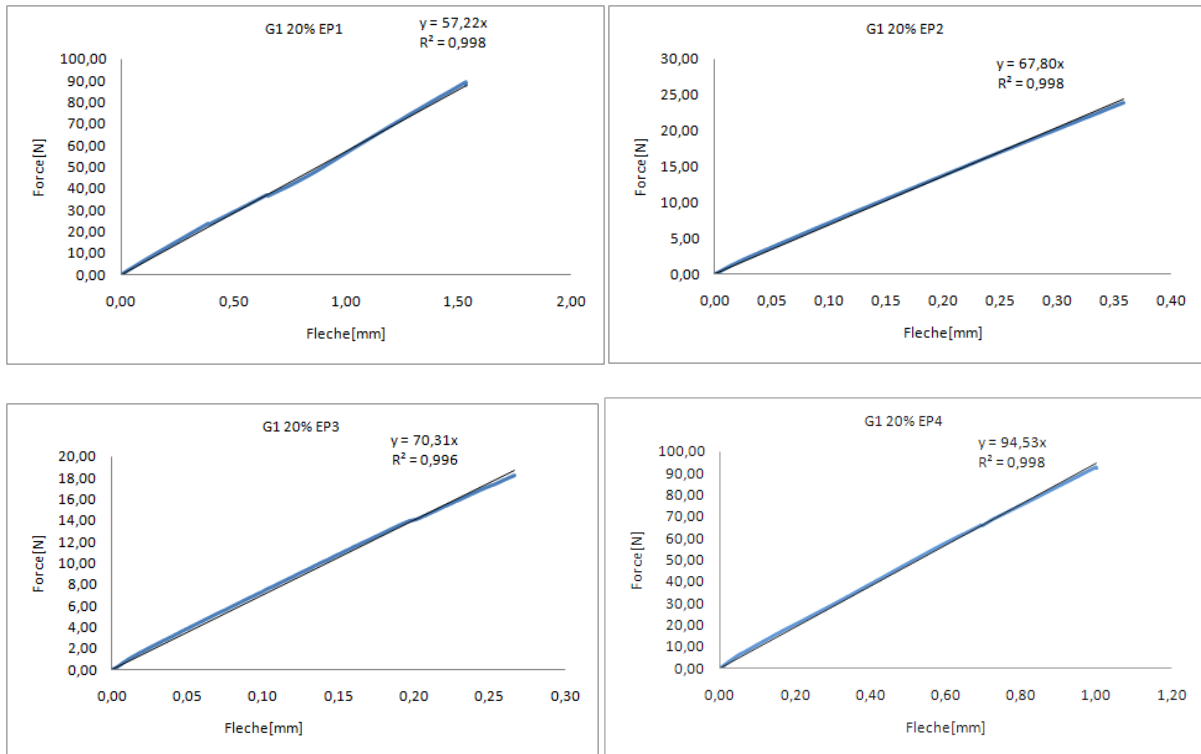


Figure V.4 Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 15 % de PET G1

V.1.1.5. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 20 % P.E.T granulométrie G1

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée en 20 % de PET G1 sont regroupés dans la figures ci-dessous



CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

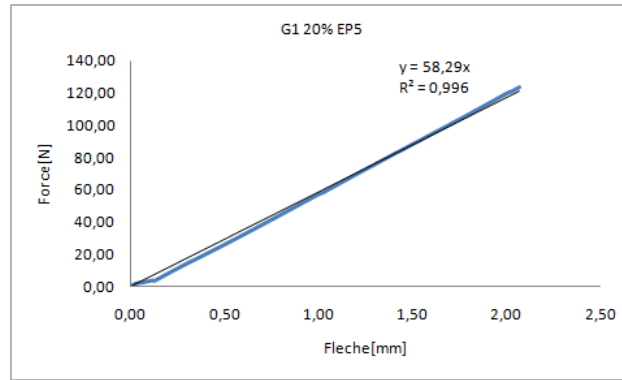
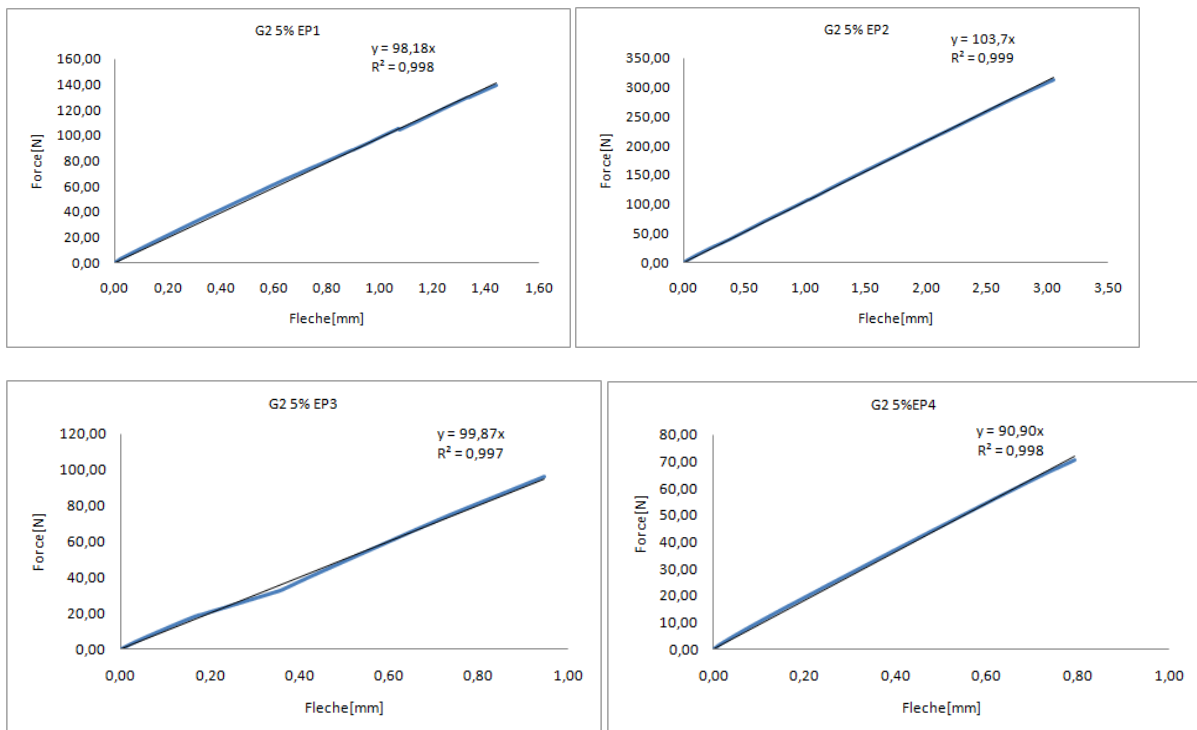


Figure V.5. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 20 % de PET G1

V.1.1.6. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 5 % P.E.T granulométrie G2

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée en 5 % de PET G2 sont regroupés dans la figures ci-dessous



CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

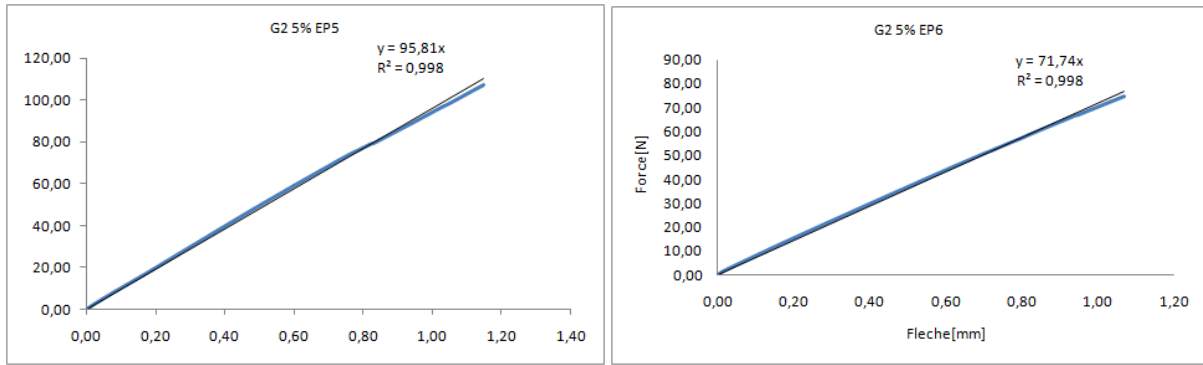
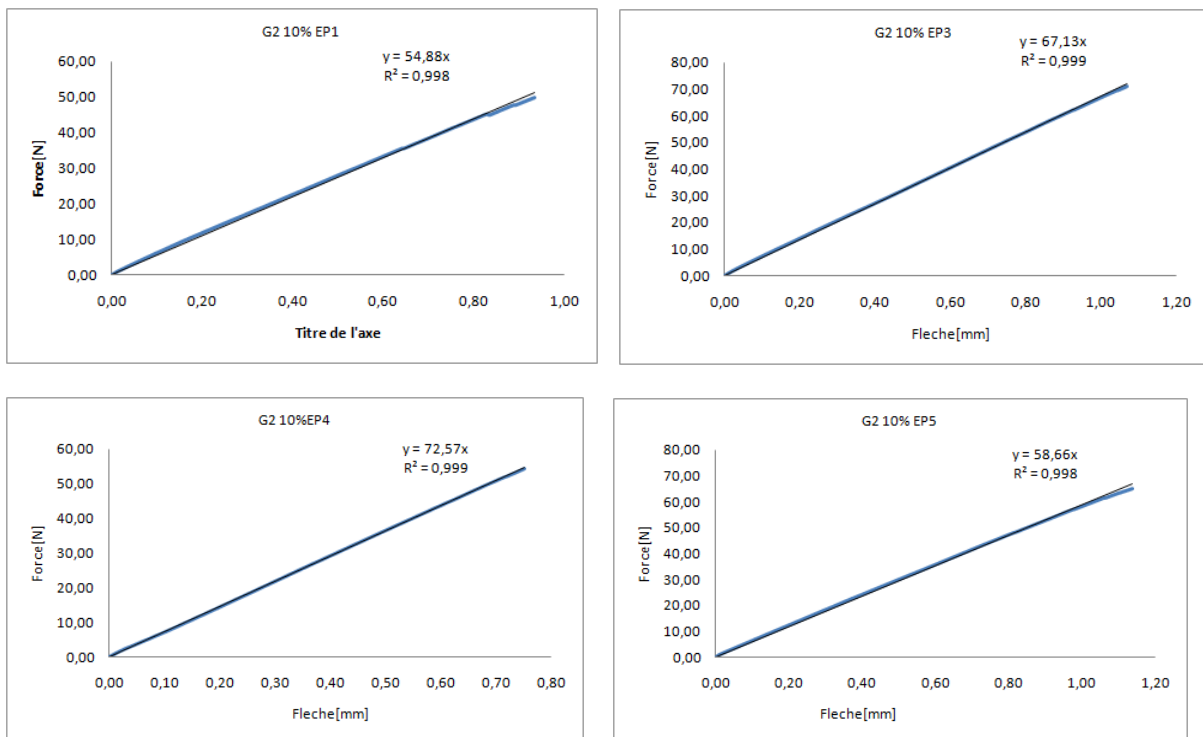


Figure V.6. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 5 % de PET G2

V.1.1.7. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 10 % P.E.T granulométrie G2

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée à 10 % de PET G2 sont regroupés dans la figures ci-dessous



CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

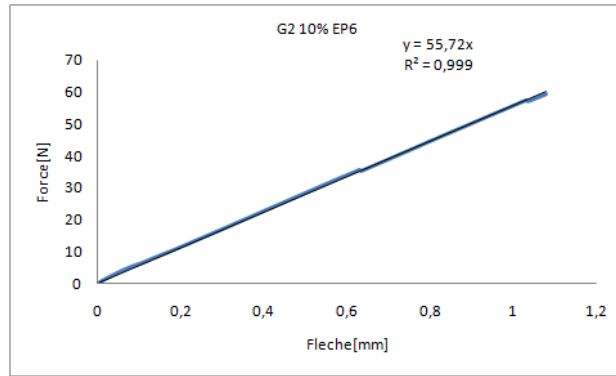


Figure V.7. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 10 % de PET G2

V.1.1.8. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 15 % P.E.T granulométrie G2

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée à 15 % de PET G2 sont regroupés dans la figure ci-dessous :

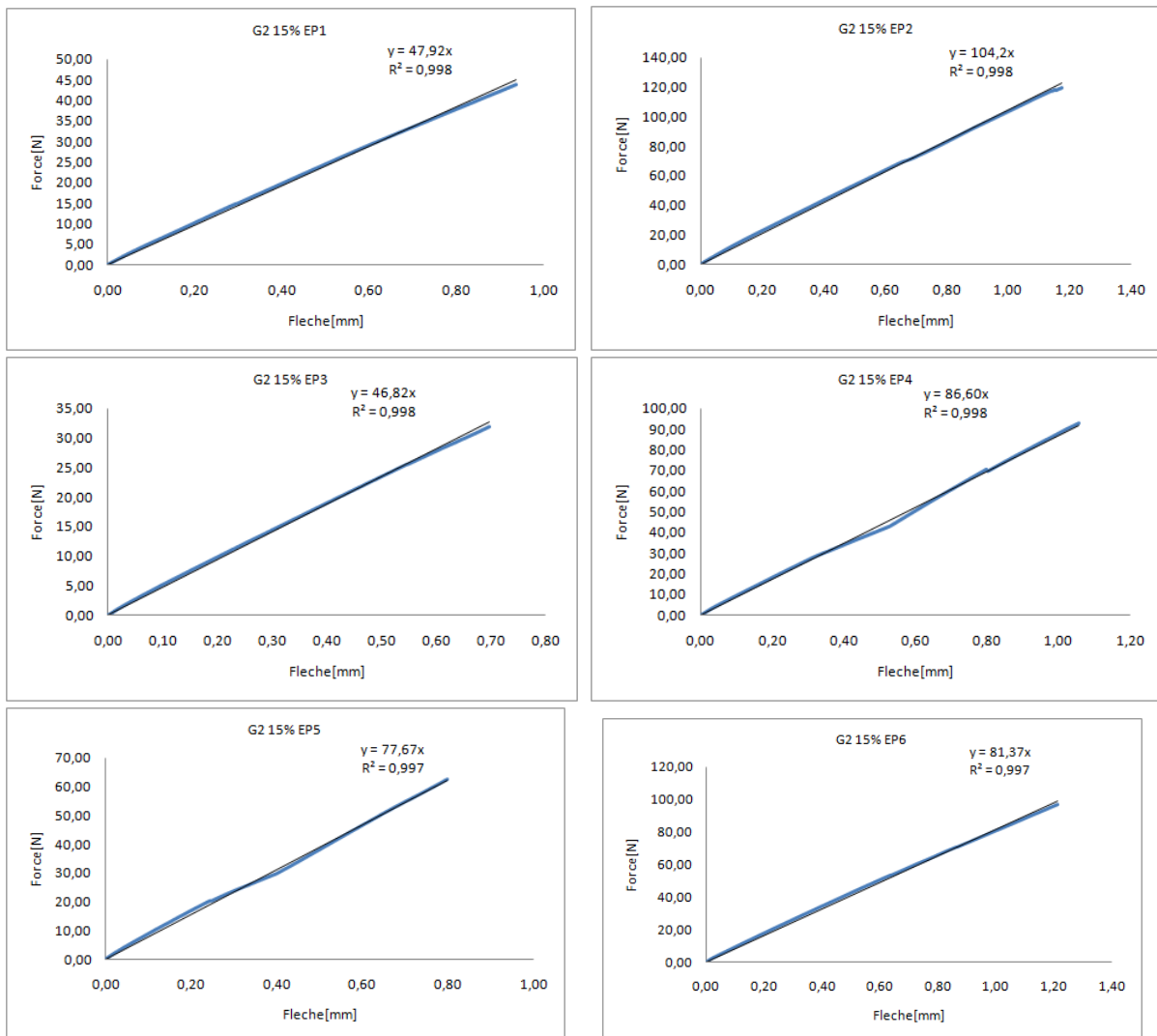


Figure V.8. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 15 % de PET G2

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1.1.9. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 20 % P.E.T granulométrie G2

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée à 20 % de PET G2 sont regroupés dans la figure ci-dessous

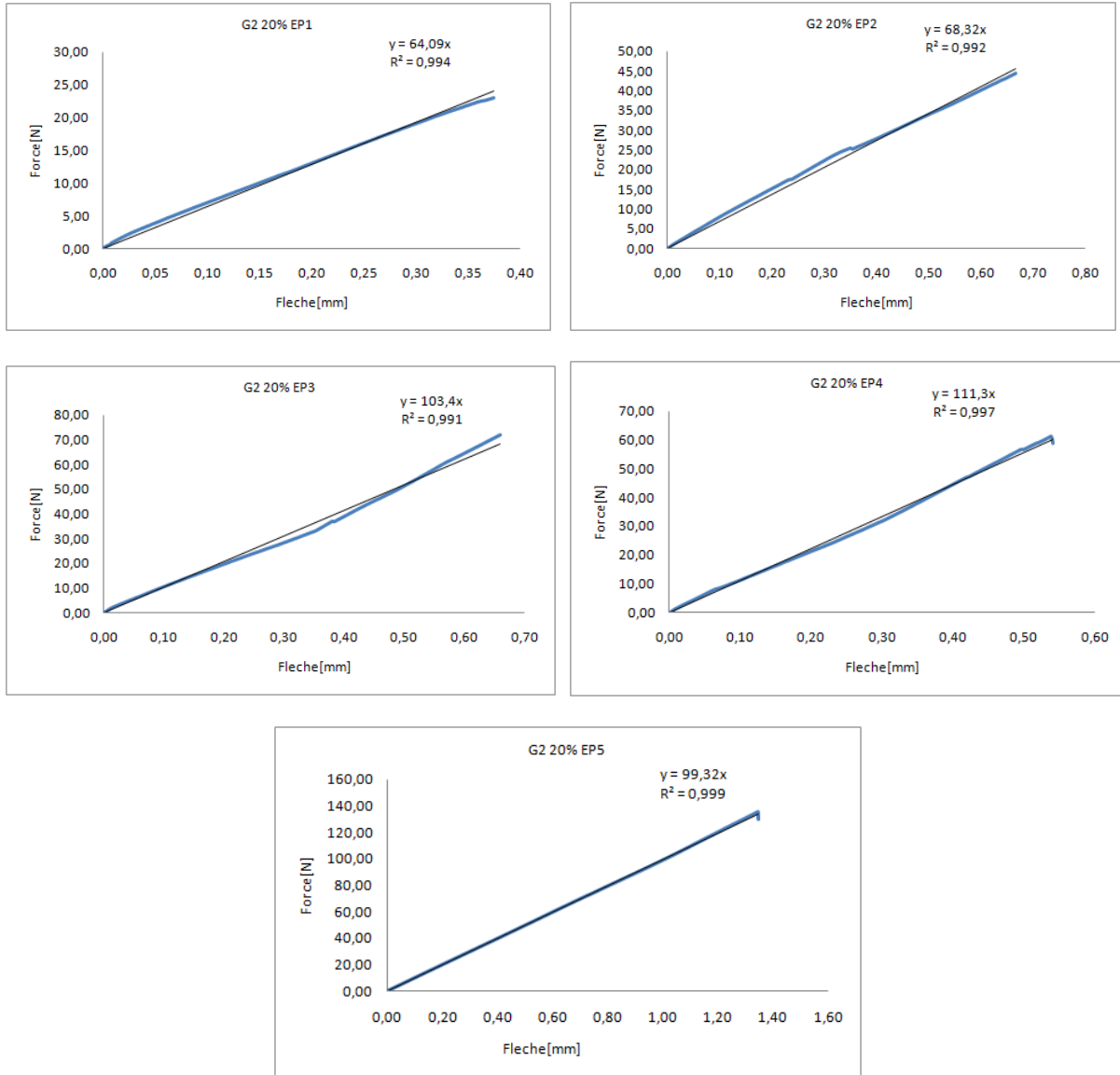


Figure V.9. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée en 20 % de PET G2

