

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université MOULOUD MAMMERRI - Tizi-Ouzou



Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique

Mémoire de Fin d'Etudes en Vue de l'Obtention du Diplôme
'Master Académique En Génie Mécanique'

Option : Génie Des Matériaux

Taux de recyclage du plastique des véhicules
hors usage (VHU)

Proposé et dirige par

M^{me} F.MOHELLEBI

Co-Promoteur

M^r. MOHELLEBI Mouloud

Etudié par :

NamaneRazika

TakiltAlissia

2022/2023

Remerciements

Tout d'abord, nous remercions Dieu, notre créateur de nous avoir donné la force, la volonté et le courage afin d'accomplir ce présent travail.

*Nous tenons tout particulièrement à exprimer notre profonde gratitude à notre promotrice **M^{me} DJEDDI FADILA** épouse **MOHELLEB** pour nous avoir suivis de près tous au long de notre travail.*

*Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre Co-promoteur **Mr. MOHELLEBI Mouloud** pour nous avoir guidés et orientés dans la réalisation de cette étude.*

Nous remercions vivement le président et les membres de jury pour nous avoir honorés et acceptés d'examiner ce mémoire.

*Nous remercions toute l'équipe de l'entreprise nationale de plastique et de caoutchouc (ENPC), filiale **SISCOPLALAST de Draa-El-Mizan**.*

Sans oublier les enseignants qui ont contribué à notre formation. Nous leurs dirons merci pour les années de sacrifice et bien vaillance.

Nos remerciements vont également à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail. Aux membres du jury qui nous feront l'honneur d'examiner ce travail.

Dédicaces

C'est avec un très grand plaisir que je dédie ce travail :

A l'être la plus chère de ma vie, ma mère ;

A celui qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui, mon père ;

A mon frère : Ali ;

A mes chères sœurs : Fatiha, Gjawida,

Et ma chère sœur Nabila et son mari Gjamel;

A mes chères neveux : Marigh et mayes ;

A mes ami(e)s

Razika

Dédicaces

C'est avec un très grand plaisir que je dédie ce travail :

A l'être la plus chère de ma vie, ma mère ;

A celui qui a fait de moi ce que je suis aujourd'hui, mon père ;

A mes chers frères : Fares et Lotfi ;

A mes chères sœurs : Souhila, Lamia, Nadia et ma chère jumelle Ouassila ;

Et sans oublier mes sœurs du cœur : Hayet et Meriem et mon frère du cœur

Massi.

Alissia

Sommaire

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction générale

I.PRESENTATION DE L'ENTREPRISE	3
I.1 Présentation.....	3
I.2 Gamme de produits fabriqués	3
I.3 La matière utilisée au sein de l'entreprise	3

Chapitre I Généralités sur les polymères

I.INTRODUCTION.....	4
II.DEFINITION D'UN POLYMERE	4
III.REACTION DE POLYMERISATION.....	4
III.1 Polymérisation par condensation	5
III.2 Polymérisation en chaîne	5
IV..CLASSIFICATION DES POLYMERES.....	6
IV.1 Selon leurs origines.....	6
IV.1.1. Les polymères naturels	6
IV.1.2. Les polymères artificiels	6
IV.1.3. Les polymères synthétiques	6
IV.2 Selon leurs domaines d'application.....	6
IV.2.1. Les polymères de grande diffusion	6
IV.2.2. Les polymères techniques	6
IV.2.3. Les polymères de fonction	6
IV.3 Selon leurs structures	7
IV.3.1. Les polymères liniers ou monodimensionnels.....	7
IV.3.2. Les polymères bidimensionnels	7

IV.3.3.Les polymères tridimensionnels	7
IV.4Selon leur comportement thermique	8
IV.4.1.Les polymères thermoplastiques.....	8
IV.4.2.Les polymères thermodurcissables	8
IV.4.3.Les élastomères	9
IV.5Selon leur morphologie.....	9
IV.5.1.Polymère amorphe	9
IV.5.2.Polymères semi-cristallins	10
IV.5.3.Polymère cristallin	11
V.PROPRIETES DES POLYMERES.....	11
V.1 Propriétés thermiques des polymères	11
V.1.1.La température.....	11
V.2 Propriétés mécaniques	13
V.2.1.Contrainte au seuil d'écoulement σ_y	13
V.2.2.Résistance en traction σ_m (ou contrainte maximale en traction)	13
V.2.3.Contrainte à x% d'allongement σ_x	13
V.2.4.Contrainte à la rupture σ_{rup}	13
V.2.5.La résistance en compression σ_{cm}	14
V.2.6.La résistance en cisaillement τ_m	14
V.3 Propriétés techniques	14
VI.MISE EN ŒUVRE DES POLYMERES	14
VI.1Mise en œuvre des thermoplastiques	15
VI.2Mise en œuvre des thermodurcissables.....	15
VI.3Les adjuvants	16
VII.TRANSFORMATION DES POLYMERES	17
VII.1 L'injection.....	17
VII.1.1 L'injection par moulage	17

VII.1.2.Procédé de mise en œuvre par injection plastique.....	18
VII.2.L'extrusion.....	19
VIII.CONCLUSION	19

Chapitre II Recyclage des polymères

I.INTRODUCTION.....	20
II.CIRCUIT DU RECYCLAGE DES POLYMERES EN GENERAL.....	20
II.1.Les principes de recyclage.....	21
II.2.L'infrastructure de recyclage.....	21
II.2.1.La collecte des déchets	21
II.2.2.Tri des déchets	22
II.2.3.La transformation	22
II.2.4.Réutilisation.....	23
II.3.Les différents procédés de recyclage.....	23
II.3.1.Le procédé mécanique	24
II.3.2.Le recyclage en vrac	25
II.3.3.Recyclage chimique et thermique	25
II.4.Evaluation des impacts de recyclage	26
II.4.1.Impacts économiques	26
II.4.2.Impacts environnementaux.....	26
II.4.3.Impacts en matière d'emploi	27
III.CIRCUIT DU RECYCLAGE DES POLYMERES DE DECHETS AUTOMOBILES ..	27
III.1.Réglementation sur l'automobile	27
III.1.1.Les véhicules en réparation.....	28
III.1.2.Les véhicules en fin de vie	28
III.2.Introduction des polymères dans l'industrie automobile.....	28
III.3.Les polymères utilisés dans l'industrie automobile	29

III.4.Distribution des polymères dans un véhicule	30
III.5.Le recyclage des polymères issus de l'automobile	31
III.5.1.Description des différents acteurs de la filière de recyclage des polymères issus de l'automobile	31
III.5.1.1.Les démolisseurs	31
III.5.1.2.Les broyeurs	31
III.5.1.3.Les recycleurs.....	32
III.5.2.Les étapes du recyclage des polymères issus de l'automobile.....	32
IV.CONCLUSION.....	33

Chapitre III Elaboration et caractérisation des mélanges

I.INTRODUCTION.....	32
II.ÉLABORATION DES MELANGES	32
II.1 Déroutement du travail	32
II.1.1.La collecte des pièces polymériques	32
II.1.2.Étape du broyage	33
II.1.3.Étape du mélangeage à froid	34
II.1.4.Étape de l'extrusion.....	35
II.1.5.Étape de découpage	36
II.1.6.Étape de l'injection.....	37
III.TECHNIQUES DE CARACTERISATION DES MELANGES.....	39
III.1.La caractérisation physico-chimique de nos mélanges	39
III.1.1.Test de flottation	39
III.1.1.1.Matériel et produits	39
III.1.1.2.Mode opératoire	39
III.1.2.Test au feu	39
III.1.2.1.Sécurité.....	40
III.1.3.Test de densité.....	40

III.1.3.1. Matériel et produits	40
III.1.3.2. Sécurité.....	40
III.1.3.3. Mode opératoire	40
III.1.3.4. Observations.....	41
III.1.4. L'indice de fluidité	41
III.1.4.1. Principe	41
III.1.4.2. Échantillon	41
III.1.4.3. Appareillage	41
III.1.4.4. Calcul indice de fluidité	42
III.1.5. Caractérisation par analyse enthalpique différentielle (DSC).....	42
III.2. Caractérisation mécanique	44
III.2.1. Essai de traction	44
III.2.1.1. Principe de l'essai	44
III.2.1.2. Présentation des échantillons standardisés.....	44
III.2.1.3. Présentation de la machine de traction.....	45
III.2.2. Essais de résilience.....	46
III.2.2.1. Les éprouvettes utilisées	46
III.2.2.2. Présentation de la machine.....	46
III.2.2.3. Principe de fonctionnement.....	47
III.3. Caractérisation morphologique	47
III.3.1. Observation au microscope optique	47
III.3.1.1. Le microscope optique	47
III.3.1.2. Principe de fonctionnement du microscope optique	47
III.3.2. Observation au microscope électronique à balayage (MEB).....	48
III.3.2.1. Principe du MEB	49
IV. CONCLUSION.....	49

Chapitre IV Résultats et discussion

I.INTRODUCTION.....	49
II.CARACTERISATION PHYSICO –CHIMIQUE	50
II.1 Résultats Test de flottation.....	50
II.2 Résultats Test de densité.....	51
II.3 Résultats Test au feu	54
II.4 Résultats Indice de fluidité.....	55
II.5 Résultats de l’analyse DSC	57
II.5.1.Courbe DSC du polymère 100% PP.....	57
II.5.2.Courbe DSC du mélange (25/ 75%) polymère1/ PP	58
II.5.3.Courbe DSC du mélange PP/ polymère2 (75 /25%)	58
II.5.4.Courbe DSC du mélange PP/ polymère3 (75 /25%)	59
II.5.5.Courbe DSC du mélange PP/ polymère4 (75 /25%)	60
II.5.6.Superposition des courbes DSC des mélanges.....	61
III.CARACTERISATION MECANIQUE	62
III.1 Essai de traction	62
III.1.1.Courbes contrainte-déformation.....	62
III.1.1.1.Courbes contrainte-déformation du polypropylène.....	62
III.1.1.2.Courbes contrainte-déformation du polymère 1 et ses mélanges.....	63
III.1.1.3.Courbes contrainte-déformation du polymère 2 et ses mélanges.....	64
III.1.1.4.Courbes contrainte-déformation du polymère 3 et ses mélanges.....	65
III.1.1.5.Courbes contrainte-déformation du polymère 4 et ses mélanges.....	66
III.1.2.Variation des caractéristiques mécaniques issues des courbes contrainte-déformation	67
III.1.2.1.Variation de la contrainte maximale de nos polymères	67
a)Variation de la contrainte max du mélange (P1/PP).....	68
b)Variation de la contrainte maximale du polymère 2.....	69
c)Variation de la contrainte maximale du polymère 3.....	70

d)Variation de la contrainte maximale du polymère 4.....	70
e)Superposition des courbes de variation de la contrainte maximale des mélanges.....	71
III.1.2.2.Variation de la contrainte à la rupture de nos polymères	72
a)Variation de la contrainte à la rupture du polymère 1	73
b)Variation de la contrainte à la rupture du polymère 2	73
c)Variation de la contrainte à la rupture du polymère 3	74
d)Variation de la contrainte à la rupture du polymère 4	74
e)Superposition des courbes de variation de la contrainte à la rupture des mélanges	75
III.1.2.3.Variation du module d'élasticité de nos polymères	76
a)Variation du module d'élasticité du polymère 1.....	77
b)Variation du module d'élasticité du polymère 2	77
c)Variation du module d'élasticité du polymère 3.....	78
d)Variation du module d'élasticité du polymère 4	78
e)Superposition des courbes de variation du module d'élasticité.....	79
III.1.2.4.Variation de la déformation à la rupture de nos polymères	80
a)Variation de la déformation à la rupture du polymère 1.....	81
b)Variation de la déformation à la rupture du polymère 2.....	81
c)Variation de la déformation à la rupture du polymère 3.....	82
d)Variation de la déformation à la rupture du polymère 4.....	82
e)Superposition des courbes de variation de la déformation à rupture.....	83
III.2.Essai de résilience	84
IV.OBSERVATION MICROSCOPIQUE	89
IV.1.Observation au microscope optique.....	90
IV.1.1.Observation au microscope optique du polypropylène (PP), polymère1 et leur mélange 25/75%	
IV.1.2.Observation au microscope optique du polymère 2 et du mélange 15/85% (P2/PP) .	91
IV.1.3.Observation au microscope optique du polymère 3 et du mélange 15/85% (P3/PP)	91
IV.1.4.Observation au microscope optique du polymère 4 et du mélange 25/75% (P4/PP)	92
IV.2.Observation au microscope électronique à balayage monophasique du polymère.....	93
IV.2.1.Observation au MEB du faciès de rupture en résilience du polypropylène (PP).....	93

IV.2.2.Observation au MEB du faciès de rupture en résilience du polymère 2.....	94
IV.2.3.Observation au MEB du faciès de rupture en résilience du polymère 3.....	94
IV.2.4.Observation au microscope électronique a balayage du mélange polymère 3 /PP (25/75%)	95
V.CONCLUSION.....	96
 CONCLUSION GENERALE	 91

ملخص :

الهدف من هذا العمل هو إعادة تدوير النفايات البلاستيكية من ساحات خردة السيارات. يتم جمع هذه النفايات لتكوين خليط من البلاستيك المعاد تدويره وبلاستيك PP البكر، بنسب كتلة مختلفة. وتكون المخاليط المطورة بتركيبات (بوليمر معاد تدويره / بكر) بنسب (95/5) و(85/15) و(75/25)، حتى يتم الحصول على قطع اختبارية لكل خليط، مروراً بعدة مراحل تجريبية. ويتم تصنيع المخاليط بهدف دراسة خصائصها، لتحديد خصائصها الفيزيائية والميكانيكية والمورفولوجية، وذلك من خلال إجراء تجارب مختلفة.

Abstract:

The objective of this work is to recycle plastic waste from automobile scrapyards. This waste is collected to create mixtures of recycled plastics and virgin PP plastic, with various mass percentages. The mixtures developed are at compositions of (recycled polymer / virgin PP) of (5/95), (15/85) and (25/75), until test pieces of each mixture are obtained, passing through several experimental stages. The mixtures are created with the aim of studying their characteristics, in order to determine their physical, mechanical and morphological properties, by carrying out different experiments.

Résumé:

L'objectif de ce travail est de recycler les déchets en plastique provenant des casses automobiles. Ces déchets sont rassemblés afin de créer des mélanges de plastiques recyclés et de plastique vierge de type PP, avec divers pourcentages en masse. Les mélanges élaborés sont à des compositions de (polymère recyclé / PP vierge) de (5/95), (15/85) et (25/75), jusqu'à ce que des éprouvettes de chaque mélange soient obtenues, en passant par plusieurs étapes expérimentales. Les mélanges sont créés dans le but d'étudier leurs caractéristiques, afin de déterminer leurs propriétés physiques, mécaniques et morphologiques, en effectuant différentes expériences.

Liste des Figures

Figure I.1 : Monomère	4
Figure I.2 : (-CH ₂ -CH ₂ -) est une unité de polymères	4
Figure I.3 : Polymérisation par condensation.	5
Figure I.4 : Polymérisation en chaîne.	5
Figure I.5 : Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire	7
Figure I.6 : Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel	7
Figure I.7 : Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel	8
Figure I.8 : Réticulation des polymères thermoplastique.	8
Figure I.9 : Réticulation des polymères thermodurcissable	8
Figure I.10 : Polymère amorphe	9
Figure I.11 : Polymère semi cristalline	10
Figure I.12 : Polymère cristallin.	10
Figure I.13 : Variation du module d'Young d'un polymère en fonction de la température	11
Figure I .14 : Variation du volume spécifique en fonction de la température pour les polymères amorphes, partiellement cristallin et cristallin	12
Figure I.15 : Grandeurs caractéristiques déterminées à partir des courbes Contrainte déforma	12
Figure I.16 : Différentes sollicitations mécaniques.	14
Figure I.17 : Schéma de mise en œuvre des thermoplastiques.	15
Figure I.18 : Schéma de mise en œuvre des thermodurcissables.	15
Figure I.19: Structure de la presse d'injection.	17
Figure I.20: Cycle d'injection.	18
Figure I.21 : Machine à extrusion.	19
Figure II.1 : Symbole de recyclage.	20
Figure II.2 : Collecte des déchets	21
Figure II.3 : Le tri des déchets	22

Figure II.4 : Transformation des déchets	22
Figure II.5: Réutilisation des déchets	22
Figure II.6: Représente le devenir des matières plastiques soumis à une transformation et leur intérêt économique.	23
Figure II.7: Répartition des pièces polymériques dans un véhicule.	29
Figure II.8: Les étapes du recyclage des polymères automobiles.	31
Figure III.1 : Garnitures automobiles choisies pour le recyclage mécanique	33
Figure III.2 : Découpage des garnitures auto	33
Figure III.3 : Lavage des morceaux de polymères à recycler.	34
Figure III.4 : Présentation du broyeur utilisé.	34
Figure III.5 : Mélangeage à froid	34
Figure III. 6. Déroulement de l'opération d'extrusion des mélanges	36
Figure III. 7 : Etape de découpage des joncs	36
Figure III 8 : Grains résultants de la granulation des joncs du mélange Polymère recyclé/PP.	37
Figure III.9 : Procédé d'injection	37
Figure III.10 : Type d'éprouvette obtenue après injection	37
Figure III.11 : Test de flottation	39
Figure III.12 : Test a feu	39
Figure III.13 : Appareil utilisé pour calculer la densité.	40
Figure III. 14 : Appareil d'indice de fluidité.	41
Figure III.15 : Appareil DSC	42
Figure III.16 : Principe de fonctionnement d'un appareil DSC	42
Figure III.17: Les étapes de l'essai de traction.	43
Figure III.18 : Eprouvette de traction NF EN ISO 527 – 2.	44
Figure III .19 : Machine de traction Zwick/Roell Z050.	44

Figure III.20 : Eprouvette utilisée pour l'essai de résilience.	45
Figure III.21: Essai de résilience.	45
Figure III.22 : Eléments constituant le microscope optique	46
Figure III.23 : Principe du fonctionnement du microscope optique.	47
Figure III.24 Représentation du microscope à balayage .	47
Figure IV.1 : Comportement de nos polymères au test de flottation.	50
Figure IV.2 : Résultat du test de densité.	51
Figure IV.3 : variation de la densité des différents polymères recyclés.	52
Figure IV.4 : Comportement des polymères recyclés vis-à-vis du test au feu.	54
Figure IV.5 : Indice de fluidité des polymères recyclés.	55
Figure IV. 6 : Courbe DSC du polymère 100% PP.	56
Figure IV.7 : Courbe DSC du mélange (25/ 75%) polymère1/ PP.	57
Figure IV.8 : Courbe DSC du mélange (25/ 75%) polymère2/ PP.	57
Figure IV.9 : Courbe DSC du mélange (25/ 75%) polymère3/ PP.	58
Figure IV.10 : Courbe DSC du mélange (25/ 75%) polymère4/ PP.	59
Figure IV. 11 : Courbe DSC des différents mélanges des polymères et 100% PP.	60
Figure IV.12: Courbe contrainte déformation 100% PP.	61
Figure IV.13 : Courbe contrainte déformation polymère 1.	62
Figure IV.14 : Courbe contrainte déformation polymère 1/PP.	63
Figure IV.15 : Courbe contrainte déformation polymère 2/PP.	64
Figure IV.16 : Courbe contrainte déformation polymère 3/PP.	64
Figure IV.17 : Courbe contrainte déformation polymère 4/PP	65
Figure IV.18: Variation de la contrainte maximale du polymère 1	67
Figure IV.19 : Variation de la contrainte maximale du polymère 2.	67
Figure IV.20 : Variation de la contrainte maximale du polymère 3.	68
Figure IV.21 : Variation de la contrainte maximale du polymère 4.	68
Figure IV.22: Contraintes maximales de nos polymères et leurs mélanges	69

Figure IV.23 : Variation de la contrainte à la rupture du polymère 1	70
Figure IV.24 : Variation de la contrainte à la rupture du polymère 2	71
Figure IV.25 : Variation de la contrainte à la rupture du polymère 3	71
Figure IV.26 : Variation de la contrainte à la rupture du polymère 4	72
Figure IV.27 Courbes des contraintes à la rupture de nos polymères et leurs mélanges	72
Figure IV.28 : Variation du module d'élasticité du polymère 1	74
Figure IV.29 : Variation du module d'élasticité du polymère 2	74
Figure IV.30 : Variation du module d'élasticité du polymère 3	75
Figure IV.31 : Variation du module d'élasticité du polymère 4	75
Figure IV.32 : Superposition des courbes du module d'élasticité de nos polymères.	76
Figure IV.33 : Variation de la déformation à la rupture du polymère 1.	77
Figure IV.34 : Variation de la déformation à la rupture du polymère 2	77
Figure IV.35 : Variation de la déformation à la rupture du polymère 3.	78
Figure IV.36 : Variation de la déformation à la rupture du polymère 4	78
Figure IV.37 : Variation de la déformation à la rupture des polymères.	79
Figure IV.38 : Variation de la résilience des mélanges en fonction du % PP.	85
Figure IV.39 : Observation au microscope optique a) du polypropylène (PP), b) du Polymère 1 et c) du mélange 25% P1/75%PP.	86
Figure IV.40 : Observation au microscope optique, a) du polymère 2 et b) du mélange 15/85% (P2/PP).	87
Figure IV.41 : Observation au microscope optique du polymère 3 et b) du mélange 15/85% (P3/PP).	87
Figure IV.42: Observation au microscope optique, a) du polymère 4 et b) du mélange 25/75% (P4/PP).	88
Figure IV.43: Micrographie MEB du polypropylène (PP).	89
Figure IV.44: Micrographie MEB du polymère 2.	89
Figure IV.45 : Micrographie MEB du polymère 3.	90
Figure IV.46: Micrographie MEB du mélange polymère 3 /PP (25%/75%).	90

Liste des Tableaux

Tableau II.1 : Propriétés d'usage des MP dans l'industrie automobile.	27
Tableau II.2 : Exemple de l'utilisation des polymères dans l'automobile (en kg).	28
Tableau II.3: Répartition des résines utilisées dans l'industrie automobile	29
Tableau III.1: Marques des garnitures automobiles récupérées	32
Tableau III.2 : différentes compositions des mélanges à étudier.	35
Tableau III.3 : Paramètre d'injection.	38
Tableau IV.1: désignation des différentes pièces.	49
Tableau IV.2: Valeurs de la densité des différents mélanges	50
Tableau IV.3: Résultats du test au feu	53
Tableau IV.4 : Valeurs des indices de fluidité des différents mélanges	54
Tableau IV.5 : Valeurs des contraintes max des polymères étudiés	66
Tableau IV.6. : Valeurs des contraintes à la rupture des polymères étudiés	69
Tableau IV.7: Valeurs du module d'élasticité des polymères étudiés	73
Tableau IV.8. Valeurs des contraintes à la rupture des polymères étudiés	76
Tableau IV.09 : Valeurs des caractéristiques mécaniques des différents mélanges	80
Tableau IV.10 : Valeurs de l'essai de résilience du polypropylène, polymère 1 et ses mélanges	80
Tableau IV.11 : Valeurs de l'essai de résilience du polymère 2 et ses mélanges.	82
Tableau IV.12 : Valeurs de l'essai de résilience du polymère 3 et ses mélanges.	83
Tableau IV.13 : Valeurs de l'essai de résilience du polymère 4 et ses mélanges.	84

Introduction

Générale

Introduction Générale

Les matériaux polymères sont de plus en plus utilisés dans notre quotidien, améliorant et facilitant notre qualité de vie. Tous les domaines de notre vie sont imprégnés de plastiques ; nous les utilisons dans l'industrie alimentaire comme emballages, ustensiles, dans la construction pour l'amélioration et le confort de nos habitats, dans l'industrie du transport automobile et aéronautique, etc. Ces avancées ne sont pas sans impact sur l'environnement, elles sont consommatrices de ressources naturelles non renouvelables où il est à noter que la production de 4 tonnes de plastiques découle de l'extraction de 100 tonnes d'hydrocarbures et d'autre part leurs transformation en produits semi fini ou produits finis engendre un coût énergétique élevé.

La consommation des polymères génère également des quantités croissantes de déchets, qui sont une source de pollution de notre éco système, cela touche la faune et la flore.

Le recyclage des polymères post consommation est une alternative à ce gaspillage de matière et d'énergie : collecter, trier, transformer et mélanger les polymères sont les voies de la valorisation des polymères.

Parmi les déchets polymériques problématiques dans l'environnement, nous citons les déchets plastiques des véhicules automobiles hors d'usage, véhicules en fin de vie. Le parc mondial automobile est en croissance continue et la quantité de polymères dans les véhicules augmente de 2 % par an, cela produit des quantités énormes de matières plastiques dans les décharges automobiles à ciel ouvert.

Afin de tirer le meilleur parti de la quantité de déchets non traités dans les différentes opérations de recyclage, la gestion des produits en fin de vie est encadrée par de nombreuses réglementations.

Le recyclage mécanique, également appelé valorisation " matière ", consiste à récupérer les polymères d'une première utilisation et suite à un ensemble d'opérations mécaniques, à les rendre appropriés pour une seconde application souvent différente de la première.

Collecter des déchets polymériques et les combiner avec un polymère vierge par mélangeage mécanique peu coûteux représente une alternative significative pour générer des matières premières et protéger l'écosystème.

Dans cette perspective, notre étude se concentre sur la valorisation des déchets plastiques provenant des véhicules automobiles hors d'usage collectés dans les casses-automobiles. Le mélangeage de ces déchets avec du Polypropylène (PP), polymère de grande diffusion et économique, permet de les réintégrer dans le processus de production comme matières premières secondaires par le biais du recyclage.

Les pièces plastiques automobiles choisies dans notre travail sont des garnitures internes de portières automobiles, se sont des pièces volumineuses élaborées par procédé d'injection généralement ces pièces sont en polypropylène.

La partie expérimentale de notre travail, l'élaboration par extrusion puis par injection des mélanges (polymères recyclés du véhicule auto avec du polypropylène vierge), est réalisée

à l'usine SISCOPLAST de Draa El Mizan, les mélanges sont réalisés sans additifs ni comptabilisant.

La présentation de notre étude est organisée comme suit :

Le premier chapitre sera consacré aux concepts généraux des polymères pour donner une idée globale sur les matériaux polymériques qui font l'objet de cette étude.

Dans le second chapitre nous donnerons un aperçu sur le recyclage des polymères.

La partie concernant l'élaboration des éprouvettes, matériaux et techniques de caractérisation est décrite dans le chapitre trois.

Le quatrième chapitre sera consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats des différents essais aux quels nous avons soumis nos éprouvettes et nous terminerons notre travail par une conclusion générale dans laquelle nous mettrons l'accent sur les résultats les plus pertinents qui découlent de notre travail. Des perspectives seront envisagées pour la continuité de cette étude.

I. Présentation de l'Entreprise

I.1 Présentation

L'entreprise Siscoplast est une filiale du groupe ENPC (Entreprise Nationale des Plastique et des Caoutchouc), qui regroupe quatre autres unités de production et de transformation de plastique sises respectivement à : Chlef, Sétif, Médéa et Alger.

L'entreprise Siscoplast (société d'injection plastique et de fabrication des articles scolaire) de Draa El Mizan a été créée en 1981 et est gérée par un conseil de direction. C'est une société par action. La superficie de cette entreprise s'étend sur 30,000m². Elle a réussi a occuper une place prépondérante dans le marché locale de l'industrie de la plasturgie malgré le marché concurrentiel ouvert contre d'autres produits importes et locaux. Ses produits multiples ont été, au fil des années et grâce a l'apport considérable des compétences composées de techniciens, d'ingénieurs et de cadres dirigeants formés dans les différents instituts et universités algériennes, améliorés. Et gagnent la satisfaction du client.

L'entreprise Siscoplast est certifiée suivant les deux systèmes de management de la qualité et de l'environnement depuis 2008 pour le premier et 2010 pour le second. Cette norme intègre la politique de gestion de la qualité et a pour objectifs principaux de répondre aux exigences du client et apporter des améliorations sur tous les plans de la gestion de l'entreprise.

I.2 Gamme de produits fabriqués

L'atelier de production au sein de l'entreprise est divisé en trois secteurs, à savoir le secteur d'extrusion et enfin le secteur de souples.

➤ Le secteur d'injection

Actuellement ce secteur fabrique, bouchon moubyd en polypropylène (PP), les fusettes en polyéthylène haute densité injection et bouchon Naftal en PP.

➤ Le secteur d'extrusion

Par ce procédé l'entreprise fabrique principalement, les tubes en PEHD pour AEP, tubes en PEBD pour l'irrigation et des gains électriques.

➤ Le secteur de calandrage

Ce dernier secteur fabrique, protèges cahiers et pochettes vignettes en PVC.

I.3 La matière utilisée au sein de l'entreprise :

Les matières utilisées au sein de cette entreprise sont données ci-dessous :

- Polyéthylène (PE)
- Polychlorure de vinyle (PVC)
- Polypropylène (PP)
- Polystyrène

CHAPITRE I
GÉNÉRALITÉS
SUR LES POLYMÈRES

I. Introduction

Nous savons tous que les applications des polymères se sont considérablement développées ces dernières années et se sont étendues à tous les domaines : technique, médical, domestique et même artistique. Le choix d'un polymère pour une application spécifique nécessite une connaissance approfondie de ses différentes propriétés structurales, thermiques et mécaniques. Nous présentons une étude bibliographique ; des informations générales sur les polymères, leurs différentes méthodes de classification, leurs structures, leurs synthèses et leurs différentes propriétés.

II. Définition d'un polymère

Les polymères sont des macromolécules formées par l'assemblage de nombreuses molécules de très petite taille. Les petites molécules qui se combinent pour former des molécules de polymère sont appelées monomères, et la réaction dans laquelle elles se combinent et appelée polymérisation [1].



Figure I.01 : Monomères [2].

M : motif monomère (motif de répétition).

n : degré de polymérisation ; nombre de fois que l'on rencontre M dans la molécule.

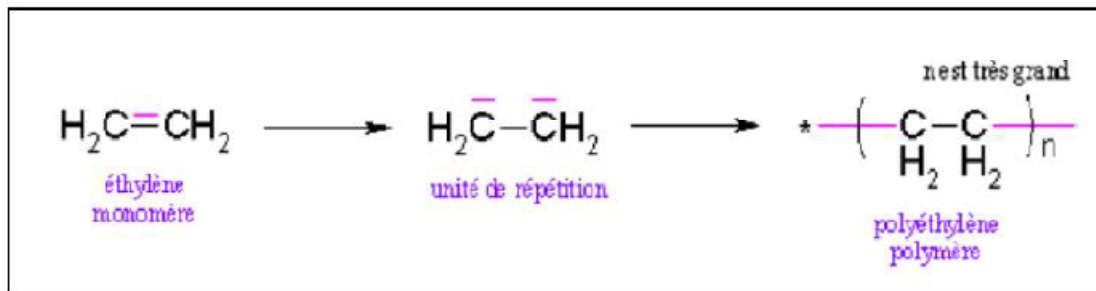


Figure I.02 : (-CH₂-CH₂-) est une unité de polymères [3].

III. Réaction de polymérisation

Les réactions de polymérisation sont classées en matériaux thermoplastiques et thermodurcissables, en fonction des propriétés du polymère résultant. Cependant, il existe des classifications supplémentaires basées sur le type de réaction chimique qui se produit (addition ou condensation) [4].

III.1 Polymérisation par condensation [4]

La polycondensation se produit par l'interaction d'un ou plusieurs composés avec l'élimination d'éléments tels que l'eau et l'ammoniac. Des exemples importants de ce type de polymérisation sont les nylons (polyamides), les polyesters, etc.

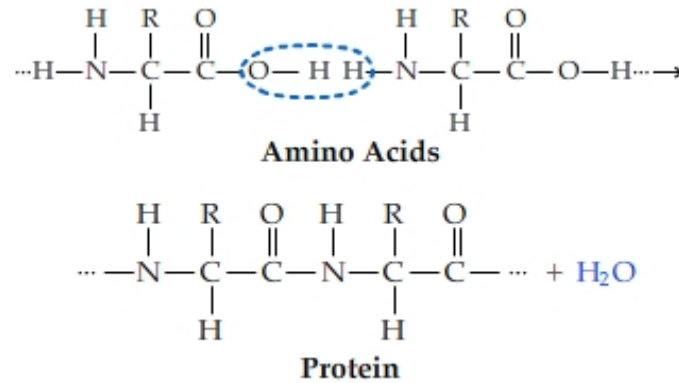


Figure I.03 : Polymérisation par condensation.