V.1.1.10. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 5 % P.E.T granulométrie G3

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée à 5 % de PET G3 sont regroupés dans la figure ci-dessous

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

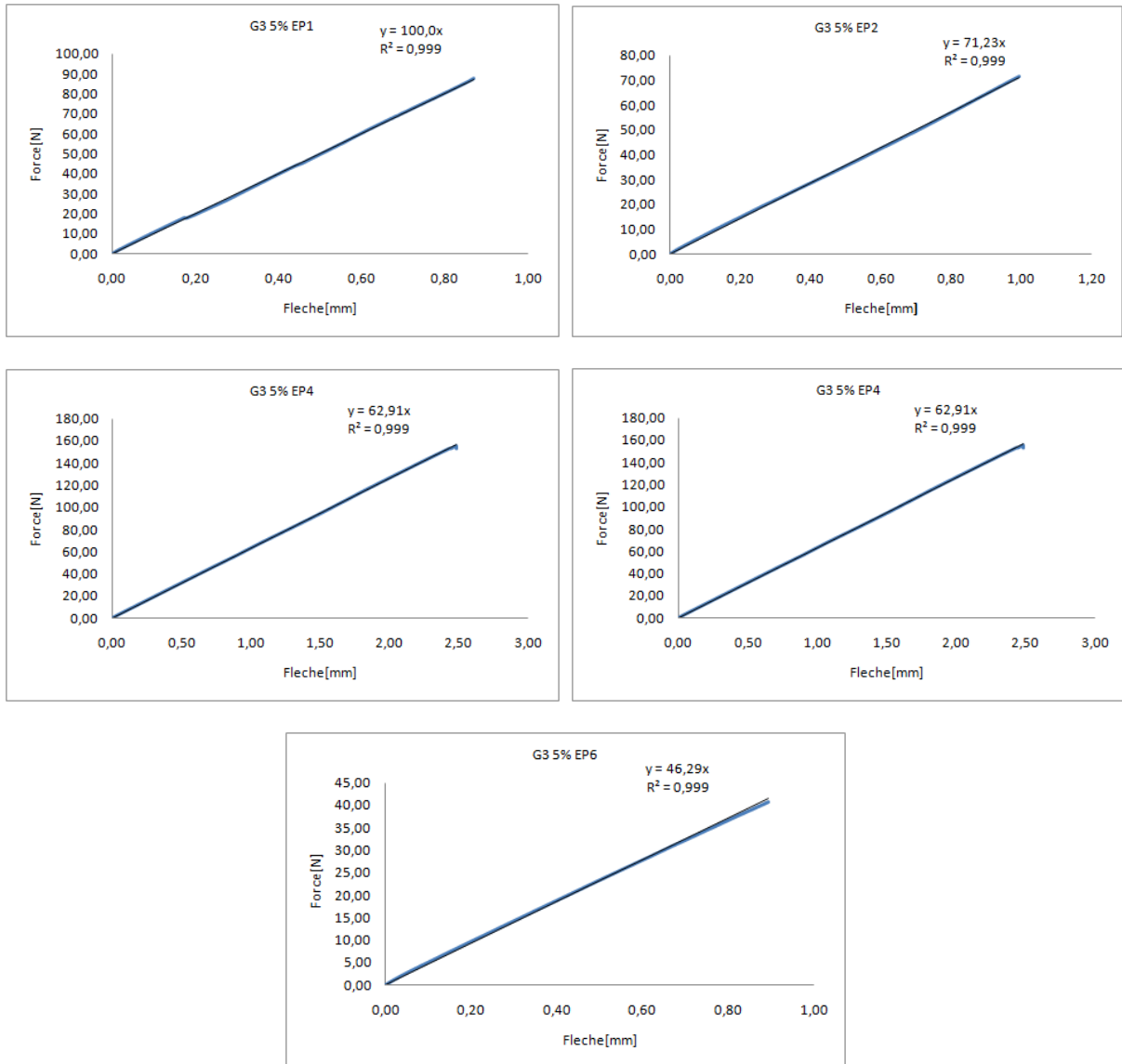


Figure V.10. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée à 5 % de PET G3

V.1.1.11. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 10 % P.E.T granulométrie G3

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée à 10 % de PET G3 sont regroupés dans la figure ci-dessous

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

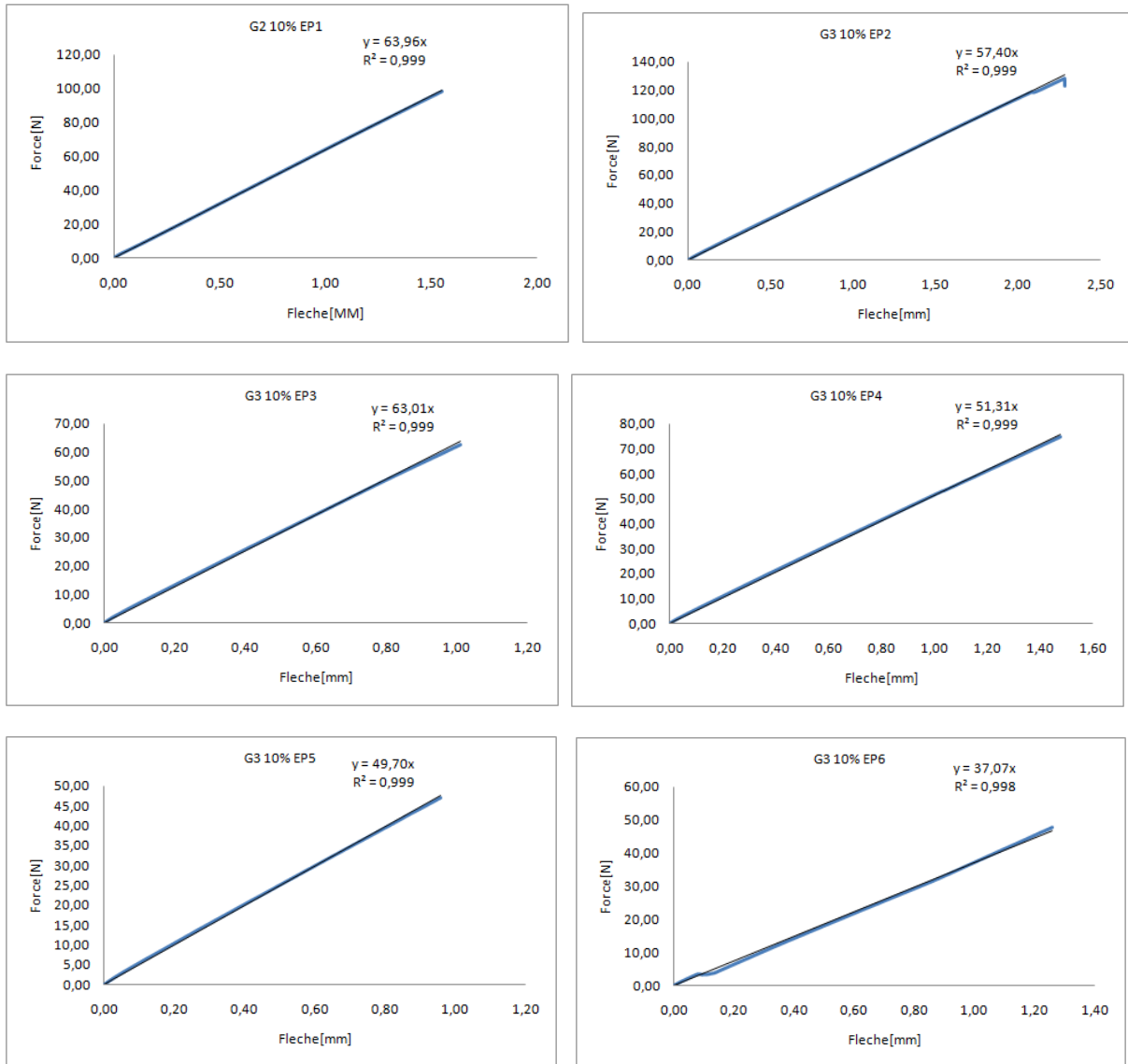


Figure V.11. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée à 10 % de PET G3

V.1.1.12. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 15 % P.E.T granulométrie G3

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée à 20 % de PET G2 sont regroupés dans la figure ci-dessous

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

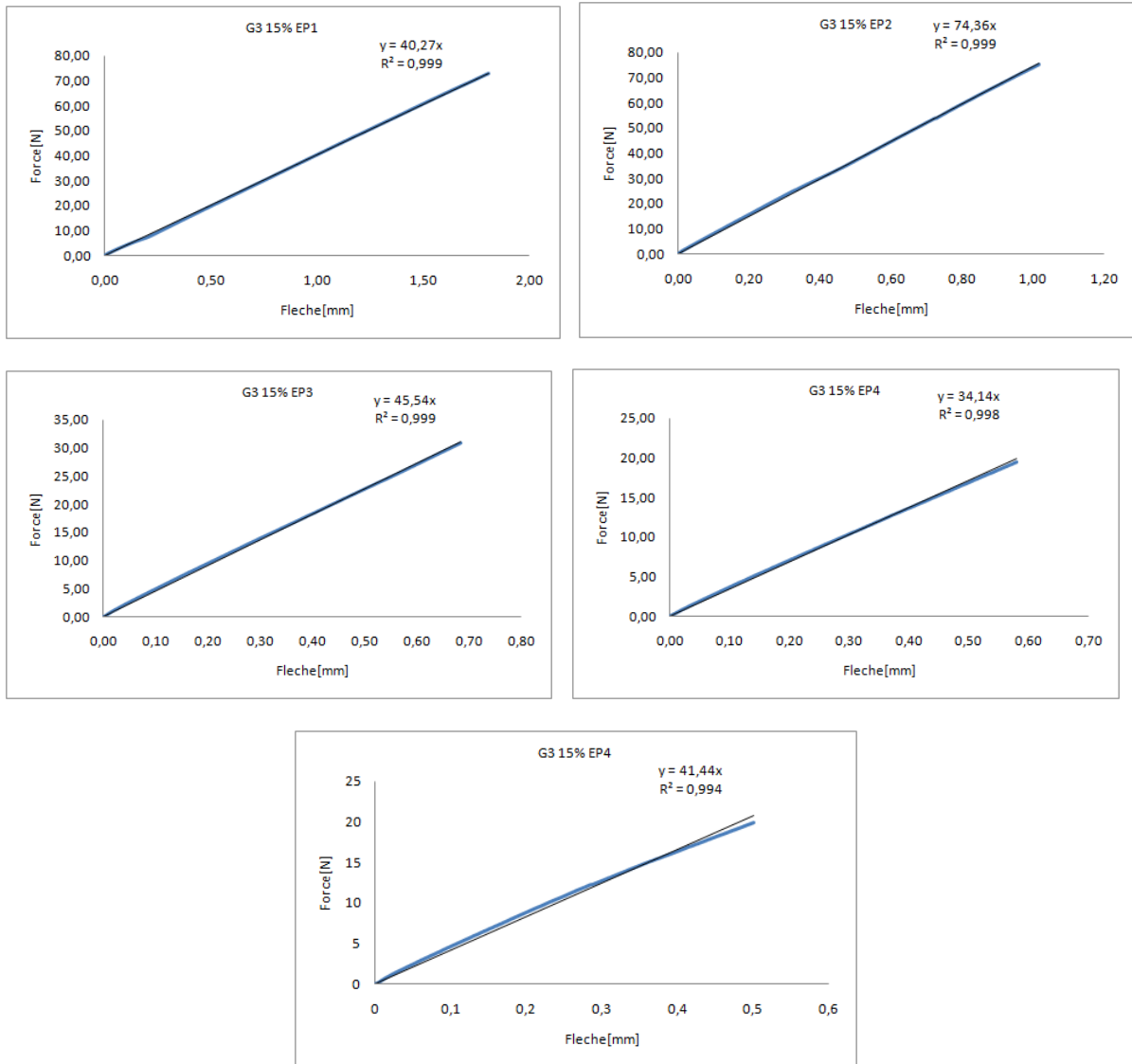


Figure V.12. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée à 15 % de PET G3

V .1.1.13. Courbes force /flèche pour la Résine non traitée chargée à 20 % P.E.T granulométrie G3

Les résultats de l'essai de flexion de la résine non traitée chargée à 20 % de PET G3 sont regroupés dans la figure ci-dessous

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

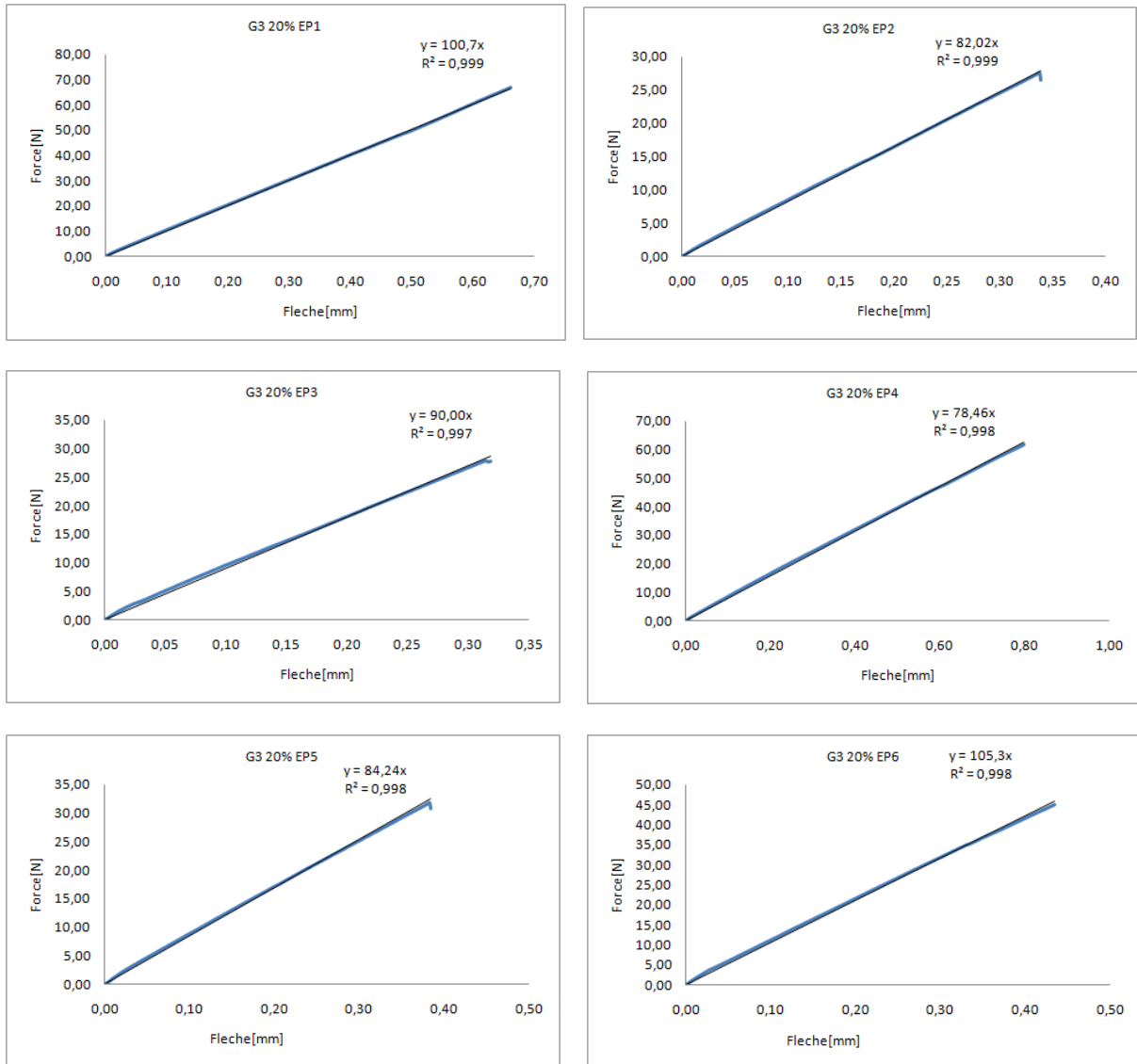


Figure V.13. Courbe Force / flèche pour la résine non traitée chargée à 20 % de PET G3

V.1.2 Présentation des résultats des essais de flexion des matériaux composites traités

Nous présentons ci-dessous les courbes forces flèche pour le deuxième lot de matériau composite qui a subi un traitement thermique de relaxation

V.1.2.1. Courbes force /flèche pour la Résine traitée

Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée non chargée sont regroupés dans la figure ci-dessous

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

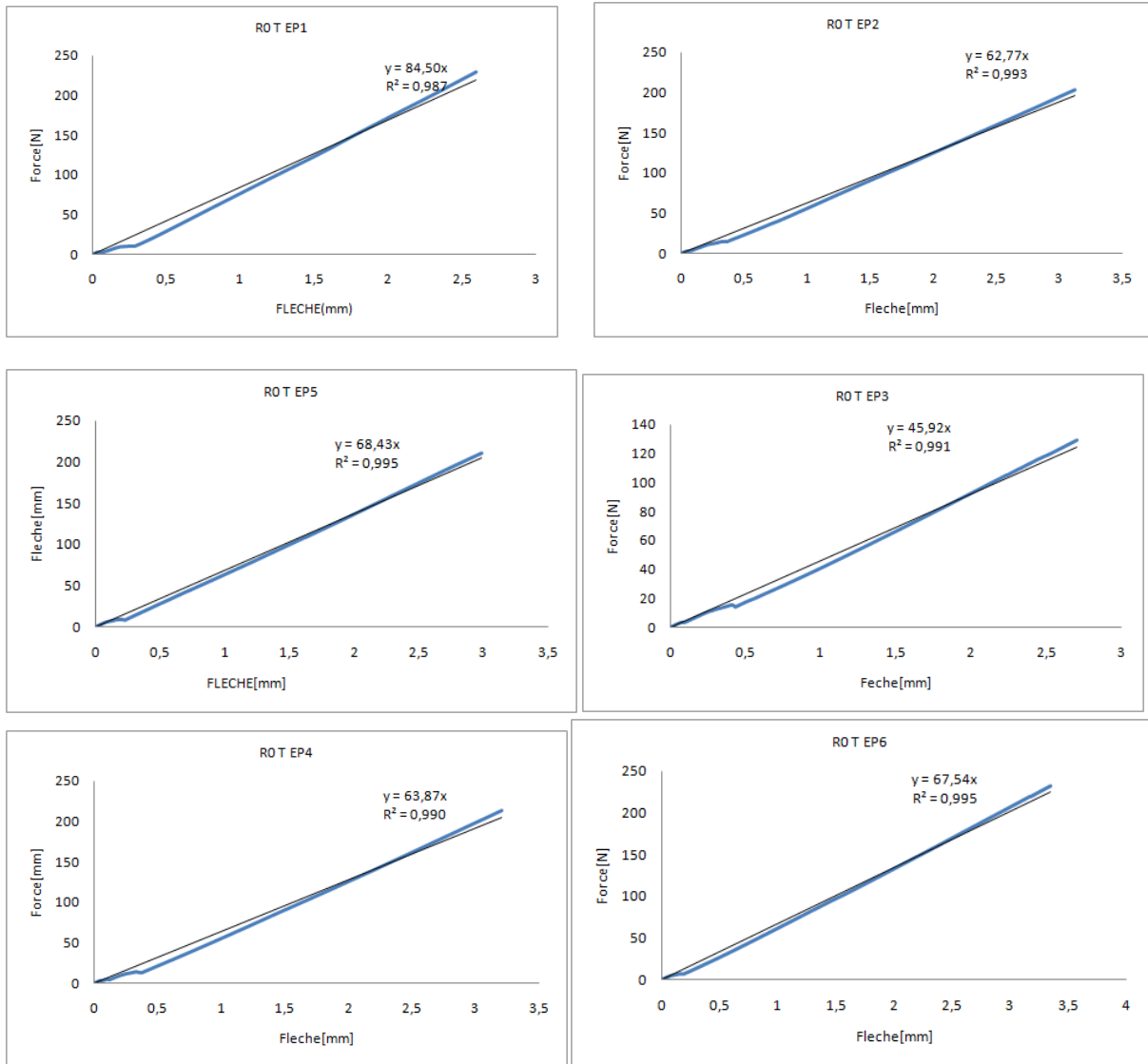
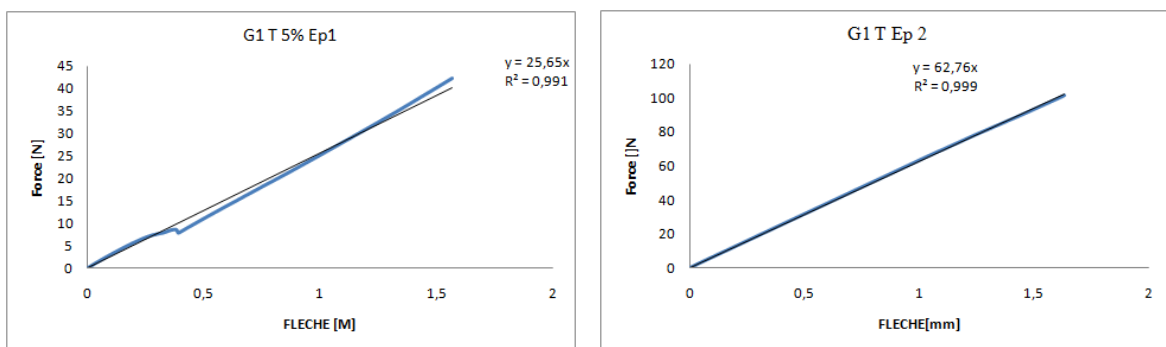


Figure V.14. Courbe Force / flèche pour la résine traitée

V.1.2.2. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 5% PET granulométrie G1
Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 5% de PET granulométrie G1 sont regroupés dans la figure ci-dessous



CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

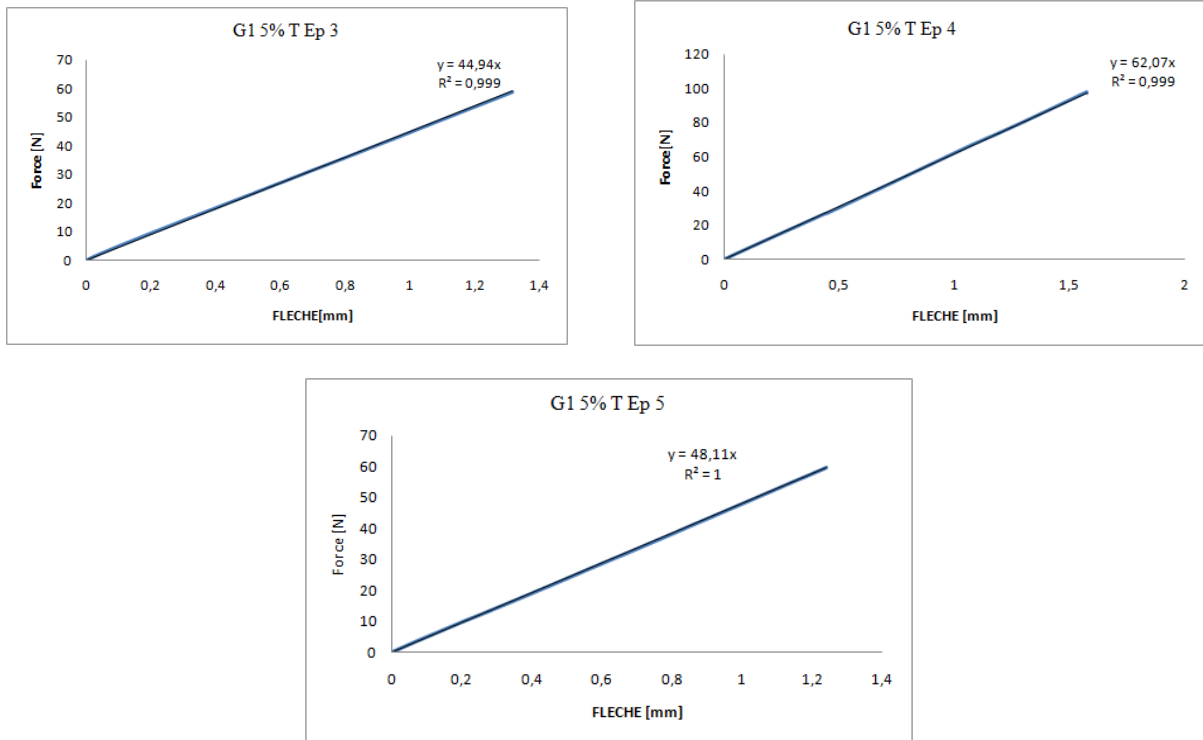
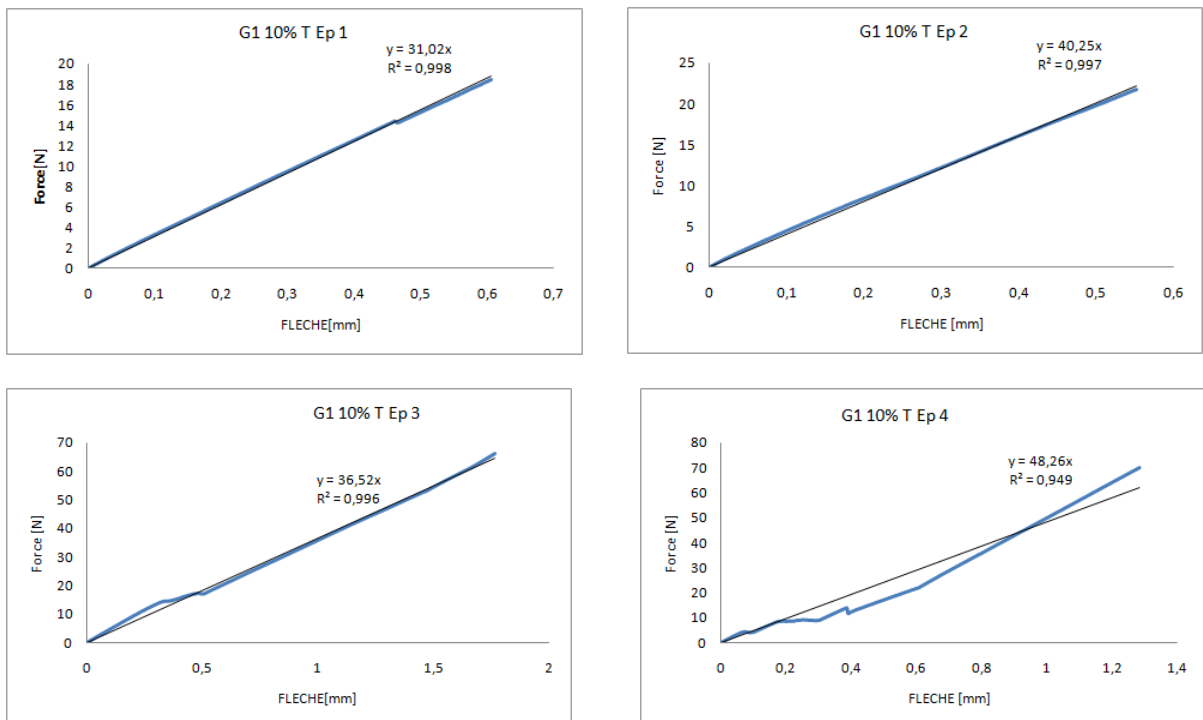


Figure V.15. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 5% PET G1

V.1.2.3. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 10% PET granulométrie G1

Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 10% de PET granulométrie G1 sont regroupés dans la figure ci-dessous



CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

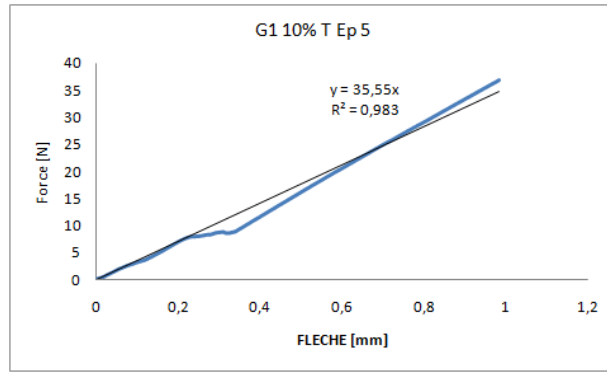


Figure V.16. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 10% PET G1

V.1.2.4. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 15% PET granulométrie G1

Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 10% de PET granulométrie G1 sont regroupés dans la figure ci-dessous

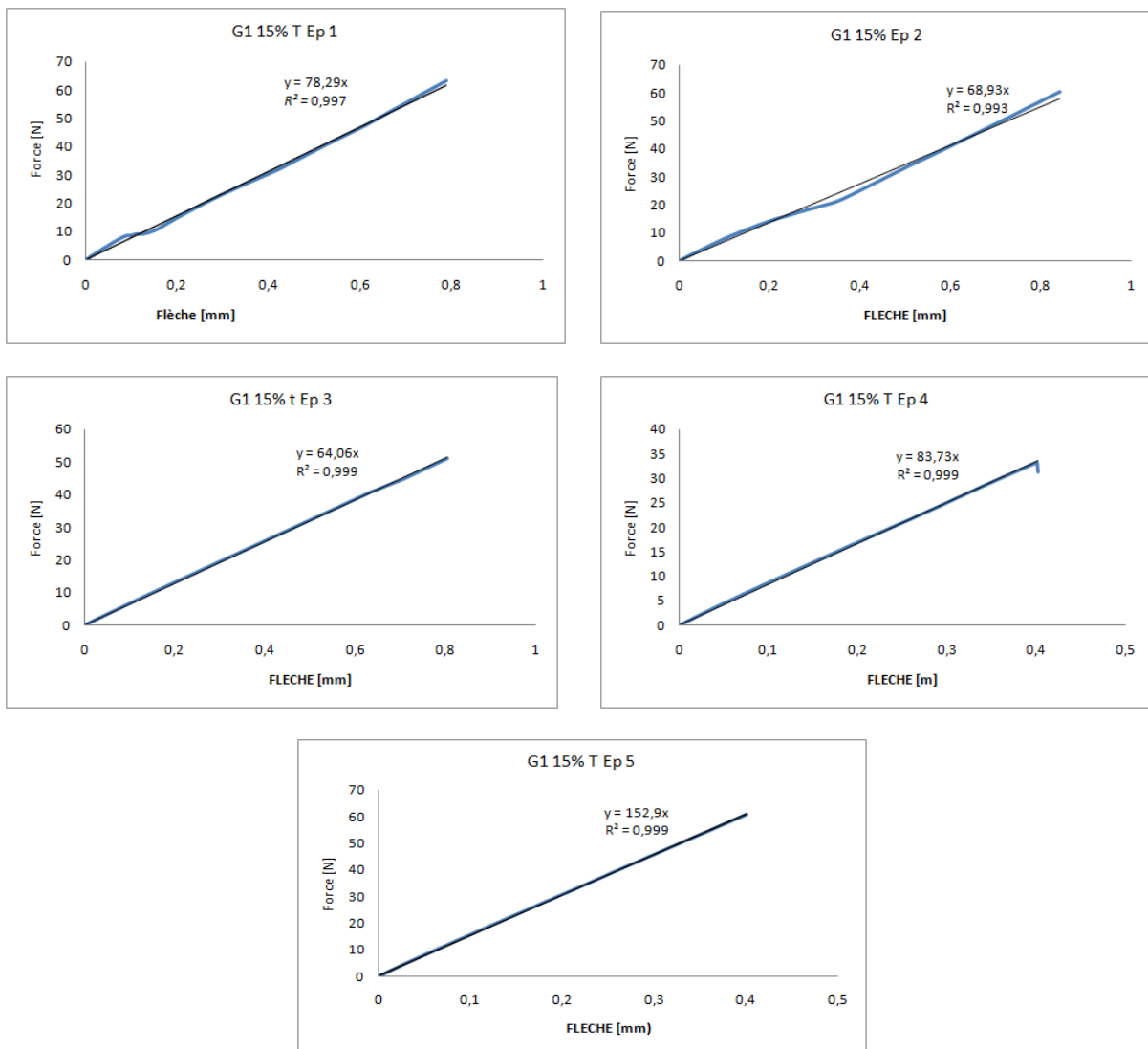


Figure V.17. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 15% PET G1

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1.2.5. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 20% PET granulométrie G1

Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 20% de PET granulométrie G1 sont regroupés dans la figure ci-dessous

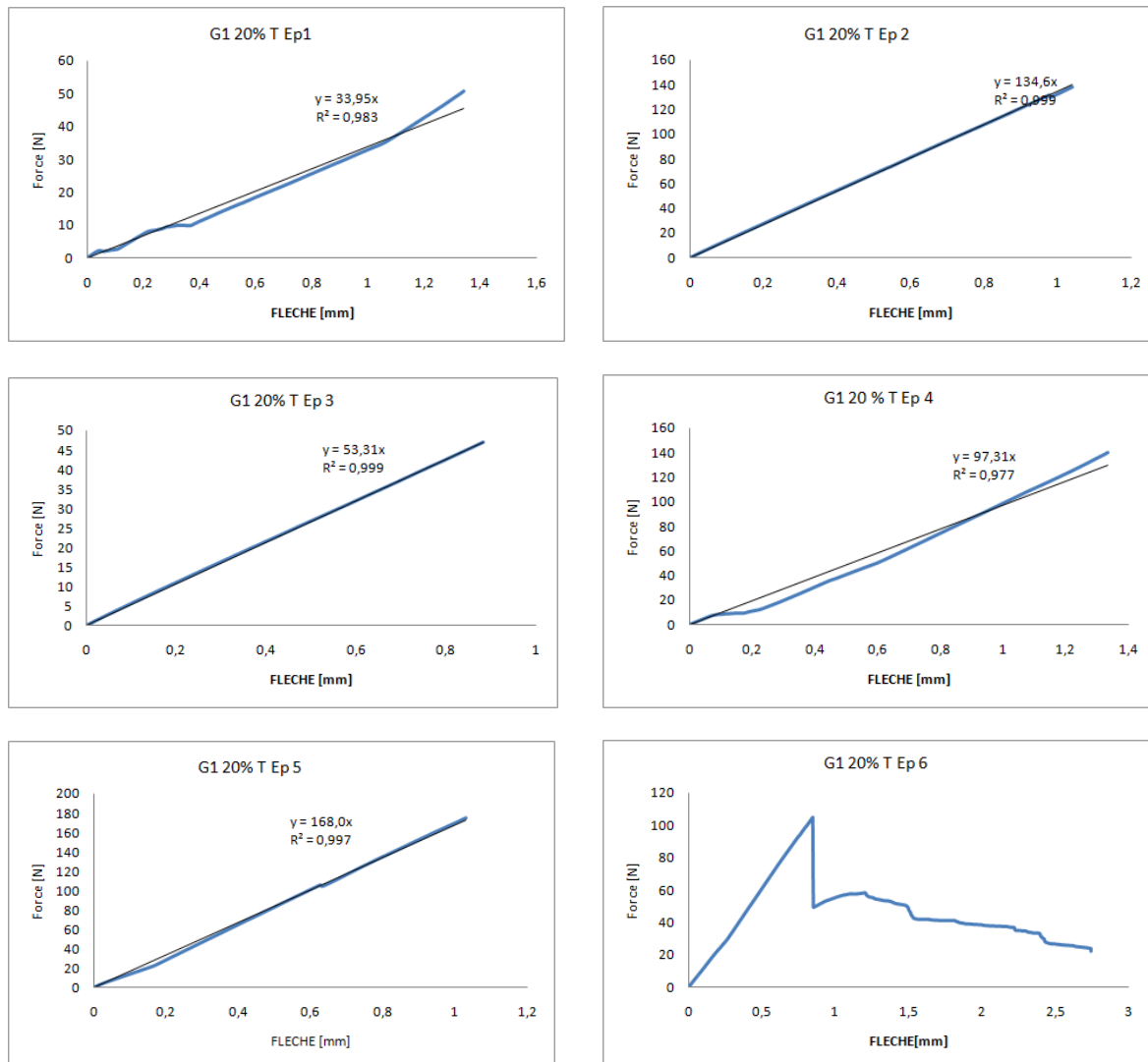


Figure V.18. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 20 % PET G1

V.1.2.6. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 5 % PET granulométrie G2

Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 5% de PET granulométrie G2 sont regroupés dans la figure ci-dessous