III.2 Polymérisation en chaîne

Dans la polymérisation par croissance de chaîne, un catalyseur qui initie une réaction forme des sites actifs auxquels les molécules monomères se fixent facilement. Le monomère réagit rapidement et ajoute toujours la même quantité à la chaîne d'extension. Ce processus est interrompu par une réaction de terminaison [5].

Selon la nature du site actif qui entraîne l'addition séquentielle d'unités, chaque réaction de polymérisation en chaîne peut être classée dans l'un des groupes suivants :

- Polymérisation radicalaire.
- Ionique (anionique, cationique).

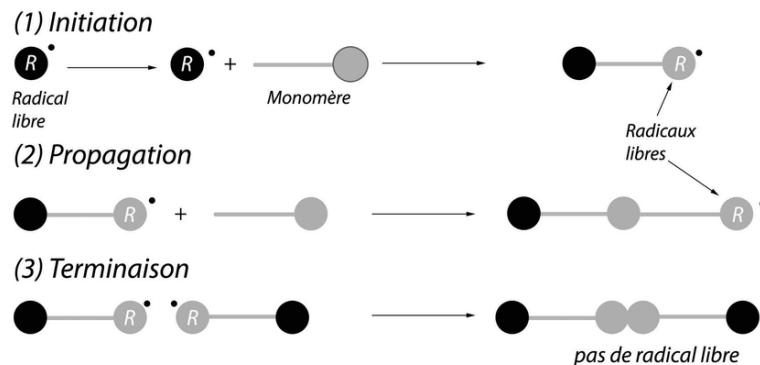


Figure I.04 : Polymérisation en chaîne.

IV. Classification des polymères

IV.1 Selon leurs origines

IV.1.1 Les polymères naturels

Ils sont issus du règne végétal ou animal et revêtent une importance considérable. Cependant, dans cette catégorie, on peut citer les polysaccharides (cellulose, amidon, etc.), les familles de protéines (laine, soie, etc.), le caoutchouc naturel, etc. [6].

IV.1.2 Les polymères artificiels

Ils sont obtenus en modifiant chimiquement des polymères naturels pour changer certaines de leurs propriétés. Les esters de cellulose (nitrocellulose, acétate de cellulose, etc.) ont toujours eu une certaine importance économique.

IV.1.3 Les polymères synthétiques

Ceux-ci sont entièrement créés par le génie humain et sont obtenus par la polymérisation de molécules monomères. Leur variété est énorme et ci-dessous sont les plus fréquemment considérés.

IV.2 Selon leurs domaines d'application

Il est difficile de proposer une classification complète, car la variété des propriétés a élargi les applications des polymères, notamment en tant que matériaux. Cependant, on peut classer les polymères en trois grandes catégories :

IV.2.1 Les polymères de grande diffusion

Encore appelés polymères de masse, dont la production annuelle est estimée à des millions de tonnes, ils sont une corvée quotidienne pour tous. Le polyéthylène, le polystyrène, le chlorure de polyvinyle et plusieurs autres entrent dans cette catégorie d'une grande importance économique [4].

IV.2.2 Les polymères techniques

Ils ont des propriétés qui leur permettent de remplacer de plus en plus les matériaux traditionnels (métaux, céramiques, etc.) dans de nombreuses applications. Les polyamides, poly acétals, etc. appartiennent à cette famille.

IV.2.3 Les polymères de fonction

Ils ont généralement une caractéristique qui détermine leur utilisation dans une application particulière. Cette catégorie comprend des polymères tels que conducteurs, photo-actifs, thermiquement stables et adhésifs. Tous les experts ne définissent pas ces catégories de la même manière, même s'ils s'accordent sur la terminologie.

IV.3 Selon leurs structures

Les polymères peuvent encore être classés en trois catégories selon leur dimensionnalité :

IV.3.1 Les polymères liniers ou monodimensionnels

Chaque chaîne polymère est composée d'un nombre potentiellement important mais fini d'unités monomères. Un tel système correspond à la polymérisation de monomères divalents, et les macromolécules linéaires peuvent être très schématiquement représentées par des traits pleins divisés en intervalles représentant des unités monomères (Figure 05).

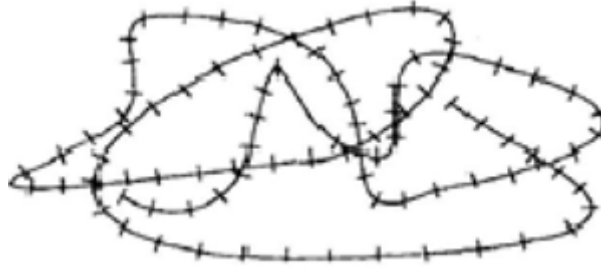


Figure I.05 : Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire [5].

IV.3.2 Les polymères bidimensionnels

Certains d'entre eux sont d'origine naturelle (charbon graphitique, kératine, etc.). Dans le domaine des polymères synthétiques, ils sont encore une curiosité de laboratoire. Ils se présentent sous la forme de couches bidimensionnelles dont l'épaisseur est comparable à celle de molécules simples. (Figure 06).

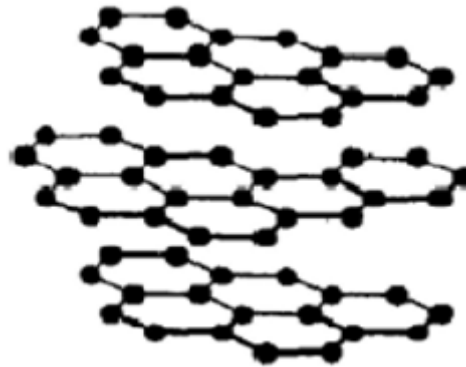


Figure I.06 : Représentation schématique d'un polymère bidimensionnel [5].

IV.3.3 Les polymères tridimensionnels

Celles-ci proviennent de la polymérisation de monomères de valence moyenne supérieure à 2, ou de la réticulation physique ou chimique de polymères linéaires (formant un réseau tridimensionnel). Étant donné que toutes les unités monomères qui composent l'objet sont

liées de manière covalente pour former une seule macromolécule, ses dimensions moléculaires peuvent être considérées comme infinies.

Les connexions sont développées en trois dimensions et l'élément de volume d'un tel système peut être représenté sur la (Figure 07).



Figure I.07 : Représentation schématique d'un polymère tridimensionnel [6].

IV.4 Selon leur comportement thermique

On peut regrouper les polymères selon leurs comportements thermiques comme suit :

IV.4.1 Les polymères thermoplastiques

Il se ramollit lorsqu'il est chauffé au-dessus d'une certaine température, mais se solidifie en dessous d'une certaine température. Ce type de polymère conserve de manière réversible sa thermo plasticité d'origine. Exemple : PE, PVC, PP, [7]

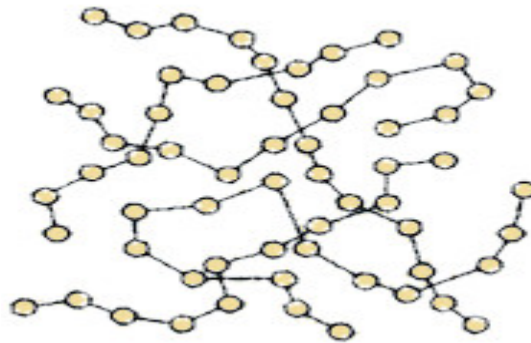


Figure I.08 : Réticulation des polymères thermoplastiques.

IV.4.2 Les polymères thermodurcissables

Lorsqu'il est exposé à la chaleur, il se ramollit d'abord puis durcit progressivement pour atteindre un état solide irréversible, exemple : Résines phénoliques/formaldéhydes ; Bakélite, Galalis, ... [7].

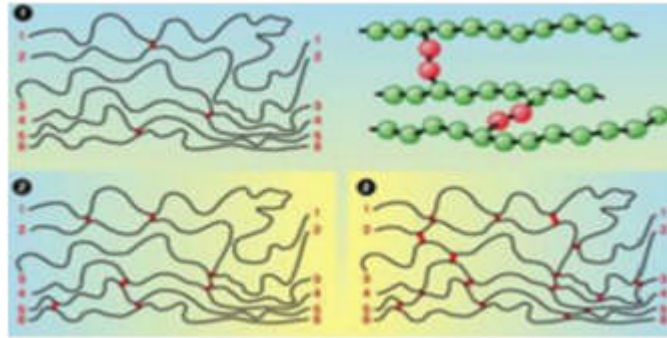


Figure I.09 : Réticulation des polymères thermodurcissable.

IV.4.3 Les élastomères

Les élastomères sont un type particulier de matériaux polymère, qui possède l'impressionnante faculté de pouvoir de supporter de très grande déformation, il se caractérise aussi par la quasi-recouvrance de ces propriétés initiales quand la sollicitation cesse.

Composé naturel ou synthétique présentant l'élasticité du caoutchouc à sa température d'utilisation, en général proche de la température ambiante. Ce sont des polymères dont la température de transition vitreuse se situe bien en dessous de la température ambiante, possède les propriétés suivantes : souple, il s'allonge facilement sous l'effet d'une traction, et possède donc un module d'élasticité peu élevé ; il possède une résistance à la rupture importante à son allongement maximal ; il est élastique et retrouve rapidement sa longueur initiale lorsque la sollicitation mécanique cesse [8].

IV.5 Selon leur morphologie

IV.5.1 Polymère amorphe

Ils sont transparents. En dessous de leur température de transition vitreuse (ramollissement) ils sont à l'état vitreux. Ils sont généralement peu résistants à la rupture. L'adjonction de particules d'élastomère permet de les rendre plus ductiles. Les chaînes macromoléculaires peuvent être orientées au cours de la mise en œuvre, ce qui leur confère des propriétés anisotrope. Les matières hautes températures amorphes ont une structure moléculaire disposée aléatoirement, et n'ayant pas de point de fusion précis, se ramollissent progressivement à mesure que la température augmente. Ces matières change de viscosité à mesure que la température augmente. Ces matières change de viscosités lorsque elles sont chauffées, mais ont rarement un flux aussi aisé que les matières semi-cristallines. Leur flux est isotrope, avec un retrait uniforme dans la direction du flux et transversal au flux. C'est pour quoi les matières amorphes ont des retraits au moule moins élevés, et une moindre tendance à la déformation que les matières semi cristallines.

Les résines amorphes perdent leur résistance rapidement au-dessus de leur température de transition vitreuse(T_g) [9]

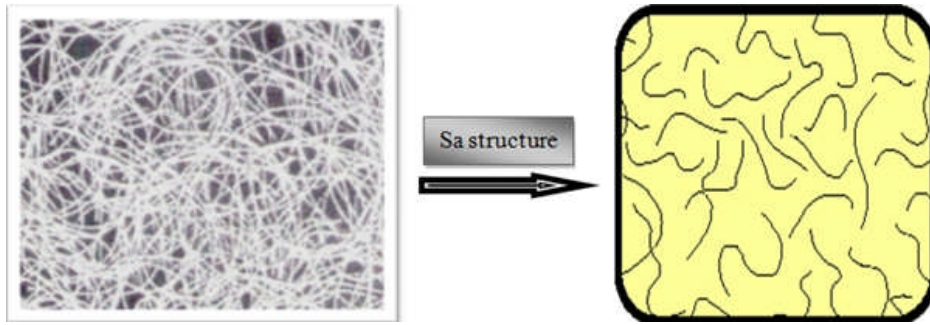


Figure I.10 : *Polymère amorphe.*

IV.5.2 Polymères semi-cristallins

Ils sont constitués de phases cristallines et de phases amorphes du même polymère. Leur microstructure est souvent complexe et, en conséquence, la description de leurs propriétés aussi. Leurs propriétés mécaniques sont généralement bonnes.

A titre d'exemple, la matière plastique des gobelets jetables est plus résistante à la déchirure dans la direction circonférentielle que dans la direction des génératrices, ce qui manifeste une anisotropie des propriétés mécaniques.

Les matières semi- cristallines ont une structure moléculaire hautement ordonnées, avec des points de fusion très précis. Elles ne ramollissent pas à mesure que la température augmente, puis se transforment rûpai dément en un liquide à basse viscisite.ces matières ont un flux anisotrope, se retirant moins dans la direction du flux que transversalement au flux.

Elles ont une excellent résistance chimique .Les semi -cristallines renforcées ont des propriétés haute-températures bien meilleures, et conservent des niveaux de résistances et de rigidité au-delà de leur température de transition vitreuse (Tg).

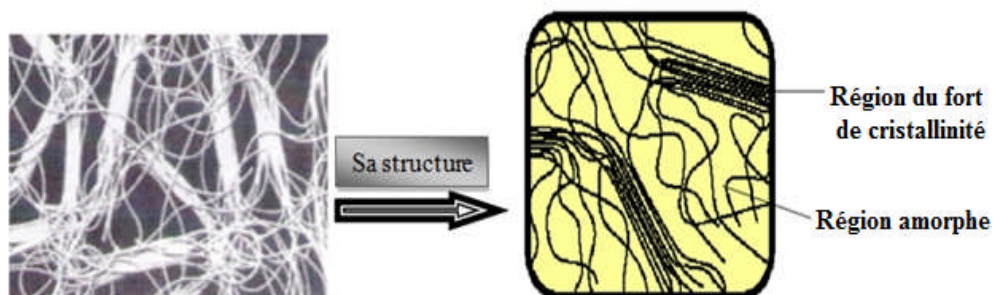


Figure I.11: *Polymère semi cristalline.*

Le taux de cristallinité est donné par la relation suivante :

$$X = \frac{\text{Nombre de monomères dans la phase cristalline}}{\text{Nombre total de monomères}}$$

IV.5.3 Polymère cristallin

Cet état est caractérisé par un arrangement organisé de molécules. La chaîne peut également être organisée de manière ordonnée et compacte. Les cristaux de polymère sont décrits par leurs réseaux et leurs motifs. Le réseau présente une périodicité dans trois directions spatiales. Les principales caractéristiques de l'état cristallin sont qu'il est plus dense que la phase amorphe, a un point de fusion et pas de transition vitreuse, et est plus rigide que la phase amorphe.

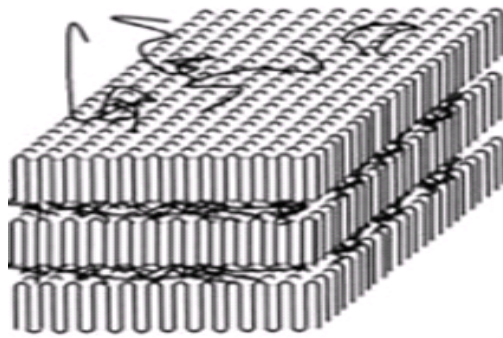


Figure I.12 : Polymère cristallin.

V. Propriétés des polymères

Les propriétés des matériaux polymères sont beaucoup plus sensibles aux influences extérieures telles que la température, la dureté, l'intensité de la contrainte appliquée, la lumière UV et les influences chimiques.

Les caractéristiques de résistance ne diffèrent que d'un ordre de grandeur. Outre les paramètres spécifiques au matériau (poids moléculaire, taux de ramification, mobilité de la chaîne, taux de réticulation, etc.) et les conditions externes (humidité, produits chimiques, température, vitesse de déformation, type et intensité de la charge appliquée) [10].

V.1 Propriétés thermiques des polymères [11]

Les propriétés mécaniques des polymères dépendent fortement de la température. À basse température, la plupart des polymères deviennent vitreux. Lorsque la température augmente, les états de transition

V.1.1 La température

La température de transition vitreuse " T_g " et la température de fusion " T_f " sont les deux températures fondamentales nécessaires dans l'étude des matériaux polymères. La température de transition vitreuse est partiellement importante pour les polymères amorphes, notamment les thermoplastiques amorphes, pour lesquels, il n'existe aucune force de cohésion importante autre que l'enchevêtrement.

Les zones cristallines ne fondent que bien au delà de la température de transition vitreuse. Les températures caractéristiques d'un seul et même matériau peuvent alors être classées de la façon suivante [12] :

Température de transition vitreuse < Température de cristallisation < Température de fusion < Température de décomposition thermique.

Selon la température à laquelle il est soumis, un matériau polymère peut présenter des comportements mécaniques différents. Ceci peut se produire pour les thermoplastiques semi cristallins dans un domaine même étroit de la température [12].

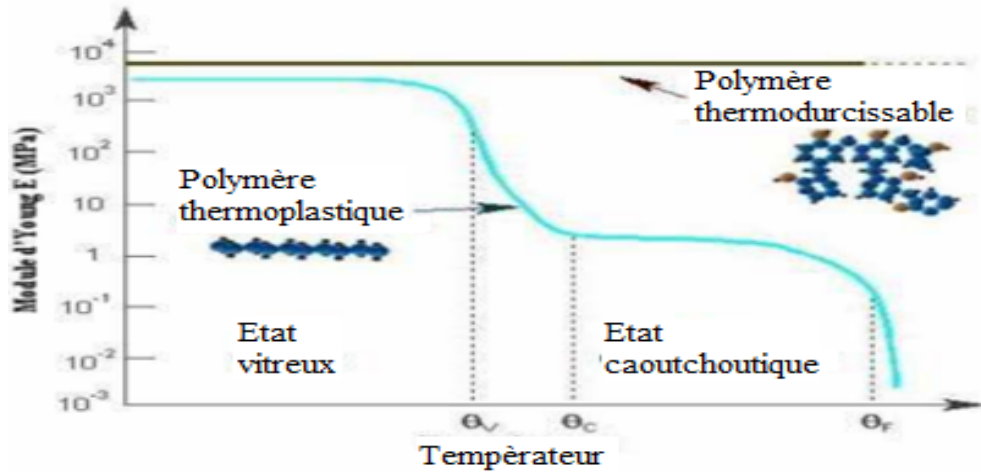


Figure I.13: Variation du module d'Young d'un polymère en fonction de la température [10]

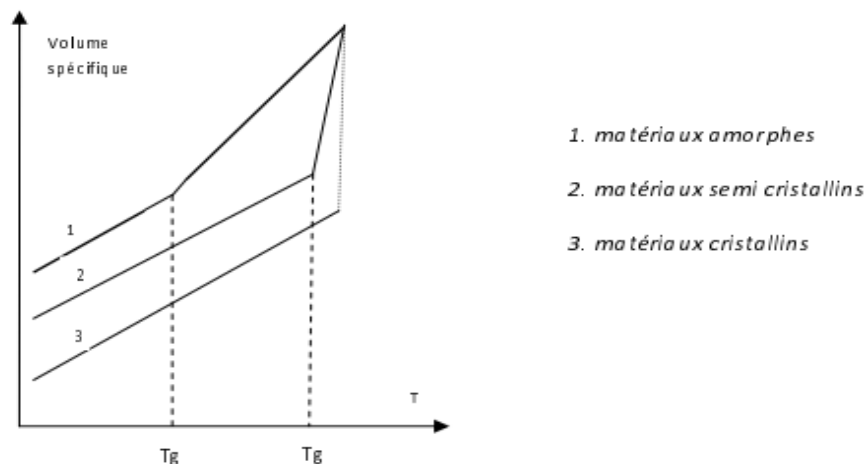


Figure I.14: Variation du volume spécifique en fonction de la température pour les polymères amorphes, partiellement cristallin et cristallin [10].

Pour un polymère totalement amorphe on voit qu'il y a un changement de pente bien net. Par convention, la température de transition vitreuse correspond à l'intersection des deux pentes. En revanche, lorsque le polymère est totalement cristallin, on ne remarque aucune variation dans la pente de la courbe jusqu'au moment de la fusion. Il n'y a donc pas de Tg pour ce type de polymère. [10]

V.2 Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques d'un polymère décrivent son comportement sous des charges mécaniques telles que la pression, la déformation, la torsion, le frottement, l'impact et les effets de la gravité [13].

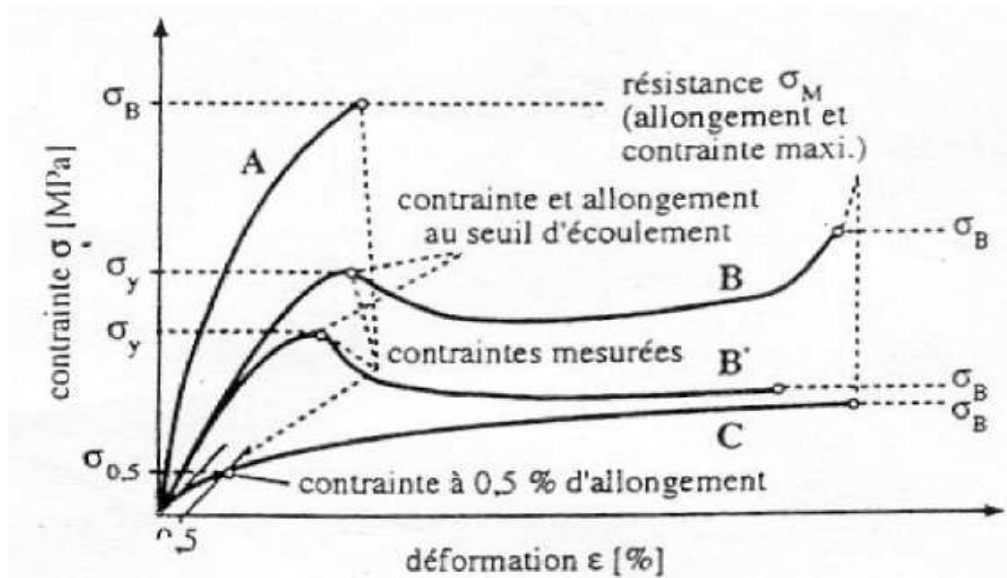


Figure I.15 : Grandeurs caractéristiques déterminées à partir des courbes Contrainte déformation (essai de traction) pour différents types de matériaux.

A : fragiles, B, B' : ductiles avec seuil d'écoulement, C : ductile sans seuil d'écoulement.

V.2.1 Contrainte au seuil d'écoulement σ_y

Elle est définie comme la contrainte en traction pour laquelle la pente de la courbe (a- E) s'annule pour la première fois.

V.2.2 Résistance en traction σ_m (ou contrainte maximale en traction)

Comme son nom l'indique, il caractérise la contrainte maximale qu'une éprouvette peut supporter lors d'un essai de traction [13].

V.2.3 Contrainte à x% d'allongement σ_x

La courbe (a-E) est définie comme la contrainte de traction décalée de la courbe linéaire d'origine d'une distance correspondant à x% d'allongement [13].

V.2.4 Contrainte à la rupture σ_{rup}

Celle-ci est déterminée lorsque l'éprouvette casse (lorsqu'il n'y a pas de limite d'élasticité et donc pas de contrainte correspondante, ou lorsque la contrainte à x % d'allongement ne peut être déterminée) [13].

V.2.5 La résistance en compression σ_{cm} .

Les mesures sont faites sur de petits spécimens. Afin de limiter le risque de flambage, la présence de fissures et petites fissures est moins importante dans ce type d'essai que dans les essais de traction, car l'action de la compression peut refermer ces défauts morphologiques. Pour cette raison, la résistance à la compression des matériaux polymères est généralement supérieure à la résistance à la traction.

V.2.6 La résistance en cisaillement τ_m

Peut être mesuré sur des éprouvettes cylindriques soumises à des contraintes de torsion. Une déformation inégale de l'échantillon doit être évitée pendant l'essai.

La résistance au cisaillement "T." est généralement mieux définie en termes de résistance à la traction en utilisant le critère de déformation de Haber-von-Mises-Henkey. On peut en général appliquer le classement suivant [14] :

Résistance en cisaillement < Résistance en traction < Résistance en compression < Résistance en flexion.

V.3 Propriétés techniques

Les propriétés mécaniques décrivent leur comportement vis à vis des sollicitations mécaniques telles que pressions, étirements, torsions, frottements, chocs et effets de la pesanteur. Autrement dit, est-ce que la structure et la forme du polymère sont stables dans le temps, même s'il est un peu bousculé? Certains polymères seront appréciés pour leur bonne stabilité dimensionnelle (par exemple les polyesters aromatiques). D'autres, les élastomères, seront recherchés pour leur élasticité qui leur confère une excellente capacité d'absorption des chocs.

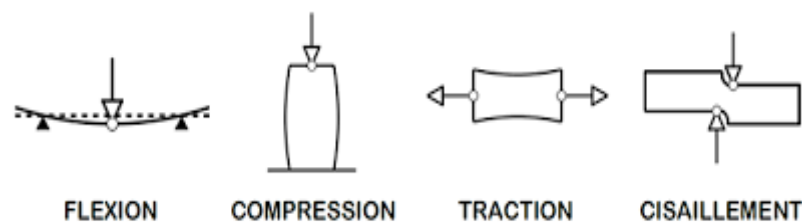


Figure I.16 : Différentes sollicitations mécaniques.

VI. Mise en œuvre des polymères [15]

Le choix de la technologie de transformation du plastique est déterminé par plusieurs facteurs.

- Selon la nature du matériau (thermoplastique ou thermodurcissable).
- La thermo plasticité dépend de la température de ramollissement.
- Dépend de la stabilité à l'air du matériau de moulage.
- Varie selon la forme et la taille du produit fini.

Certains de ces processus sont très similaires à ceux utilisés dans la fabrication des métaux et des céramiques.

VI.1 Mise en œuvre des thermoplastiques

Pour mettre en œuvre les thermoplastiques, vous pouvez commencer par :

- Poudre ou granulés,
- Produits semi-finis : plaques, feuilles ou films, objets en matière déformable,
- Corps étrangers (objets, substances) et poudres ou pâtes thermoplastiques.
- Un apport d'énergie externe (échauffement) ou un apport d'énergie interne (par frottement) transforme le matériau de l'état solide à l'état plastique ou fondu.
- Un moule ou matrice moule ce matériau.
- Un système de refroidissement gèle le matériau thermoplastique dans la forme souhaitée.

Les objets peuvent recevoir de nouvelles implémentations (par exemple : assiettes, feuilles) ou déchiqueter pour le recyclage.

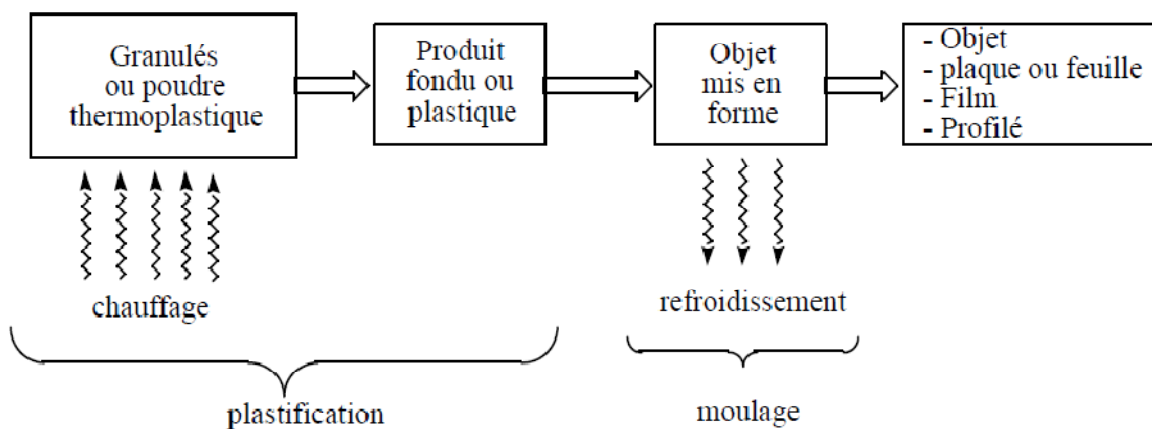


Figure I.17 : schéma de mise en œuvre des thermoplastiques.

VI.2 Mise en œuvre des thermodurcissables

Les composants de base sont :

- Mélanger un ou plusieurs liquides ensemble, mélanger avec une pâte ou mélanger une pâte.
- Poudres ou granulés de matériaux préparés.
- Les réactions chimiques sont contrôlées par des catalyseurs et des initiateurs.
- L'initiation de la réaction est provoquée par le mélange des produits ou par l'apport d'énergie (généralement de la chaleur).

- Le produit est mis en forme avant ou pendant l'initiation de la réaction (moulage, injection, laminage dans un moule, etc.). Une fois la réaction terminée (90-100 °C), l'objet est retiré du moule. À ce moment, la pièce peut être chaude ou froide.

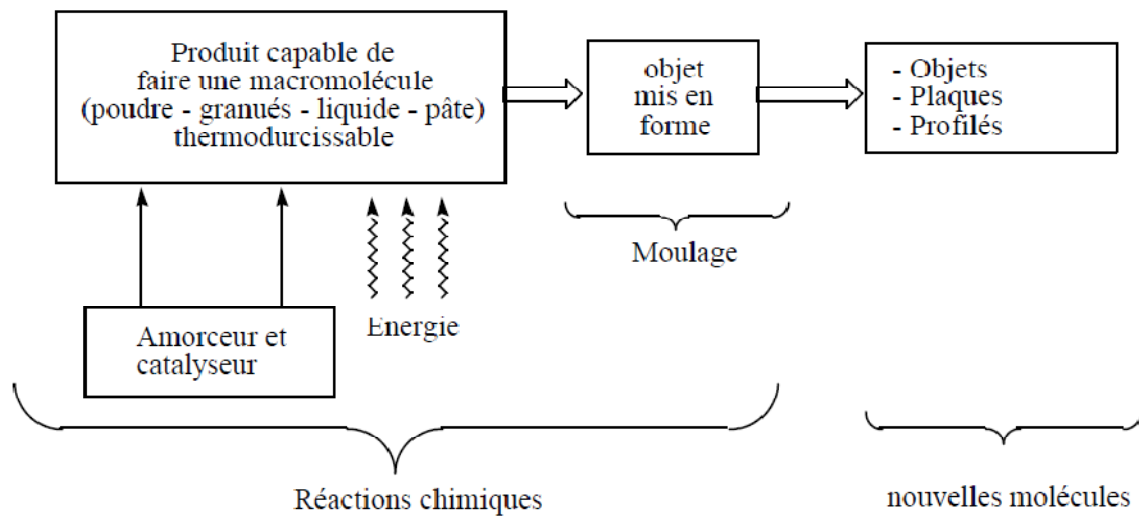


Figure I.18 : schéma de mise en œuvre des thermodurcissables.

VI.3 Les adjuvants

Dans la plupart des cas, les nouveaux polymères ne peuvent pas être utilisés tels quels. Divers additifs sont utilisés pour les transformer plus facilement ou pour leur conférer des propriétés recherchées. On en distingue plusieurs espèces.

- ❖ **Les adjuvants technologiques** : Plus facile à utiliser sur les machines de traitement. Par exemple, les lubrifiants et les stabilisants thermiques dans les conduits des machines de moulage par injection empêchent la surchauffe localisée et ses effets néfastes.
- ❖ **Les adjuvants spécifiques** : Ils protègent le polymère des facteurs de vieillissement ou modifient certaines des propriétés physiques du polymère.
 - Les antioxydants et les stabilisants réduisent les effets des oxydants, de la chaleur et des radiations.
 - Les plastifiants sont des composés organiques de poids moléculaire plus ou moins élevé qui s'intercalent entre des chaînes polymères pour réduire les forces attractives qui les unissent et leur donner de la souplesse.
 - Les retardateurs de flamme réduisent l'inflammabilité.
 - Les teintures donnent le look désiré.
 - Les charges dites inertes (farine de bois, craie...) réduisent les coûts et contribuent à améliorer certaines propriétés (dureté, résistance à l'écrasement...).

Les agents de renforcement sont des polymères (poids moléculaire élevé et propriétés différentes de la matrice) ou des fibres (fibres de verre, de carbone, etc.) qui améliorent de

nombreuses propriétés mécaniques telles que la ténacité, la résistance aux chocs, la résistance à la traction et la résistance à la chaleur.

VII. Transformation des polymères [16]

Les techniques de transformation du plastique varient en fonction de la nature du polymère et de la destination du produit final. De nombreuses méthodes sont couramment utilisées pour fabriquer des pièces et des objets en polymère. Les procédés de fabrication industrielle les plus importants sont : Moulage par injection, extrusion, calandrage, roto moulage, thermoformage.

VII.1 L'injection

VII.1.1 L'injection par moulage

Le moulage par injection, également appelé moulage par injection plastique, est le processus de fabrication des thermoplastiques. La plupart des pièces thermoplastiques sont fabriquées par moulage par transfert de plastique.

Après ramollissement de la matière plastique, celle-ci est injectée dans le moule et refroidie. Le moulage par injection est une technique de fabrication de pièces en grandes ou très grandes séries. Il s'agit principalement de plastiques et d'élastomères (caoutchoucs), mais également de divers métaux et alliages à point de fusion relativement bas : alliages d'aluminium, de zinc et même de laiton.

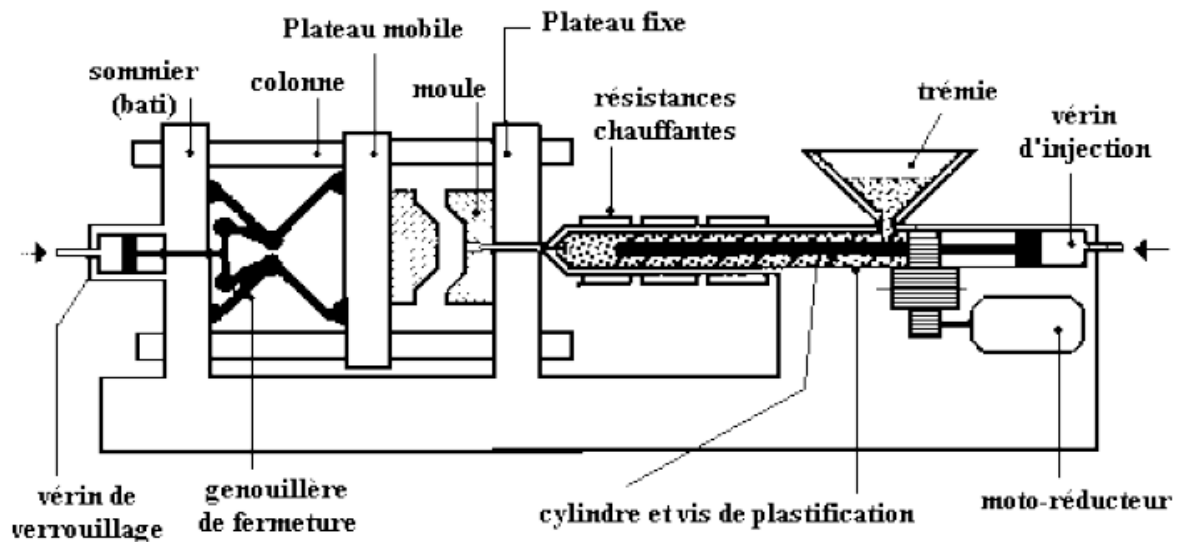


Figure I.119 : Structure de la presse d'injection.

Les pièces moulées par injection sont utilisées dans de nombreux produits : Automobiles, électroménager, matériel informatique, mobilier. Pour les pièces en plastique, les dimensions

vont de quelques millimètres à plusieurs mètres dans la gamme éléments de carrosserie, tables de jardin.

VII.1.2 Procédé de mise en œuvre par injection plastique

- La matière plastique avant déformation se présente sous forme de petits granulés, dépassant rarement quelques millimètres. Pastilles utilisées pour alimenter la vis de plastification (type vis continue).
- Chauffé et trempé via un manchon plastifiant. L'effet combiné de la rotation de la vis de plastification (entraînée par un moteur hydraulique) et de la température de l'enveloppe ramollit les granulés de plastique jusqu'à un état visqueux.
- Ce matériau est délivré à l'avant de la vis de plastification, fournissant un matériau prêt à l'injection (c'est ce qu'on appelle l'étape d'injection). • Puis la phase d'injection dynamique commence. Lors de cette étape, la matière devant la vis de plastification est injectée sous haute pression dans un moule (ou cavité) conformé à la pièce souhaitée. Le moule est contrôlé en dessous de la température de traitement (de l'ordre de 15°C à 130°C dans certains cas).
- La troisième étape est la phase de rétention. A ce stade, une pression constante est appliquée pendant une période de temps pour continuer à alimenter la cavité même si la cavité est remplie. Cela permet de compenser le rétrécissement lorsque le matériau refroidit. La pièce est refroidie quelques secondes puis retirée.
- Vous pouvez démarrer un nouveau cycle.
- **Paramètres et réglages** : Les temps de retard les plus importants à régler sont : Dosage, remplissage, ouverture et fermeture, décharge, maintien de la pression.
- **Autres paramètres**
 - Température du fourreau, température du matériau, température du moule d'injection
 - Pression d'injection et de maintien, contre-pression, vitesse de vis, course de dosage
 - Course d'ouverture, course d'éjection, etc...

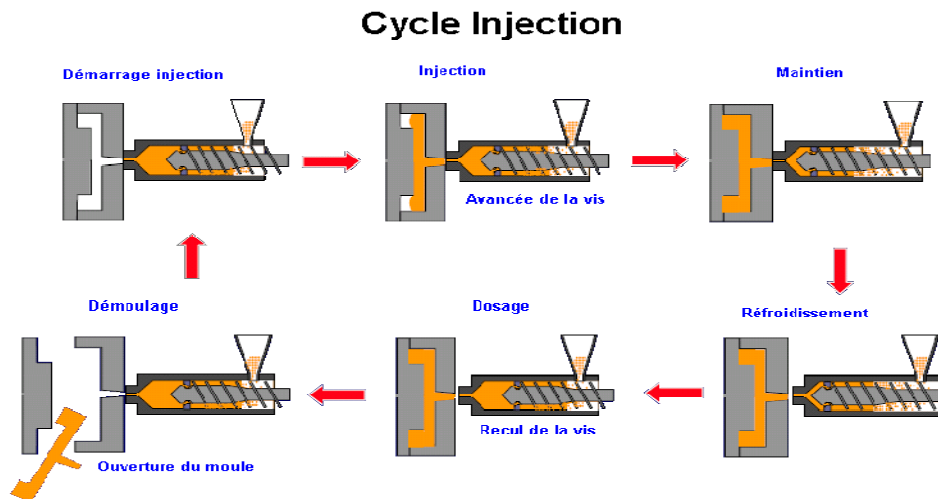


Figure I.20 : cycle d'injection.

VII.2 L'extrusion

Il s'agit d'une extrudeuse qui peut fabriquer des produits semi-finis de différentes formes. Cette technologie de traitement est utilisée pour produire des produits très longs tels que des profilés de portes et de fenêtres, des tuyaux, des câbles, des fibres optiques, des tubes, des treillis, des panneaux et des feuilles de plastique. Les tubes ou profilés sortent en continu, sont refroidis puis coupés à la longueur souhaitée. En ajoutant plusieurs couches de matériau, vous pouvez créer des produits aux propriétés complexes.

L'extrusion est un processus de déformation continue. Comme une injection, elle comprend les étapes suivantes :

- Les pellets entrent dans un tube chauffé avec une vis sans fin.
- Le matériau souple homogénéisé est pressé, compressé et passé à travers une filière pour former la forme souhaitée.

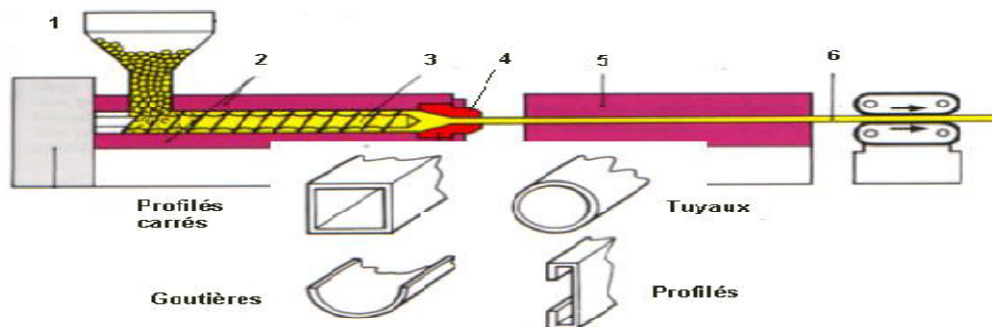


Figure I.21 : machine à extrusion.

VIII. Conclusion

Ce chapitre propose une revue bibliographique des propriétés générales des polymères. Les polymères sont donc classés comme des matériaux complexes, contrairement aux matériaux composés de petites molécules.

De plus, nous avons exploré les stratégies de traitement des polymères et nous nous sommes concentrés sur différentes méthodes de synthèse.

CHAPITRE
II
LE RECYCLAGE DES
POLYMÈRS

I. Introduction

Le plastique est omniprésent dans nos vies. Outre ces avantages, une grande quantité de déchets est générée après la consommation. Dans la plupart des cas, leur faible biodégradabilité rend leur diffusion dans la nature persistante et inesthétique. Il y a donc lieu de favoriser le recyclage, ou la réutilisation, qui économise de grandes quantités d'énergie primaire, notamment le pétrole, principale matière première de la plupart des plastiques.

Ce chapitre vise à donner une meilleure compréhension de la problématique du recyclage des déchets polymères en général, et des déchets automobiles en particulier, et des évolutions que l'on peut attendre dans ce domaine, en apportant quelques définitions basées sur un certain nombre de recherches. Nous explorons ensuite comment ce type de « déchets » peut avoir plusieurs vies grâce à la réutilisation, au recyclage ou à la récupération d'énergie. Et faites toujours attention au côté technique, à ce qui se passe déjà aujourd'hui et à ce qui vous attend dans le futur.

II. Circuit du recyclage des polymères en général

Par définition, le recyclage est le processus de transformation d'un produit en une ressource réutilisable dans la même industrie ou un autre domaine d'activité à la fin de son cycle.

Les impacts écologiques ont deux impacts majeurs :

- Réintroduction de grandes quantités de déchets et de la pollution qui en résulte (certains matériaux mettent des décennies voire des siècles à se décomposer).
- Conservation des ressources naturelles en utilisant des matériaux recyclés au lieu de matériaux qui devraient être récupérés.



Figure II.01 : *symbole Du recyclage.*

II.1 Les principes de recyclage

Le recyclage évite le gaspillage des ressources naturelles et de l'énergie, sécurise l'approvisionnement en matières premières de l'industrie et réduit l'impact environnemental. En incluant de nouvelles matières premières recyclées (MPR), vous pouvez :

- Réduction de la consommation d'énergie et d'eau,
- Réduction des émissions de CO₂,

Depuis les années 2000, le recyclage est la vraie réponse à :

- Production industrielle selon les directives de gestion des déchets :
 - ✓ Objectifs de recyclage, développement du secteur de la responsabilité élargie des producteurs (REP).
 - ✓ Demande croissante de matériaux.
 - ✓ Contraintes écologiques et économiques.

Cette évolution a conduit à la dynamique d'industrialisation du recyclage portée par l'économie circulaire telle que nous la connaissons aujourd'hui.

II.2 L'infrastructure de recyclage

L'industrie du recyclage des plastiques est encore jeune. Il y a à peine Vingt ans, il n'y avait pratiquement aucune technique et ni infrastructure. Aujourd'hui, ce recyclage connaît des progrès remarquables. Combiné à d'autres composantes de la gestion des ressources, il permet de réduire les quantités de déchets qui autrement seraient acheminés vers les dépotoirs. Il doit y avoir une infrastructure de base pour qu'on puisse mettre au point des méthodes rentables et efficaces de recyclage des plastiques usées, qu'on les récupère du circuit des déchets et qu'on les réintègre au processus de fabrication industrielle. On a besoin d'une infrastructure de recyclage appropriée qui assurera le retour aux fabricants des plastiques usées.

Comme pour toute autre matière recyclable, l'infrastructure de recyclage des plastiques comporte quatre éléments :

II.2.1 La collecte des déchets

Le tri à la source, qu'il s'agisse de déchets industriels ou domestiques, est un outil important pour le développement du recyclage. La collecte sélective est la forme la plus courante. Cela facilite la formation en masse de certains types de déchets et permet la construction de filières de recyclage économiquement viables.



Figure II.02 : collecte des déchets.

II.2.2 Tri des déchets

Comme déjà mentionné, l'efficacité de la filière de recyclage repose sur l'étape élémentaire du tri. Ainsi, après collecte, les déchets pré-triés par le consommateur sont acheminés vers des centres de tri où différentes opérations mécanisées filtrent la part recyclable des déchets et optimisent les opérations de valorisation. Un tri manuel par des opérateurs devant le convoyeur complète souvent ces opérations automatisées.

Des boules de déchets sont générées à la sortie.



Figure II.03 : Le tri des déchets.

II.2.3 La transformation

Une fois les déchets triés et emballés, ils sont ensuite traités par des presses à balles et des entreprises de recyclage qui achètent les déchets au centre de tri. Le conditionnement prépare les déchets avant leur recyclage. La matière est nettoyée et découpée pour un recyclage aisé et intégrée dans des filières de traitement spécifiques. Chez le recycleur, la matière traitée renaît. Ils sont ainsi réutilisés dans la fabrication de nouveaux produits. Certains recycleurs peuvent également produire directement de nouveaux produits, notamment des bouteilles en plastique PET.



Figure II.04 : Transformation des déchets.

II.2.4 Réutilisation

Les matériaux issus du recyclage sont achetés par des entreprises et des organisations, introduits dans leurs processus de production et utilisés pour créer une variété de nouveaux produits, qui sont ensuite commercialisés pour servir les consommateurs et l'industrie.

Prenons l'exemple des déchets plastiques recyclables. Les déchets plastiques peuvent changer de plusieurs manières. Selon la couleur et la composition, il peut s'agir d'un couvre-lit, d'un pull, d'une poubelle, d'un arrosoir ou encore d'un molleton.



Figure II.05 : réutilisation des déchets.

II.3 Les différents procédés de recyclage

La figure II.06 représente le devenir des matières plastiques soumis à une transformation et leur intérêt économique.

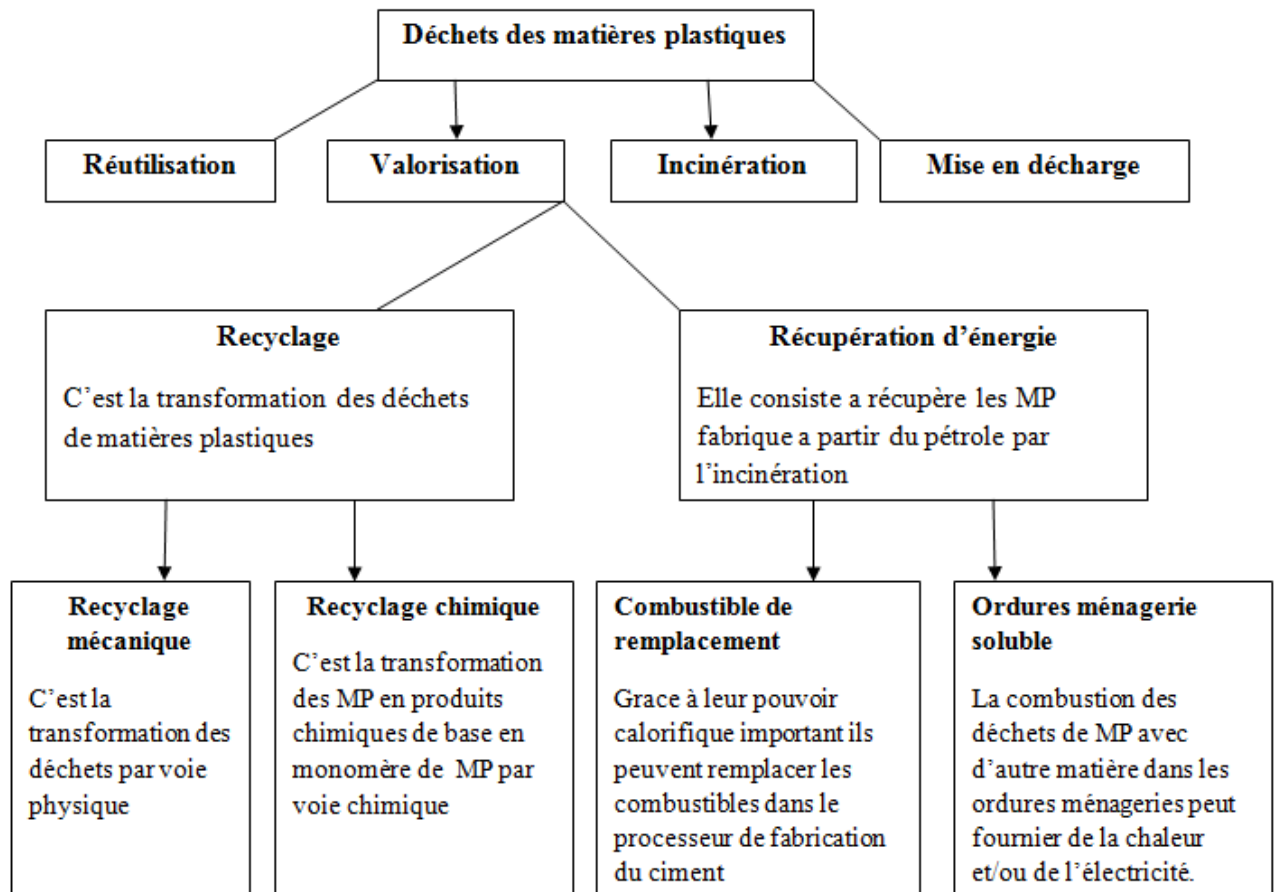


Figure II.06 : Représente le devenir des matières plastiques soumis à une transformation et leur intérêt économique.

II.3.1 Le procédé mécanique

Le procédé mécanique comporte les étapes suivantes :

- **Inspection :** On vérifie les intrants plastiques pour s'assurer qu'ils ne contiennent pas de contaminants et s'ils sont d'un type que le recycleur ne peut pas traiter. (Certaines installations traitent divers types de plastique tandis que d'autres n'en traitent qu'un seul).
- **Le lavage et le broyage :** Les plastiques sont broyés et lavés. (L'eau de lavage n'est pas nocive et elle peut être filtrée et réutilisée).
- **Le tri dans la cuve de flottaison :** Si on traite des plastiques mixtes, ils sont séparés dans une cuve de flottaison (Certains plastiques flottent, d'autres pas).

- **Le séchage** : Les granules propres doivent être complètement séchés. (Toute humidité résiduelle peut affecter la qualité du produit fini).
- **La fusion** : Les granules séchés sont passés dans une machine à extrusion où ils se liquéfient sous l'effet de la chaleur et de la pression. (Chaque type de plastique a un point de fusion qui lui est propre).
- **Le filtrage** : Le plastique liquéfié est passé dans un filtre fin pour en éliminer tout contaminant qui aurait résisté au lavage.
- **La granulation** : Les pailles sont refroidies, coupées en morceaux et entreposées pour la vente et l'expédition.

II.3.2 Le recyclage en vrac

Le recyclage en vrac est celui où on utilise comme matière première, des déchets de plastiques mixtes tels quels. Il diffère sensiblement du recyclage mécanique puisqu'il ne requiert ni triage, ni lavage des plastiques, qui sont plutôt directement moulés en produits tels des plastiques simili-bois et des substituts aux matériaux de construction. Grâce à leur résistance à l'eau, aux insectes, aux champignons et aux intempéries, les plastiques simili-bois sont un bon substitut pour le bois traité sous pression.

II.3.3 Recyclage chimique et thermique

Il s'agit d'une nouvelle approche au recyclage des plastiques usées qui peut augmenter considérablement les plastiques recyclables. Les procédés de recyclage chimique et thermique donnent une variété de produits finis qui nous ramènent aux composantes originelles des plastiques. En fractionnant les plastiques (polymères) en leurs composantes moléculaires d'origine (monomères), ou en divers autres produits pétroliers.

- **Le procédé chimique** : Le procédé chimique par lequel certains plastiques sont reconvertis en matières premières s'appelle dépolymérisation. Deux variations de ce procédé - la méthanolyse et la glycolyse - sont employées pour produire certains polymères, exemple du (PET), le plastique communément utilisé dans les bouteilles de boissons gazeuses.
- **Le procédé thermique** : Grâce à un procédé appelé «décomposition thermique», les plastiques sont chauffés dans une unité de recyclage à une température élevée où ils sont convertis en produits pétroliers liquides qui servent à fabriquer d'autres plastiques. Cette technologie de recyclage permet aussi de produire de petites quantités de carbone solide et de gaz légers.

Lorsqu'il est intégré aux systèmes mécaniques traditionnels de recyclage, ce procédé thermique offre plusieurs avantages importants :

- Les plastiques post-consommations contenant de hauts niveaux de contamination (déchets alimentaires, étiquettes) peuvent être recyclés en toute sécurité ;
- On peut recycler des plastiques mixtes et en vrac ;
- C'est un procédé sans danger pour l'environnement.

Bien que plusieurs de ces technologies de recyclage des plastiques soient encore au stade du développement, elles offrent la possibilité d'accroître la capacité des infrastructures de recyclage à conserver les ressources naturelles et à réduire les déchets.

II.4 Evaluation des impacts de recyclage [17]

Le recyclage évite la mise en décharge des déchets et permet d'éviter, par conséquent, des émissions de gaz à effet de serre. Il permet également de remplacer le plastique vierge, ce qui évite tout impact environnemental lié à l'extraction et au raffinage. Parallèlement, le recyclage offre des avantages économiques et sociaux : activité économique, innovation, emploi.

II.4.1 Impacts économiques

Le recyclage est de plus en plus important pour l'économie car il fournit des intrants importants en remplaçant les matières premières vierges et en améliorant l'efficacité d'utilisation des ressources pour la production.

Les recettes directement issues du recyclage des plastiques apportent une contribution substantielle et croissante à l'économie. En tant qu'activité économique, le recyclage a un impact approximativement deux fois supérieur à celui de la mise en décharge.

Un renforcement de l'objectif de recyclage des plastiques offrirait un climat d'investissement plus stable pour le secteur. Il encouragerait les investissements dans de nouvelles machines et logistiques, la modernisation des infrastructures actuelles de gestion des déchets et l'amélioration des systèmes de collecte, c'est-à-dire la collecte séparée.

En fonction des conditions du marché, les plastiques recyclés représentent une économie estimative de 25 à 50% par rapport aux plastiques vierges en termes de prix du marché uniquement (c'est-à-dire même sans prendre en compte l'ensemble des autres avantages associés). Pour les plastiques mixtes, la différence par rapport au PP vierge de catégorie injection peut être de 50%, voire davantage.

Le secteur du recyclage des plastiques fait actuellement économiser beaucoup d'argent, si tous les plastiques étaient recyclés, les économies progresseraient de façon considérable.

II.4.2 Impacts environnementaux

Le recyclage occupe une place importante dans la directive-cadre sur les déchets. Après la prévention et la réutilisation, le recyclage est préféré aux solutions de valorisation énergétique et d'élimination. Ses avantages environnementaux par rapport aux autres alternatives ont fait l'objet de nombreuses études et incluent des réductions en matière de consommation d'énergie, d'émissions de gaz à effet de serre, d'épuisement des ressources (et d'occupation des sols), d'émissions de particules, d'acidification, de pollution sonore, olfactive et visuelle. Dans la plupart des cas, le recyclage présente également des impacts environnementaux plus faibles que la production de matières vierges. Et dans de nombreux cas, notamment pour les

secteurs de l'automobile (parties légères) et du bâtiment (isolation), les produits à base de plastique recyclé permettent de réaliser des économies d'énergie et de CO₂ non négligeables.

Du point de vue de l'efficacité de l'utilisation des ressources, en se substituant au plastique vierge le recyclage réduit l'extraction des matières premières, garantit que les ressources restent dans l'économie, et contribue à découpler l'utilisation des matériaux de la croissance économique.

II.4.3 Impacts en matière d'emploi

Le recyclage apporte une contribution importante à la création de nouveaux emplois. Il crée plus d'emplois assortis de revenus plus élevés que la mise en décharge ou l'incinération.

Bien que les données officielles ne soient pas disponibles pour les plastiques séparément, l'emploi lié au recyclage de tous les matériaux dans les pays européens a augmenté progressivement pour passer de 422 emplois par million d'habitants en 2000 à 611 emplois en 2007.

L'emploi dans le secteur du recyclage des plastiques inclue le travail traditionnel de tri manuel peu qualifié, mais aussi de plus en plus des emplois très qualifiés, allant de la collecte et du tri au traitement et à la transformation des matériaux jusqu'à la fabrication des produits. Les emplois peu qualifiés peuvent être occupés par des employés disposant de moins d'options dans le reste de l'économie, ce qui constitue un facteur important de réduction de la pauvreté.

III. Circuit du recyclage des polymères de déchets automobiles [18]

L'industrie automobile produit une pollution directe : Émissions atmosphériques, nuisances sonores, déchets des usines de production, déchets indirects des véhicules hors d'usage. Pour atténuer ces risques, des mesures ont été prises, sur une base volontaire ou légale, pour modifier les pratiques de conception, de fabrication, d'utilisation des produits et de gestion des déchets.

Dans ce contexte, recycler ces déchets polymères sous forme de matériaux et les réintroduire dans le circuit industriel joue un rôle très important. La chaîne de recyclage suit les mêmes étapes que pour les polymères courants, commençant par la collecte et le tri et se terminant par la vente des pièces en plastique recyclées.

III.1 Réglementation sur l'automobile [18]

Cette partie a pour objectif de développer les aspects réglementaires de la mise en place des normes dans les entreprises de réparation et de démontage de carrosseries automobiles et de donner des exemples de traitement des différents déchets polymériques issus de la réparation et du démontage.

III.1.1 Les véhicules en réparation

Les professionnels de la réparation automobile ont la responsabilité d'organiser le recyclage de leurs déchets polymériques et doivent les trier et les stocker dans des installations agréées. D'autre part les déchets non recyclables sont remis à des entreprises d'élimination agréés reconnues par les Pouvoirs publics, comme c'est le cas pour la récupération des huiles usagées, des batteries, et des pneus.

III.1.2 Les véhicules en fin de vie

Dans plusieurs pays du monde et notamment en Europe, il existe un décret relatif à la construction et à la destruction des véhicules hors d'usage (V.H.U). Cette réglementation oblige les constructeurs de manière catégorique à la collecte, le retraitement et la destruction des VHU et doivent mettre en place une filière adaptée.

III.2 Introduction des polymères dans l'industrie automobile [19].

Le secteur automobile est confronté à de grands défis, notamment en raison des restrictions réglementaires sur le périmètre de recyclage des véhicules en fin de vie. Dans ce contexte, les constructeurs font de la construction légère des véhicules une de leurs priorités et les matériaux organiques (plastiques, composites, élastomères, etc.) vont jouer un rôle de plus en plus important. En fait, le nombre de voitures vendues ne cesse d'augmenter d'année en année. Compte tenu du poids toujours croissant des plastiques dans les automobiles aujourd'hui, le marché mondial est estimé à plus d'un milliard d'unités, 8 kg en 1960, 115 kg en 1990, 200 kg aujourd'hui, et probablement 400 kg dans les prochaines années, soit 40 % du poids moyen d'une voiture.

Cependant, à mesure que l'économie se développe, les constructeurs sont contraints de repenser leurs stratégies, notamment en augmentant la proportion de matériaux recyclés dans les véhicules neufs. Ils se sont fixé des objectifs ambitieux, notamment en matière d'intégration de matières plastiques recyclées.

Le tableau ci-dessous représente les avantages des plastiques utilisés dans l'automobile :

Tableau II.01: *Propriétés d'usage des MP dans l'industrie automobile.*

Industrie automobile	Propriétés recherchée dans les MP
	Une plus grande liberté du design
	Intégration fonctionnelle
	Une diminution des coûts de revient
	Une plus grande automatisation des tâches
	Un allègement des poids du véhicule entraînant une économie de carburant
	Une sécurité accrue en cas de chocs
	Un meilleur confort pour les usagers

III.3 Les polymères utilisés dans l'industrie automobile [18] [19]

Le polypropylène (PP) est l'un des polymères les plus couramment utilisés dans la construction automobile, représentant 5 % de la masse totale du véhicule et 43 % du MP utilisé (voir tableau 3). Grâce à ses propriétés intéressantes : Haute cristallinité (généralement bonne résistance mécanique et résistance à l'impact en présence d'élastomères EPR, EPDM...), stabilité dimensionnelle en service, faible coût, facilité de mise en œuvre et bonne recyclabilité. En raison de l'augmentation significative de la consommation de polypropylène dans l'industrie automobile, il convient d'envisager sérieusement le recyclage de ce matériau après utilisation. Malheureusement, plusieurs problèmes limitent cette voie de récupération :

- L'essentiel du polypropylène utilisé dans l'automobile se présente sous forme de mélanges de polymères (PE, ABS, PVC...), d'élastomères (EPR, EPDM...) et de charges (CaCO₃, talc, noir de carbone...) ;
- Diverses parties de la voiture sont recouvertes d'un ou plusieurs types de peinture (polyuréthane, acrylique, etc.) qui peuvent altérer les propriétés du matériau lors du recyclage.

Outre le polypropylène, le polyuréthane (PU) et le polychlorure de vinyle (PVC), d'autres polymères sont également utilisés, quelques exemples dans l'industrie automobile (poids kg hors fibres et mastics) sont indiqués dans le tableau ci-dessous :

Tableau II.02: Exemple de l'utilisation des polymères dans l'automobile (en kg)

Polymères	Renault Modus	Smart Forfour	BMW Serie1	Toyota Aygo	Honda FR-V
Polypropylène	77	64	72	47	68
Polyuréthane	19	29	27	12	19
Polyamide	16	10	28	8	6
Polyesters saturés	5	2	4	1	3
Polyéthylène	8	8	12	7	9
PVC	5	4	7	3	6
ABS	5	2	14	1	3
Polyacétal (POM)	2	1	3	3	4
Polycarbonate	2	35	2	1	2
Autres	10	27	28	10	34
Totale	148	180	200	90	154

Les métaux ferreux, notamment l'acier, représentent environ 75 % de la masse des véhicules hors d'usage. Après plusieurs étapes de traitement dans les broyeurs, ce matériau est presque entièrement recyclé dans les aciéries et les fonderies. Les métaux non ferreux, principalement le cuivre et l'aluminium, sont de plus en plus demandés sur le marché des matériaux en raison

de leur valeur élevée. Les difficultés de recyclage proviennent des matériaux non métalliques. Le défi consiste à rendre le plastique, le verre, la mousse et le caoutchouc recyclables pour respecter le quota requis.

III.4 Distribution des polymères dans un véhicule [20]

Les polymères sont utilisés dans les différents modules d'un véhicule :

- Les pièces intérieures de l'habitacle (env. 46% des MP),
- Les pièces extérieures et la carrosserie (env. 29% des MP),
- Les pièces de structure et les réservoirs (env. 13% des MP),
- Les pièces sous-capot (env. 12% des MP).