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

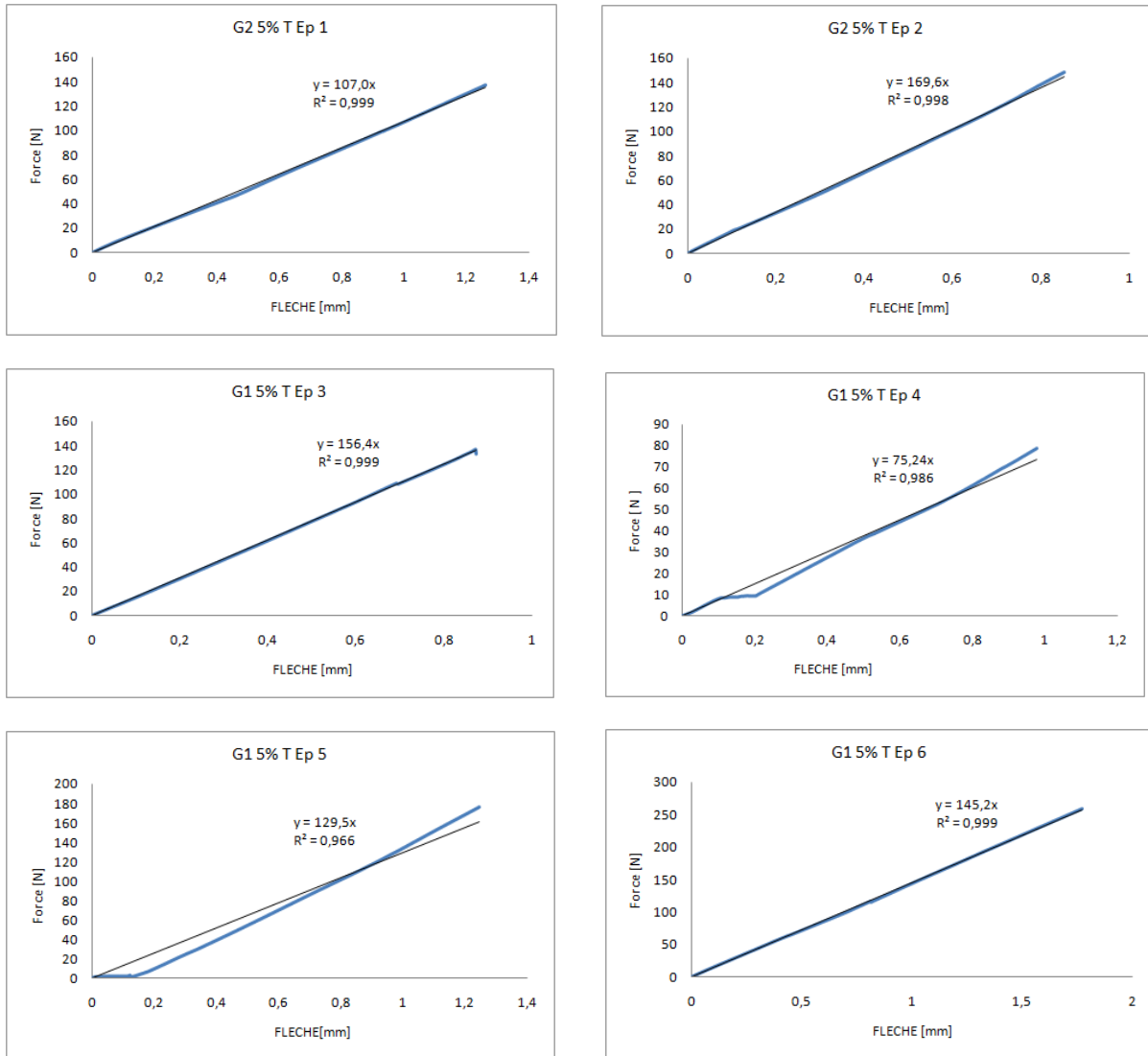
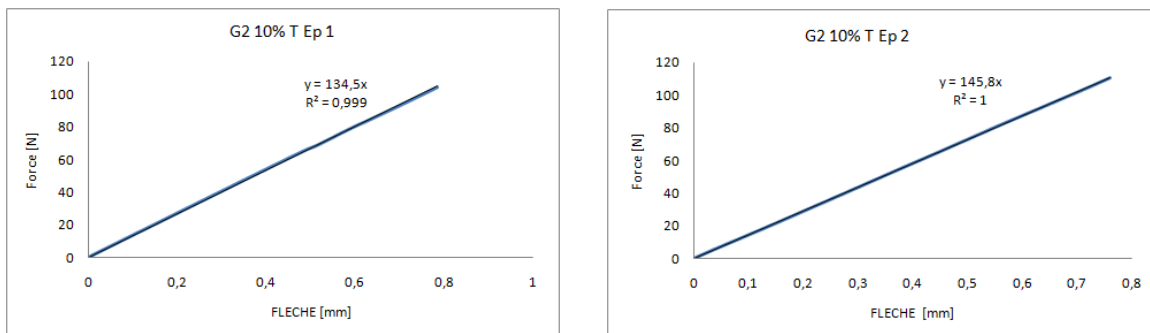


Figure V.19. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 5 % PET G2

V.1.2.7. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 10% PET granulométrie G2
Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 20% de PET granulométrie G1 sont regroupés dans la figure ci-dessous



CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

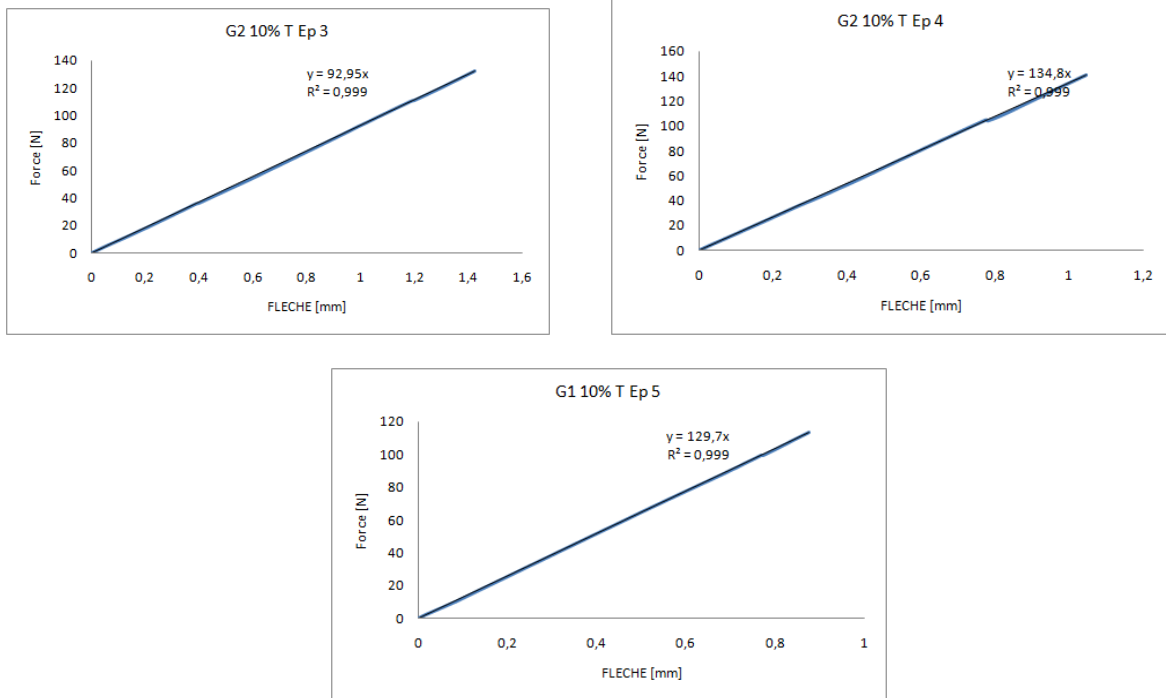
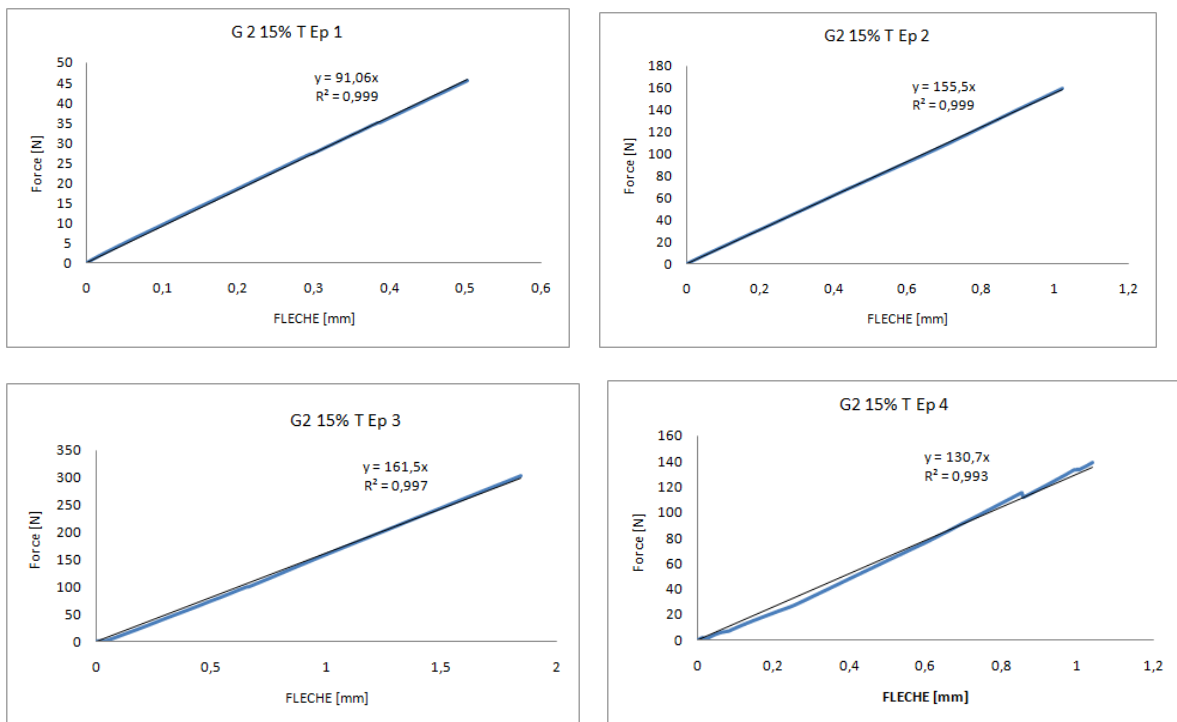


Figure V.20. Courbe Force / flèche pour la résine traitée chargée à 10 % PET G2

V.1.2.8. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 15% PET granulométrie G2
Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 15% de PET granulométrie G2 sont regroupés dans la figure ci-dessous



CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

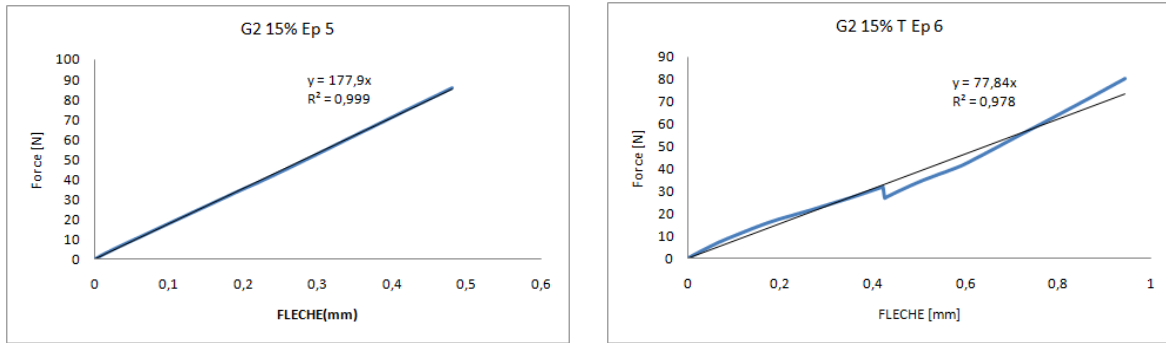


Figure V.21. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 15 % PET G2

V.1.2.9. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 20% PET granulométrie G2
Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 20% de PET granulométrie G2 sont regroupés dans la figure ci-dessous

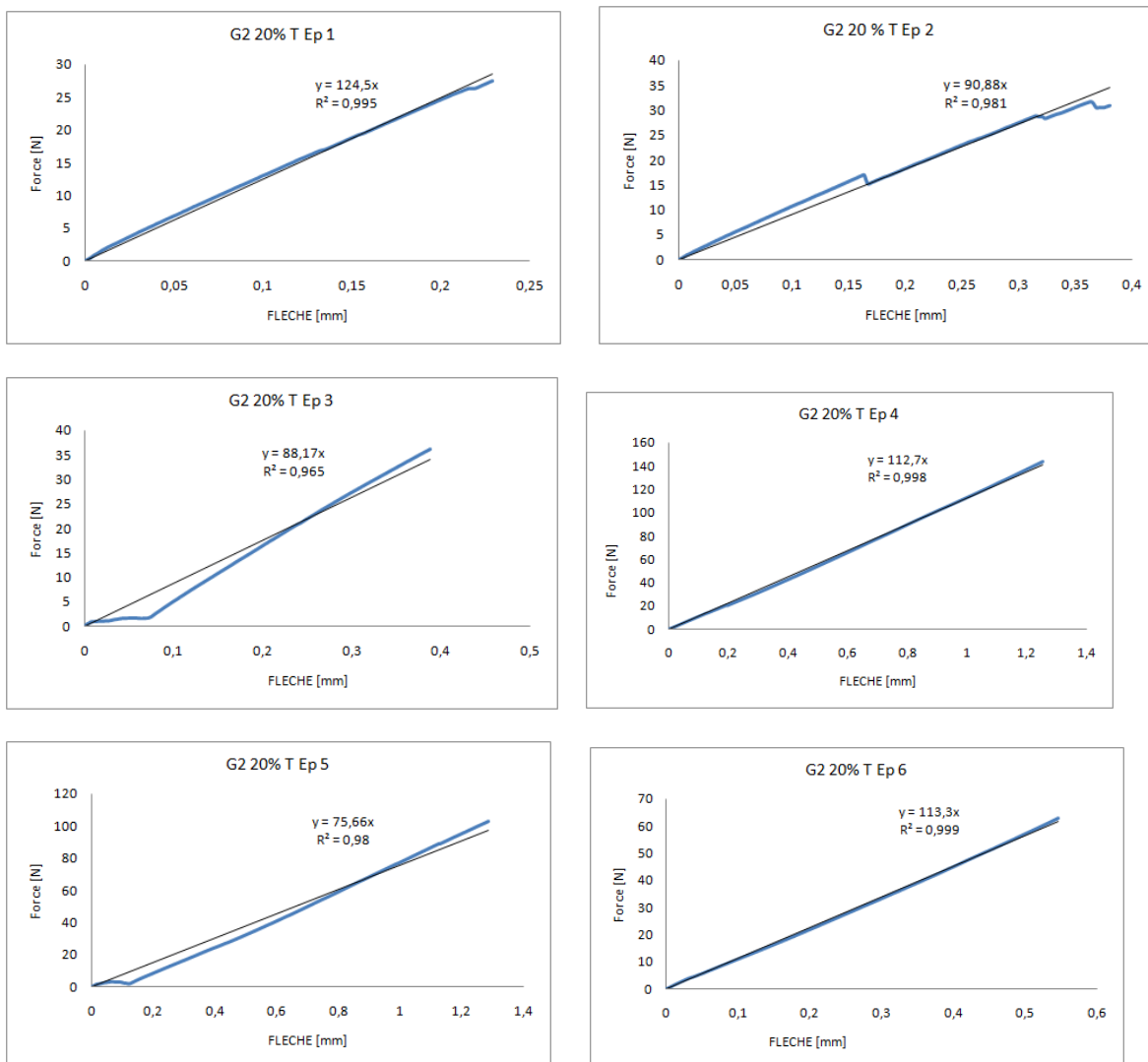


Figure V.22. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 20 % PET G2

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1.2.10. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 5% PET granulométrie G3

Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 5% de PET granulométrie G3 sont regroupés dans la figure ci-dessous

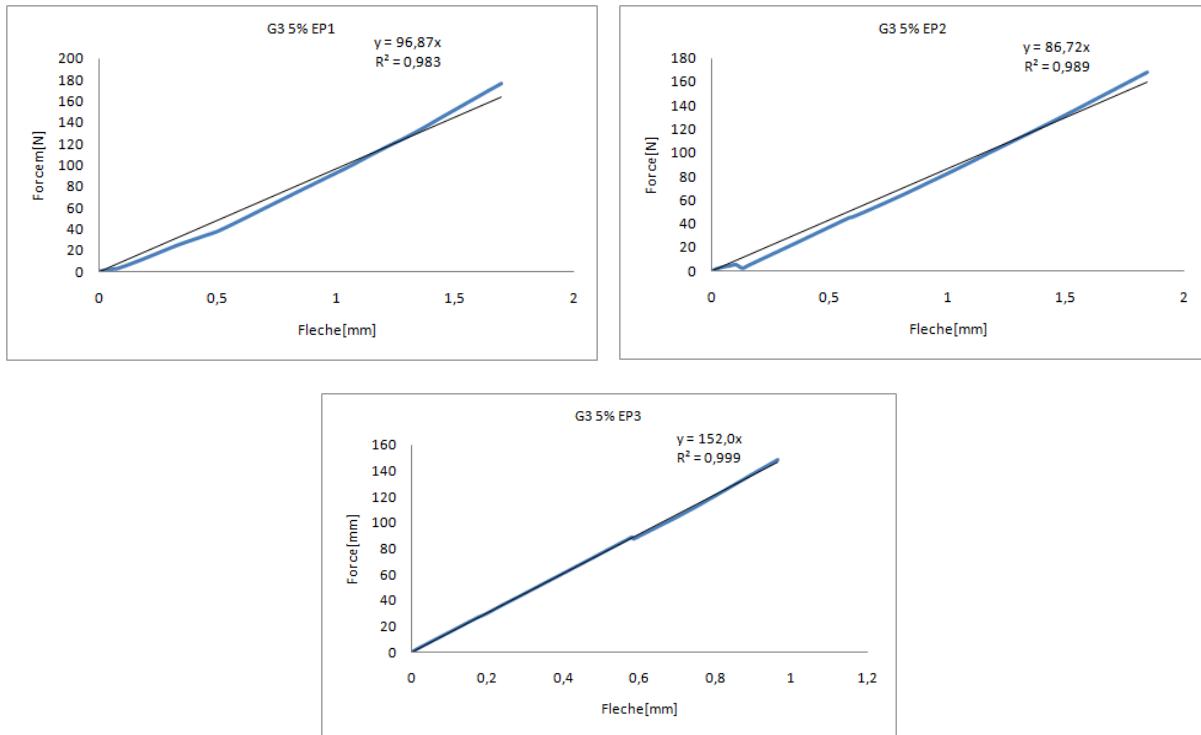
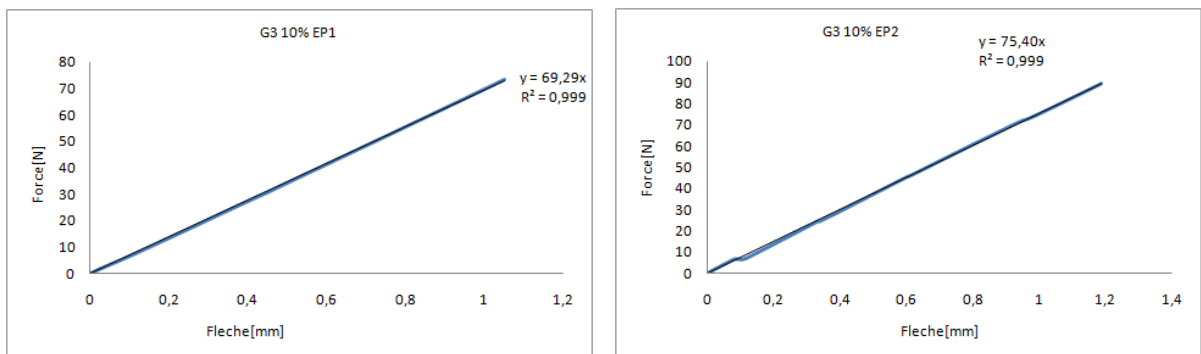


Figure V.23. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 5 % PET G3

V.1.2.11. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 10% PET granulométrie G3

Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 10% de PET granulométrie G3 sont regroupés dans la figure ci-dessous



CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

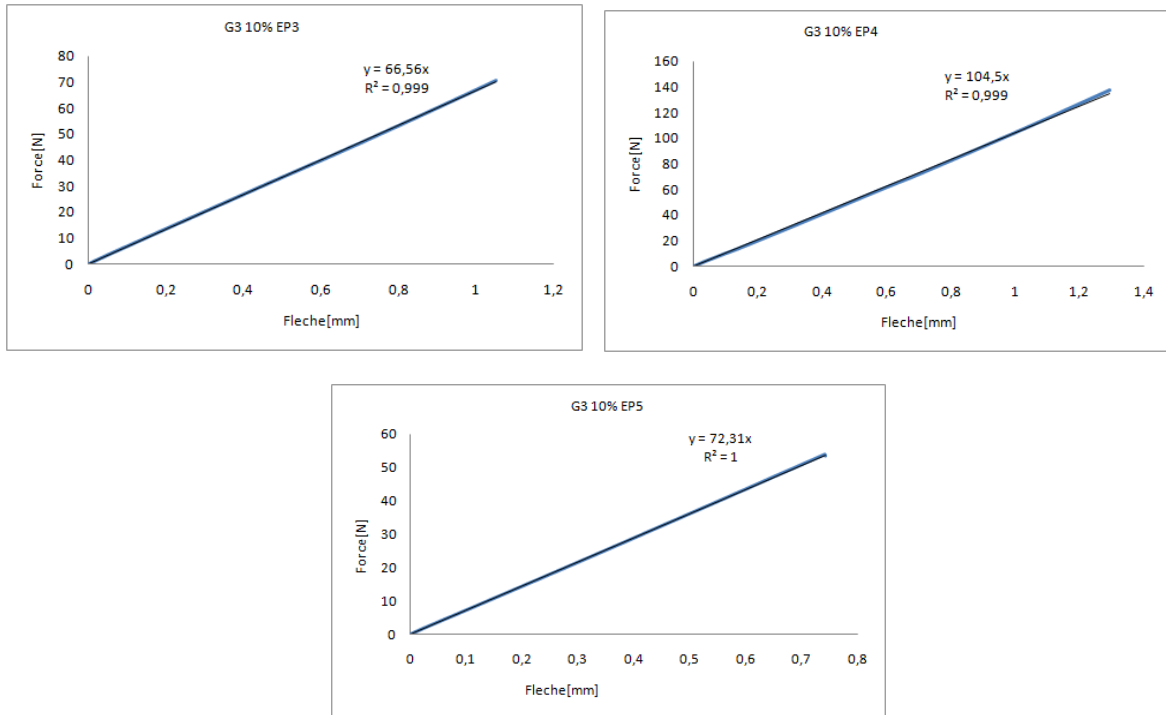


Figure V.24. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 10 % PET G3

V.1.2.12. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 15% PET granulométrie G3

Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 15 % de PET granulométrie G3 sont regroupés dans la figure ci-dessous

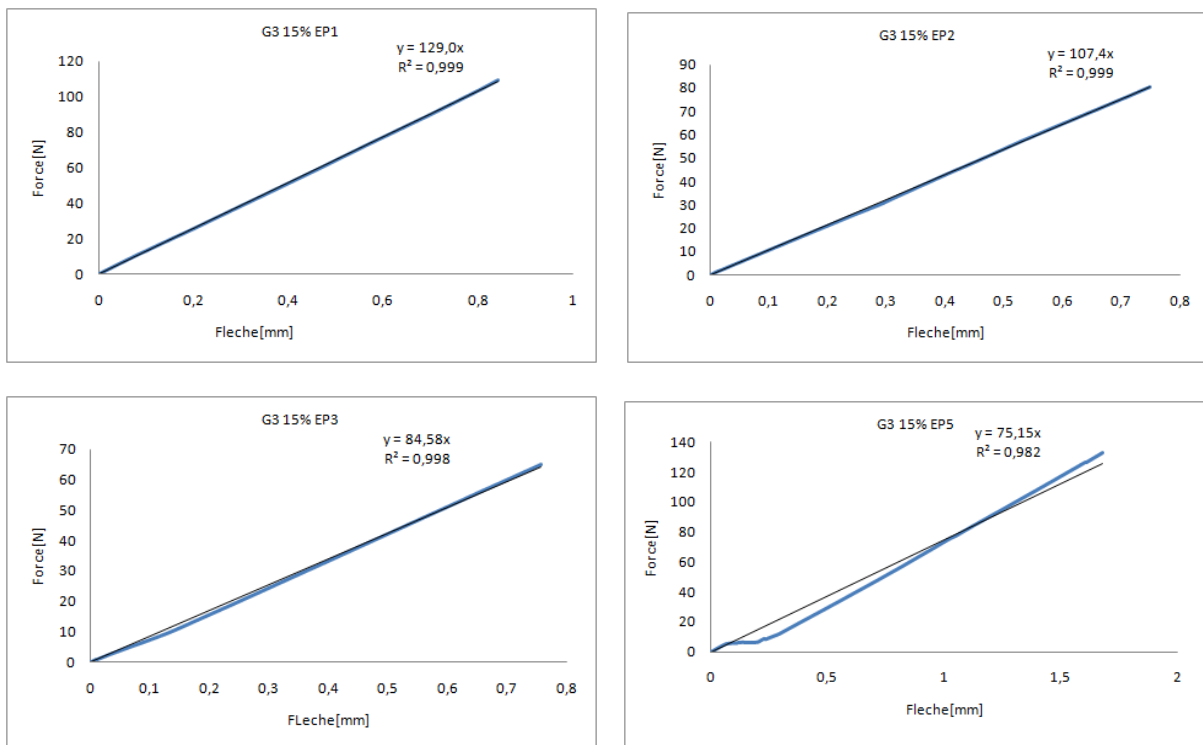


Figure V.25. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 15 % PET G3

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.1.2.13. Courbes force /flèche pour la Résine traitée, chargée à 20% PET granulométrie G3

Les résultats de l'essai de flexion de la résine traitée, chargée à 20% de PET granulométrie G3 sont regroupés dans la figure ci-dessous

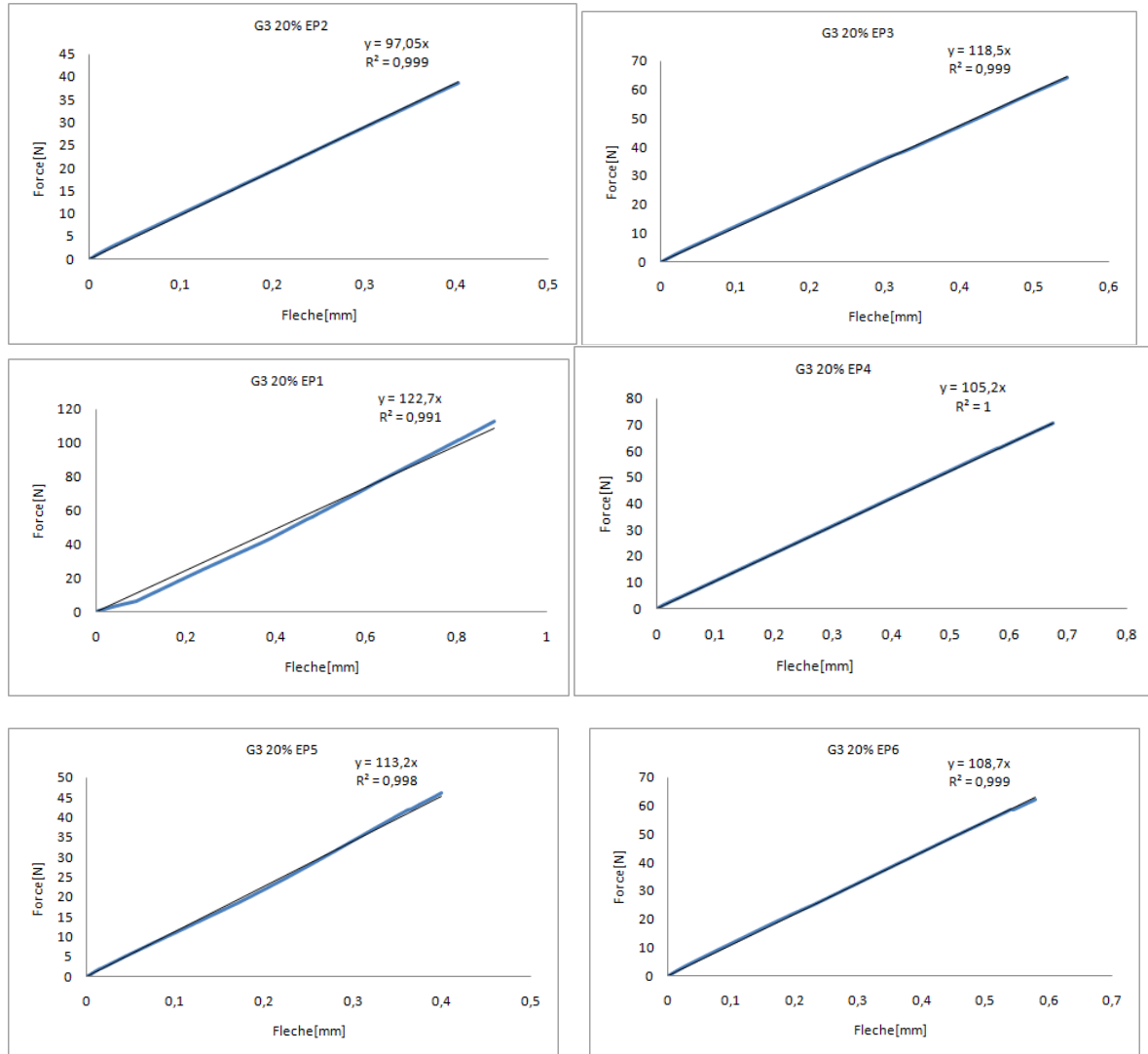


Figure V.26. Courbe Force / flèche pour la résine traité chargée à 20 % PET G3

V.2.Présentation des résultats pour l'essai de résilience

Nous donnons les résultats de l'essai de résilience pour les éprouvettes traitées.

V.2.1. Présentation des résultats de l'essai de résilience pour les matériaux traités

Nous donnons les résultats de résilience pour les échantillons traités dans ce qui suit :

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

V.2.1.1. Résultats de l'essai de résilience pour la résine traitée

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine seule traitée.

Tableau V.1. Valeurs de la résilience de la résine seule traitée

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience [J/Cm2]	Résilience moyenne [J/Cm2]
1	0.280	0.46	0,495
2	0.345	0.57	
3	0.270	0.45	
4	0.300	0.50	

V.2.1.2. Résultats de l'essai de résilience pour la résine traitée chargée à 5% PET G1

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine traitée chargée à 5% PET G1.

Tableau V.2. Valeurs de résilience de la résine seule traitée chargée à 5% PET G1

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
1	0.105	0.17	0,222
2	0.115	0.19	
3	0.120	0.20	
4	0.200	0.33	

V.2.1.3. Résultats de l'essai de résilience pour la résine traitée chargée à 10 % PET G1

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 10% PET G1

Tableau V.3. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 10% PET G1

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
3	0.200	0.33	0,26
4	0.180	0.30	
5	0.095	0.15	

V.2.1.4. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 15% PET G1

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 15 % PET G1

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau V.4. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 15% PET G1

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
1	0.285	0.47	0,33
2	0.185	0.30	
3	0.165	0.27	
4	0.170	0.28	

V.2.1.5. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 20% PET G1

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 20 % PET G1

Tableau V.5. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 20 % PET G1

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
1	0.195	0.32	0,32
2	0.170	0.28	
3	0.185	0.30	
4	0.235	0.39	

V.2.1.6. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 5% PET G2

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 5 % PET G2

Tableau V.6. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 5% PET G2

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
1	0.080	0.13	0,172
4	0.130	0.21	
5	0.095	0.15	
6	0.120	0.20	

V.2.1.7. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 10 % PET G2

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 10 % PET G2

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau V.7. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 10% PET G2

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
1	0.065	0.10	0,135
2	0.095	0.15	
4	0.100	0.16	
5	0.080	0.13	

V.2.1.8. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 15 % PET G2

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 15 % PET G2

Tableau V.8. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 15% PET G2

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
1	0.200	0.33	0.255
2	0.140	0.23	
3	0.160	0.26	
4	0.125	0.20	

V.2.1.9. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 20 % PET G2

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 20 % PET G2

Tableau V.9. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 20% PET G2

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
1	0.160	0.26	0,277
2	0.160	0.26	
3	0.160	0.26	
4	0.200	0.33	

V.2.1.10. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 5 % PET G3

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 5 % PET G3

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau V.10. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 5% PET G3

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
1	0.105	0.17	0,19
2	0.125	0.20	
3	0.125	0.20	

V.2.1.11. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 10 % PET G3

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 10 % PET G3

Tableau V.11. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 10% PET G3

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
1	0.080	0.13	0,145
2	0.075	0.12	
3	0.100	0.16	
5	0.105	0.17	

V.2.1.12. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 15 % PET G3

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 15 % PET G3

Tableau V.12. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 15% PET G3

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
3	0.150	0.25	0,197
4	0.100	0.16	
5	0.110	0.18	
6	0.120	0.20	

V.2.1.13. Résultats de l'essai de résilience pour la résine non traitée chargée à 20 % PET G3

Nous regroupons dans le tableau ci-dessous les résultats obtenus pour l'essai de résilience de la résine non traitée chargée à 20 % PET G3

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau V.13. Valeurs de résilience de la résine seule non traitée chargée à 20% PET G3

Eprouvettes	Energie [J]	Résilience J/Cm2	Résilience moyenne [J/Cm2]
3	0.150	0.250	0,24
4	0.155	0.258	
5	0.150	0.250	
6	0.125	0.20	

V.2 Discussion des résultats

Les résultats ainsi obtenus pour l'essai de flexion et l'essai de résilience sont commentés dans ce qui suit.

V.2.1. Discussion des résultats de l'essai de flexion

Selon les courbes obtenues pour nos matériaux lors des essais de flexion trois points (voir figure V.1.- figure V.26), nous avons constaté que le comportement des matériaux ainsi élaborés est un comportement fragile.

Le mode rupture de toutes les éprouvettes de résine seule est une rupture totale, (figure V. 27 a)), pour le composite chargé, nous trouvons des éprouvettes ayant une rupture totale et des éprouvettes non totalement rompues (figure V. 27 b)) .

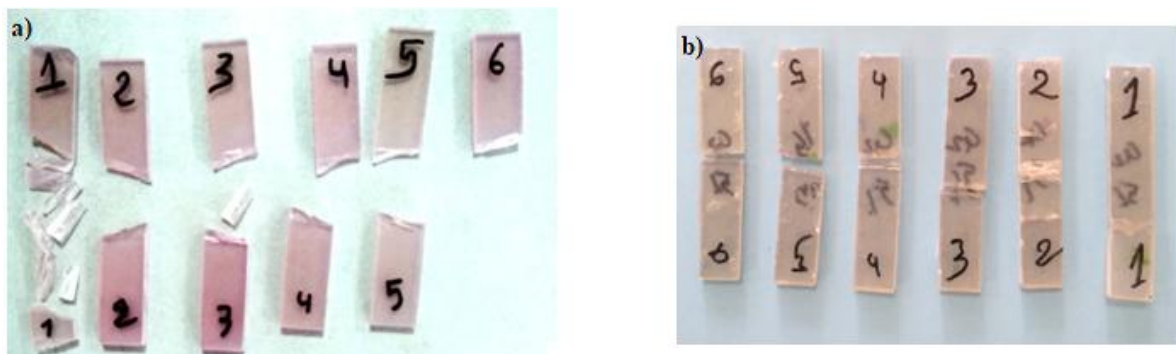


Figure V.27. Photo des éprouvettes rompues en flexion

a) Résine seule, b) Composite 5% PET

V.2.1 .1. Discussion des résultats de l'essai de flexion pour la résine seule

La figure V.28 représente la superposition des courbes force / flèche des éprouvettes sollicitées en flexion trois points, pour la résine non traitée (figure V.28 a), et pour la résine traitée (figure V.28 b).

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

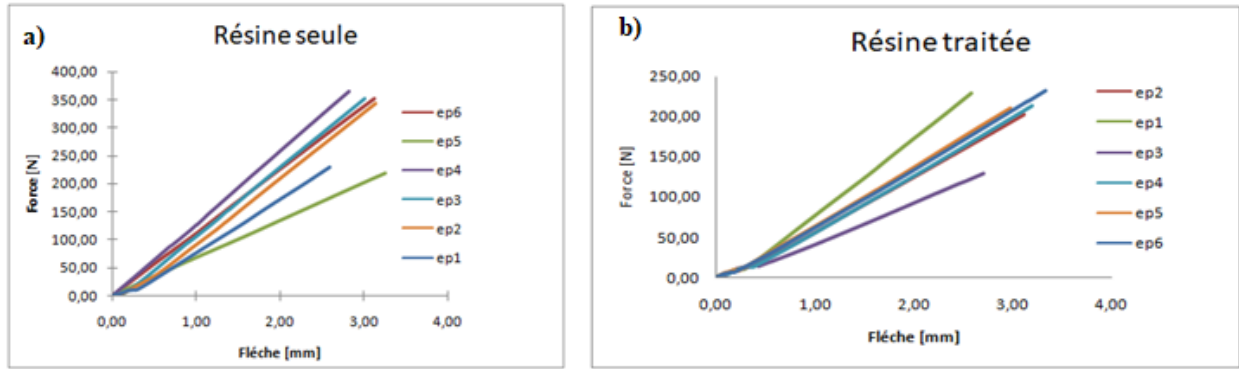


Figure V.28. Superposition des courbes Force / flèche pour la résine seule

a) Résine non traitée, b) Résine traitée

Le traitement thermique, est un traitement de relaxation des contraintes, ces dernière sont du à l'usinage.

Toutes les éprouvettes ainsi testées présentent un comportement fragile dans les deux cas non traitées et traitées.

- **Influence du traitement thermique sur la résine seule**

A partir des courbes forces /flèche données ci-dessus (figure V.1.- figure V.26), nous tirons les caractéristiques mécaniques moyennes, représentées dans le tableau V. 13.

Ces caractéristiques sont:

- La contrainte à la rupture σ_R ;
- Le module d'élasticité apparent E_{app} ;
- La déformation à la rupture ϵ_R .

Tableau V.13 Valeurs moyennes des caractéristiques mécanique de la résine seule

	Force max [N]	Fleche [mm]	σ_R [MPa]	ϵ_R	E_{app} [MPa]
R ₀ (non traitée)	344,40	3,80	84,81	0,49	2919,34
R ₀ T (traitée)	202,69	2,98	68,29	0,42	3119,23

A partir des résultats du tableau V. 13, nous traçons les histogrammes ci-dessous :

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

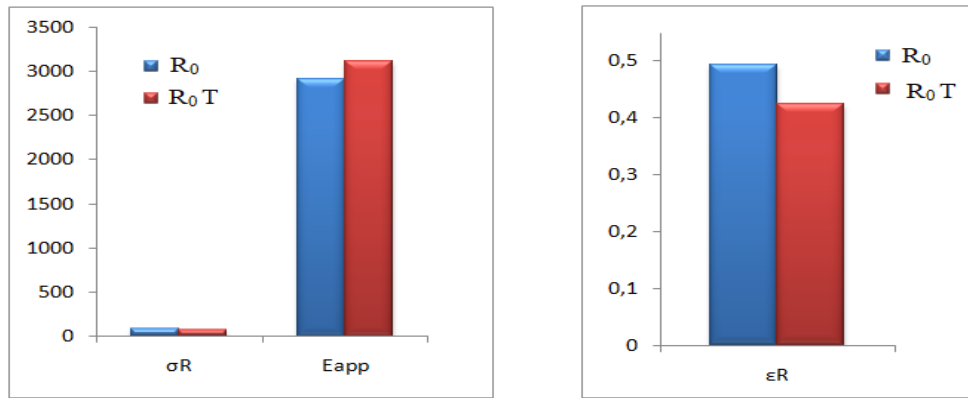


Figure V.29. Représentation comparative des caractéristiques mécaniques de la résine seule.