On illustre cette répartition par deux exemples à travers le tableau et l'image suivants :

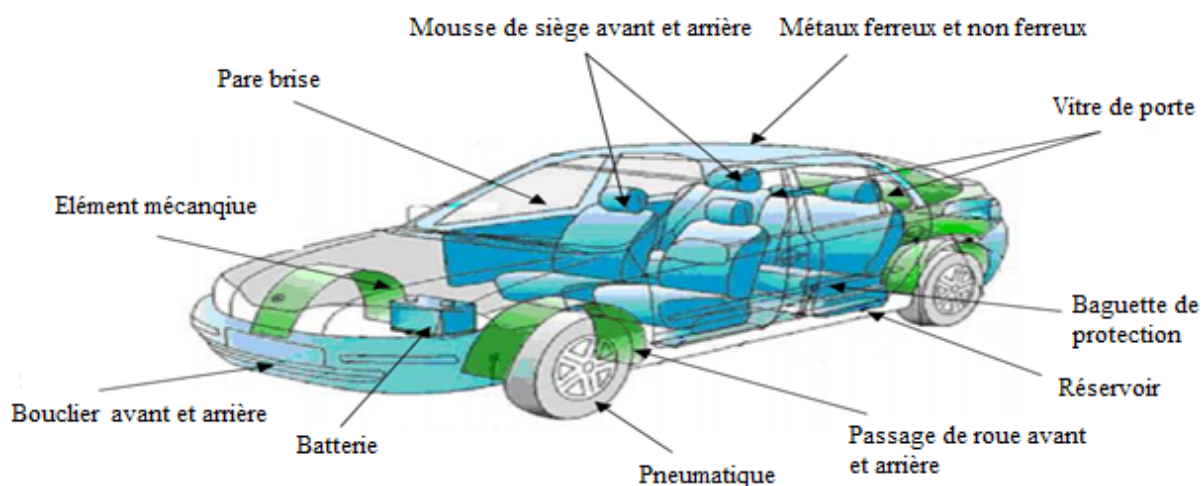


Figure II.07 : Répartition des pièces polymériques dans un véhicule.

Le ci dessous (tableau II.03) répartition des résines utilisées dans l'industrie automobile.

Tableau II.04 : Répartition des résines utilisées dans l'industrie automobile:

Polymères	Part (%)	Fonction
Polypropylène (PP)	43	Pare chocs, enjoliveurs, habillages d'intérieur
Polyuréthane(PU)	14	Mousse de sièges, pare-chocs
Polychlorure de vinyle (PVC)	3	Câblerie, joints, mastics d'étanchéité, planches de tableau de bord
ABS	7	Pièces d'intérieur, calandres
Polyamide (PA)	12	Circuits, freinage, pneus (camions), canalisations d'essence
PMMA et Polycarbonate (PC)	4	Feux arrière, toits ouvrants, plaques d'immatriculations
Polyéthylène (PE)	8	Réservoirs d'essence et lave-glace
Autres	9	...

III.5 Le recyclage des polymères issus de l'automobile

III.5.1 Description des différents acteurs de la filière de recyclage des polymères issus de l'automobile [20]

Les différents acteurs impliqués dans le traitement des véhicules hors d'usage sont, dans notre cas, des destructeurs qui collectent des matières plastiques de grande valeur. Un broyeur qui refabrique des pièces pour créer de nouvelles matières premières. Et enfin, un système qui génère de l'énergie à partir des résidus combustibles tout au long de la chaîne de traitement.

III.5.1.1 Les démolisseurs

Les démolisseurs sont essentiellement de petites structures qui fonctionnent de manière traditionnelle. Nous récupérons actuellement la plupart de nos véhicules hors d'usage. Ces derniers peuvent provenir de concessions, de compagnies d'assurances, de particuliers ou de fourrières. L'activité principale des démonteurs est la revente de véhicules et de pièces d'occasion. En tant que premier maillon de la chaîne de traitement, il doit effectuer la décontamination obligatoire du véhicule. Vous pouvez également démonter certaines pièces et les envoyer au recyclage.

III.5.1.2 Les broyeurs

Les démolisseurs sont dans la plupart des cas le point d'entrée dans la filière de traitement des véhicules hors d'usage, mais le concasseur en est la pierre angulaire. Un concasseur, contrairement à un broyeur, est une installation industrielle. Le métier d'un broyeur est de traiter et de revendre les matières plastiques des véhicules hors d'usage.

III.5.1.3 Les recycleurs

Les broyeurs et démolisseurs sont les principaux acteurs de la filière de valorisation des VHU, mais les recycleurs en sont un maillon essentiel. En effet, ils assurent la viabilité et la pérennité de l'ensemble de la chaîne de valeur. Transforme les déchets polymères triés par les démolisseurs en matières premières adaptées à l'industrie.

III.5.2 Les étapes du recyclage des polymères issus de l'automobile

Une fois que la matière plastique recyclable arrive au recycleur, elle est soumise aux mêmes procédures que le recyclage général des polymères, c'est-à-dire :

- **Le procédé mécanique** : Qui comporte les étapes suivantes :
 - Inspection ;
 - Le lavage et le broyage ;
 - Le tri dans la cuve de flottaison ;
 - Le séchage ;
 - La fusion ;
 - Le filtrage ;
 - La granulation ;
- **Le recyclage en vrac**
- **Le recyclage chimique et thermique** :
 - Le procédé chimique ;
 - Le procédé thermique.

En suivant le schéma de traitement des VHU on comprend mieux les différentes étapes à partir du véhicule jusqu'à la valorisation de la matière.

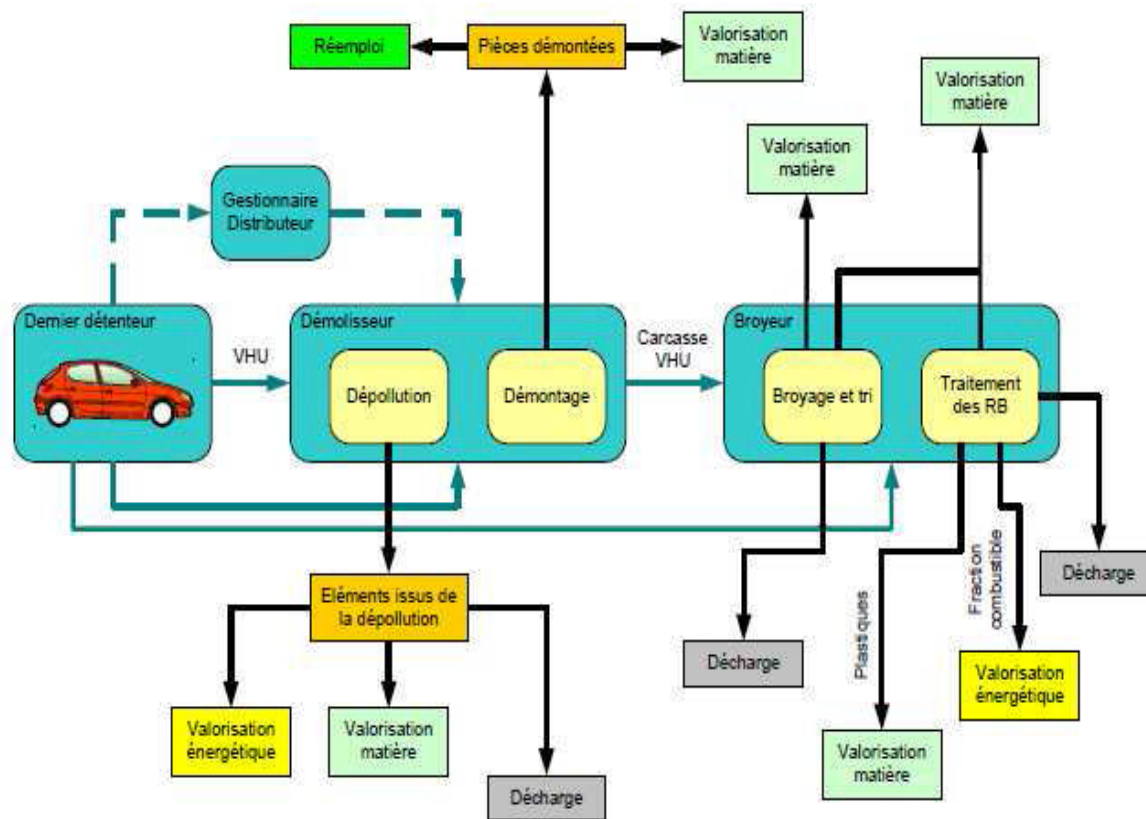


Figure II.08 : Les étapes du recyclage des polymères automobiles.

IV. Conclusion

Des procédés de collecte et de recyclage ont été développés pour recycler le plastique. Les plastiques des véhicules hors d'usage sont broyés, triés, fondus puis collectés et accumulés sous forme de granulés avant d'être mis sur la marche.

CHAPITRE III
ÉLABORATION ET
CARACTÉRISATION
DES MÉLANGES

I. Introduction

La phase d'élaboration des mélanges nécessaires à notre travail est décrite dans ce qui suit ; des mélanges de polymères recyclés du véhicule automobile hors usage (les VHU) et du Polypropylène homopolymère (PP), à différentes concentrations massiques. Le procédé d'extrusion est adopté pour l'homogénéisation des mélanges et le procédé d'injection nous donne des éprouvettes normalisées pour essai de traction et de résilience.

Les éprouvettes élaborées seront soumises à des tests de caractérisation physiques (test de densité, indice de fluidité et DSC) et des tests de caractérisation mécanique qui consiste en l'essai de traction et de résilience).

II. Élaboration des mélanges

II.1 Déroulement du travail

Ce travail a été réalisé au niveau de l'entreprise National de Plastique et de Caoutchouc, Filiale SISCOPLAST de Draa-EL-Mizan. Les différentes étapes suivies pour la réalisation de ce travail sont présentées ci-dessous :

II.1.1 La collecte des pièces polymériques

Elle s'est faite au niveau de la casse automobile d'Oeud eksari, Tizi-Ouzou, où nous avons récupérés des garnitures internes de portières automobiles de marques différentes.

Tableau III.01: *Marques des garnitures automobiles récupérées*

Pièce	Marque	Code
01	Peugeot	P2-36-2124 96 293 25877 > P/E <
02	J300 DAEWOO	>PP+ EPDM- TD 20<
03	Renault	>P/E Recycle <
04	KIA	>PP -T20 < >PPE (MS 213-43<)

La figure III.1 présente les différentes garnitures auto, polymères recyclés, composant de notre étude du mélange polymère recyclé avec du polypropylène.

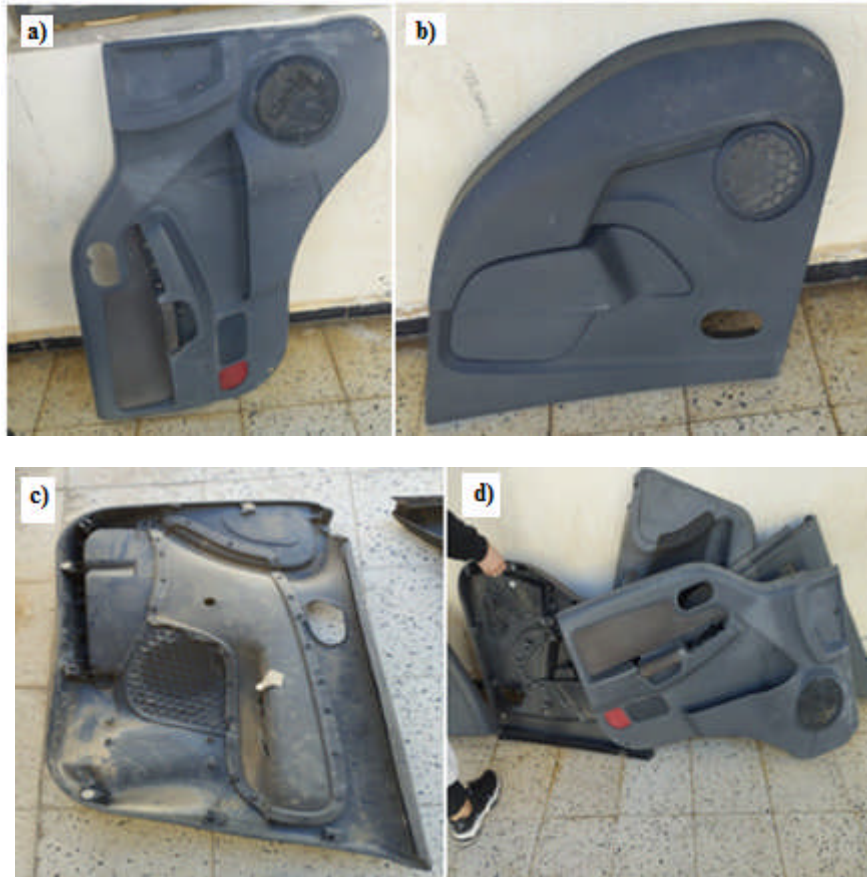


Figure III.01 : Garnitures automobiles choisies pour le recyclage mécanique.
a) KIA b) Peugeot c) Renault d) J300 DAEWOO

II.1.2 Étape du broyage

Cette étape implique le broyage des polymères recyclés lavés avant leurs passages en extrusion.

Un découpage à la cisaille est adopté pour faciliter l'opération de broyage des polymères à recyclés. Cette opération c'est déroulée au niveau du laboratoire RDM du département de Génie civil de la faculté, UMMTO).

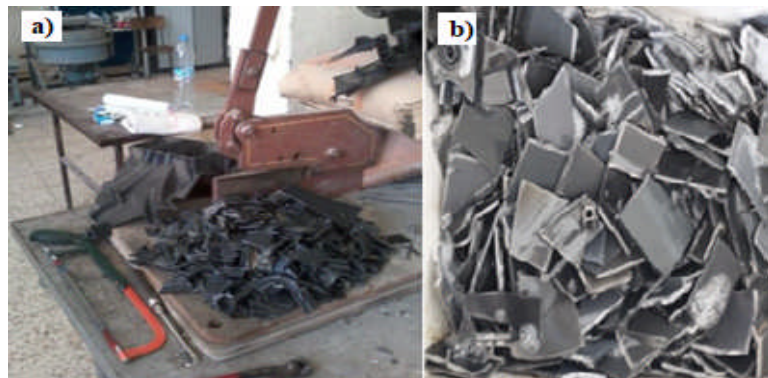


Figure III.02: Découpage des garnitures auto.
a) La cisaille de découpage et b) les morceaux de polymères obtenus.

Une fois les pièces réduites en petits morceaux. On les met dans récipient pour les laver.



Figure III.03: *Lavage des morceaux de polymères à recycler.*

Les morceaux de pièces polymériques à recycler sont séchés et prêts à être broyer.



Figure III.04 : *Présentation du broyeur utilisé.*

II.1.3 Étape du mélangeage à froid

Afin d'assurer une bonne répartition des granulés des polymères recyclés avec ceux du polypropylène dans le mélange, nous utilisons un mélangeur électrique.

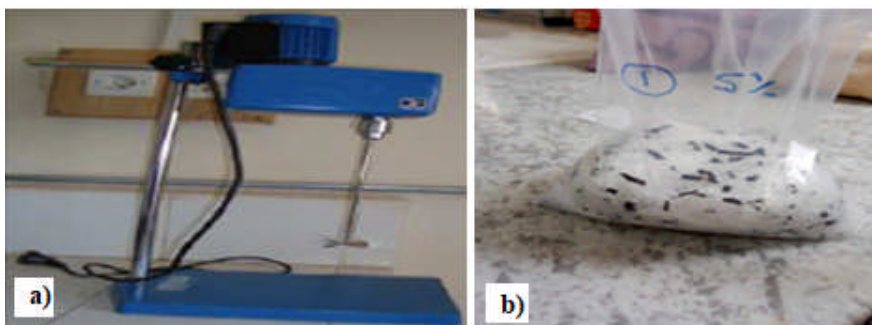


Figure III.05 : *Mélangeage à froid*
a) le mélangeur électrique et b) mélange 5/95 Polymère recyclé/PP

Pour chaque portière, nous effectuons des mélanges aux concentrations de 5%, 15% et 25% de matière recyclée et l'autre pourcentage c'est du PP, nous nommons nos mélanges comme indiqué dans le tableau III.2.

Tableau III.02: différentes compositions des mélanges à étudier.

Concentration du polymère recyclé	Concentration du PP	Désignation du mélange
100% P1	0%	(100/0%) P1/PP
5% P1	95%	(5/95%) P1/PP
15% P1	85%	(15/85%) P1/PP
25% P1	75%	(25/75%) P1/PP
100% P2	0%	(100/0%) P2/PP
5% P2	95%	(5/95%) P2/PP
15% P2	85%	(15/85%) P2/PP
25% P2	75%	(25/75%) P2/PP
100% P3	0%	(100/0%) P3/PP
5% P3	95%	(5/95%) P3/PP
15% P3	85%	(15/85%) P3/PP
25% P3	75%	(25/75%) P3/PP
100% P4	%	(100/0%) P4/PP
5% P4	95%	(5/95%) P4/PP
15% P4	85%	(15/85%) P4/PP
25% P4	75%	(25/75%) P4/PP

II.1.4 Étape de l'extrusion

Les granulés des polymères recyclés et du PP mélangés à froid, sont passés à travers le fourreau de l'extrudeuse afin d'obtenir une répartition homogène par malaxage et mélangeage à chaud des deux composants du mélange polymère recyclé/PP.

Le mélange de polymère sort de la filière de l'extrudeuse sous forme d'un jonc à l'état pâteux qui une fois refroidi se transforme en longues tige, qui sera découpée sous forme de de paille, comme illustré sur la figure III.6.

Les consignes d'extrusion utilisés lors de l'extrusion de nos mélanges polymères recyclés/ pp sont donnés ci-dessous :

➤ Paramètres d'extrusion

- Cadence (vitesse d'étirage) = 14.85 m/min ;
- Débit : 90g/min ;

- Température : Elle varie en mesure que les pourcentages des polymères recyclés changent et cela comme suit :

- PP 100% :
T1= 205°C, T2= 200°C,
T3= 150°C, T4= 160°C ;
- PP 95% :
T1= 230°C, T2= 210°C,
T3= 180°C, T4= 170°C ;
- PP 85% et 75% :
T1= 270°C, T2= 240°C,
T3= 190°C, T4= 170°C.



Figure III.06 : Déroulement de l'opération d'extrusion des mélanges
a) La sortie de la matière de la filière de l'extrudeuse. b) refroidissement du jonc
c) La matière finale.

II.1.5 Étape de découpage

Les longues tiges de mélanges de polymères extrudés sont découpées en pailles 10 à 15 Cm de longueur puis granulées à l'aide d'un broyeur comme monté sur la figure III.7.

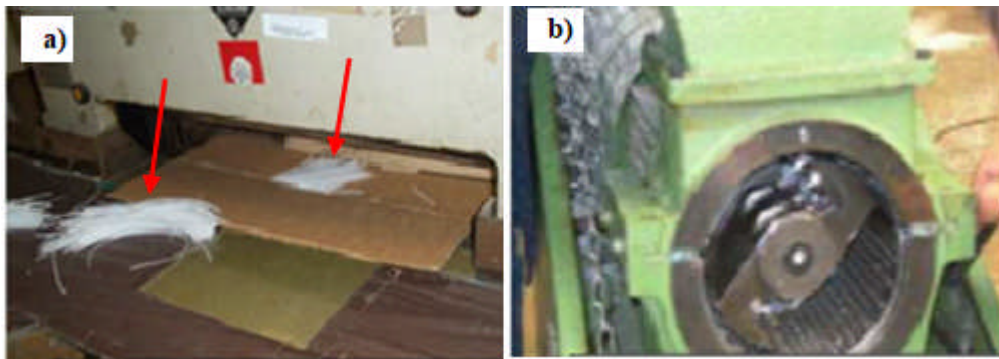


Figure III.07 : Etape de découpage des joncs
a) Appareil de Découpe et (b).le broyeur

La figure III.8 montre les granulat du mélange polymère recyclé/ PP.



Figure III.08 : Grains résultants de la granulation des joncs du mélange Polymère recyclé/PP.

II.1.6 Étape de l'injection

Les éprouvettes normalisées, destinées pour notre étude, sont obtenues par procédé d'injection. L'opération s'est déroulée sur la presse à injection présentée sur la figure III.9.



Figure III.09 : Procédé d'injection
a) Machine à injection et b) moule d'éprouvettes normalisées.

Après l'opération d'injection nous obtenons les éprouvettes représentées sur la figure III.10 ci-dessous.

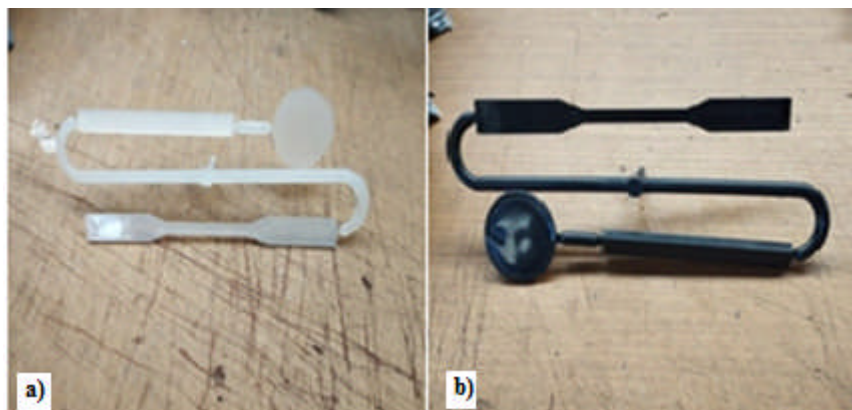


Figure III.10 : Type d'éprouvette obtenue après injection
a) Eprouvette en PP et b) Eprouvette du mélange Polymère recyclé /PP.

Il est envisageable que certaines étapes du processus d'injection s'effectuent en parallèle. Il est donc faisable de terminer le refroidissement d'une pièce dans le moule tout en commençant la plastification du polymère pour produire la prochaine pièce. Les paramètres de la machine d'injection sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau III.04 : Paramètre d'injection.

Paramètre	Valeur
Temps de cycle	38 s
Retrait / avance du chariot	2 s
Temps d'injection	2.65 s
Temps de maintien	2 s
Temps de refroidissement	8.90 s
Temps de pose	8s -1 s
Température de moule	18°C
Température de l'eau	20°C
Force de fermeture	70 tonne
Vitesse de rotation de la vis	300 trs/min
Pression d'injection	40 bars
Pression de maintien	110 bars
Contre pression	5 bars
Vitesse de rechargement de la vis	3 trs/min
Vitesse d'ouverture de moule	3 trs/min
Vitesse de fermeture de moule	2.5 trs/min
Vitesse d'injection	3 tr/min
Vitesse d'éjection	2.5 trs/min
Vitesse retour d'éjecteur	5 trs/min

➤ **Température de la buse d'injection** : Comme pour l'extrusion, elle varie en mesure que les pourcentages des polymères recyclés changent et cela comme suit :

- PP 100% :

T1= 200°C, T2= 190°C,

T3= 180°C, T4= 165°C

- PP 95%:

T1= 240°C, T2= 220°C,

T3= 210°C, T4= 200°C ;

- PPC 85% et 75% :

T1= 260°C, T2= 250°C,

T3= 230°C, T4= 220°C ;

III. Techniques de Caractérisation des mélanges

La caractérisation des mélanges s'est faite via une caractérisation physico-chimique qui consiste en l'essai de flottation, le test au feu, le test de densité, l'indice de fluidité et l'analyse calorimétrique différentielle (la DSC); une caractérisation mécanique a été effectuée sur nos mélanges, englobant l'essai de traction et l'essai de résilience.

III.1 La caractérisation physico-chimique de nos mélanges

III.1.1 Test de flottation

Ce test consiste à différencier les différentes matières plastiques.

III.1.1.1 Matériel et produits

Récipient

Matières plastiques coupées en petits morceaux

Eau

III.1.1.2 Mode opératoire

Mettre de l'eau dans un récipient, introduire les morceaux de plastique.



Figure III.11 : Test de flottation

Observation

La flottation du polymère indique que sa densité est inférieure à celle de l'eau.

La précipitation ou l'immersion du polymère indique une densité supérieure à celle de l'eau.

III.1.2 Test au feu

Ce test consiste à approcher un polymère à une source de flamme et observer le comportement de ce dernier vis-à-vis de la flamme.

Ce protocole se résume à réchauffer un petit échantillon de matière plastique à l'aide d'une petite flamme (ex : briquet). Cela sectionne les longues chaînes de polymères et produit des

substances de décomposition jusqu'aux éléments fondamentaux des matières plastiques, les monomères.



Figure III.12 : Test a feu.

III.1.2.1 Sécurité

Au moment de sentir l'odeur de la fumée, ne pas approcher l'échantillon trop près de nez.

Attention aux risques de brûlures par le bec BUNSEN et par les gouttes enflammées des plastiques.

III.1.3 Test de densité

Ce test nous permet d'évaluer la densité du polymère

III.1.3.1 Matériel et produits

Eau distillée

Sel

Alcool à brûler

Baguette en verre

Diverses matières plastiques

III.1.3.2 Sécurité

Eviter tout contact du sel et de l'alcool avec les yeux. Si il y'a un contact, il faut rincer abondamment avec de l'eau. Eviter tout contact de l'alcool avec une flamme.

III.1.3.3 Mode opératoire

Remplir le berlin avec de l'alcool à brûler

Introduire le morceau de plastique

Maintenir l'échantillon immergé à l'aide de la baguette en verre

Après une vingtaine de secondes, libérer-le

Répéter la même opération avec un mélange eau-alcool

(50ml eau + 50 ml alcool \rightarrow = 0.94 g / cm³)

Répéter la même opération avec de l'eau distillée (= 1 g /cm³)

Répéter la même opération avec de l'eau saturée en sel

(20 g de sel + 80g d'eau \rightarrow =1,1 g / cm³)

Après chaque opération, retirer les échantillons.

III.1.3.4 Observations

Les échantillons flottent à la surface de l'alcool.

La densité de l'alcool est de 0.8 g/ml d'où tous les plastiques avec une densité inférieure à celle de l'alcool vont flotter et ceux avec une densité supérieure vont couler au fond du récipient.

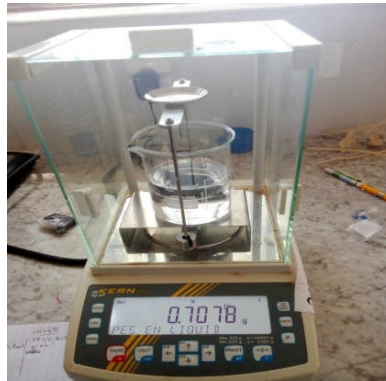


Figure III.13 : Appareil utilisé pour calculer la densité.

III.1.4. L'indice de fluidité

L'indice de fluidité, le Melt Flow Index (MFI), également connu sous les noms Melt Flow Rate (MFR) et Melt Index (MI), mesure la masse écoulee à travers une filière d'une matière thermoplastique l'état « fondu » (état fluide ou déformable), dans des conditions définies de température et de pression. Cet indice de fluidité, également appelé grade, fournit des informations sur les possibilités de transformation de la matière.

III.1.4.1. Principe

Il mesure la masse de matière fondue s'écoulant à travers une buse spécifique sous l'action d'une masse spécifique pendant un temps spécifique à une température spécifique.

III.1.4.2. Échantillon

On utilise pour calculer l'indice de fluidité une poudre, granulés, morceaux de feuilles...etc, entre 3 à 8 g.

III.1.4.3. Appareillage

L'appareil se compose principalement d'un plastomère d'extrusion (rhéomètre capillaire) opérant à température fixe.

La forme générale est représentée sur la figure III.13 ci- dessous.



Figure III.14: *Appareil d'indice de fluidité.*

Le thermoplastique, contenu dans un cylindre vertical, est extrudé à travers une filière au moyen d'un piston chargé.

L'appareillage comporte les parties principales suivantes :

- Un cylindre
- Un piston en acier
- Un système de contrôle de température
- Une filière normalisée
- Un bâti
- Une charge amovible qui dépendra de la matière utilisée

III.1.4.4. Calcul indice de fluidité

Le melt flow rate (MFR/MFI) en gramme par min, est donné par l'équation suivante :

$$\text{MFR} (\theta, \text{mnom}) = \text{tref} \times m / t$$

- θ est la température d'essai, en degrés Celsius
- mnom est la charge nominale, en kilogrammes
- m est la masse moyenne des extrudés, en grammes
- tref : est le temps de référence (10 min), en secondes (600 s)
- t est l'intervalle de temps dt, en secondes, entre deux coupes d'un extrudé

III.1.5. Caractérisation par analyse enthalpique différentielle (DSC)

Principe

L'analyse enthalpique différentielle DSC est une technique de caractérisation qui permet d'observer et de quantifier les changements d'enthalpies d'un matériau en fonction de la température lors d'un cycle thermique contrôlé.

La DSC permet de déterminer les transitions thermiques d'un matériau polymère c'est-à-dire les changements de caractéristiques du matériau lorsqu'il subit une modification de sa température.



Figure III.15 : Appareil DSC (USTHB).

Le principe de fonctionnement d'une machine DSC est schématisé comme suit :

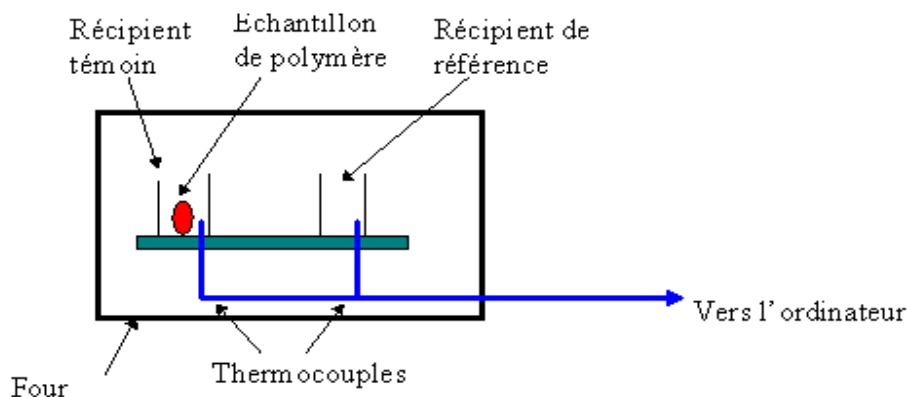


Figure III.16 : Principe de fonctionnement d'un appareil DSC.

Comme la montre la (figure III.15), Il y a deux récipients ou capsules scellées. Dans l'un des deux, le récipient témoin, on dispose l'échantillon de polymère. L'autre, laissé vide, est le récipient de référence. Les deux récipients se trouvent dans un four qui permet de monter régulièrement en température. Chaque récipient contient un thermocouple relié à un ordinateur.

L'ordinateur fait la différence entre la température de l'échantillon et celle de référence, et les convertit en flux de chaleur.

Dans notre travail, l'analyse DSC des différents échantillons a été effectuée dans le plateau technique de l'USTHB, sur un appareil de type Mettler Toledo DSC 1 Star System. Les balayages de température sont effectués de 30° C à 140 °C, avec une vitesse de chauffe de 10 °C/min.

III.2 Caractérisation mécanique

III.2.1. Essai de traction

Les essais de traction permettent de déterminer les propriétés normalisées des matériaux.

Ces propriétés sont souvent exigées par les spécifications.

Une relation raisonnable entre la contrainte et la déformation peut être dérivée de la limite d'élasticité, de la charge et de l'allongement à la rupture.

III.2.1.1.Principe de l'essai

Dans ce test, un échantillon de matériau est placé entre deux mâchoires d'une machine de tension et une tension est appliquée jusqu'à ce que l'échantillon se casse.

III.2.1.2.Présentation des échantillons standardisés

L'échantillon a toujours une section constante S entre des marques séparées par une distance L_0 , et la forme de l'échantillon est prismatique. La section d'extrémité ou de tête de l'éprouvette est plus grande que S et peut être montée sur la machine d'essai.