Nous avons constaté, à partir de la figure V. 28, que le traitement thermique a influencé négativement la contrainte à la rupture σ_R et la déformation ϵ_R , le module apparent E_{app} a été amélioré.

V.2.1 .2. Discussion des résultats de l'essai de flexion pour la résine chargée.

Dans cette partie nous allons étudier l'évolution des propriétés mécaniques en fonction du taux de charge en PET (5%, 10%, 15% et 20%), en tenant compte de l'effet de la granulométrie ($G1 > 5\text{mm}$, $2,5\text{mm} < G2 < 5\text{mm}$ et $G3 < 2,5\text{mm}$).

a) Matériau composite chargé en PET granulométrie G1

Les tableaux V.14 et V.15 regroupent les caractéristiques mécaniques des composites chargés en PET granulométrie G1, dans le cas non traité et traité.

Tableau V.14 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G1 non traité

Non traité G1	Force max [N]	Fleche [mm]	σ_R [MPa]	ϵ_R	E app [MPa]
5%	106,08	1,83	31,37	0,43	2365,08
10%	97,29	1,093	20,26	0,51	2250,45
15%	52,07	1,21	15,89	0,42	1947,08
20%	68,89	1,06	18,07	0,47	2206,01

Tableau V.15 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G1 traité

Traité G1	Force max [N]	Fleche [mm]	σ_R [MPa]	ϵ_R	E app [MPa]
5%	72,06	1,46	28,33	0,37	3094,3
10%	42,74	1,04	13,32	0,42	1758,528
15%	62,44	0,73	15,98	0,47	2962,47
20%	109,29	1,08	22,60	0,50	2455,83

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

A partir des deux tableaux ci-dessus, nous traçons les histogrammes de la contrainte à la rupture, du module apparent et de la déformation figure V.29.

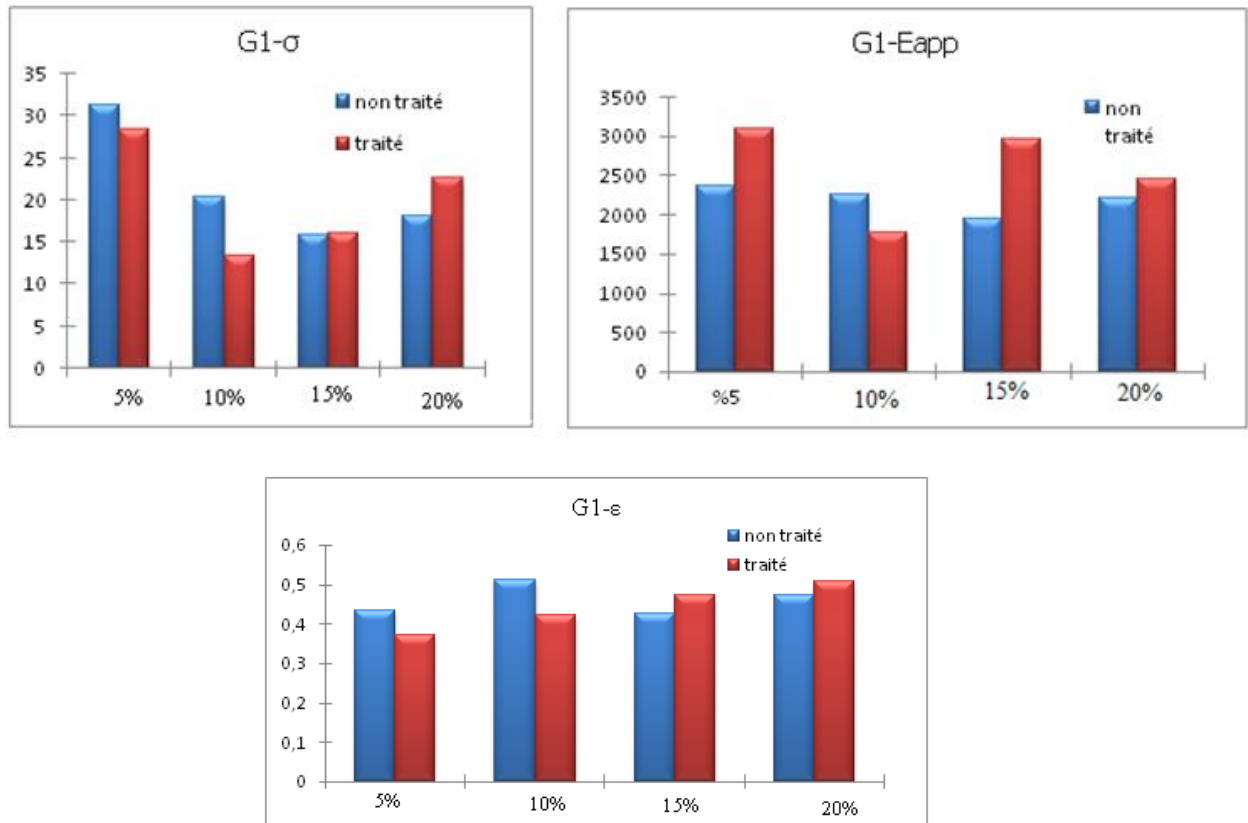


Figure V.30. Représentation comparative des caractéristiques mécaniques de M.C.G1.

D'après la figure V.29, nous constatons que les propriétés mécaniques sont influencées par le taux de charge et le traitement thermique.

En observant la figure V.30, la variation des caractéristiques mécaniques en fonction du taux de charge, nous constatons :

- La contrainte à la rupture dans les deux cas traité et non traité ne varie presque pas (légère variation), c'est la résine polyester qui supporte l'effort, la variation du taux de charge n'a pas d'incidence sur la contrainte à la rupture.
- Le module apparent varie en fonction du taux de charge en PET dans les deux cas. Il atteint sa valeur minimale à 15% pour le cas non traité et à 10% pour le cas traité.
- Pour la déformation, une variation croissante avec l'augmentation du taux de charge dans le cas traité, par contre la variation n'est pas constante dans le cas non traité.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

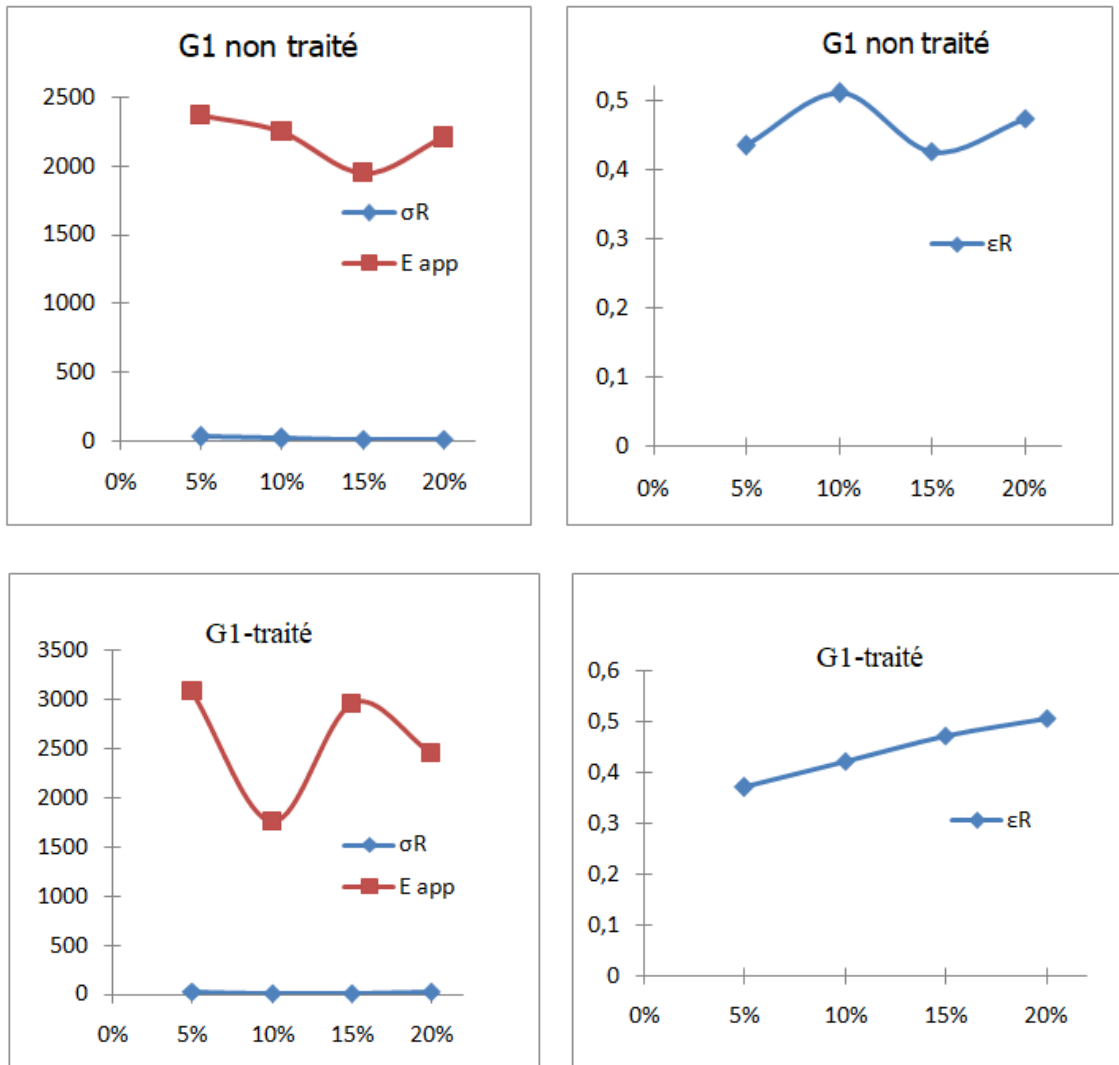


Figure V.31. Variation des caractéristiques mécaniques en fonction du taux de charge

M.C.G1.

b) Matériau composite chargé en PET granulométrie G2

Les tableaux V.16 et V.17 regroupent les caractéristiques mécaniques des composites chargés en PET granulométrie G2, dans le cas non traité et traité.

Tableau V.16 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G2non traité

Non traité-G2	Force max [N]	Fleche [mm]	σ_R [MPa]	ϵ_R	E app [MPa]
5%	133,49	1,41	29,157	0,52	2393,14
10%	59,86	0,99	16,41	0,45	2244,26
15%	72,42	1,01	17,21	0,47	2326,25
20%	71,68	0,74	12,75	0,56	1745,22

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau V.17 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G2traité

Traité G2	Force max [N]	Fleche [mm]	σ_R [MPa]	ϵ_R	E app [MPa]
5%	156,05	1,16	33,11	0,53	3128,45
10%	120,69	0,97	27,92	0,49	3626,35
15%	135,58	0,97	27,56	0,52	3103,87
20%	68,43	0,68	12,27	0,57	1865,73

A partir des deux tableaux ci-dessus, nous traçons les histogrammes de la contrainte à la rupture, du module apparent et de la déformation (figure V31).

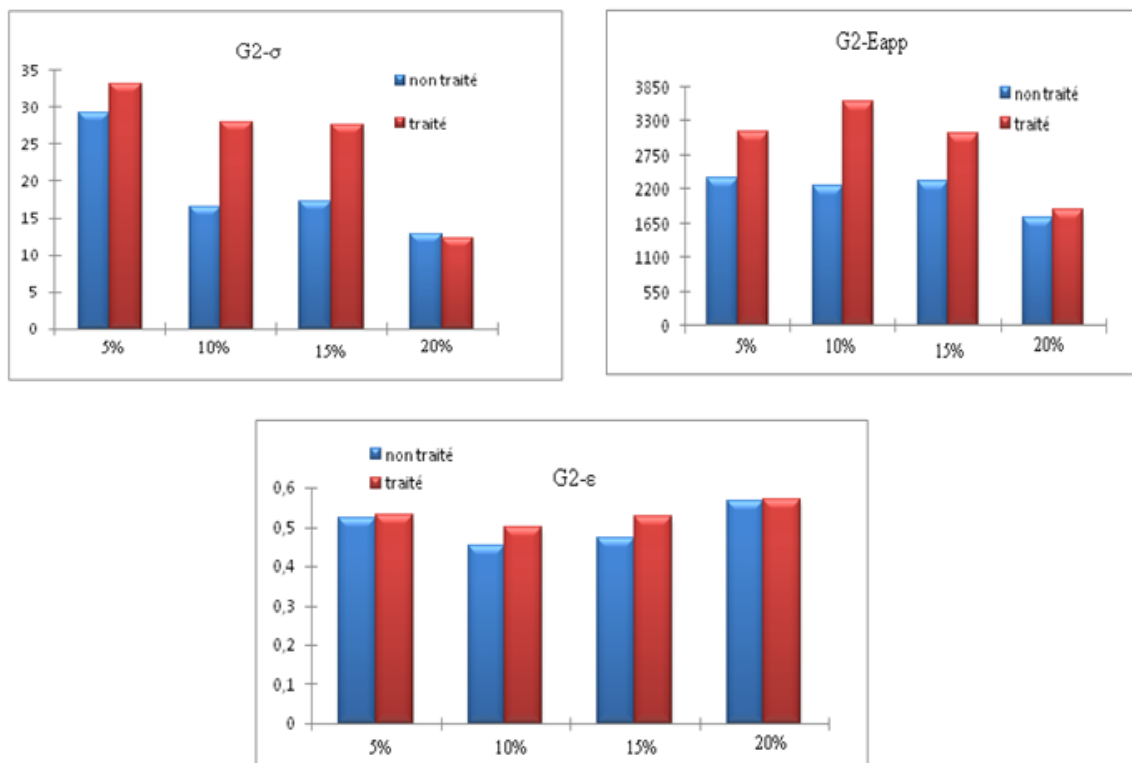


Figure V.33. Représentation comparative des caractéristiques mécanique de M.C.G2.

D'après la figure V.31, nous constatons que, pour chaque taux de charge, les propriétés mécaniques sont améliorées par le traitement thermique.

En observant la figure V.32, la variation des caractéristiques mécanique en fonction du taux de charge, nous constatons :

- La contrainte à la rupture a la même variation que dans les cas G1 (pas d'influence).
- Le module apparent varie en fonction du taux de charge en PET. Il diminue avec l'augmentation du taux de charge pour les deux cas.
- Pour la déformation, une augmentation à partir de 10% est observée dans les deux cas.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

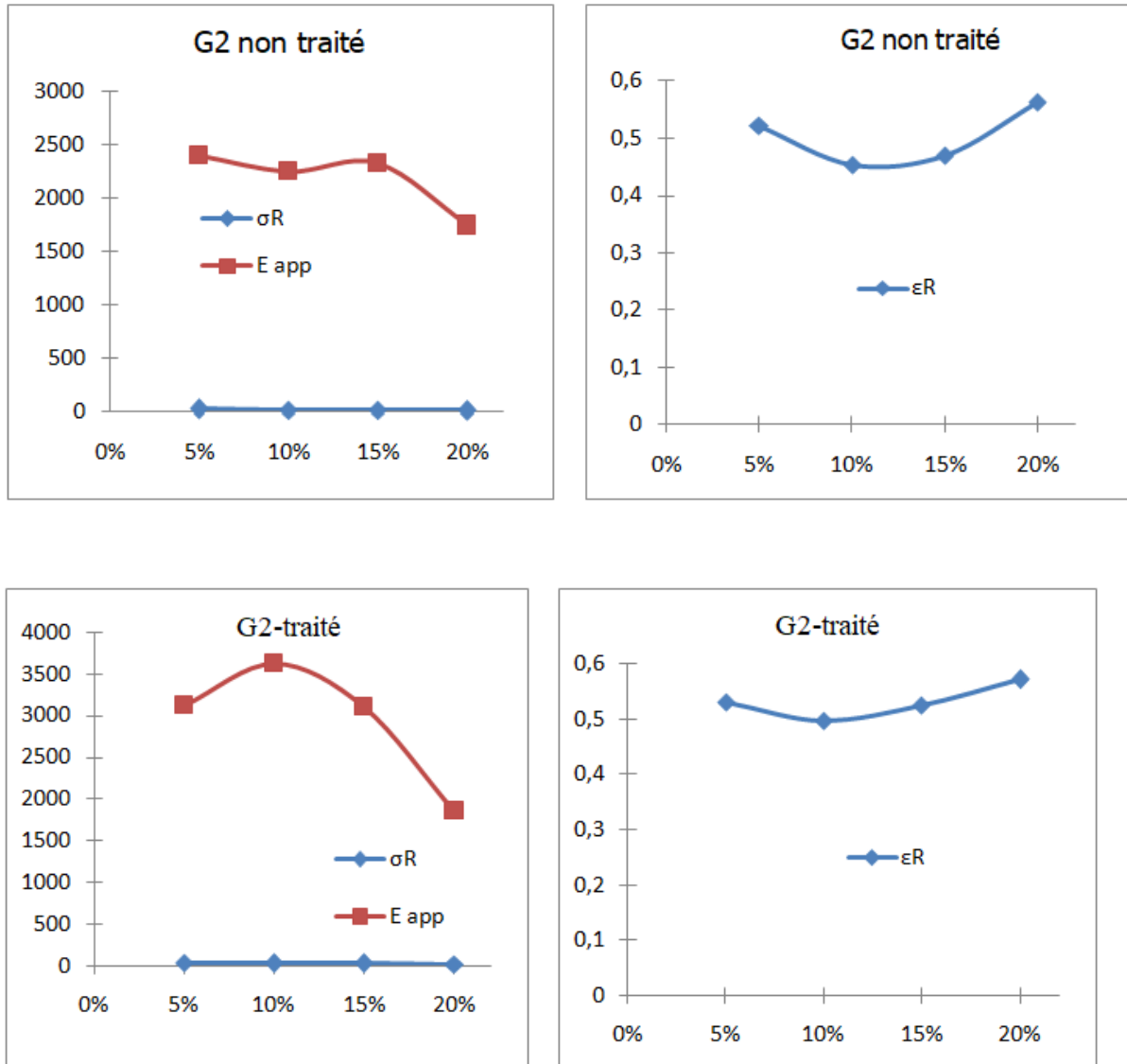


Figure V.34. Variation des caractéristiques mécanique en fonction du taux de charge du composite M.C.G2.

c) Matériau composite chargé en PET granulométrie G3

Les tableaux V.18 et V.19 regroupent les caractéristiques mécaniques des composites chargés en PET granulométrie G3, dans le cas non traité et traité.

Tableau V.18 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G3 non traité

Non traité G3	Force max [N]	Fleche [mm]	σ_R [MPa]	ϵ_R	E_{app} [MPa]
5%	89,61	1,41	25,69	0,46	2386,47
10%	76,63	1,42	24,59	0,42	2444,40
15%	43,68	0,92	13,95	0,42	2157,24
20%	43,46	0,49	10,60	0,47	2796,51

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

Tableau V.19 Valeurs moyennes des caractéristiques mécaniques M.C.G3 traité

traité G3	Force max [N]	Fleche [mm]	σ_R [MPa]	ε_R	E app [MPa]
5%	164,32	1,49	38,78	0,50	3003,14
10%	84,32	1,06	27,19	0,42	3543,13
15%	96,93	1	24,87	0,49	3008,95
20%	68,21	0,60	17,34	0,47	3523,08

A partir des deux tableaux ci-dessus, nous traçons les histogrammes de la contrainte à la rupture, du module apparent et de la déformation (figure V33),

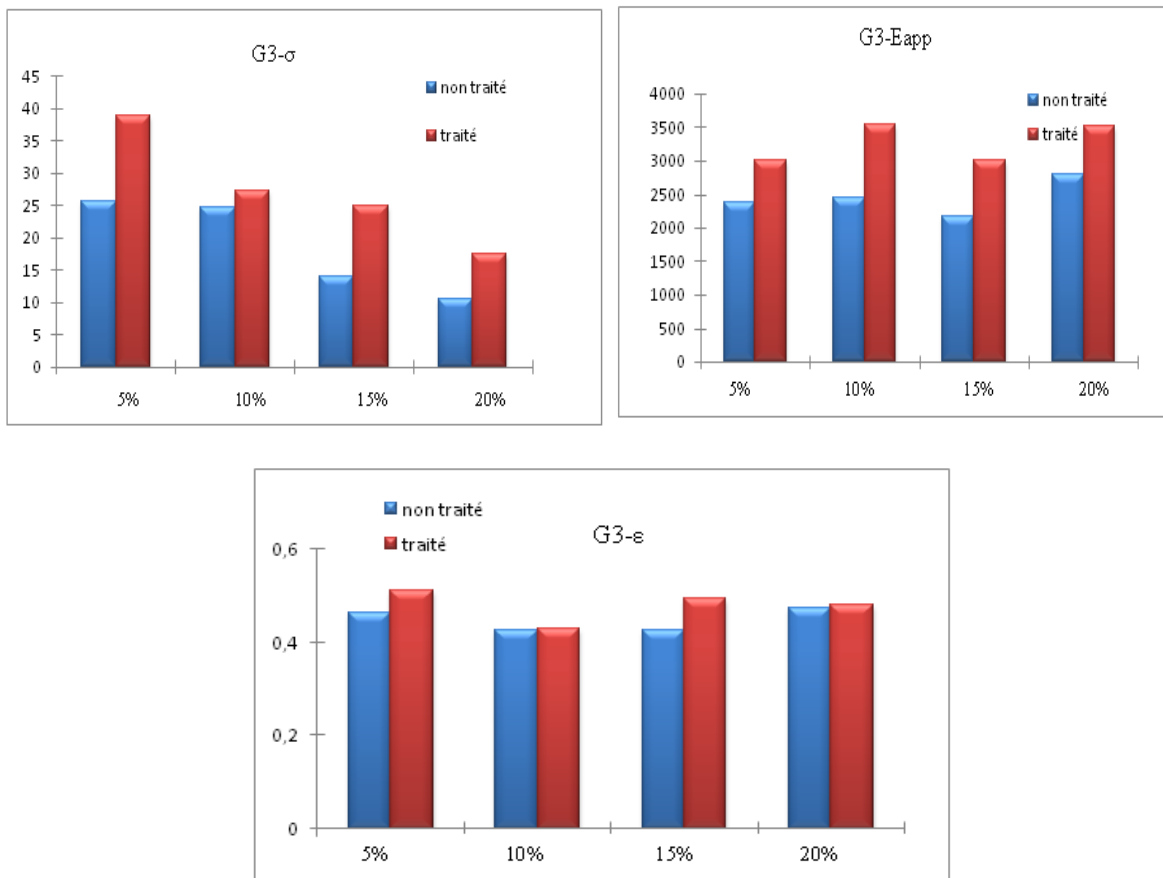


Figure V.35. Représentation comparative des caractéristiques mécanique de M.C.G3.

D'après la figure V.33, nous constatons que les propriétés mécaniques sont améliorées par le traitement thermique.

En observant la figure V.34, la variation des caractéristiques mécanique en fonction du taux de charge, nous constatons :

- La contrainte à la rupture a la même variation que dans les cas G1 et G2.
- A 15% de charge une chute significative du module apparent a été observée dans les deux cas.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

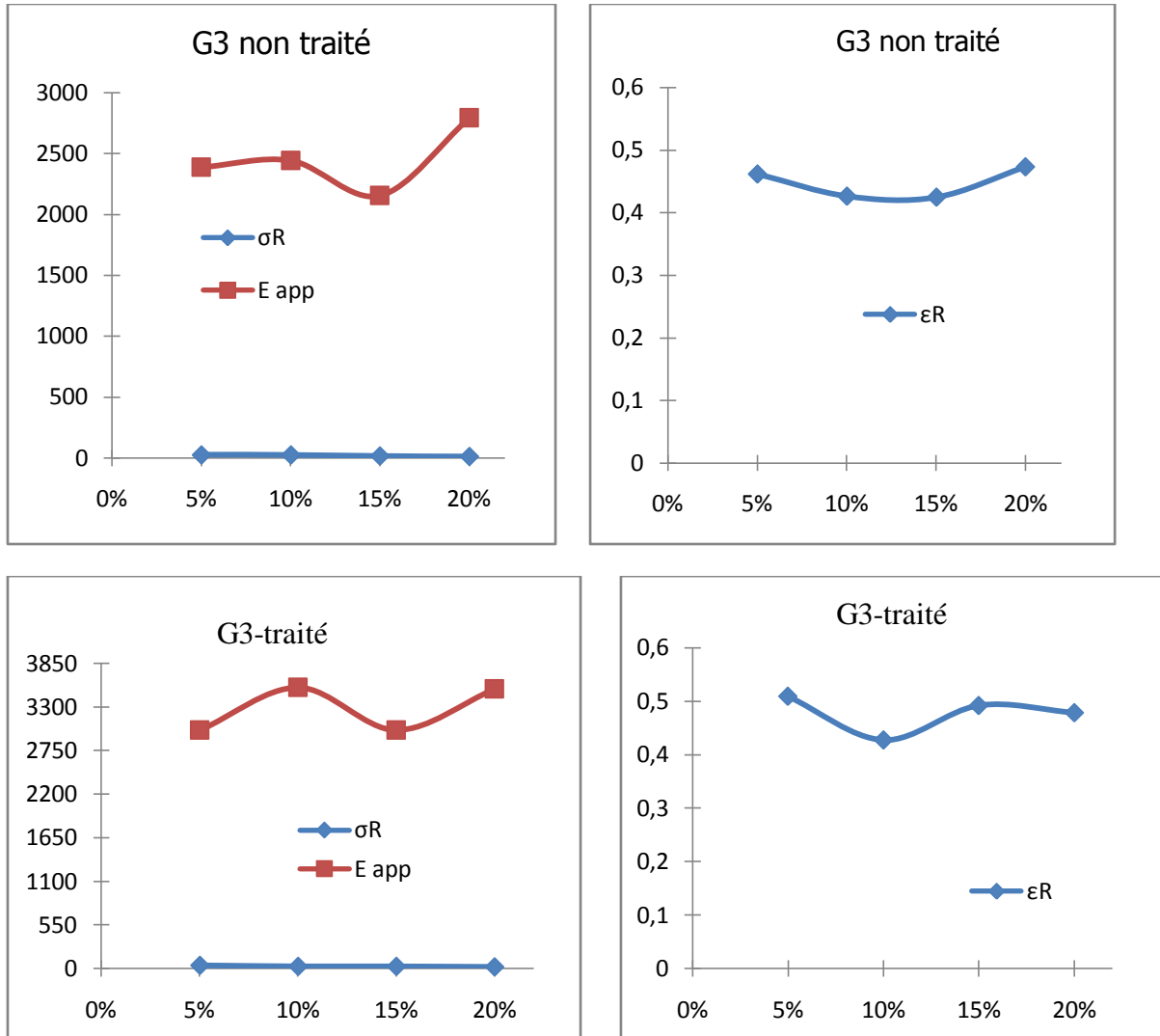


Figure V.36. Variation des caractéristiques mécanique en fonction du taux de charge du composite M.C.G3.

V.2.1 .3. Comparaison des caractéristiques mécanique

Nous regroupons les résultats précédents en prenant en compte les caractéristiques de la résine seule.

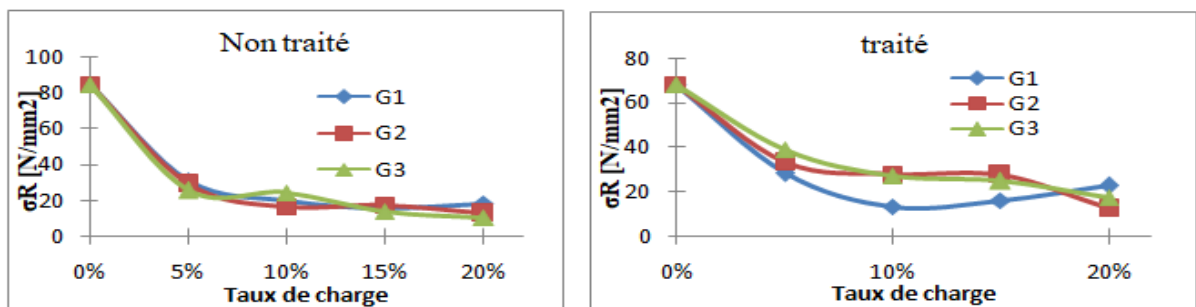


Figure V.37. Variation de la contrainte à la rupture en fonction du taux de charge et de la granulométrie.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

La contrainte à la rupture est influencée négativement par le taux de charge, pour toutes les granulométries, sans traitement thermique la granulométrie et le taux ont la même incidence sur la contrainte à la rupture. Après le traitement thermique, nous constatons que la granulométrie G1 (> 5mm) donne la contrainte la plus faible.

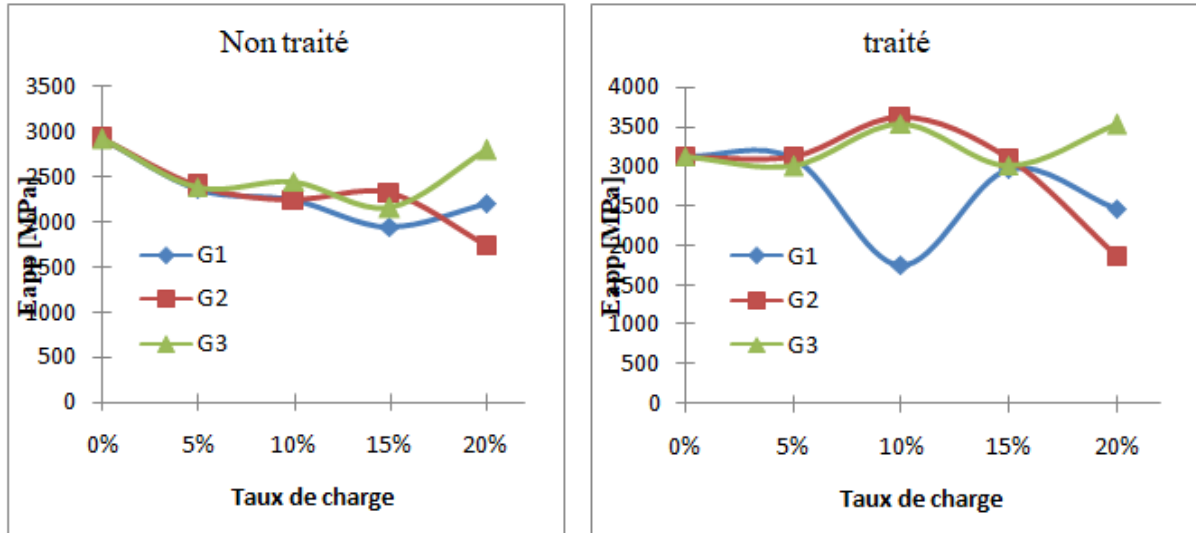


Figure V.37. Variation du module apparent en fonction du taux de charge et de la granulométrie.

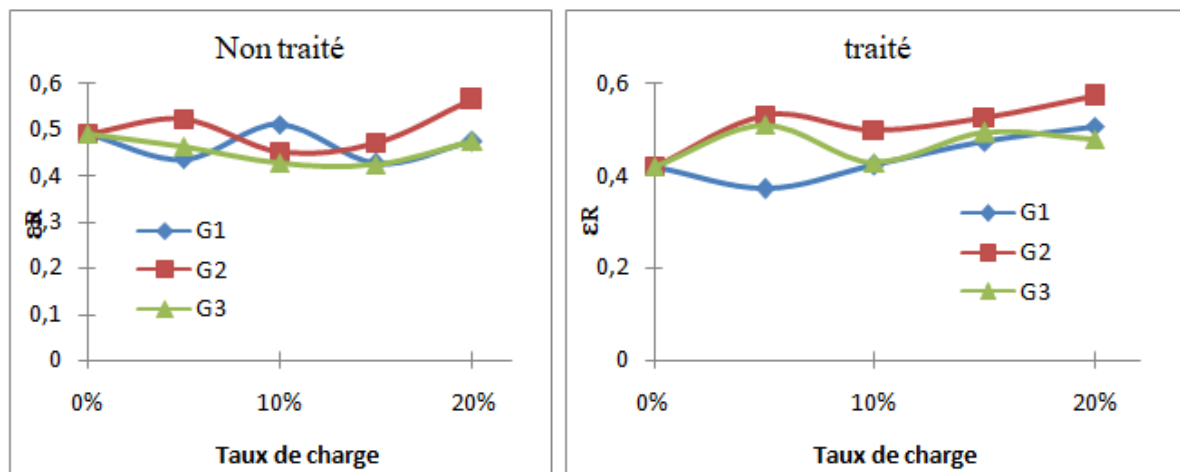


Figure V.38. Variation de la déformation en fonction du taux de charge et de la granulométrie

V.2.2. Discussion des résultats de l'essai de résilience

A partir des résultats obtenus pour nos éprouvettes en résilience, rapportés dans les tableaux (tableau V.1- tableau V.13) nous traçons les courbes suivantes.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

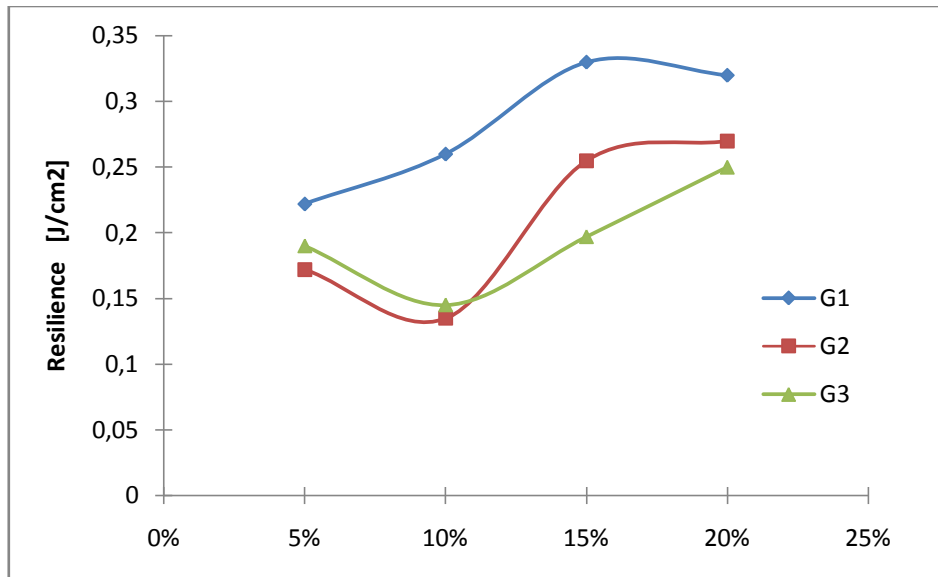


Figure V.39. Variation de la résilience en fonction du taux de charge et de la granulométrie

La résilience augmente avec l'augmentation du taux de charge et cela pour toutes les granulométries. La granulométrie G1 est la plus résiliente comparée à la résilience des composites chargés en G2 et G3.

V.2.3. Discussion des résultats de l'infra rouge à transformée de Fourier

La figure V.40 est la représentation du spectre infra rouge de la résine polyester en transmittance.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

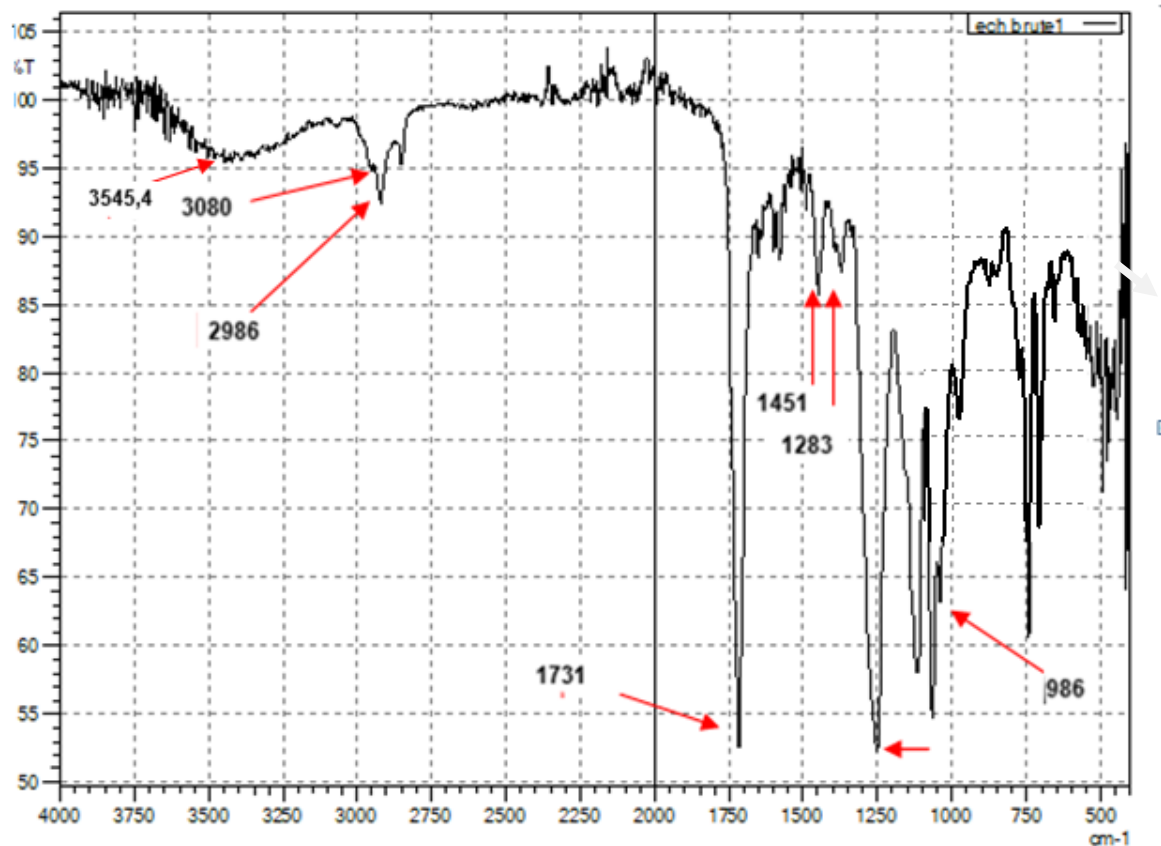


Figure V.40. Spectre infra rouge de la résine seule

Le spectre montre la présence des C-H aromatique (bande de vibration entre 3080 cm^{-1} et 3030 cm^{-1}) et des C=C correspondant au cycle aromatique (bande de vibration entre 1650 cm^{-1} et 1450 cm^{-1}).

La présence du groupement carbonyle de la fonction ester est déterminé à 1731 cm^{-1} et la liaison C-O est déterminée à 1283 cm^{-1} .