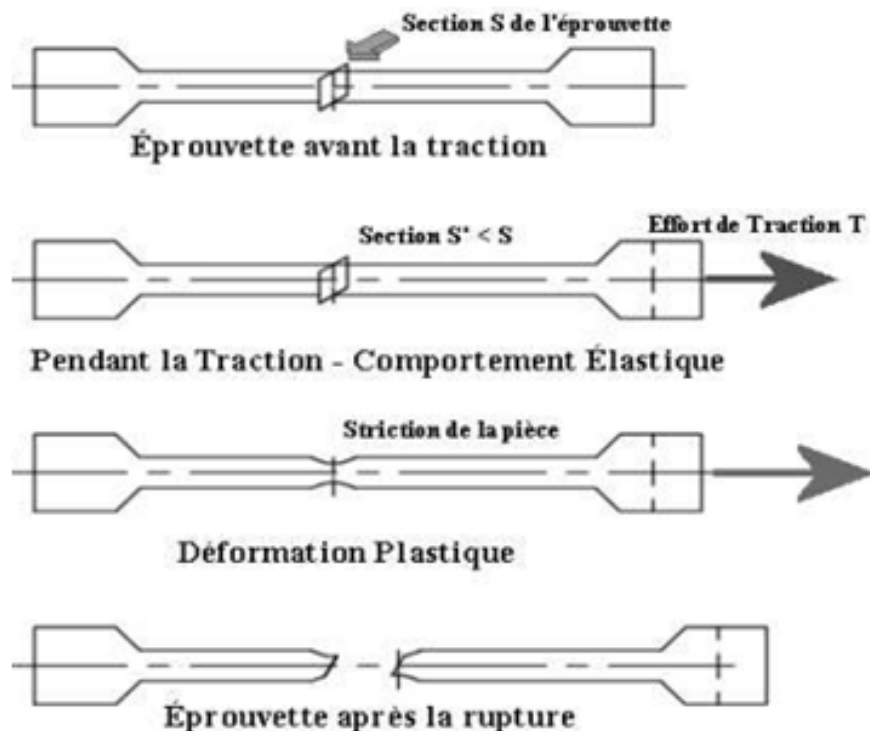
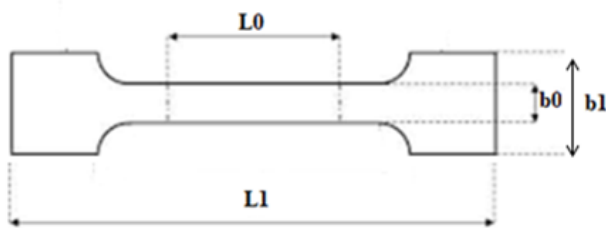


Figure III.17: Les étapes de l'essai de Traction.

Nos éprouvettes élaborées pour l'essai de traction sont selon la norme (NF EN ISO 527- 2)



$L_0 = 70$ mm ; longueur de mesure

$L_1 = 210$ mm ; longueur totale.

$b_0 = 7$ mm, largeur de la partie étroite.

$b_1 = 15$ mm, largeur aux extrémités

Figure III.18: *Eprouvette de traction NF EN ISO 527 – 2.*

III.2.1.3. Présentation de la machine de traction

La machine de traction est constituée d'un bâti rigide avec une traverse fixe à laquelle une tête de l'éprouvette est fixée et l'autre extrémité de l'éprouvette est fixée à une traverse mobile. Les traverses mobiles sont déplacées par une commande hydraulique ou des vis sans fin. La charge sur l'échantillon est mesurée avec un dynamomètre, l'allongement est mesuré avec un extensomètre et une courbe de traction brute est enregistrée.



Figure III.19 : *Machine de traction Zwick/Roell Z050.*

III.2.2. Essais de résilience

La résilience, représentée par le symbole général K ou R, caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans défaillance. Les mesures sont réalisées sur des machines de type Charpy (échantillons sur deux supports) ou Izod (échantillons encastrés).

III.2.2.1. Les éprouvettes utilisées

L'éprouvette utilisée dans notre étude, est selon la norme NE3.03.070, l'éprouvette est constituée d'un barreau de section carrée (12.7mm x12.7mm) comprenant en son milieu une entaille de forme V à 45° et d'une épaisseur 2.5mm. Elles ont toutes une longueur 63.5mm.

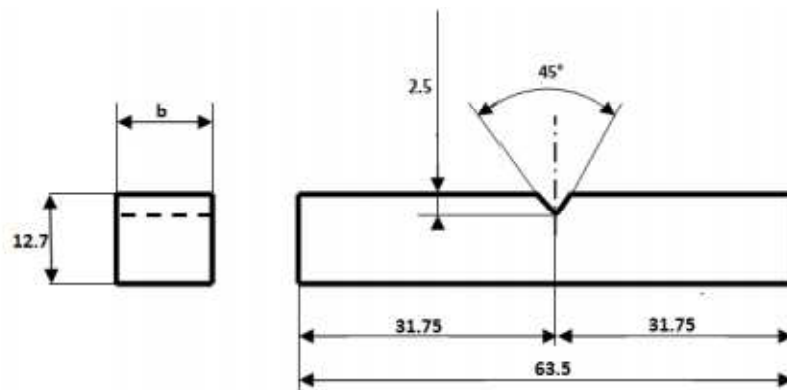


Figure III.20 : Eprouvette utilisée pour l'essai de résilience.

III.2.2.2. Présentation de la machine

Un appareil Charpy consiste en un couteau attaché à un marteau qui oscille dans un plan vertical autour de son axe. Une partie de l'énergie stockée lors de la chute du pendule est utilisée pour casser l'échantillon. Le centre de gravité du pendule sera toujours très proche du tranchant du pendule.

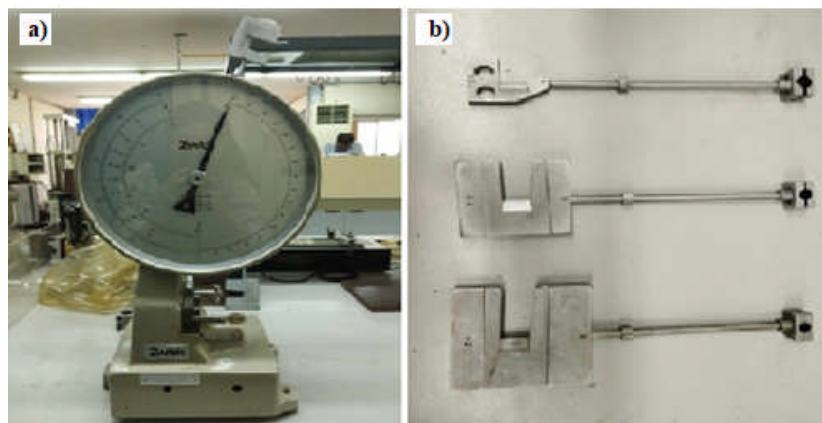


Figure III.21 : Essai de résilience.
a) La machine Charpy et b) marteaux pendules.

III.2.2.3. Principe de fonctionnement

L'essai consiste à casser une éprouvette posée sur deux supports avec une encoche au centre d'un seul coup de marteau pendulaire. L'énergie absorbée W s'exprime en joules, d'où dérive la résilience (énergie nécessaire pour casser l'éprouvette, exprimée en joules par cm^2).

III.3 Caractérisation morphologique

Nous avons observé au microscope optique, l'état de surface de nos mélanges pour analyser l'homogénéité du mélange. Les faciès de rupture en résilience ont été analysés par microscopie électronique à balayage afin de comprendre le mode de rupture de nos matériaux.

III.3.1 Observation au microscope optique

Afin d'observer des structures de petite taille, on utilise un microscope optique, permettant de grossir l'image de l'objet étudié.

III.3.1.1 . Le microscope optique

Les microscopes sont équipés de lentilles grossissantes. La qualité d'un microscope est donc liée à la qualité de ses lentilles et aussi au dispositif d'éclairage.

La figure III.21 présente les éléments constituant le microscope optique.

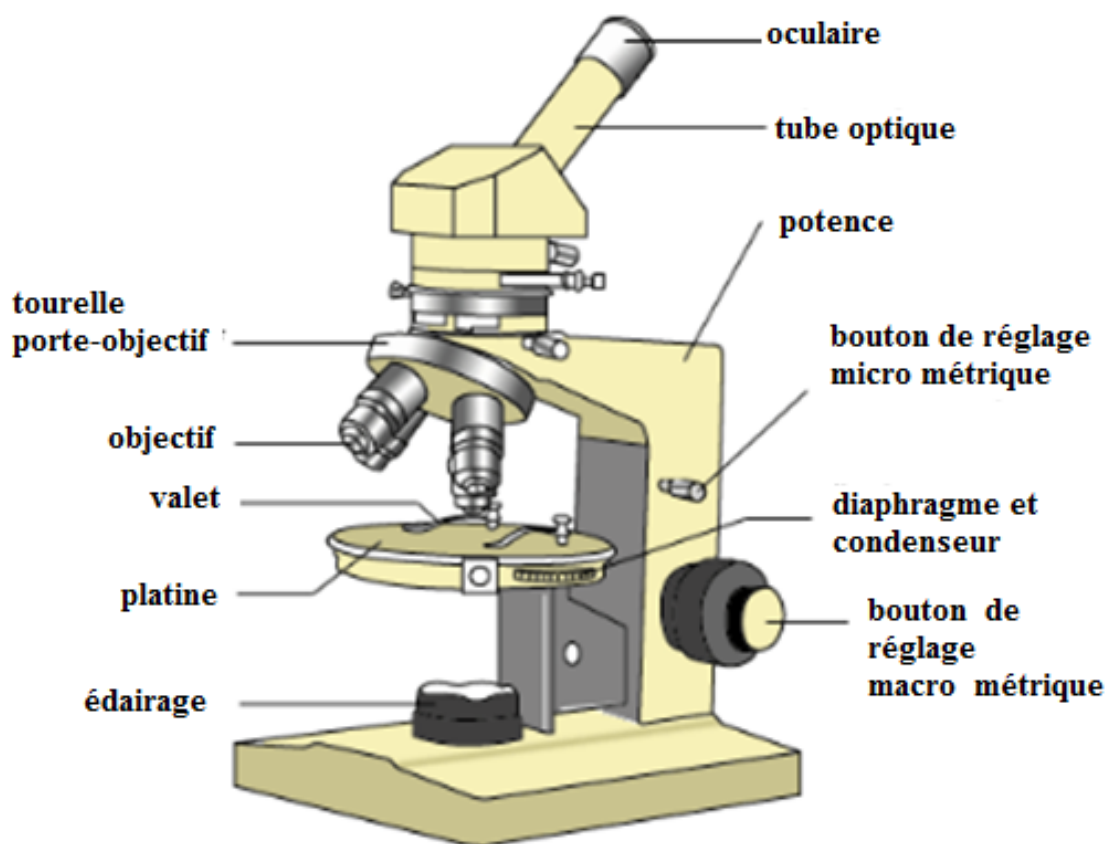


Figure III.22 : Eléments constituant le microscope optique.

III.3.1.2 Principe de fonctionnement du microscope optique

Comme le montre la figure III.23, le faisceau lumineux traverse l'objet à observer,

Le microscope optique d'un tube qui possède à ses deux extrémités des lentilles.

Le premier groupe de lentilles, dirigé vers l'objet à examiner, constitue l'**objectif**. Il donne une image réelle, inversée et agrandie de l'objet. Cette image n'est pas formée sur un verre dépoli, mais se trouve quelque part dans le tube optique, c'est l'image intermédiaire.

Le deuxième groupe de lentilles, dirigé vers l'œil de l'observateur, est appelé l'**oculaire** ; il fonctionne comme une simple loupe et grossit l'image précédente.

On obtient alors l'image définitive virtuelle, plus ou moins fortement grossie et renversée de l'objet initial.

Le grossissement total du microscope est égal au produit du grandissement de l'objectif (un rapport de longueurs) par le grossissement de l'oculaire (un rapport angulaire).

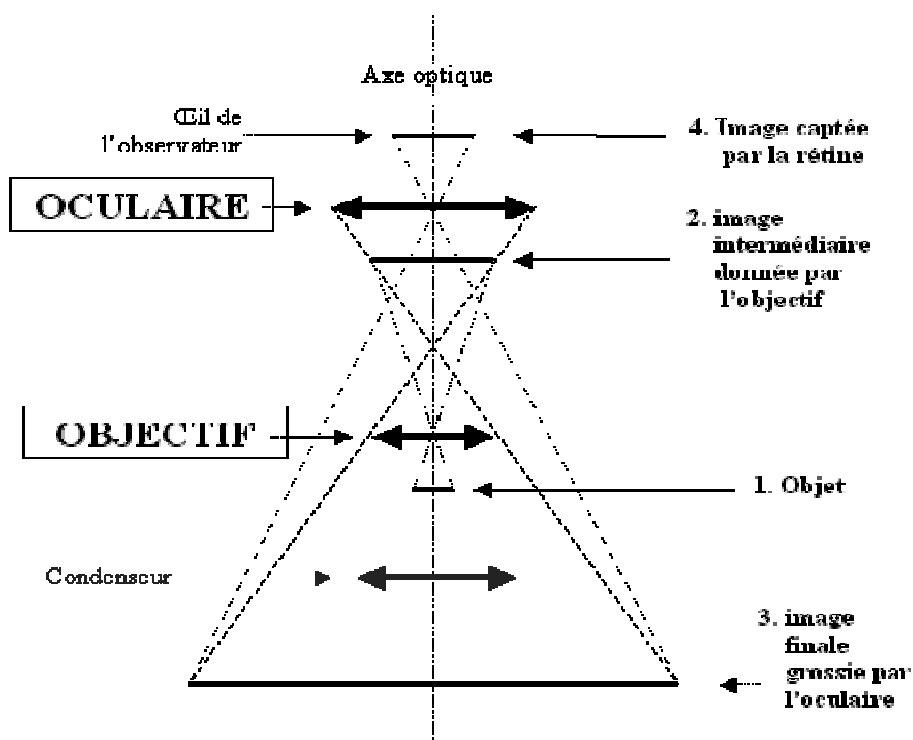


Figure III.23 : Principe du fonctionnement du microscope optique.

III.3.2 Observation au microscope électronique à balayage (MEB)

Le MEB permet de faire des analyses chimiques sur de très petits volumes de matière (ordre de grandeur de quelques micromètre cubes) ou d'obtenir des images qui montrent la répartition spatiale des éléments (images rayons X ou en électro-diffusés).

III.3.2.1 Principe du MEB

Un faisceau très étroit d'électrons monocinétiques balaye la surface de l'échantillon, l'interaction y étant détectée par un capteur contrôlant la luminosité d'un oscilloscope à rayons cathodiques, dont le balayage est synchronisé avec celui du faisceau d'électrons. Par conséquent, le MEB peut être comparé à un système de télévision en circuit fermé.



Figure III.24 : Représentation du microscope à balayage.

IV. Conclusion

Dans ce chapitre, les échantillons d'essai ont été élaborés après la collecte des déchets plastiques VHU,, la découpe, le concassage, le mélangeage froid et à chaud et enfin l'injection dans une presse à moule pour éprouvettes normalisées. La caractérisation par diverses techniques permet d'analyser le comportement mécanique, physique et l'aspect morphologique des différents mélanges élaborés. Les résultats qui découlent de ces caractérisations font l'objet du chapitre prochain.

CHAPITRE IV

Résultats et discussion

I. Introduction

A partir des quatre garnitures de portières automobile récupérées des VHU, nous avons élaboré des mélanges en ajoutant du PP vierge à ces polymères dans le but de les recycler et de les réintroduire dans le cycle de production. Les mélanges ainsi élaborés sont à des compositions de (polymère recyclé/ PP vierge) de (5/95), (15/85) et (25/75).

La présentation des résultats obtenus après caractérisation physico-chimique et mécaniques de nos éprouvettes est donnée dans ce qui suit :

La caractérisation physico-chimique consiste en : un test au feu, un test de densité, détermination de l'indice de fluidité, détermination des températures de fusion (DSC).

La caractérisation mécanique s'est faite via l'essai de traction (détermination des caractéristiques de résistance et de déformation) et l'essai de résilience (résistance au choc).

Des observations au microscope électronique à balayage (MEB), nous permettrons d'expliquer la relation entre le comportement macroscopique de nos mélanges de polymères et la structure à l'échelle microscopique en ce qui concerne l'homogénéité des mélanges élaborés.

Dans la suite de travail nous allons désigner par polymère1, Polymère 2, Polymère 3, Polymère 4, les différentes pièces (garniture interne des portières des VHU récupérées).

Tableau IV.1 : Désignation des différentes pièces.

Pièce	Marque	Code	Désignation
01	Peugeot	P2-36-2124 96 293 25877 > P/E <	Polymère 1
02	J300 DAEWOO	>PP+ EPDM- TD 20<	Polymère 2
03	Renault	>P/E Recycle <	Polymère 3
04	KIA	>PP -T20 < >PPE (MS 213-43<)	Polymère 4

II. Caractérisation physico –chimique

Les études physico-chimiques permettent l'exploration des matériaux et de leurs propriétés pour vérifier leurs compositions ou découvrir des imperfections. Selon les problèmes rencontrés, elles sont également essentielles pour évaluer la qualité finale d'un produit, d'une pièce ou d'un assemblage.

II.1 Test de flottation

Nos polymères de récupération ont réagi vis-à-vis du test de flottation par quatre comportements différents comme le montre la figure IV.1 :



Figure IV.1 : *Comportement de nos polymères au test de flottation.*

Nos quatre polymères ont réagi différemment lors du test de flottation :

- le polymère N01 a flotté en grande partie,
- le polymère N02 a coulé en grande partie,
- le polymère N03 a flotté majoritairement,
- le polymère N04 a coulé majoritairement.

La flottation des polymères N° (01) et (03) indiquent que leurs densités est inférieurs à celle de l'eau contrairement aux polymères N° (02) et (04) qui ont coulé, leur densités est supérieur à celle de l'eau. Comme le montre le tableau IV. 1 ci-dessous, qui porte les valeurs du test de densité de nos polymères.

II.2 Test de densité

Des échantillons aléatoires des polymères récupérés et de leurs mélanges ainsi que le PP vierge, ont été analysés par test de densité, le tableau IV. 1 ci-dessous donne les différentes valeurs obtenues par ce test.

Tableau IV.2 : Valeurs de la densité des différents mélanges

Mélanges	Pourcentage	Pèse en air	Pèse en liquide	Densité
PP	100%	4,88	0,437	0,910
Polymère recyclé 1	100%	2,97	0,37	0,890
	25%	3,6	0,46	0,906
Polymère recyclé 2	100%	3,16	0,7	1,01
	5%	2,75	0,337	0,900
	15%	3,5	0,45	0,910
	25%	2,338	0,345	0,923
Polymère recyclé 3	100%	4,04	0,508	0,901
	5%	2,51	0,336	0,910
	15%	2,364	0,316	0,908
	25%	2,327	0,313	0,905
Polymère recyclé 4	100%	3,75	0,913	1,041
	5%	2,437	0,361	0,914
	15%	2,74	0,335	0,907
	25%	2,315	0,345	0,925

En comparant les résultats du test de densité regroupés dans le tableau IV.1, et ceux donnés par le test de flottation, nous remarquons que l'échantillon N° 01 et N° 03 (qui ont flotté) ont des densités égales à **0,890** **0,901** respectivement. De même pour les échantillons N° 02 et N° 04 (ces derniers ont coulé) leurs densités sont égales à **1,01** et **1,041** respectivement.

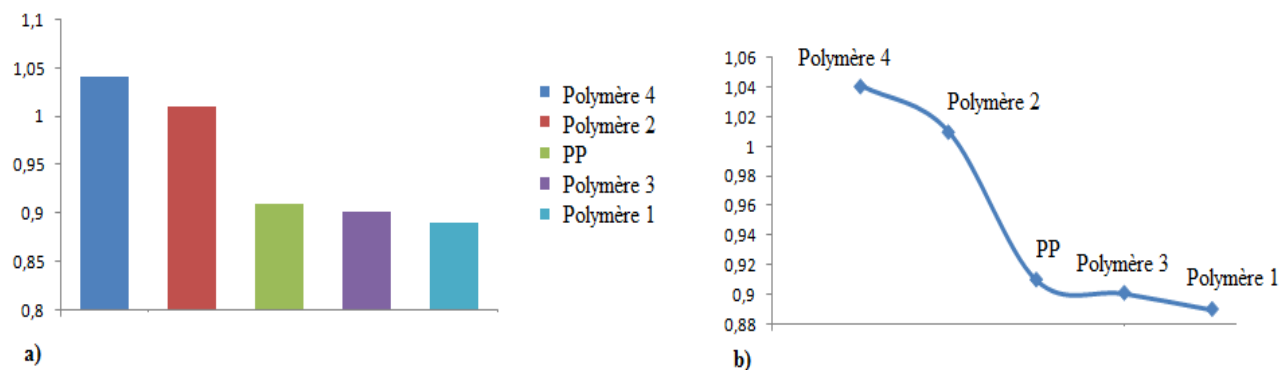


Figure IV.2 : Résultats du test de la densité.

a) Histogramme, b) variation de l'indice de densité des polymères recyclés.

A partir de la Figure IV.2 nous donnons les résultats du test de densité de nos polymères, le classement de densité de nos polymères est tel que : 1^{er} : polymère 4, 2^{eme} : polymère 2, 3^{eme} : PP, 4^{eme} : polymère 3 et le 5^{eme} : polymère 1.

La figure IV.3 représente la variation de densité des mélanges de polymère recycle avec le PP. La figure IV.3 a) est la variation de la densité du polymère 1 en fonction de taux de PP dans le mélange polymère 1/PP. Le PP plus dense que le polymère 1, l'ajout de 75 % de PP au polymère 1 augmente sa densité.

La figure IV.3 b) est la variation de la densité du polymère 2, la densité du polymère 2 est plus élevée que celle du PP. l'ajoute 75, 85 et 95 % de PP diminue la densité du mélange progressivement.

La figure IV.3 c) est la variation de la densité du polymère 3, la densité du PP est supérieure à celle du polymère 3. L'ajout du PP augmente considérablement la densité du mélange.

La figure IV.3 d) est la variation de la densité du polymère 4, la densité du polymère 2 est plus élevée que celle du PP. L'ajoute 75, 85 et 95 % de PP diminue la densité du mélange.

La figure IV.3 e) est la superposition des courbes de densité de quatre polymères recyclés et de leurs mélanges. Sur cette figure nous remarquons que toutes les courbes se coupent en un point qui correspond à (85% PP, 0.9).

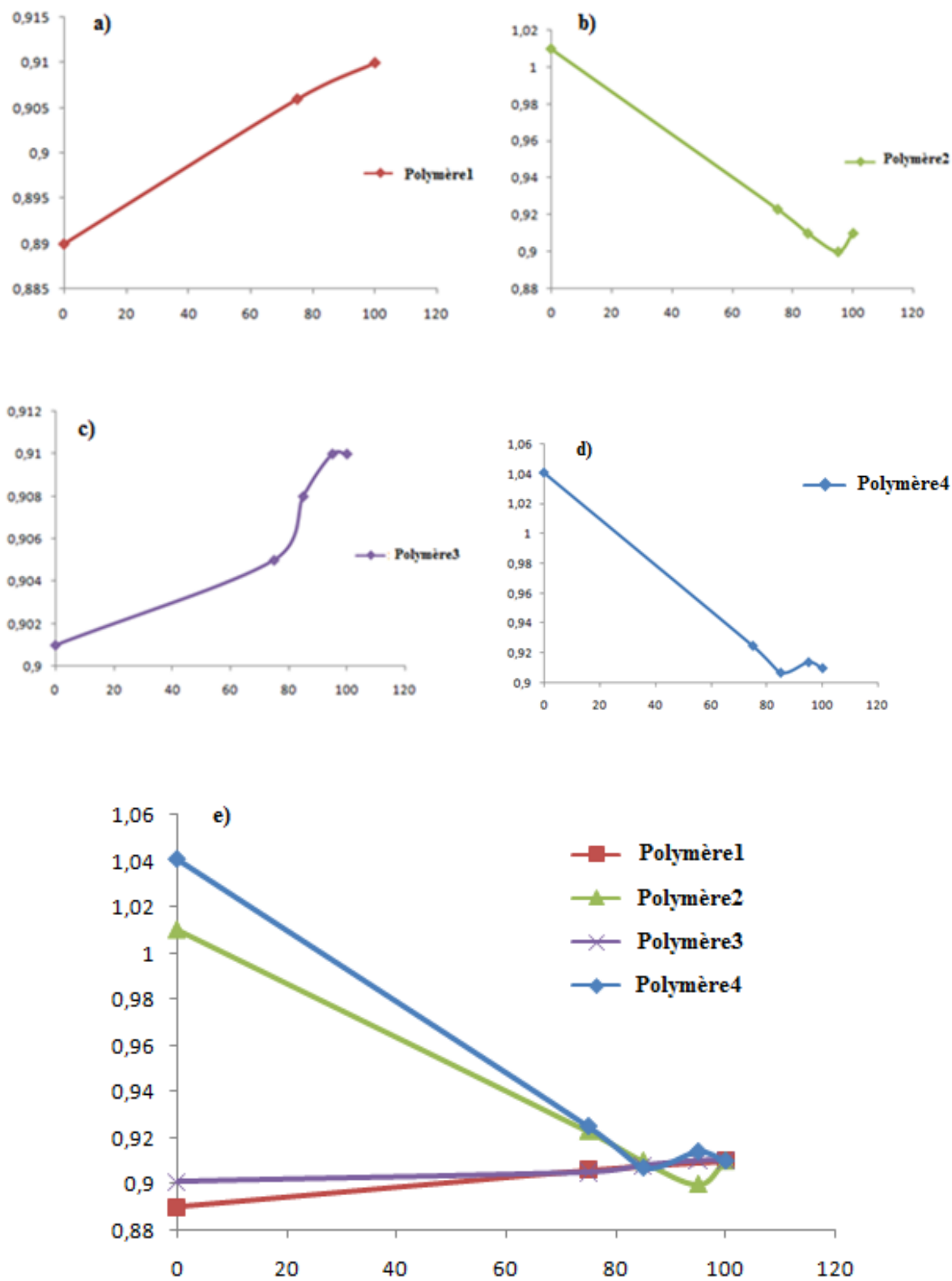


Figure IV.3 : Variation de la densité des différents polymères recyclés.
 a) Polymère 1 b) Polymère 2 c) Polymère 3 d) Polymère 4.

II.3 Test au feu

Nous avons réalisé des tests au feu pour nos polymères, et cela pour les échantillons qui ont flotté et ceux qui ont coulé.

Différents comportements au feu sont observés pour nos polymères recyclés, comme illustré dans le tableau IV.3 ci-dessous nous portons les observations recueillies.

Tableau IV.3 : Résultats du test au feu

Echantillon	Flotte	Comportement au feu
Polymère 1	<ul style="list-style-type: none"> – Flamme rouge – Fumée blanche – Odeur paraffine – Surface lisse – Les gouttes tombent et se solidifient 	<ul style="list-style-type: none"> – Flamme rouge – Fumée noire – Odeur carbonisée – Surface rugueuse – sous forme de suie (cendre)
Polymère 2	<ul style="list-style-type: none"> – Flamme rouge est plus intense – Odeur paraffine – Fumée noir intense – Surface lisse – Des gouttes tombent et se solidifient 	<ul style="list-style-type: none"> – Flamme rouge moins intense – Fumée blanche – Mauvaise odeur – Surface rugueuse – Pas de gouttes
Polymère 3	<ul style="list-style-type: none"> – Flamme rouge – Odeur paraffine – Surface lisse – Fumée blanche – Gouttes visqueuse 	<ul style="list-style-type: none"> – Flamme importante et rouge – Fumée noire – Surface rugueuse – Goutte, plus une matière noire carbonisé
Polymère 4	<ul style="list-style-type: none"> – Flamme rouge – Fumée blanche – Odeur paraffine – Surface lisse – Les gouttes tombent et se solidifient 	<ul style="list-style-type: none"> – Flamme importante et rouge – Mauvaise odeur – Fumée noire – Gouttes visqueuse carbonisées

La figure IV.4 montre le comportement vis-à-vis du feu de nos polymères. Nous observons sur la figure IV.4 a) l'écoulement visqueux du polymère, à l'image du comportement des polymères 1 et 3.

Sur la figure IV.4 b), nous observons un écoulement fluide (sous forme de gouttes) du polymère, à l'image du comportement des polymères 2 et 4.

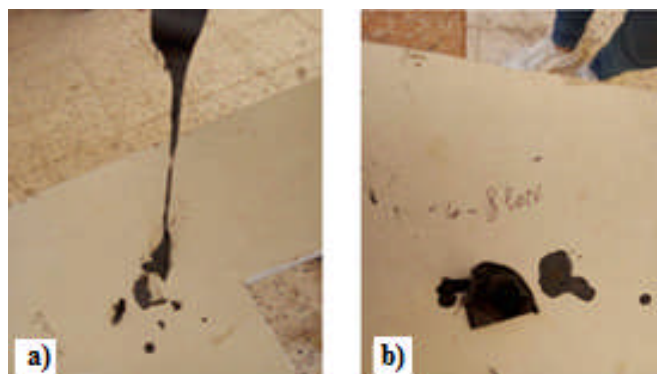


Figure IV.4 : *Comportement des polymères recyclés vis-à-vis du Test au feu.*

II.4 Indice de fluidité

L'indice de fluidité est un facteur important pour connaître la fluidité d'un polymère. Nous pouvons sélectionner le mode de transformation du polymère en connaissant cette valeur.

L'indice de fluidité à chaud (MFI) est donné, en gramme durant le temps de référence.

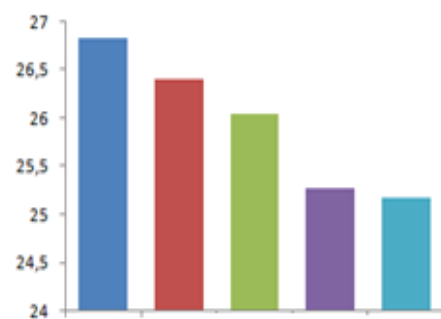
Nous avons procédé à la détermination de l'indice de fluidité des mélanges PP/PP recyclé, nous avons consignés les résultats dans le Tableau suivant :

A partir du tableau IV.4, on voit que les valeurs des indices de fluidité des polymères recyclés, nous montrons que les valeurs des indices de fluidité des différents polymères sont proches, elles varient entre 25,17 pour le PP et 26,83g/10min pour le polymère 1. Tous ces polymères ainsi que leurs mélanges se prêtent à la transformation en injection plastique.

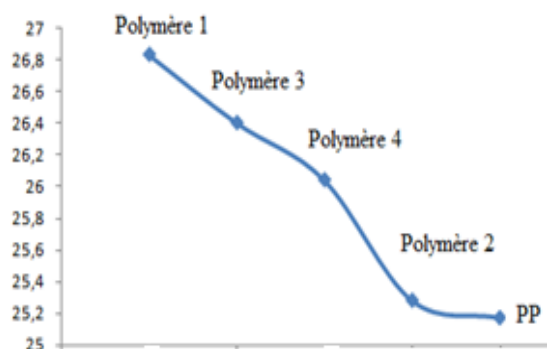
Tableau IV.4. Valeurs des indices de fluidité des différents mélanges

Mélanges	Pourcentage %	Indice de fluidité [g/10min]
PP	100%	25.17
Polymère 1		
	100%	26.83
	5%	24.29
	15%	25.30
	25%	24.22
Polymère 2		
	100%	25.28
	5%	23.04
	15%	26.56
	25%	23.18
Polymère 3		
	100%	26.40
	5%	20.48
	15%	22.03
	25%	24.97
Polymère 4		
	100%	26.04
	5%	22.56
	15%	23.16
	25%	25.10

A partir des valeurs du tableau ci-dessus on trace la courbe, l'histogramme et la superposition de la variation des indices de fluidité en fonction du taux de PP dans les mélanges.



a)



b)

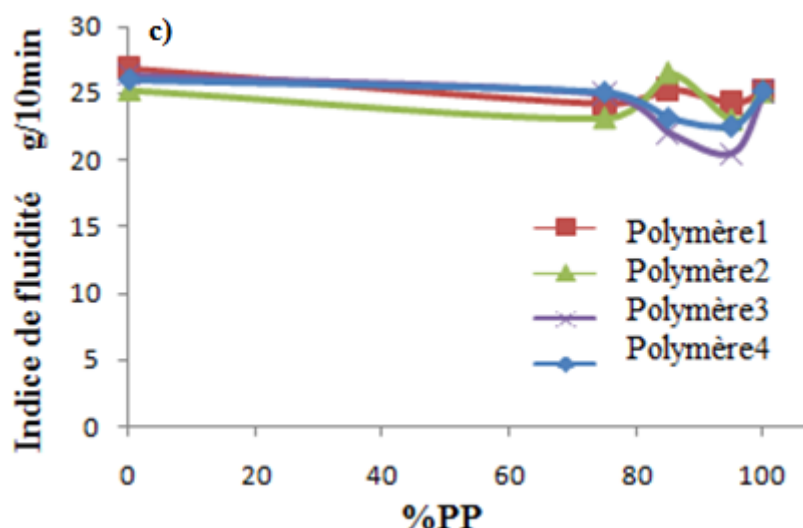


Figure IV.5 : Indice de fluidité des polymères recyclés.