Quand à la série de bandes de entre 1000 et 1076 cm^{-1} , elle correspond aux déformations Symétrique C-O-C. les bandes de transmittance située à 986 cm^{-1} correspond à l'élongation C=C du polyester.

Les bandes caractéristiques de la fonction alcool sont situées entre 3600 cm^{-1} et 3200 cm^{-1}

La figure V.41 est la représentation du spectre infra rouge de la résine polyester chargée en PET, en transmittance.

CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

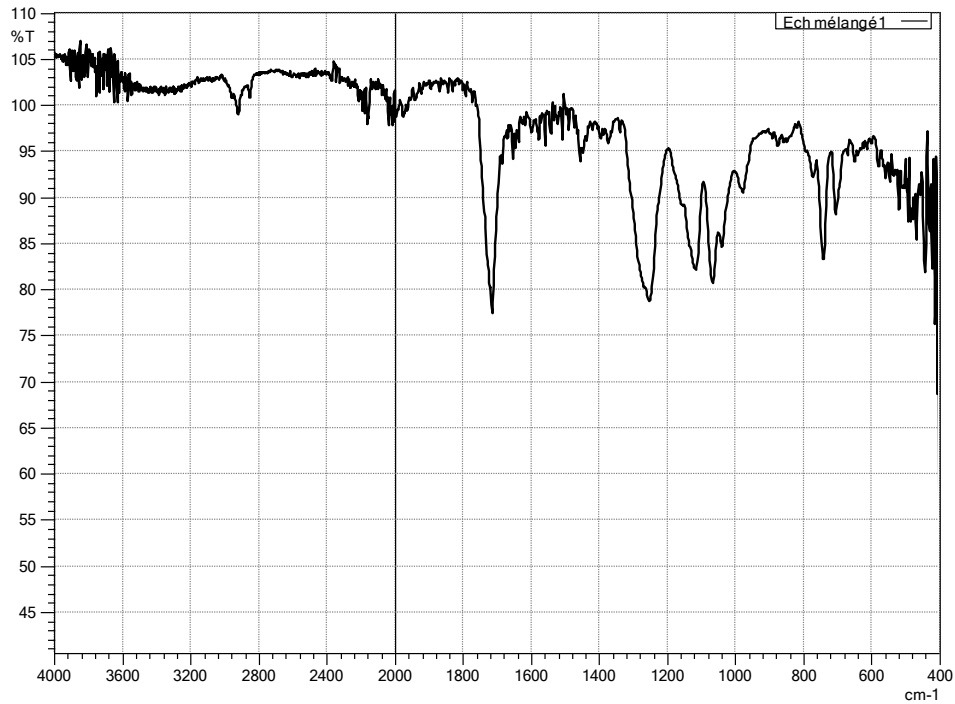


Figure V.41. Spectre infra rouge de la résine chargée

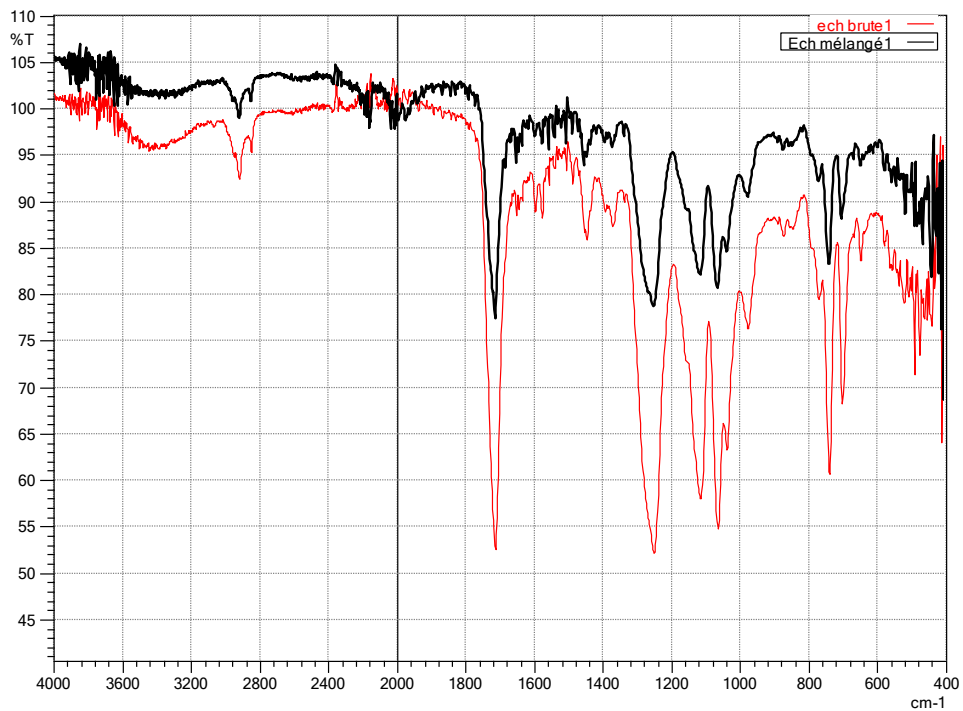


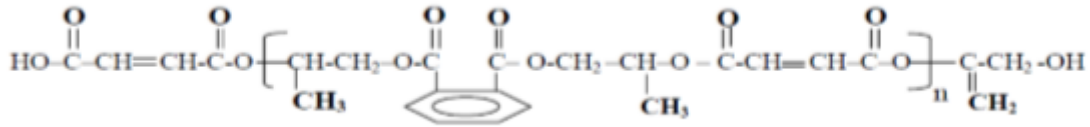
Figure V.42. Superposition des spectres infra rouge de la résine seule et de la résine chargée

Nous analysons la figure V 42, superposition des deux spectre infra rouge de la résine seule et de la résine chargée en PET, tous les pics initialement apparus dans le premier spectre se

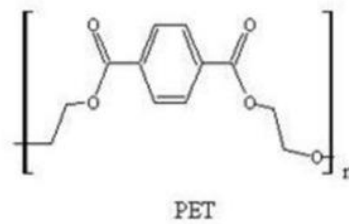
CHAPITRE V : RESULTATS ET DISCUSSIONS

retrouvent dans le second spectre, car le polyester et le PET possèdent presque les mêmes groupement fonctionnels.

La formule chimique du polyester est donnée ci-dessous :



La formule chimique du PET



Conclusion

Les différentes techniques de caractérisation utilisées dans notre travail nous ont permis de connaître le comportement mécanique de nos échantillons en flexion et résilience.

Le traitement thermique à améliorer la résistance des éprouvettes chargées de la résine seule.

La résilience augmente avec le taux de charge, mais reste inférieur à la valeur de la résilience de la résine seule.

La caractérisation par spectroscopie infra rouge à transformée de Fourier nous a donné les spectre de vibration des liaisons existant dans la résine polyester et dans le la résine chargée en PET.

La superposition des spectres I R de la résine seule et de la résine charge sont presque identique et superposables.

Conclusion générale et perspective

Conclusion générale et perspectives

L'objectif de ce travail était d'étudier le comportement mécanique d'un composite à matrice résine polyester chargée en paillettes de PET recyclé.

Nous avons élaboré des échantillons (matériaux composites :résine polyester, charge PET recyclé) par moulage au contact, à différents taux de charge (5%, 10%, 15% et 20%) et à différentes granulométries ($G1 > 5\text{mm}$, $2,5\text{mm} < G2 < 5\text{mm}$ et $G3 < 2,5\text{mm}$).

Une partie des éprouvettes a subit un traitement thermique de relaxation à fin de diminuer la fragilité de nos éprouvettes lors des essais mécaniques.

La caractérisation mécanique en flexion montre que les composites ainsi élaborés ont tous un comportement fragile,

L'ajout de la charge a modifier le mode de rupture, qui passe de rupture totale à une rupture fragile mais sans fragmentation du composite.

Le traitement thermique a amélioré la résistance de la résine seule.

La contrainte à la rupture de la résine seule est la plus importante comparée à la résistance à la rupture des autre matériaux composés élaborés, la charge en PET a produit des défauts dans la structure, il n'y a pas une bonne adhérence entre la charge et la matrice.

La granulométrie G1 est la granulométrie la plus grande, les dimensions des paillettes étant les plus importante ce qui donne aux matériaux composites correspondant les propriétés mécaniques en flexion les plus faibles. Ce sont les matériaux composites chargés en PET granulométrie G3 qui ont une meilleur résistance à la rupture et un meilleur module.

La résilience des matériaux composites chargés en paillettes de granulométrie G1 est la plus importante.

Nous proposons l'utilisation de ce matériau composite comme surface décorative de tables, et comme élément de substitution du verre pour les fenêtres.

L'ajout à la résine polyester de la charge, paillettes en PET recyclé, n'a pas considérablement amélioré les propriétés mécaniques de la résine.

Pour augmenter ces propriétés mécaniques, nous devons ajouter des renforts tels que les fibres de verre.

Nous devons améliorer les paramètres du traitement thermique de nos éprouvettes afin de diminuer la fragilité des composites ainsi élaborés.

Références Bibliographiques

- [1] J.M. Berthelot. Composite Materials: Mechanical Behavior and Structural Analysis. Springer New York. 1999.
- [2] J.M.BERTHELOT «Matériaux composites: Comportement mécanique et analyse des structures»,Ed. MASSON, Paris, 1992.
- [3]. Gharbi, A., Analyse des fissurations des matériaux composites et détermination de leur délaminage utilisant des capteurs piézo-électriques.
- [4]Daniel Gay. Matériaux composites. 3eme édition Hermès, Paris 1991p569.
- [5]Maurice Reyne. Les plastiques. Edition Hermès, Paris, 1990p189.
- [6] Klárová, M., Composite materials, 2015, VSB.
- [7] Boudenne, A., Etude expérimentale et théorique des propriétés thermophysiques de matériaux composites à matrice polymère, 2003, Paris 12.
- [8] El Hadji Babacar, L., Nouveaux matériaux composites thermo formables à base de fibres de cellulose, 2008, Institut National Polytechnique de Grenoble.
- [9]. A. AL-Maghribi, Comportement des matériaux composites à fibres courtes : applications à l'impact basse vitesse, thèse de doctorat, l'université Paul Sabatier, 2008.
- [10]. J.M. Berthelot. Composite Materials. Mechanical Behavior and Structural Analysis, NewYork, 1999.
- [11]. Berthelot J-M. Matériaux composites. Editions Eyrolles, 2010.
- [12]. Rigal J-C. Negrier A, Présentation des matériaux composites. Plastiques et composites, Technique de l'ingénieur, 1991.
- [13]. Glossaire Matériaux Composites. Carma Actualisation octobre 2006.

[14]. 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.

[15]. 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.

[16] Laurent Gornet. Généralités sur les matériaux composites. Engineering school. 2008. <cel-00470296v1>HAL Id: cel-00470296.

[17] R.P.C. Decathlon. Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs. Congrès RFIS, 2005.

[18] R.P.C. Decathlon. Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs. Congrès RFIS,

[19]<http://www.ac-nice.fr/>[19]<http://www.ac-nice.fr/>

[20] R.P.C. Decathlon. Les matériaux composites dans l'industrie des sports et loisirs. Congrès RFIS, 2005.

[21]. Hadadi. Manel, Etude numérique avec comparaison expérimentale des propriétés thermophysiques des matériaux composites à matrice polymère. mémoire de magister, Université de Ferhat Abbas, setif, Algerie.

[22]. A. R. Blythe, Electrical resistivity measurements of polymer materials, Poly Test,4 195-209, 1984.

[23]. P. V. Joeseeph, G. Mathew, K. Joeseeph, G. Groeninckx, S. Thomas, Dynamic mechanical properties of short sisal fibre reinforced polypropylene composites, Comp. Part A. 34, 275-290, (2003).

[24] Djebbloun Youcef, Etude de la rupture en MODE I d'ouverture des Matériaux composites, Université de Biskra (2004).

- [25] :M. BORDIVAL. « Modélisation et optimisation numérique de l'étape de chauffage infrarouge pour la fabrication de bouteilles en PET par injection- soufflage ». Thèse de doctorat. Paris: Ecole Doctorale 364: Sciences Fondamentales et Appliquées. 2009, 196 p.
- [26] :E. DELOYE. « Effet de l'architecture de chêne sur le comportement en injection-soufflage de co-polyesters PET ». Thèse de Doctorat. Paris : Ecole des Mines de Paris.2006, 124 p
- [27] :S. A. JABARIN. « Crystallization kinetics of poly (ethylene terephthalate) isothermal crystallization from the melt ». Journal of Applied Polymer Science, 1987, Vol. 34, P. 85-96.,
- [28] :A. E. LANGROUDI. « Etude de la déformation viscoélastique et plastique du PET amorphe et semi-cristallin autour de la transition vitreuse ». Thèse de Doctorat. Lyon : Ecole doctorale : Matériaux de Lyon. 1999, 201 p.
- [29] :A. PAWLAK et al. « Characterization of scrap poly (ethylene terephthalate) ». European Polymer Journal, 2000, Vol. 36, P. 1875-1884.
- [30] :B. SWOBODA. «Amélioration du comportement au feu de poly (éthylène téréphtalate) et d'alliages poly (éthylène téréphtalate)/polycarbonate recyclés». Thèse de Doctorat. Lyon : Université Montpellier II Science et Technique du Languedoc. 2007, 279 p.
- [31] J.P.QUENTIN, PET ou polyéthylènetéréphtalate. Techniques de l'Ingénieur, J6488, (2004).
- [31] :P. DUMAZET. « Cristallisation et comportement rhéologique d'un composite PET/fibres de verres ». Thèse de Doctorat. Lyon : Université Lyon I. 1991, 230 p.
- [32] L. Gouissem, Etude de l'effet des paramètres de transformation et des extenseurs de chaînes sur les propriétés du poly (éthylène téréphtalate) (PET) recyclé, thèse de doctorat université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie, 145p (2015).
- [33] P.Y. Pennarun, Migration à partir de bouteilles en PET recyclé. Elaboration et valorisation d'un modèle applicable aux barrières fonctionnelles, thèse de doctorat, Université de Reims Champagne-Ardenne-France, 281p (2001),

[34] ACHWAL W. B. - Use of UV absorbers for minimising photodegradation of disperse dyes as well as polyester fiber, Colourage, 1994, June, pp. 21-22.

[35] Etude du vieillissement des produits textiles de type sangles, élingues et cordes toronnées. Rapport de l'IFTH (2004), 64 pp

[36] G. LI, S.L. YANG, J.M. JIANG et C.X. WU, Polymer, 46, 11142-11148,(2005)

[37] U. KÖNCKE, G. ZACHMANN et F.J. BALTA-CALLEJA, Macromolecules, 29, 6019-6022, (1996).

[38]: Daubeny R.P., Caubeny R.P., Bunn C.W., et Brown C.J., "the crystal structure pet" proc. Roy. Soc.Lon.Vol. a 226, P.531-542. (1954)

[39] :A. J. MULLER et al. « The calorimetric and mechanical properties of virgin and recycled poly (ethylene terephthalate) from beverage bottles ». Polymer Engineering and Science, 1987, Vol. 27, P. 796-803

[40] :J. C. RIFFIN. « Evaluation of PET and recycled PET as replacements for a PETG packaging tray ». Journal of Plastic Film and Sheeting, 1996, Vol. 12, p.139-148.

[41] : E Langroudi, « Etude de la déformation viscoélastique du PET amorphe et Semi-Cristallin Autour de la Transition Vitreuse », Thèse de l'Institut National des Sciences Appliqués de Lyon, (1999).

[42] :ADEME. « Recyclage chimique des matières plastiques.» [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.adem.fr>>. (Consulté le : 20/11/2010).

[43] :K. L. NAIT-ALI. « Le PET recyclé en emballage Alimentaires : approche expérimentale et modélisation ». Thèse de Doctorat. Lyon : Université Montpellier II Science et Technique du Languedoc. 2008, 220 p.

[44] :AFSSA. « Evaluation sanitaire des matériaux en poly (éthylène téréphtalate) recyclés utilisés en tant que matériaux au contact des denrées alimentaires et de l'eau de boisson». [en ligne]. Disponible sur : <www.contactalimentaire.com>. (Consulté le : 20/10 /2012).

[45] :ECOEMBALLAGES. « Etude des perspectives d'évolution du tri par couleur du verre d'emballage en France ». [en ligne]. Disponible sur: < www.ecoemballages.fr >. (Consulté le : 05 /09/2013).

[46] :AMCORE PET Packaging. « Technologies dans le monde de l'environnement ». [en ligne]. Disponible sur: <<http://www.industrie.gouv.fr>> (Consulté le: 20/09/2010).

[47] : J. M .PASTOR, A. GONALEZ et J. A. DE SEJA. « Characterization of the isothermal crystallization of PET by microhardness measurements ». Journal of Applied Polymer Science, 1989, Vol. 38, P. 2283-2288.

[48]P. Y. PENNARUN. « Migration à partir de bouteilles en PET recyclé. Elaboration et valorisation d'un modèle applicable aux barrières fonctionnelles ». Thèse de Doctorat. Reims : université de Reims Champagne-Ardenne, 2001, 290 p.

[49] :VALOROPLAST. « Le recyclage des emballages plastiques ». [en ligne]. Disponible sur : <<http://www.valorplast.com>> (Consulté le : 20/11/ 2012).

[50] :P. Y. PENNARUN et P. DOLE, A. FEIGENBAUM. « Functional barriers in PET recycled bottles. Part I: determination of diffusion coefficients in bi-oriented PET with and without contact with liquids ». Journal of Applied Polymer Science, 2004, Vol. 92, P. 2845-2858.

[51] :J. M. HUANG et F. C. CHANG. « Crystallization kinetics of poly (ethylene terephthalate) ». Journal of polymer science, Vol. 38, 2000, P. 934-941.

[52] :F. AWAJA, F. DAVER et E. KOSIOR. « Recycled Poly (ethylene terephthalate) chain extension by a Reactive extrusion process ». Polymer Engineering and Science, 2004, Vol. 44, P. 1579–1587

[53] A. VANNIER, Procédés d'ignifugation du poly(éthylène téréphtalate) – application textile, (2008).

[54] H. ZIMMERMANN, Degradation and Stabilisation of polyesters, Developments in Polymer Degradation – 5, N. Grassie. Applied Science, London, pp. 79-119, (1979).

[55]:H. ZIMMERMAN et N.T. KIM. « Investigation on thermal and hydrolytic degradation of poly (ethylene terephthalate) ». Polymer Engineering Science, 1980, Vol. 20, P. 680-683.

[56]I. C. MC NEILL et M. BOUNEKHEL. « Thermal degradation studies of terephthalate polyesters: 1- poly (alkylene terephthalate) ». Polymer Degradation and Stability, 1991, Vol. 34, P. 187-204

[57] :L. LADOUCE et al. « Non-linear creep behavior of PET ». Journal of Materials Science, 1994, Vol. 29, P. 5399-5406.

[58] Michel Dequatremare Thierry Devers, Matériaux parcours IUT, Dunod,paris ,2012

[59] J.P. Bailon, JU-M-Dorlot, Des Matériaux, presses internationales polytechniques ,2007.

[60] M. Mezzo Aghiles, Mémoire de Master, Etude d'une sollicitation Hors axes d'un composite unidirectionnelle (verre e/époxyde) : cas de la traction, 2012.

[61] M. Mezzo Aghiles, Mémoire de Master, Etude d'une sollicitation Hors axes d'un composite unidirectionnelle (verre e/époxyde) : cas de la traction, 2012.

[62] Technique de l'ingénieur, traité plastiques et composites, Essais mécaniques des plastiques AM3510