- a) Histogramme, b) variation de l'indice de fluidité des polymères recyclés.
c) superposition des courbes de variation d'indice de fluidité.

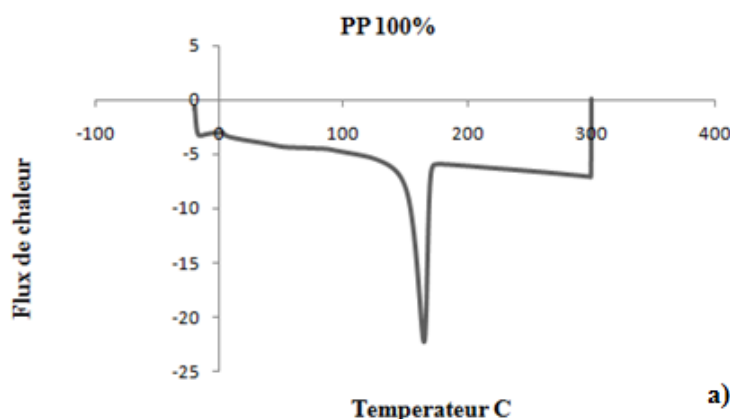
II.5 Résultats de l'analyse DSC

Un appareil d'analyse calorimétrique différentiel Pyris de PerkinElmer, préalablement étalonné, a été utilisé. Une vitesse de montée en température de 20°C/min a été appliquée. La quantité de polymère à l'état solide (entre 4 et 6 mg) a été mesurée à l'aide d'une balance de précision (pour obtenir une surface spécifique équivalente d'un échantillon à l'autre afin de maintenir un coefficient de transfert thermique constant).

Nous présentons ci-dessous, les courbes DSC obtenues pour le polymère 100%PP et les mélanges (75% PP/25% des polymères 1,2 ,3 et 4).

II.5.1 Courbe DSC du polymère 100% PP

La figure IV.6 présente le thermo gramme DSC du polypropylène, sur la figure IV.6 a) nous présentons le pic exothermique du PP, ce pic correspond à la température de 164,86°C selon la figure IV.6 b), qui est un agrandissement du pic exothermique.



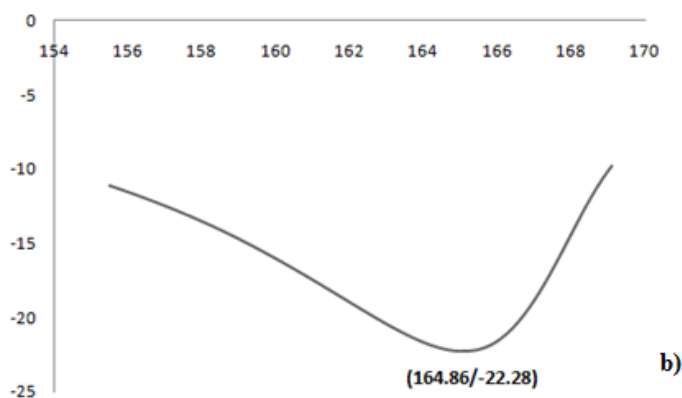


Figure IV.6 : Courbe DSC du polymère à 100% PP.

II.5.2 Courbe DSC du mélange (25/ 75%) polymère 1/ PP

La figure IV.7 présente le thermo gramme DSC du mélange polymère1/ PP à la composition (25/ 75%), sur la figure IV.7 a) nous présentons le pic exothermique du mélange, ce pic correspond à la température de 164,35 °C selon la figure IV.7 b), qui est un agrandissement du pic exothermique. Cette valeur du pic exothermique confirme que le polymère 1 est du PP.

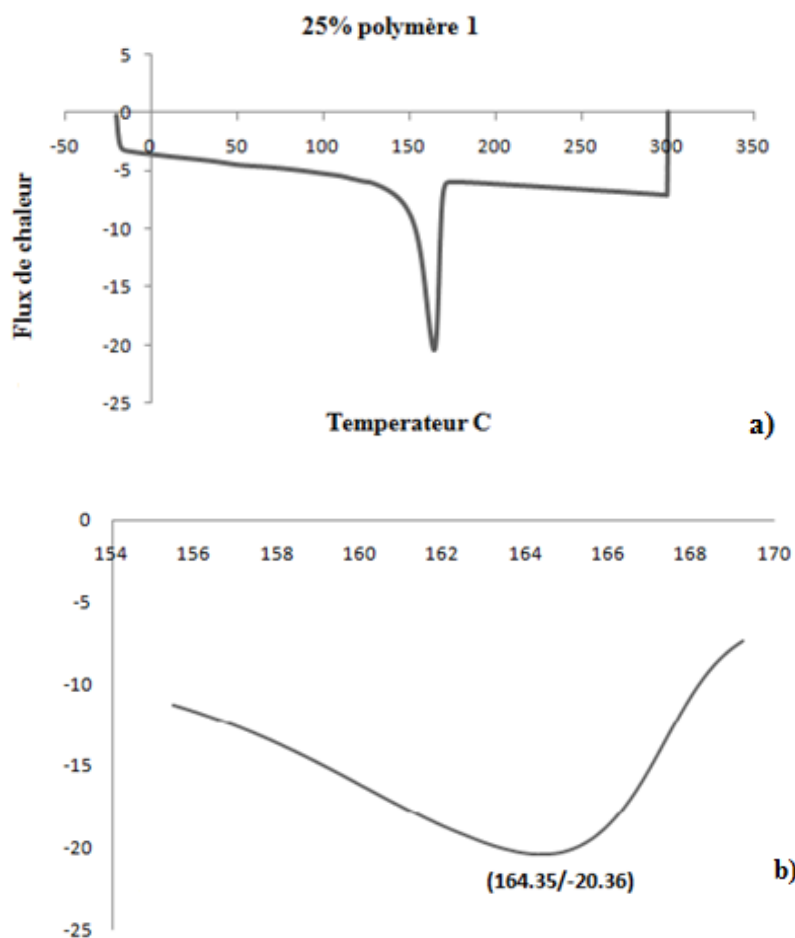


Figure IV.7 : Courbe DSC du mélange (25/ 75%) polymère 1/ PP.

II.5.3 Courbe DSC du mélange PP/ polymère 2 (75 /25%)

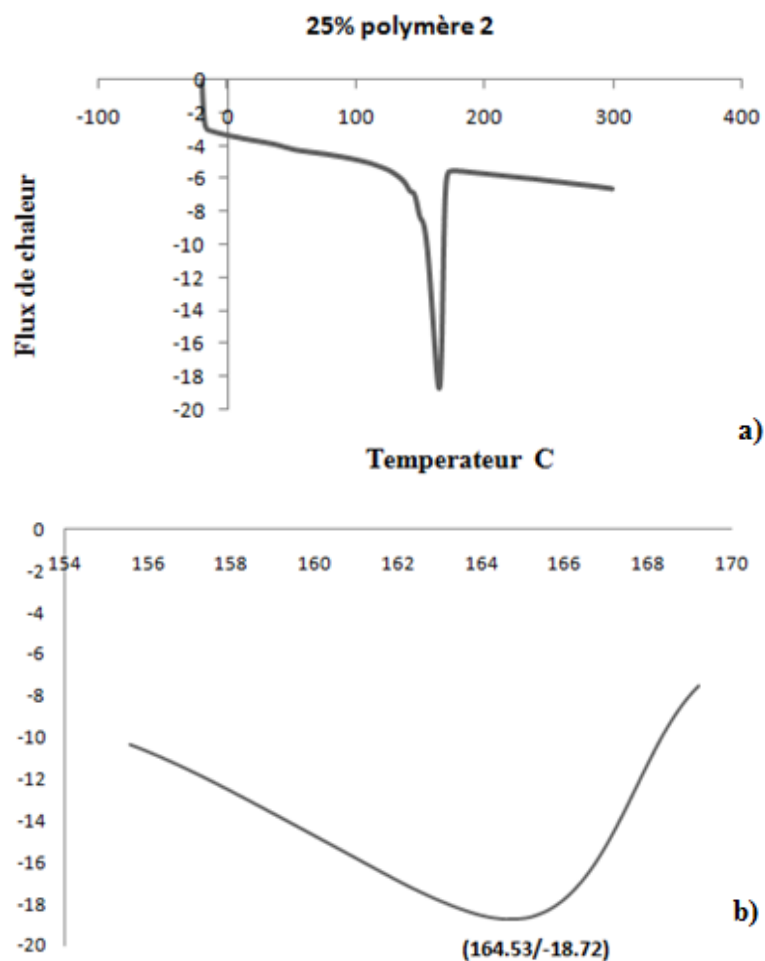


Figure IV.8 : Courbe DSC du mélange (25/ 75%) polymère 2/ PP.

La figure IV.8 présente le thermo gramme DSC du mélange polymère 2/ PP à la composition (25/ 75%), sur la figure IV.8 a) nous présentons le pic exothermique du mélange, ce pic correspond à la température de 164,53 °C selon la figure IV.8 b), qui est un agrandissement du pic exothermique. Cette valeur du pic exothermique confirme que le polymère 2 est du PP.

II.5.4 Courbe DSC du mélange PP/ polymère 3 (75 /25%)

La figure IV.9 présente le thermo gramme DSC du mélange polymère3/ PP à la composition (25/ 75%), sur la figure IV.9 a) nous présentons le pic exothermique du mélange, ce pic correspond à la température de 164,43 °C selon la figure IV.9 b), qui est un agrandissement du pic exothermique. Cette valeur du pic exothermique confirme que le polymère 3 est du PP.

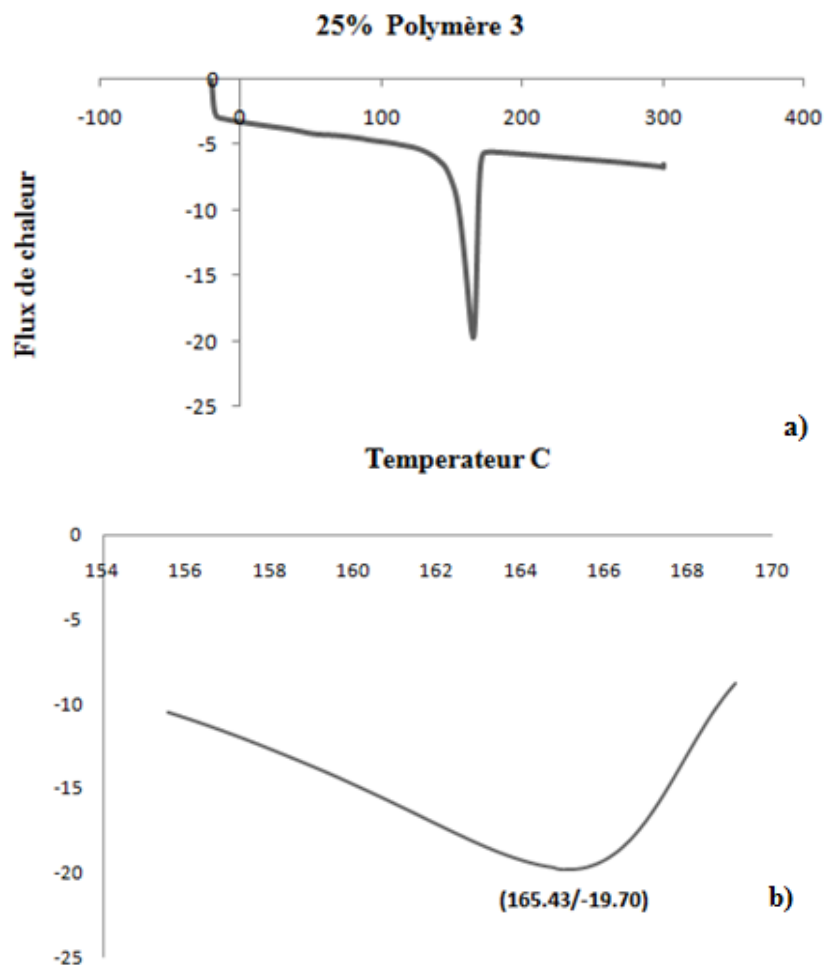
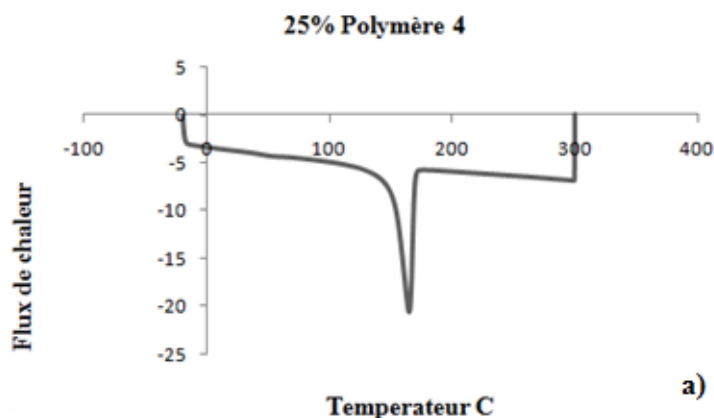


Figure IV.9 : Courbe DSC du mélange (25/ 75%) polymère 3/ PP.

II.5.5 Courbe DSC du mélange PP/ polymère 4 (75 /25%)

La figure IV.10 présente le thermo gramme DSC du mélange polymère 4/ PP à la composition (25/ 75%), sur la figure IV.10 a) nous présentons le pic exothermique du mélange, ce pic correspond à la température de 164,11 °C selon la figure IV.10 b), qui est un agrandissement du pic exothermique. Cette valeur du pic exothermique confirme que le polymère 4 est du PP.



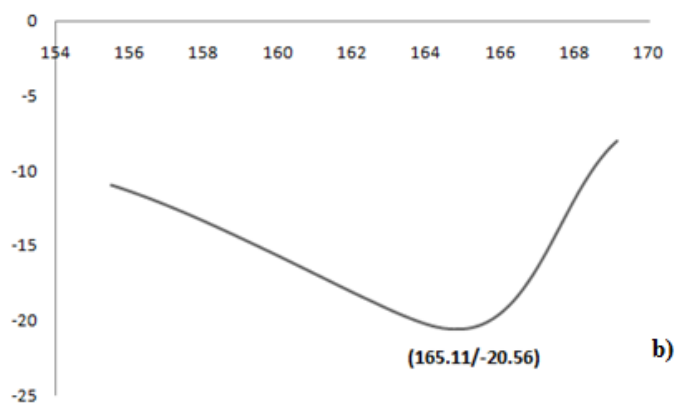


Figure IV.10 : Courbe DSC du mélange (25/75%) polymère 4/ PP.

II.5.6 Superposition des courbes DSC des mélanges

La figure IV.11 présente la superposition des courbes DSC obtenues pour nos mélanges. Sur la figure IV.11a) les cinq courbes coïncident en un même point. La figure IV.11 b) est un agrandissement du point de coïncidence des pics exothermiques, nous remarquons avec cet agrandissement que les pics ne sont pas vraiment confondus, ils sont légèrement différents.

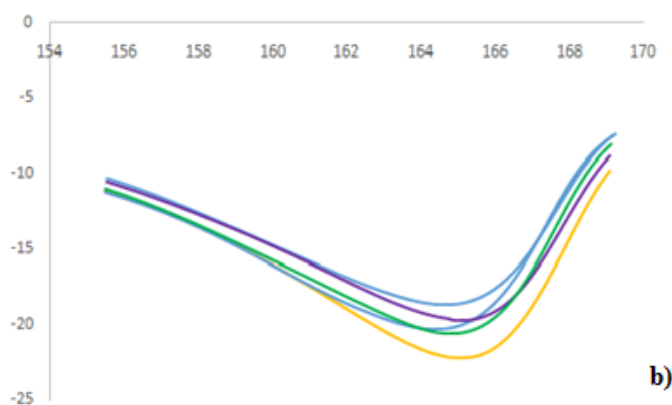
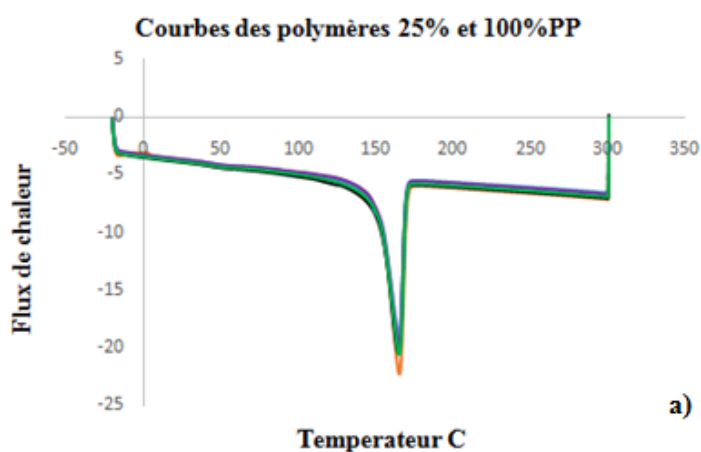


Figure IV.11 : Courbe DSC des différents mélanges des polymères et 100% PP.

A partir de l'analyse DSC, nous concluons que les quatre polymères étudiés, recyclés à partir des portières du véhicule automobile des marques différentes, sont toutes à base du polypropylène, comme déjà cité dans la partie recherche bibliographique.

III. Caractérisation mécanique

Dans cette section, nous avons analysé le comportement mécanique des mélanges de nos échantillons élaborés, afin de cerner le comportement mécanique de nos matériaux. Nous commençons par déterminer les courbes contrainte-déformation pour chaque composition (cinq échantillons ont été testés pour chaque polymère). De ces courbes contraintes – déformation, nous tirons les différentes caractéristiques mécaniques (contraintes max et rupture, modules d'élasticité et déformation).

III.1 Essai de traction

Le test de traction a été effectuée avec une machine de modèle Zwick/Roell Z050, à une vitesse de traction de 25 mm/ min et à la température ambiante de 23°C, cinq éprouvettes ont été rompues pour chaque mélange.

III.1.1 Courbes contrainte-déformation

III.1.1.1 Courbes contrainte-déformation du polypropylène

La Figure IV.12 présente les courbes de traction du polypropylène homopolymère utilisé.

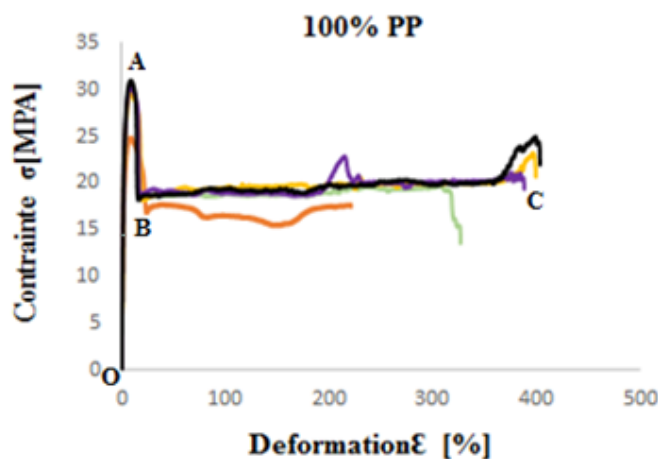


Figure IV.12 : Courbe contrainte déformation 100% PP.

L'allure de cette courbe représente le comportement d'un matériau élasto-viscoplastique, typique des polymères résistants ;

Sur cette courbe contrainte-déformation, on peut distinguer trois zones, à savoir :

- la zone OA : allant du point d'application de la contrainte jusqu'au seuil et qui montre une évolution linéaire de la contrainte en fonction de la déformation. Cette évolution obéit à la

loi de Hooke et indique un comportement élastique réversible où les chaînes macromoléculaires du polypropylène dans leur phase amorphe se déforment et s'allongent. Avant l'atteinte du seuil d'écoulement, des effets viscoélastiques interviennent ce qui induit à une déviation de la linéarité de la loi de Hooke.

- la zone AB : commence après le point seuil où on constate une diminution de la contrainte appliquée en fonction de la déformation. Ceci traduit le démarrage du phénomène de striction. Celui-ci indique le début d'une déformation hétérogène due à une distribution non uniforme de la contrainte. Cette déformation s'amorce sur un défaut existant sur l'éprouvette des échantillons. Le défaut en question peut être de différentes natures : une dislocation, une structure en bloc, des frontières inters cristallins dans le cristal, des structures globulaires ou fibrillaires ou encore des couches amorphes dans les polymères. La déformation se poursuit dans cette zone jusqu'au point du début d'apparition d'un plateau où la striction se stabilise.

- zone BC : Une fois la striction est stabilisée, on entame une troisième zone qui se traduit par un plateau. Ce dernier indique une propagation stable de la striction le long de la partie déformable des échantillons. Cette phase se traduit par une application d'une contrainte quasi-constante à l'échantillon le long de son taux de déformation naturel.

A la fin du plateau, une dernière étape s'affiche qui s'achève au point de rupture des échantillons. Au cours de cette étape, la contrainte supportée par les échantillons augmente en fonction de la déformation qui redevient homogène. Dans cette étape, les chaînes macromoléculaires s'orientent dans le sens de l'étirement provoquant ainsi une formation d'une fraction fibrillaire ce qui cause un durcissement structural puis on voit la rupture de nos échantillons.

III.1.1.2 Courbes contrainte-déformation du polymère 1 et ses mélanges

La courbe de la figure VI.13, représentant le comportement mécanique du polymère 1, a une allure d'un comportement mécanique d'un polymère viscoplastique sans seuil d'écoulement, comportement typique des matériaux résilient.

La courbe du polymère 1, polymère recyclé, se compose de deux parties :

La partie linéaire avec une droite avec une pente moins importante que dans le cas du 100% PP, de puis l'origine jusqu'à la valeur de contrainte maximale, le comportement du matériau dans cette région est fragile.

-la deuxième partie, avec une pente, partant du maximum de la contrainte jusqu'à la rupture (le plateau de plasticité).

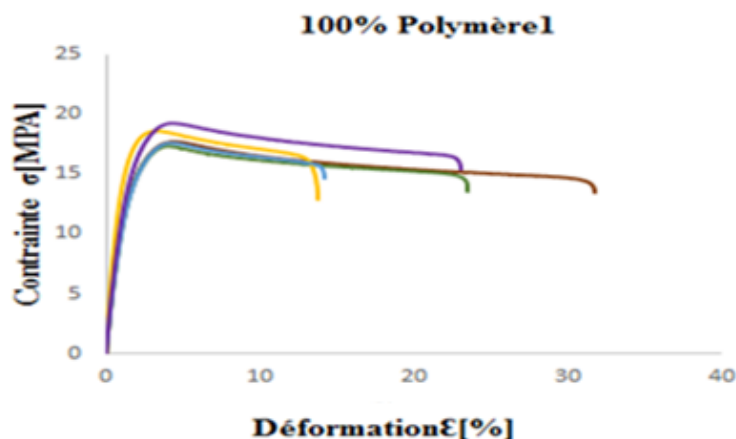


Figure IV.13 : Courbe contrainte déformation polymère 1.

L'allure des courbes de traction, des mélanges à 15% et 25% Polymère 1 et du polypropylène, sont semblables à celle du polypropylène. Représentant un comportement élasto viscoplastique avec seuil d'écoulement ; le plateau de plasticité et les déformations sont moins importantes que dans le cas de PP.

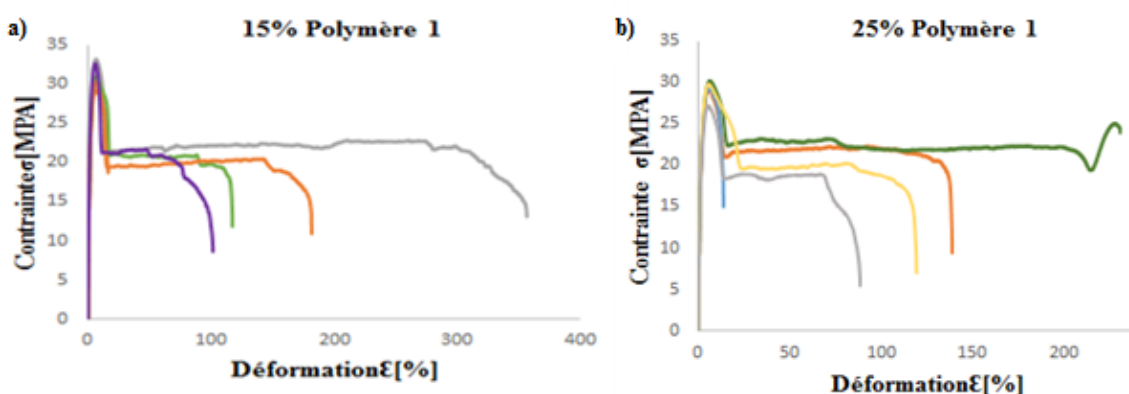


Figure IV.14 : Courbe contrainte déformation polymère 1/PP.
a) 15%/85 et b) 25%/75%.

III.1.1.3 Courbes contrainte-déformation du polymère 2 et ses mélanges

La courbe de la figure VI.15, représentant le comportement mécanique du polymère 2, l'allure des courbes de traction du polymère 2 (recyclé), figure VI.15 (a), a une allure d'un comportement mécanique d'un polymère viscoplastique sans seuil d'écoulement, comportement typique des matériaux résilients. La courbe présente deux parties :

La partie linéaire en ligne droite présente une pente plus faible que dans le cas du 100% PP, le comportement du matériau dans cette région est fragile.

La deuxième partie, avec pente, partant de la contrainte maximale jusqu'à la rupture.

L'allure des courbes de traction, des mélanges à 5%, 15% et 25% Polymère 2 figure VI.15 (b, c, d) sont semblables à celle du polypropylène. Représentant un comportement élasto

viscoplastique avec seuil d'écoulement ; le plateau de plasticité et les déformations sont moins importantes que dans le cas de PP.

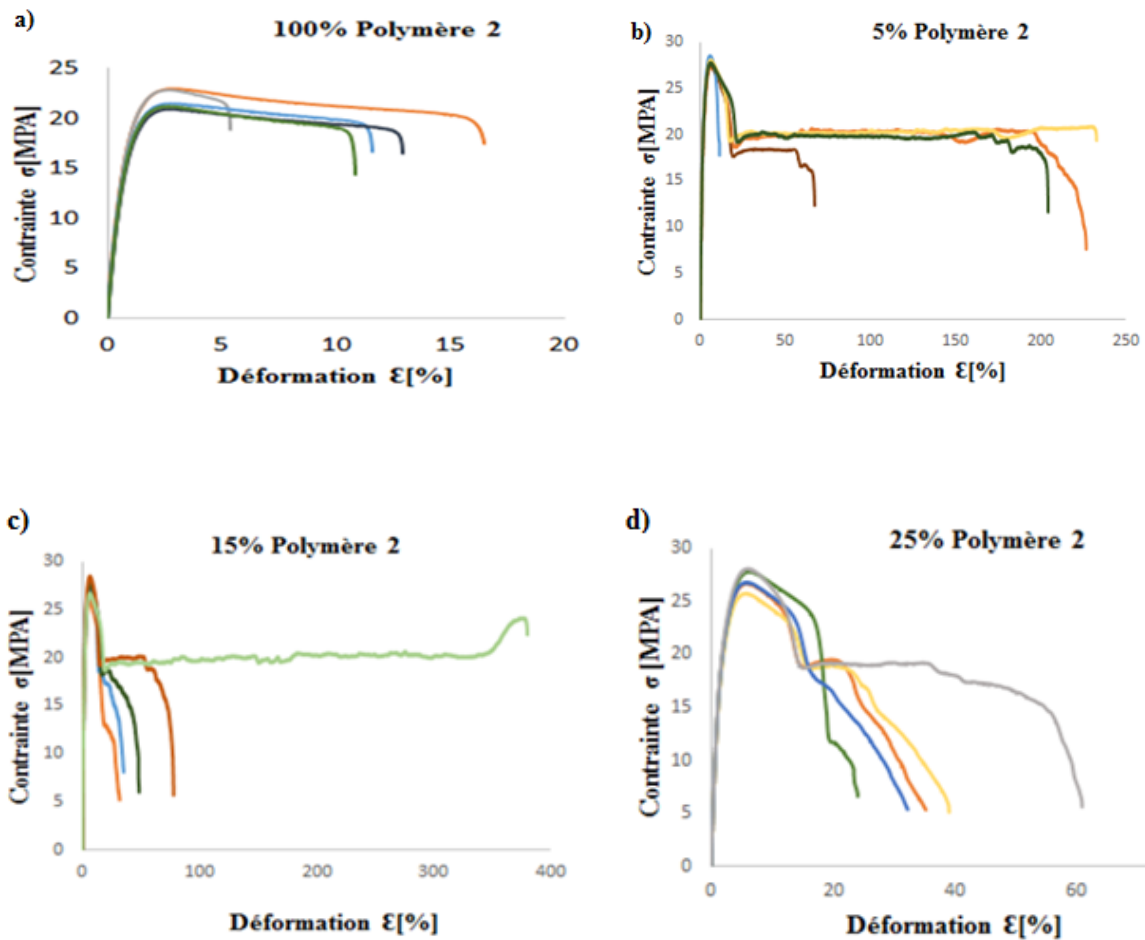


Figure IV.15 : Courbe contrainte déformation polymère 2/PP.
a) 100%/0% et b) 5%/95%. c) 15%/85% d) 25%/75%.

III.1.1.4 Courbes contrainte-déformation du polymère 3 et ses mélanges

La figure IV.16 est la courbe contrainte – déformation du polymère 3 et ces mélanges, l'allure des courbes de traction du polymère 3, ainsi que ses mélanges 5%, 15% et 25% ont une allure d'un comportement mécanique d'un polymère viscoplastique sans seuil d'écoulement, comportement typique des matériaux résilients. La courbe présente deux parties :

La partie linéaire en ligne droite présente une pente plus faible que dans le cas du 100% PP, le comportement du matériau dans cette région est fragile.

La deuxième partie, avec pente, partant de la contrainte maximale jusqu'à la rupture.

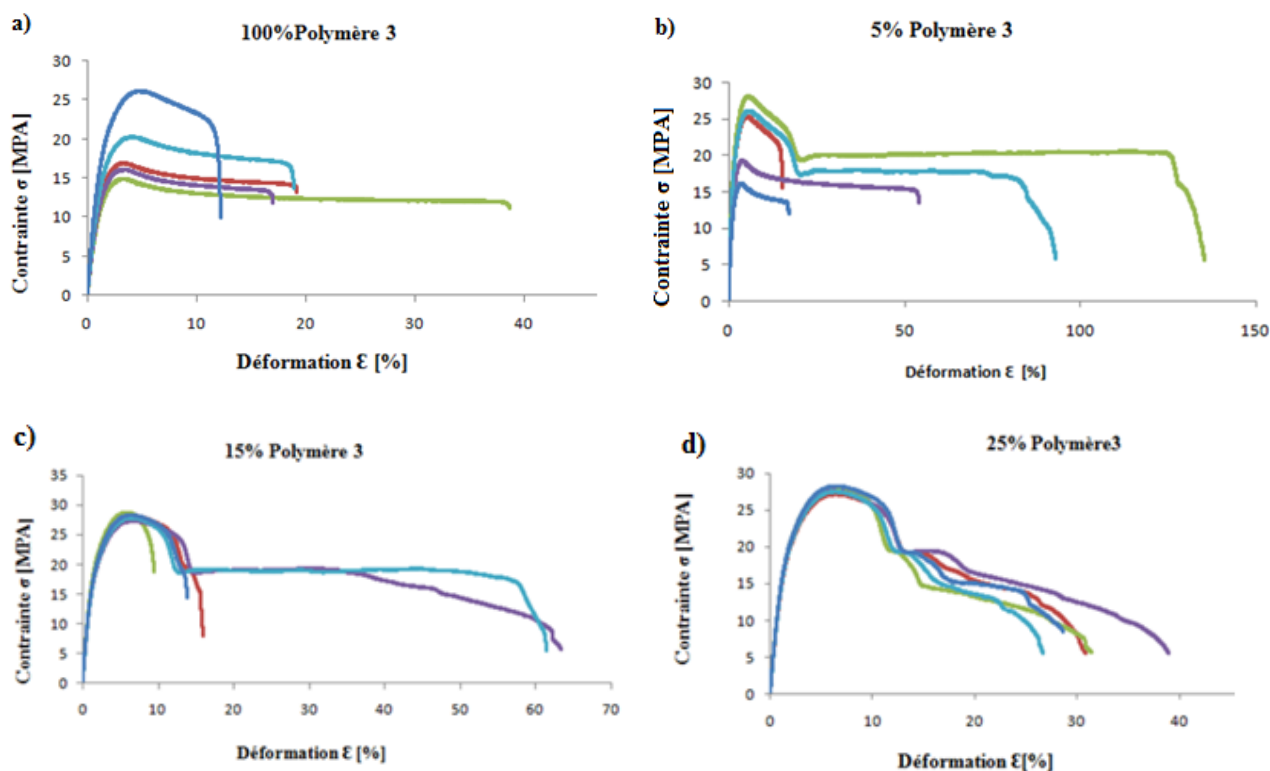


Figure IV.16 : Courbe contrainte déformation polymère 3/PP.
a)100%/0% et b) 5%/95%. c)15%/85% d) 25%/75%.

III.1.1.5 Courbes contrainte-déformation du polymère 4 et ses mélanges

La figure IV.17 est la courbe contrainte –déformation du polymère 4, la courbe (a) est typique d'un matériau plastique ductile sans seuil d'écoulement. Ce comportement mécanique est celui des polymères résilients, avec une partie linéaire dont le comportement dans cette région est fragile et la deuxième partie, avec une pente, qui commence du maximum de la contrainte jusqu'à la rupture.

L'allure de la courbe de traction, du mélange à 5% ressemble à celle du polymère 4

L'allure des courbes de traction, des mélanges 15% et 25% Polymère 4 [figure VI.17 (c, d)] sont semblables à celle du polypropylène. Représentant un comportement élasto viscoplastique avec seuil d'écoulement ; le plateau de plasticité et les déformations sont moins importantes que dans le cas de PP.

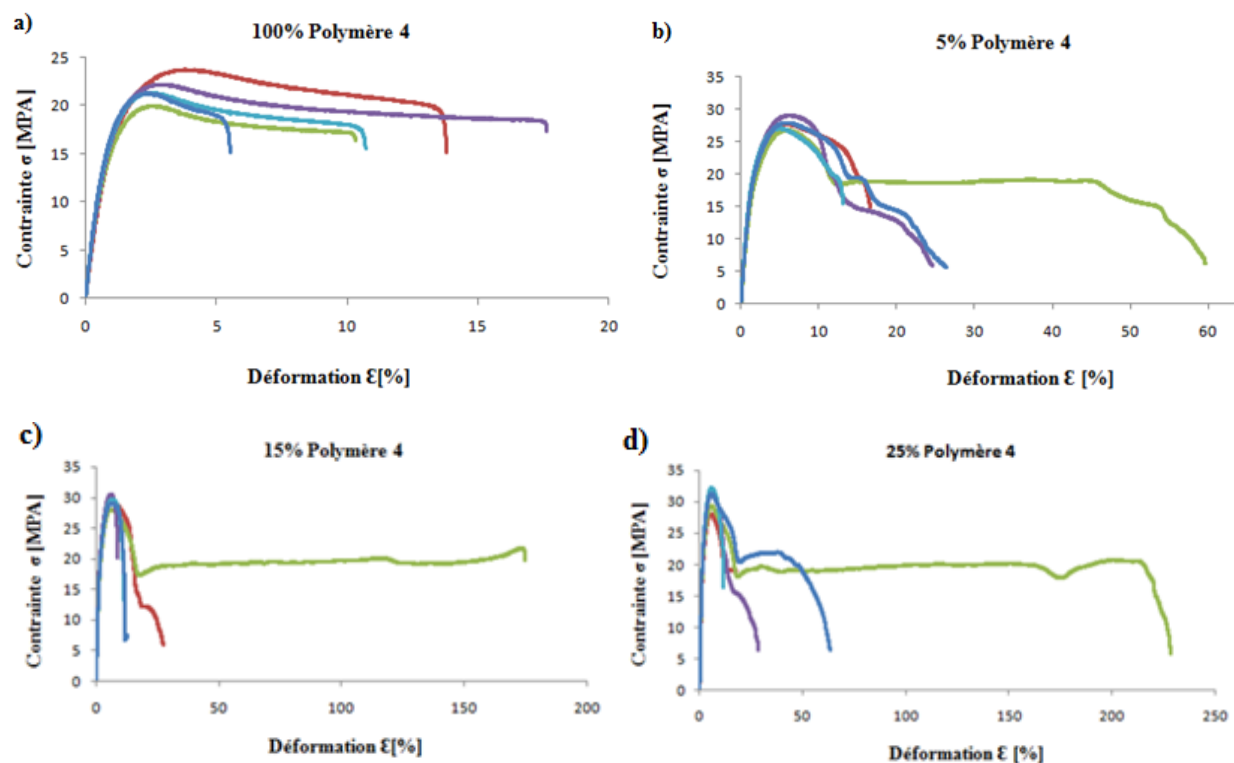


Figure IV.17 : Courbe contrainte déformation polymère 4/PP
 a)100%/0% et b) 5%/95%. c)15%/85% d) 25%/75%

Les polymères recyclés (polymère 1, 2, 3 et 4) ont tous un comportement de polymères résilients, leurs courbes ne présentent pas de seuil d'écoulement, par contre leurs mélanges à 5, 15 et 25% ont des comportements élasto viscoplastique avec seuil d'écoulement.

III.1.2 Variation des caractéristiques mécaniques issues des courbes contrainte-déformation

A partir des courbes contraintes déformation du PP, polymères 1, 2, 3 et 4 ainsi que de leurs mélanges, nous allons tirer les caractéristiques mécaniques usuelles tel que : la contrainte max (σ_{max}), la contrainte à la rupture (σ_{rup}), le module d'élasticité (E) et la déformation (ϵ_{rup}).

III.1.2.1 Variation de la contrainte maximale de nos polymères

Nous regroupons dans le tableau IV.5 les valeurs de la contrainte max des différents polymères étudiés. Nous traçons les courbes de variation de la contrainte max en fonction du taux de PP dans le mélange Polymère recyclé (1, 2,3 et 4)/ PP vierge en figures IV.18, 19,20 et 21. La superposition de ces courbes de variation de la contrainte max est donnée dans la figure IV. 22.

Tableau IV.5. Valeurs des contraintes max des polymères étudiés

	%polymère	Moyenne arithmétique (σ max)	SD (écart type)
Polymère 1 et ses mélanges	100	14,66	0,81
	25	28,91	1,16
	15	31,30	1,63
	5	34,19	1,76
Polymère 2 et ses mélanges	100	21,89	0,92
	25	27,05	0,93
	15	27,28	0,93
	5	27,92	0,42
Polymère 3 et ses mélanges	100	18,86	4,52
	25	27,74	0,45
	15	28,10	0,54
	5	22,99	5,04
Polymère 4 et ses mélanges	100	21,69	1,37
	25	27,74	0,45
	15	28,10	0,54
	5	27,70	0,88
PP	100%	22,73	0,56

a) Variation de la contrainte max du mélange (P1/PP)

La Figure IV.18 présente l'évolution de la contrainte maximale du polymère 1 en fonction du taux de PP dans le mélange P1/PP.

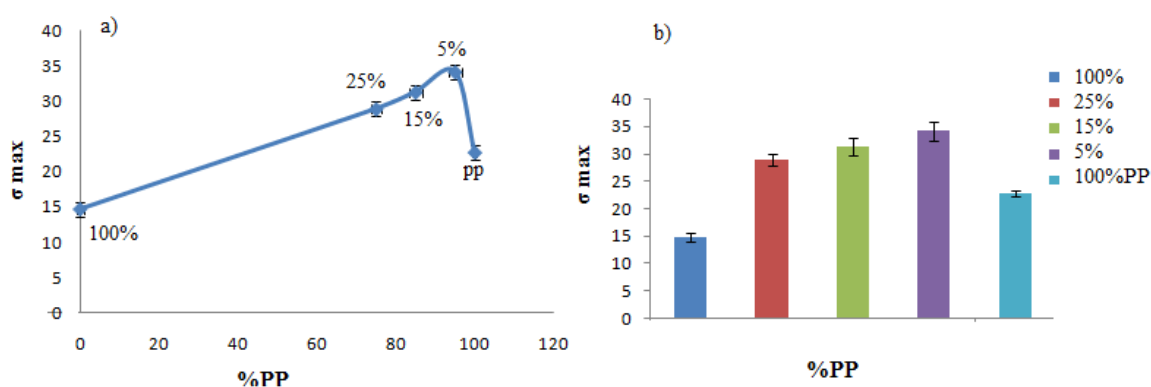


Figure IV.18: Variation de la contrainte maximale du polymère 1.
a) Variation de la contrainte maximale b) Histogramme

La contrainte max du PP (22,73MPa) est supérieure à celle du polymère recyclé1 (14,66MPa).

Les contraintes max de tous les mélanges Polymère recyclé 1/ PP sont supérieures à celle du PP vierge et aussi à celle du polymère 1.

Le mélangeage mécanique et le passage en extrusion du polymère 1 puis du mélange polymère 1/ PP à réarrangé la structure du mélange et à optimisé la valeur de la contrainte max.

Le mélange 5/95% (P1/PP) est le plus résistant de tous les mélanges (P1/PP).

Plus la quantité de polymère 1 augmente dans le mélange, plus la contrainte max diminue.

b) Variation de la contrainte maximale du polymère 2

La Figure IV.19 présente l'évolution de la contrainte maximale du polymère 2 en fonction du taux de PP dans le mélange P2/PP.

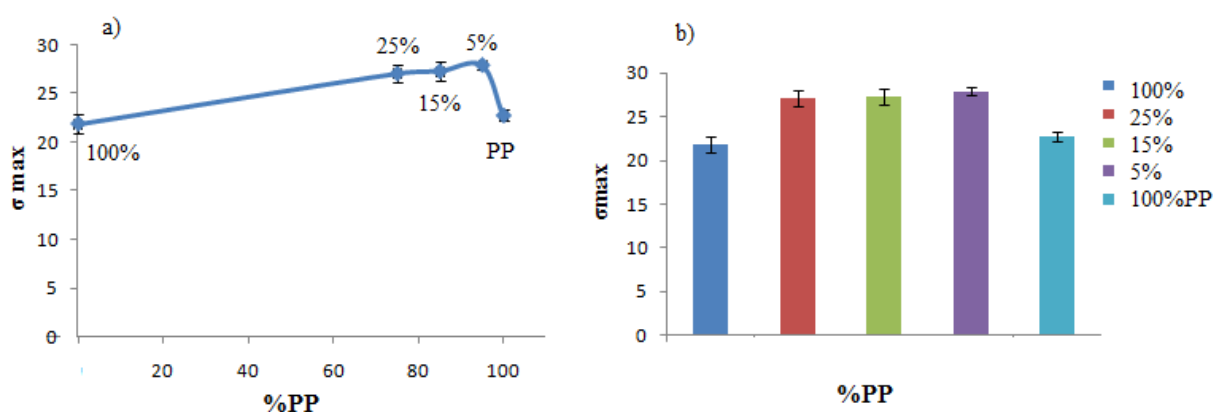


Figure IV.19 : Variation de la contrainte maximale du polymère 2.
a) Variation de la contrainte maximale b) Histogramme

La contrainte max du PP est légèrement supérieure à celle du polymère 2 (21,89MPa).

Même constatations que pour le mélange P1/PP, tous ces mélanges P2/PP ont des contraintes max supérieures à celles du PP et du P2.

La remise dans le cycle de transformation du mélange à régénéré la structure et à amélioré la résistance max.

c) Variation de la contrainte maximale du polymère 3

La Figure IV.20 présente l'évolution de la contrainte maximale du mélange polymère 3/ PP.

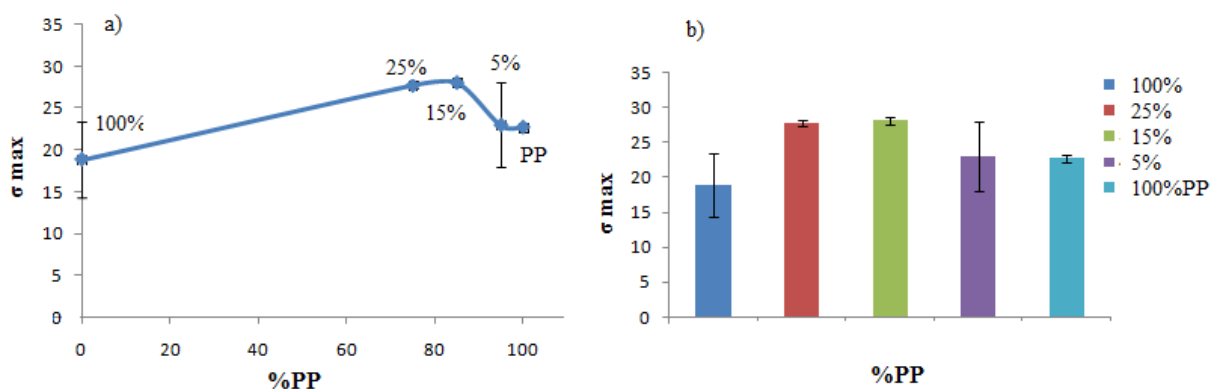


Figure IV.20 : *Variation de la contrainte maximale du polymère 3.*
 a) *Variation de la contrainte maximale* b) *Histogramme*

La contrainte max du PP est supérieure à celle du Polymère 3 (18,86MP).

Le mélange 5/95% P3/PP a une contrainte max presque équivalente à celle du PP.

Pour les mélange 15/85% et 25/75% P3/PP, la contrainte max est plus importante que celle du PP.

d) Variation de la contrainte maximale du polymère 4

La figure IV.21 présente la variation de la contrainte max des mélanges P4/PP.

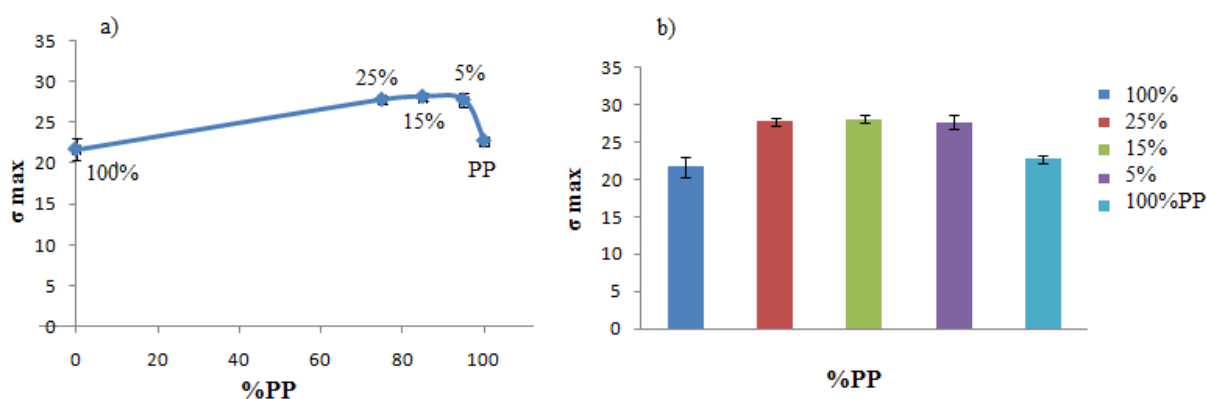


Figure IV.21 : *Variation de la contrainte maximale du mélange polymère 4/PP*
 a) *Variation de la contrainte maximale* b) *Histogramme*

Tous les mélanges P4/PP ont des contraintes max supérieures à celle du PP et à celle du polymère 4.

e) Superposition des courbes de variation de la contrainte maximale des mélanges

La figure IV.22 présente la superposition des courbes de variation de la contrainte max des mélanges polymères recyclés/ PP, en fonction du taux de PP dans le mélange.

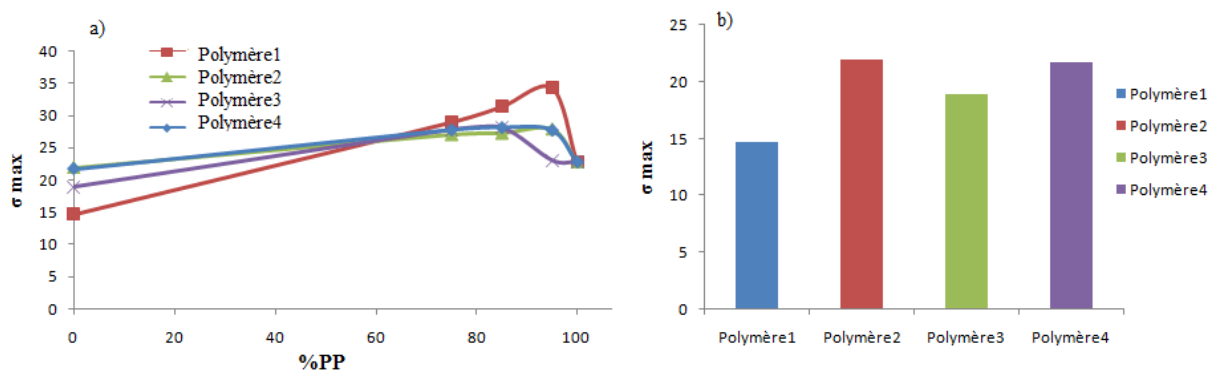


Figure IV.22 : Contraintes maximales de nos polymères et leurs mélanges.

a) Superposition des courbes des contraintes maximales.

b) Histogramme des courbes de contraintes maximales des quatre polymères recyclés.

Les polymères recyclés 2 et 4 ont des résistances max proches de celle du PP. bien que la contrainte max du polymère recyclé 1 est la plus faible de toutes les contraintes max des autres polymères (polymères 2, 3,4 et PP) mais ses mélanges avec le PP donnent des valeurs de contraintes max importantes.

III.1.2.2 Variation de la contrainte à la rupture de nos polymères

Nous regroupons dans le tableau IV.6 les valeurs de la contrainte à la rupture des différents polymères étudiés. Nous traçons les courbes de variation de la contrainte à la rupture en fonction du taux de PP dans le mélange Polymère recyclé (1, 2,3 et 4)/ PP vierge en figures IV.23, 24, 25 et 26. La superposition de ces courbes de variation de la contrainte à la rupture est donnée dans la figure IV. 27.

Tableau IV.6. Valeurs des contraintes à la rupture des polymères étudiés

	%polymère	Moyenne arithmétique (σ rup)	SD (écart type)
Polymère 1 et ses mélanges	100	13,51	1,01
	25	9,20	4,18
	15	12,61	3,75
	5	20,90	20,27
Polymère 2 et ses mélanges	100	16,76	1,63
	25	5,60	0,58
	15	9,46	7,30
	5	13,72	4,79
Polymère 3 et ses mélanges	100	11,91	1,50
	25	6,11	1,34
	15	10,46	5,88
	5	10,50	4,55
Polymère 4 et ses mélanges	100	15,9	0,91
	25	6,11	1,34
	15	10,46	5,88
	5	9,54	5,07
PP	100%	15,49	3,69

a) Variation de la contrainte à la rupture du polymère 1

La Figure IV.23, illustre les valeurs de la contrainte à la rupture des mélanges P1/PP.

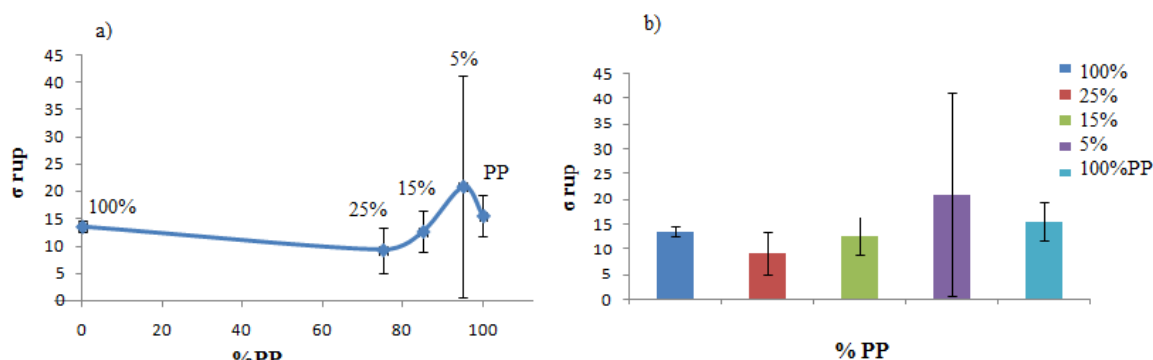


Figure IV.23 : Variation de la contrainte à la rupture du polymère 1.
 a) Variation de la contrainte à la rupture du polymère b) Histogramme

À partir de la figure IV.23, nous remarquons que la contrainte à la rupture du PP est supérieure à celle du polymère recyclé 1.

Le mélange 5/95% P1/PP à une contrainte à la rupture plus grande que celle du PP et des autres mélange P1/PP.

Plus la quantité de polymère recyclé1 augmente dans le mélange, plus la contrainte à la rupture diminue.

b) Variation de la contrainte à la rupture du polymère 2

La Figure IV.24, illustre les valeurs de la contrainte à la rupture des mélanges P2/PP.

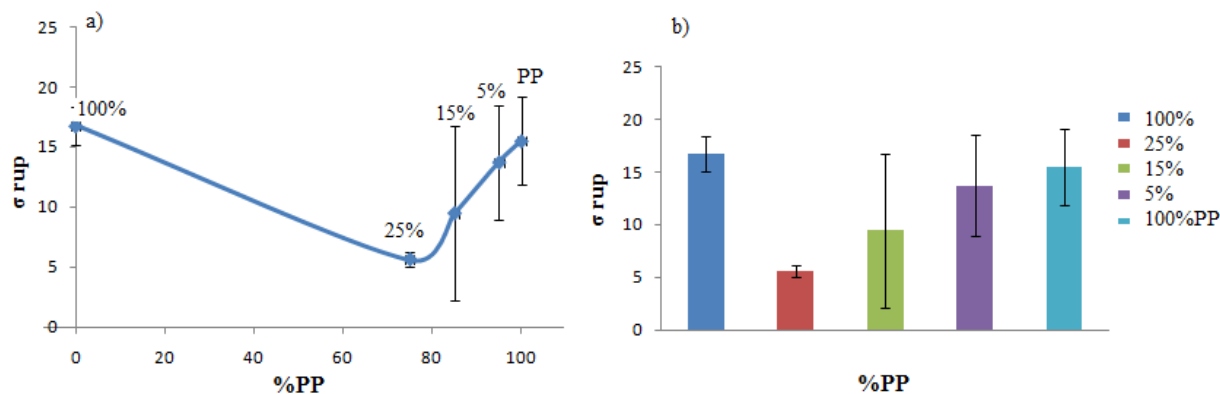


Figure IV.24 : Variation de la contrainte à la rupture du polymère 2.
 a) Variation de la contrainte à la rupture du polymère b) Histogramme

La contrainte à la rupture du polymère recyclé2 est supérieure à celle du PP.

Les contraintes à la rupture de tous les mélanges P2/PP sont inférieures à celles du PP et du P2.

Plus la quantité de polymère 2 augmente dans le mélange, plus la contrainte à la rupture diminue.

c) Variation de la contrainte à la rupture du polymère 3

La Figure IV.25, illustre les valeurs de la contrainte à la rupture des mélanges P3/PP.

La contrainte à la rupture du PP est supérieure à celle du polymère recyclé3.

La contrainte à la rupture du mélange 5/95% P3/PP et 15/85% P3/PP sont presque équivalentes.

La contrainte à la rupture du mélange 25/75% P3/PP est plus faible que la contrainte à la rupture de tous les autres mélanges.

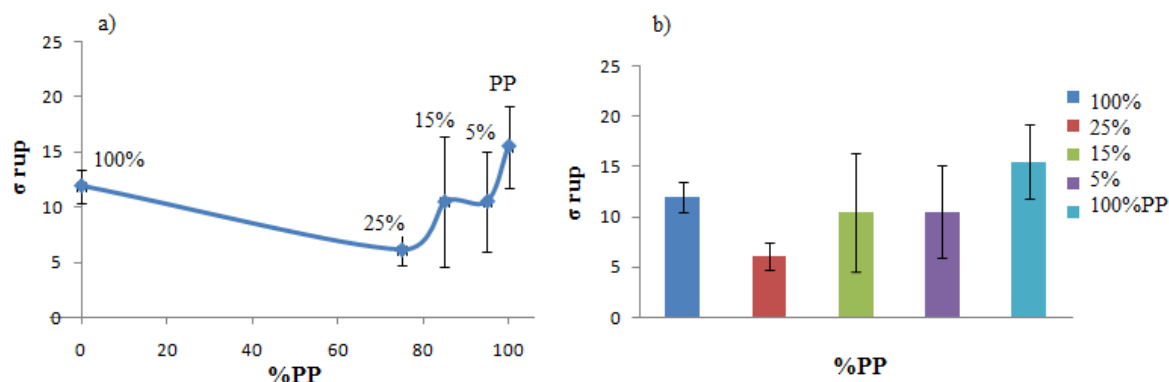


Figure IV.25 : Variation de la contrainte à la rupture du polymère 3.
a) Variation de la contrainte à la rupture du polymère b) Histogramme

d) Variation de la contrainte à la rupture du polymère 4

La Figure IV.26, illustre les valeurs de la contrainte à la rupture des mélanges P4/PP.

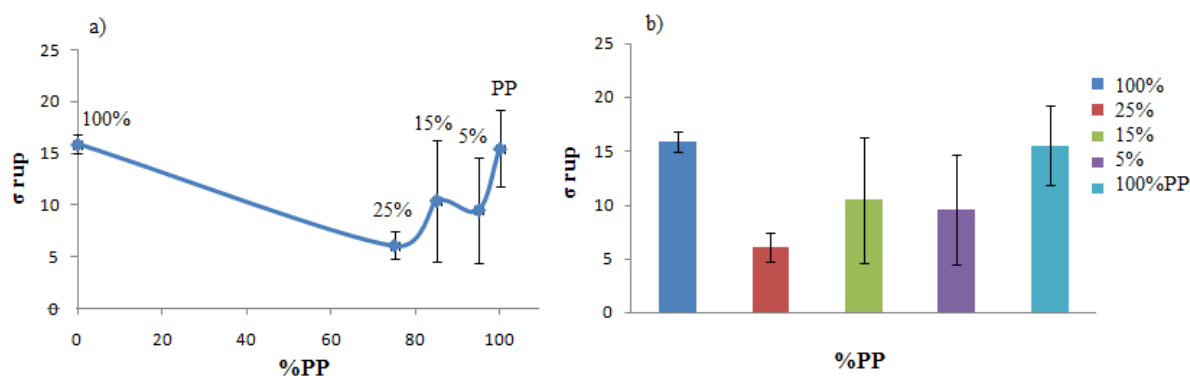


Figure IV.26 : Variation de la contrainte à la rupture du polymère 4.
a) Variation de la contrainte à la rupture du polymère b) Histogramme

La contrainte à la rupture du polymère recyclé 4 est légèrement supérieure à celle du PP.

La contrainte à la rupture du mélange 5/95% P4/PP et 15/85% P4/PP sont presque équivalentes.

e) Superposition des courbes de variation de la contrainte à la rupture des mélanges

La figure IV. 27 représente la superposition des courbes de contraintes à la rupture des différents mélanges.

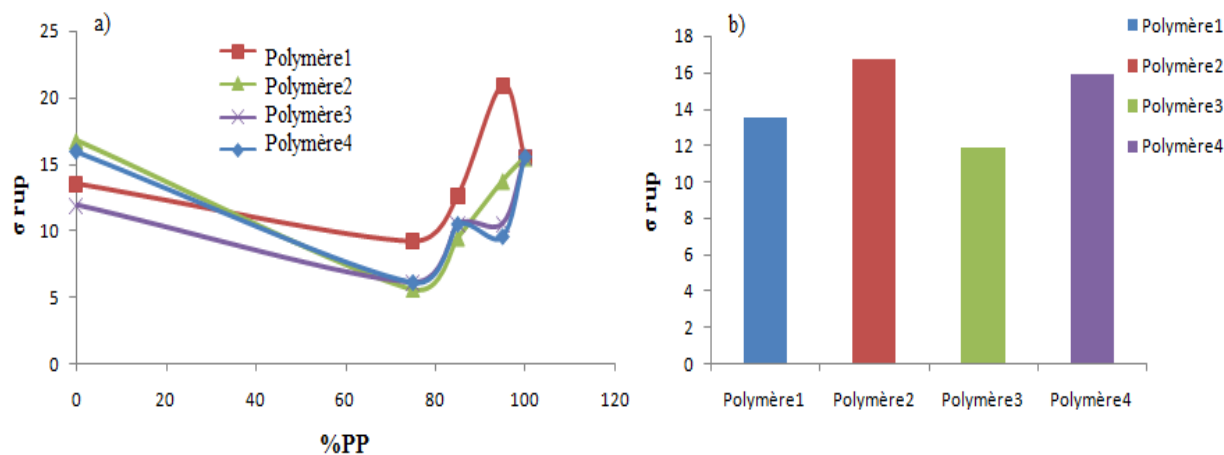


Figure IV.27 : Courbes des contraintes à la rupture de nos polymères et leurs mélanges.

a) Superposition des courbes de la contrainte à la rupture de nos mélanges.

b) Histogramme de la contrainte à la rupture des quarts polymères recyclés.

Les contraintes à la rupture des mélanges P1/PP sont les plus importantes par rapport aux autres contraintes à la rupture, ces mélanges sont plus résistants à la rupture.

Les contraintes à la rupture du P1 est légèrement supérieur à celle du P3 (selon le tableau IV.6 (13/11) respectivement), et la contraintes à la rupture des mélanges P1/PP sont nettement plus élevés que la contraintes à la rupture des mélanges P3/PP.

Les contraintes à la rupture des polymères recyclés P2 est légèrement supérieur à celle du polymère P4 (16/15).

III.1.2.3 Variation du module d'élasticité de nos polymères

Nous regroupons dans le tableau IV.7 les valeurs du module d'élasticité des différents polymères étudiés. Nous traçons les courbes de variation du module d'élasticité en fonction du taux de PP dans le mélange Polymère recyclé (1, 2, 3 et 4)/ PP vierge en figures IV.28, 29, 30 et 31. La superposition de ces courbes de variation de la contrainte à la rupture est donnée dans la figure IV. 32.

Tableau IV.7. Valeurs du module d'élasticité des polymères étudiés

	%polymère	Moyenne arithmétique (E)	SD (écart type)
Polymère 1 et ses mélanges	100	1301,76	318,18
	25	1682,72	57,67
	15	1759,82	83,85
	5	1864,70	61,53
Polymère 2 et ses mélanges	100	2551,22	106,65
	25	1709,37	33,92
	15	1605,58	74,42
	5	1584,17	36,28
Polymère 3 et ses mélanges	100	1383,51	249,14
	25	1613,19	35,55
	15	1653,95	50,81
	5	1514,98	204,73
Polymère 4 et ses mélanges	100	2351,34	188,33
	25	1613,30	35,72
	15	1653,95	50,81
	5	1715,00	123,16
PP	100%	1114,31	58,65

a) Variation du module d'élasticité du polymère 1

La figure IV. 28 présenter la variation du module d'élasticité du polymère 1 et ses mélanges.

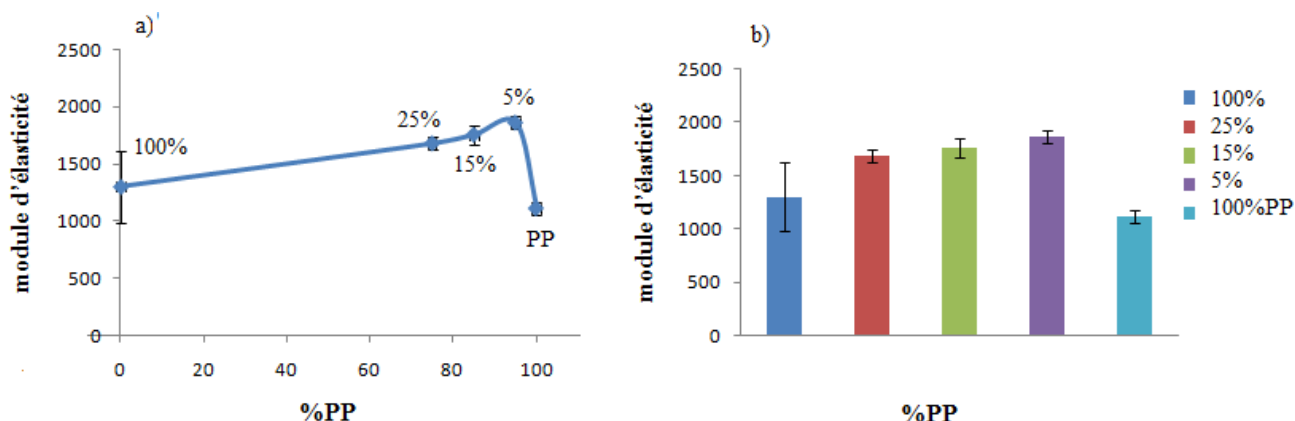


Figure IV.28 : Variation du module d'élasticité du polymère 1.

a) Variation du module d'élasticité b) Histogramme

Le module d'élasticité du polymère recyclé1 (1301MPa) est légèrement supérieur à celui du PP (1114MPa).

Tous les mélanges P1/PP ont des modules d'élasticité plus important que ceux du PP et du polymère recyclé 1.

Plus la quantité du polymère recyclé1 augmente dans le mélange, plus le module d'élasticité diminue, (même constatation que pour la contrainte max).

b) Variation du module d'élasticité du polymère 2

La figure IV.29 présente la variation du module d'élasticité du polymère 2 et ses mélanges.

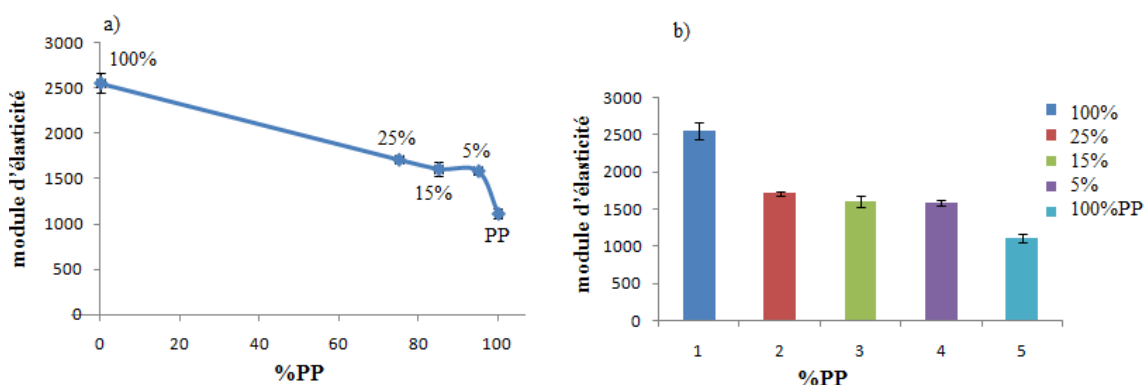


Figure IV.29 : Variation du module d'élasticité du polymère 2.

a) Variation du module d'élasticité b) Histogramme

Le module d'élasticité du polymère 2 plus important que celui du PP.

Plus la quantité du polymère recyclé augmente dans le mélange P2/PP, plus le module d'élasticité augmente.

c) Variation du module d'élasticité du polymère 3

La figure IV.30 présente la variation du module d'élasticité du polymère 3 et ses mélanges.

Le module d'élasticité du PP est plus faible que celui du polymère recyclé 3, les modules des mélanges sont presque équivalents et supérieur au module du pp et du polymère recyclé 3.

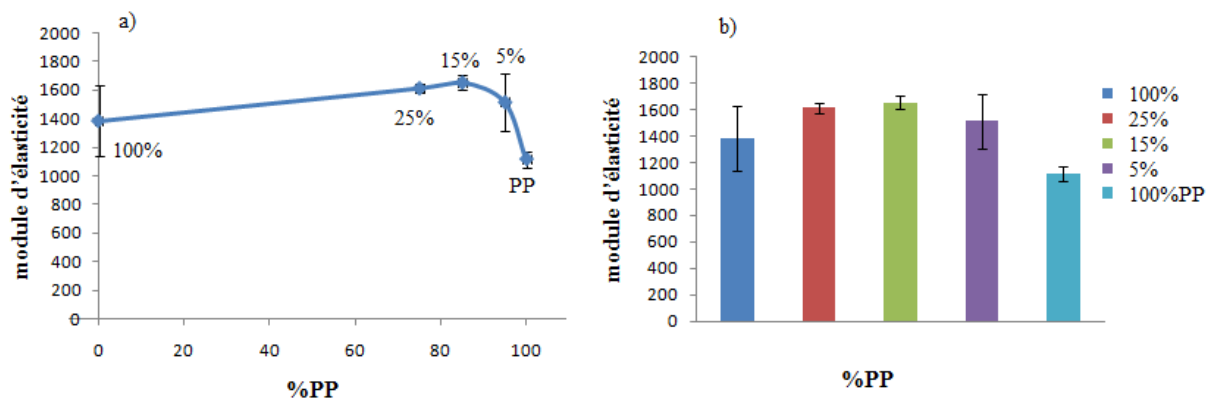


Figure IV.30 : Variation du module d'élasticité du polymère 3.
 a) Variation du module d'élasticité b) Histogramme

d) Variation du module d'élasticité du polymère 4

La figure IV.31 présente la variation du module d'élasticité du polymère 4 et ses mélanges.

Le module d'élasticité du PP est plus faible que celui du polymère recyclé 4.

Plus la quantité du polymère 4 augmente dans le mélange, plus le module d'élasticité diminue.

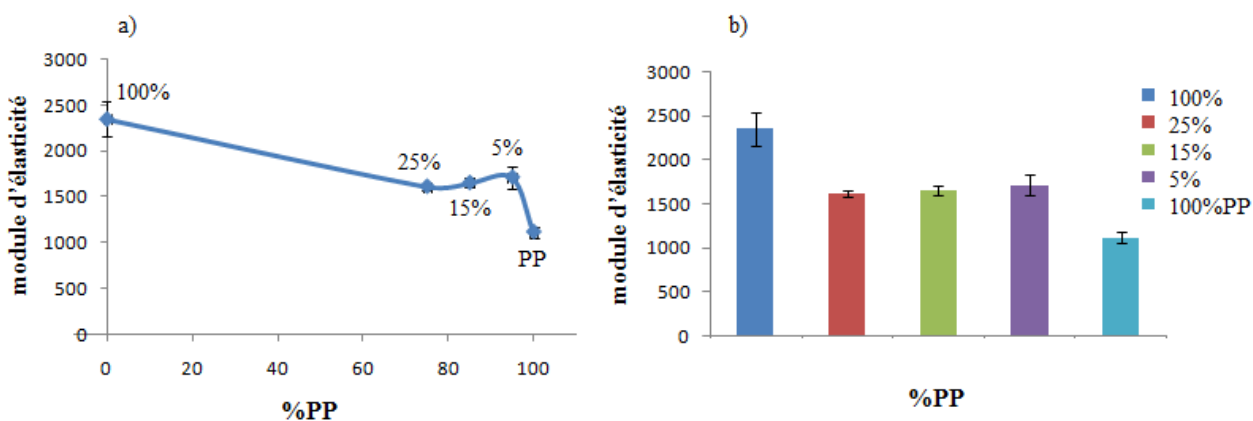


Figure IV.31 : Variation du module d'élasticité du polymère 4.
 a) Variation du module d'élasticité b) Histogramme.

e) Superposition des courbes de variation du module d'élasticité

La figure IV. 32 représente la superposition des courbes de la variation du module d'élasticité des différents mélanges.

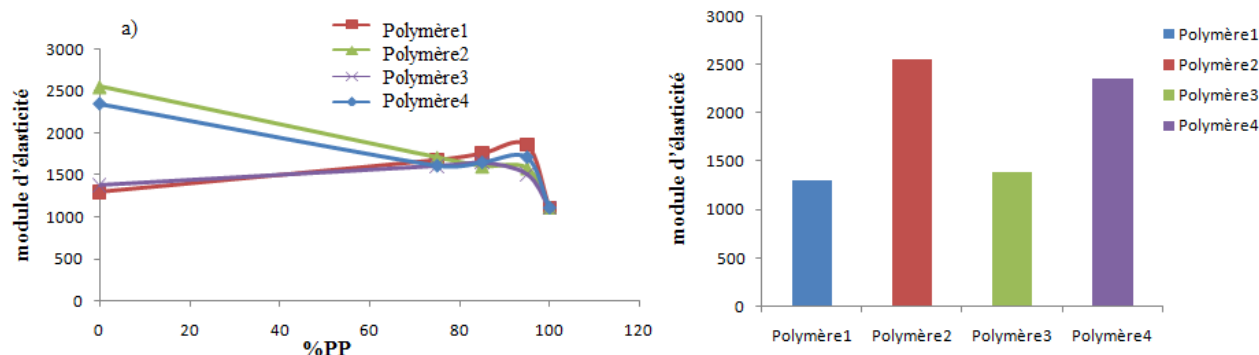


Figure IV.32 : Superposition des courbes du module d'élasticité de nos polymères.
 a) Superposition des courbes du module d'élasticité de nos mélanges.
 b) Histogramme du module d'élasticité des quarts polymères recyclés.

Le module d'élasticité du PP est inférieur aux modules de tous les polymères recyclés. Le mélange 5/95% (P1/PP) a le module d'élasticité le plus fort.

Le module d'élasticité du P1 est presque identique à celle du P3 (selon le tableau IV.7 (**1301 MPa /1383 MPa**)) respectivement, mais les modules des mélanges P1/PP sont nettement plus élevés par rapport aux modules d'élasticité des mélanges P3/PP.

Le module d'élasticité du polymère recyclé P2 est légèrement supérieur à celle du polymère P4 (**2551/2351**), le module d'élasticité des mélanges P4/PP à 5% et 15% sont faiblement supérieures aux modules des compositions presque équivalentes du mélange P2/PP. le module du mélange à 25% P2/PP est aussi légèrement supérieur à celui du mélange 25% P4/PP.

III.1.2.4 Variation de la déformation à la rupture de nos polymères

Nous regroupons dans le tableau IV.8 les valeurs de la déformation à la rupture des différents polymères étudiés. Nous traçons les courbes de variation de la déformation à la rupture en fonction du taux de PP dans le mélange Polymère recyclé (1, 2, 3 et 4)/ PP vierge en figures IV.32, 33, 34 et 35. La superposition de ces courbes de variation de la contrainte à la rupture est donnée dans la figure IV. 36.

Tableau IV.8. Valeurs des contraintes à la rupture des polymères étudiés

	%polymère	Moyenne arithmétique (E rup)	SD (écart type)
Polymère 1 et ses mélanges	100	21,22	7,48
	25	90,13	54,85
	15	154,75	127,30
	5	21,63	22,03
Polymère 2 et ses mélanges	100	10,76	5,52
	25	38,22	13,76
	15	114,66	149,41
	5	148,49	102,13
Polymère 3 et ses mélanges	100	21,21	10,14
	25	31,29	4,67
	15	32,80	27,08
	5	62,97	51,41
Polymère 4 et ses mélanges	100	11,58	4,48
	25	31,29	4,67
	15	32,80	27,08
	5	28,01	18,45
PP	100%	379,34	35,71

a) Variation de la déformation à la rupture du polymère 1

La figure IV.33 représente la variation de la déformation à rupture du polymère 1 et ses mélanges.

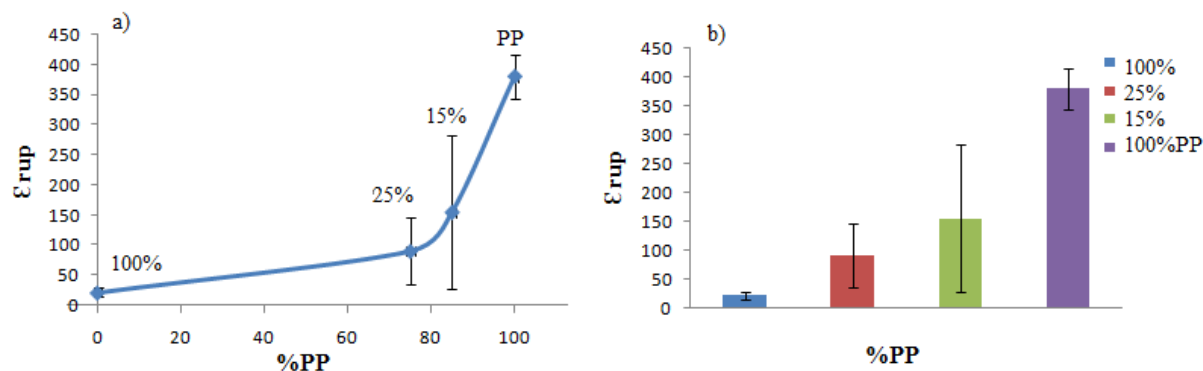


Figure IV.33 : Variation de la déformation à la rupture du polymère 1.
a) Variation de la déformation à la rupture b) Histogramme

La déformation à la rupture du polymère 1 recyclé est inférieure à celle du PP vierge. Plus la quantité de polymère 1 augmente dans le mélange, plus la déformation à la rupture diminue.

b) Variation de la déformation à la rupture du polymère 2

La figure IV.34 représente la variation de la déformation à rupture du polymère 2 et ses mélanges.

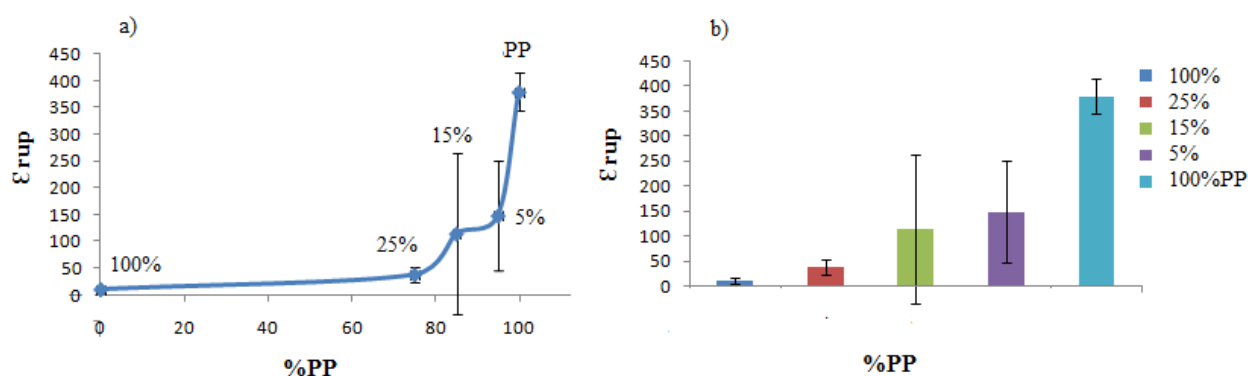


Figure IV.34 : Variation de la déformation à la rupture du polymère 2.
a) Variation de la déformation à la rupture b) Histogramme.

La déformation à la rupture du polymère 2 recyclé est inférieure à celle du PP vierge. Plus la quantité de polymère 2 augmente dans le mélange, plus la déformation à la rupture diminue.

c) Variation de la déformation à la rupture du polymère 3

La figure IV.35 représente la variation de la déformation à rupture du polymère 3 et ses mélanges.

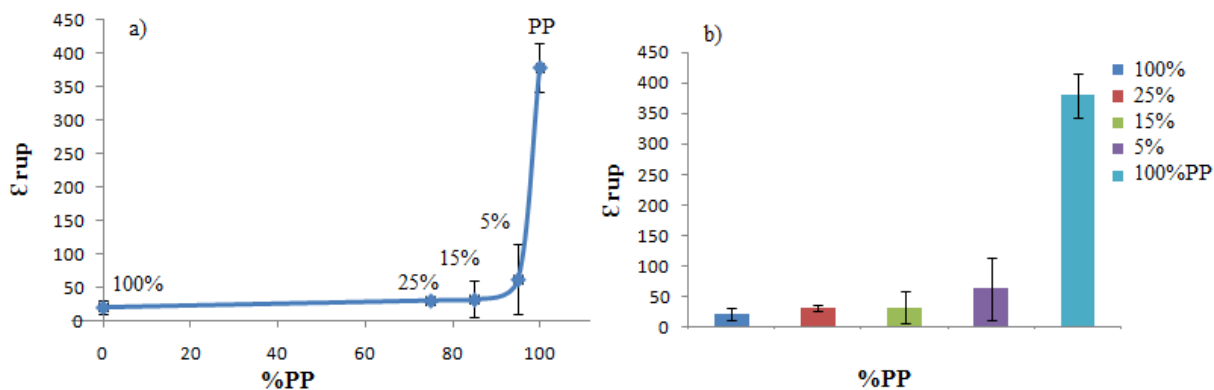


Figure IV.35 : Variation de la déformation à la rupture du polymère 3.
a) Variation de la déformation à la rupture b) Histogramme

La déformation à la rupture du polymère 3 recyclé est inférieure à celle du PP vierge. Plus la quantité de polymère 3 augmente dans le mélange, plus la déformation à la rupture diminue.

d) Variation de la déformation à la rupture du polymère 4

La figure IV.36 représente la variation de la déformation à rupture du polymère 4 et ses mélanges.

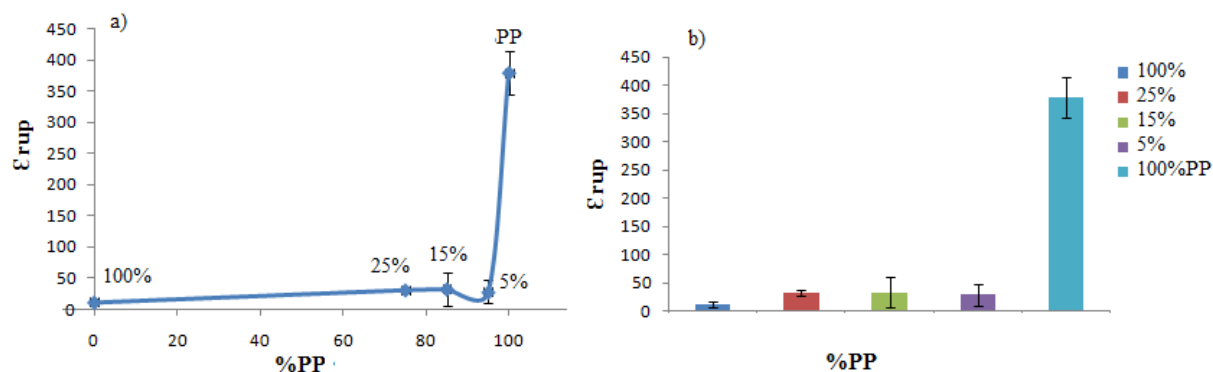


Figure IV.36 : Variation de la déformation à la rupture du polymère 4.
a) Variation de la déformation à la rupture b) Histogramme

La déformation à la rupture du polymère 4 recyclé est inférieure à celle du PP vierge. Plus la quantité de polymère 4 augmente dans le mélange, plus la déformation à la rupture diminue.

e) Superposition des courbes de variation de la déformation à rupture

La figure IV. 37 présenter la superposition des courbes de la variation de la déformation à rupture des différents mélanges.

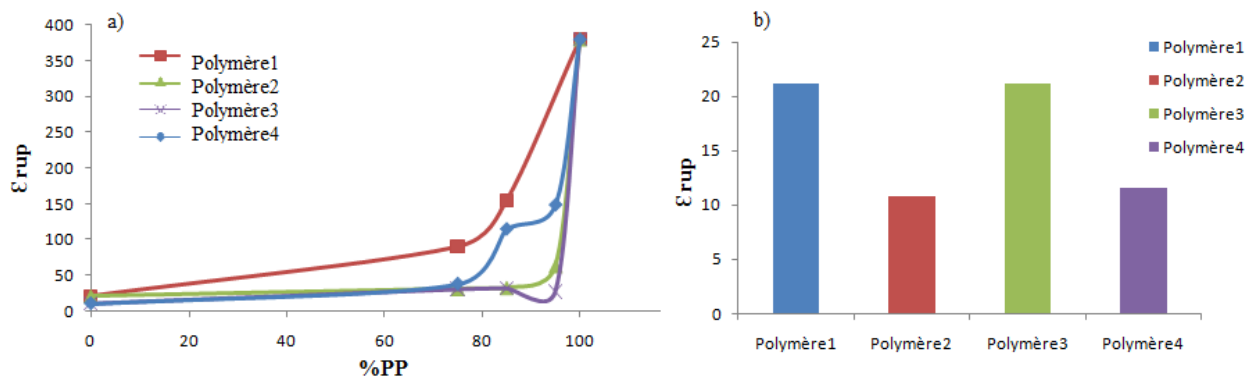


Figure IV.37 : Variation de la déformation à la rupture des polymères.

a) Superposition des courbes de la déformation de nos mélanges.

b) Histogramme de la déformation à la rupture des quarts polymères recyclés.

La déformation à la rupture du PP est plus importante que les déformations de tous les polymères recyclés.

La déformation du P1 est identique à celle du P3 (selon le tableau IV.8), mais les déformations des mélanges P1/PP sont nettement plus élevées que les déformations à la rupture des mélanges P3/PP.

La déformation à la rupture du polymère recyclé P2 est presque identique à celle du polymère P4, les déformations à la rupture des mélanges P4/PP à 5% et 15% sont supérieures aux déformations des compositions presque équivalentes du mélange P2/PP. le mélange à 25% P4/PP et 25% P2/PP ont la même valeur de déformation.

On porte sur le tableau IV.9 ci-dessous, les valeurs des caractéristiques mécaniques de tous nos mélanges.

On note en gras, couleur rouge, la valeur maximale correspondante à chaque caractéristique mécanique et on remarque :

- La valeur de la contrainte max est la plus élevée pour le mélange 5/95% (P1/PP),
- La valeur de la contrainte à la rupture est la plus élevée pour le mélange 5/95% (P1/PP).
- La valeur du module d'élasticité est la plus élevée pour le polymère 2, on remarque aussi que le module du mélange 5/95% (P1/PP) est le plus élevé par rapport au module des autres mélanges,
- valeur de la déformation à la rupture est la plus élevée pour le PP, on note aussi que la déformation à la rupture du mélange 15/85% (P1/PP) est la plus grande par rapport aux déformations à la rupture des autres mélanges.

Tableau IV.9. Valeurs des caractéristiques mécaniques des différents mélanges

	%polymère	σ max	σ rup	E	ϵ rup
Polymère 1 et ses mélanges	0	14,66	13,51	1301,76	21,22
	75	28,91	9,2	1682,72	90,13
	85	31,3	12,61	1759,82	154,75
	95	34,19	20,9	1864,7	21,63
Polymère 2 et ses mélanges	0	21,89	16,76	2551,22	10,76
	75	27,05	5,6	1709,37	38,22
	85	27,28	9,46	1605,58	114,66
	95	27,92	13,72	1584,17	148,49
Polymère 3 et ses mélanges	0	18,86	11,91	1383,51	21,21
	75	27,74	6,11	1613,19	31,29
	85	28,1	10,46	1653,95	32,8
	95	22,99	10,5	1514,98	62,97
Polymère 4 et ses mélanges	0	21,69	15,9	2351,34	11,58
	75	27,74	6,11	1613,3	31,29
	85	28,1	10,46	1653,95	32,8
	95	27,7	9,54	1715	28,01
PP	100	22,73	15,49	1114,31	379,34

III.2 Essai de résilience

Nous présentons ci-dessous, dans les tableaux IV.10, IV.11, IV.12 et IV.13, les résultats de l'essai de résilience effectué sur nos échantillons. Huit éprouvettes en moyenne en été rompues à la température ambiante de 23°C.

Tableau IV.10. Valeurs de l'essai de résilience du polypropylène, polymère 1 et ses mélanges

mélanges	Largeur	Epaisseur (mm)	Surface (Cm ²)	Energie de rupture (J)	Résilience (J/Cm ²)	Moyenne (J/Cm ²)
PP vierge						
1	9,7	6,44	0.6247	0,140	0.2241	0.1817
2	9,7	6,23	0.6043	0,090	0.1489	
3	9,7	6,36	0.6169	0,100	0.1621	
4	9,7	6,48	0.6285	0,100	0.1591	
5	9,7	6,29	0.61013	0,110	0.1802	
6	9,7	6,35	0.6159	0,115	0.1867	
7	9,7	5,85	0.5674	0,120	0.2114	
Polymère 1 (100%)						
1	9,7	6,15	0.5965	0,47	0,7523	
2	9,7	6,18	0.047	0,47	0,7777	
3	9,7	6,14	0.5956	0,47	0,7618	

4	9,7	6,43	0.6237	0,61	0,9705	0,7970
5	9,7	6,14	0.5956	0,48	0,7867	
6	9,7	6,18	0.5994	0,46	0,7468	
7	9,7	6,18	0.5994	0,48	0,8459	
8	9,7	6,18	0.5994	0,44	0,7340	
8	9,7	6,18	0.5994	0,44	0,7523	
Polymère 1 (5%)						
1	9,7	6,27	0.6082	0,07	0,1150	0,2315
2	9,7	6,51	0.6315	0,06	0,0950	
3	9,7	6,11	0.5927	0,15	0,2530	
4	9,7	6,42	0.6228	0,225	0,3612	
5	9,7	6,16	0.5975	0,165	0,2761	
6	9,7	6,12	0.5936	0,135	0,2274	
7	9,7	6,56	0.6363	0,185	0,2907	
8	9,7	6,85	0.6645	0,155	0,2332	
Polymère 1 (15%)						
1	9,7	6,36	0.6169	0,18	0,2917	0,32838
2	9,7	6,38	0.6189	0,175	0,2827	
3	9,7	6,16	0.5971	0,195	0,3265	
4	9,7	6,12	0.5936	0,225	0,3790	
5	9,7	6,21	0.5936	0,21	0,3537	
6	9,7	6,24	0.6053	0,25	0,4130	
7	9,7	6,22	0.6033	0,175	0,2900	
8	9,7	6,22	0.6033	0,175	0,2900	
Polymère1 (25%)						
1	9,7	6,17	0.5985	0,335	0,5597	0,48590
2	9,7	6,24	0.6053	0,29	0,4791	
3	9,7	6,17	0.5985	0,285	0,4761	
4	9,7	6,15	0.5965	0,305	0,5113	
5	9,7	6,13	0.5946	0,325	0,5465	
6	9,7	6,2	0.6014	0,235	0,3907	
7	9,7	6,2	0.6014	0,28	0,4655	
8	9,7	6,19	0.60043	0,275	0,4580	

Tableau IV.11. Valeurs de l'essai de résilience du polymère 2 et ses mélanges.

mélanges	Largeur	Epaisseur (mm)	Surface (Cm ²)	Energie de rupture (J)	Résilience (J/Cm ²)	Moyenne (J/Cm ²)
Polymère 2(100%)						
1	9,7	6,32	0.613	sup 0,5	0,8156	0,8781
2	9,7	6,24	0.6053	0,47	0,7764	
3	9,7	6,16	0.5975	0,48	0,8033	
4	9,7	6,06	0.5878	0,69	1,1738	
5	9,7	6,3	0.6111	0,44	0,7200	
6	9,7	6,06	0.5878	0,51	0,8676	
7	9,7	6,1	0.5917	0,53	0,8957	
8	9,7	6,15	0.5965	0,58	0,9723	
Polymère 2(5%)						
1	9,7	6	0.582	0,18	0,3092	0,3600
2	9,7	6	0.582	0,25	0,4295	
3	9,7	6,03	0.5849	0,25	0,4274	
4	9,7	6,07	0.5888	0,21	0,3566	
5	9,7	5,92	0.5742	0,17	0,2960	
6	9,7	6,12	0.5936	0,17	0,2863	
7	9,7	6,21	0.6024	0,23	0,3818	
8	9,7	6,03	0.5849	0,23	0,3932	
Polymère 2(15%)						
1	9,7	6,04	0.5859	0,17	0,2901	0,3008
2	9,7	6	0.582	0,165	0,2835	
3	9,7	6,11	0.5927	0,165	0,2785	
4	9,7	5,94	0.5762	0,16	0,2776	
5	9,7	5,93	0.5752	0,2	0,3477	
6	9,7	5,87	0.5694	0,17	0,2985	
7	9,7	5,97	0.5791	0,17	0,2935	0,3008
8	9,7	6,11	0.5927	0,2	0,3374	
Polymère 2(25%)						
1	9,7	6,12	0.5936	0,18	0,3032	0,3216
2	9,7	5,94	0.5762	0,24	0,4165	
3	9,7	6	0.582	0,235	0,4037	
4	9,7	6,04	0.5859	0,18	0,30721	
5	9,7	6,4	0.6208	0,16	0,2536	
6	9,7	5,92	0.5742	0,16	0,2786	
7	9,7	5,93	0.5752	0,14	0,2433	
8	9,7	5,9	0.5723	0,21	0,36694	

Tableau IV.12. Valeurs de l'essai de résilience du polymère 3 et ses mélanges.

mélanges	Largeur	Epaisseur (mm)	Surface (Cm ²)	Energie de rupture (J)	Résilience (J/Cm ²)	Moyenne (J/Cm ²)
Polymère 3 (100%)						
1	9,7	6,19	0.6004	0,360	0,5995	0,6056
2	9,7	5,94	0.5762	0,280	0,4859	
3	9,7	5,94	0.5762	0,350	0,6074	
4	9,7	6,01	0.5803	0,330	0,5686	
5	9,7	6	0.5820	0,290	0,4982	
6	9,7	6,15	0.5965	0,490	0,8214	
7	9,7	6,19	0.6043	0,290	0,4798	
8	9,7	6,05	0.5868	0,460	0,7839	
Polymère 3(5%)						
1	9,7	6	0.5820	0,480	0,8247	0,5157
2	9,7	6,01	0.5830	0,270	0,4631	
3	9,7	6,03	0.5849	0,490	0,8377	
4	9,7	6,03	0.5849	0,245	0,4188	
5	9,7	5,85	0.5675	0,190	0,3348	
6	9,7	5,90	0.5432	0,250	0,4602	
7	9,7	5,97	0.5791	0,225	0,3885	
8	9,7	5,96	0.5781	0,230	0,3978	
Polymère 3 (15%)						
1	9,7	5,95	0.5772	0,255	0,4417	0,3076
2	9,7	5,90	0.5723	0,140	0,2446	
3	9,7	5,88	0.5703	0,215	0,3769	
4	9,7	5,95	0.5772	0,160	0,2772	
5	9,7	5,94	0.5771	0,160	0,2772	
6	9,7	5,97	0.5791	0,160	0,2762	
7	9,7	5,90	0.5723	0,155	0,2708	
8	9,7	5,92	0.5743	0,170	0,2960	
Polymère 3 (25%)						
1	9,7	5,91	0.5733	0,160	0,2790	0,3171
2	9,7	5,83	0.5655	0,165	0,2917	
3	9,7	5,96	0.5781	0,170	0,2940	
4	9,7	5,94	0.0576	0,240	0,4165	
5	9,7	5,89	0.5713	0,150	0,2625	
6	9,7	5,96	0.5681	0,230	0,4048	
7	9,7	5,90	0.0572	0,160	0,2795	
8	9,7	6	0.5830	0,180	0,3087	

Tableau IV.13. Valeurs de l'essai de résilience du polymère 4 et ses mélanges.

mélanges	Largeur	Epaisseur (mm)	Surface (mm ²)	Energie de rupture (J)	Résilience (J/Cm ²)	Moyenne (J/Cm ²)
Polymère 4 (100%)						
1	9,7	6,05	58,68	0,290	0,4942	0,4126
2	9,7	6,20	60,14	0,310	0,5154	
3	9,7	6,14	59,56	0,190	0,3190	
4	9,7	6,03	58,49	0,215	0,3675	
5	9,7	6,14	59,56	0,190	0,31900	
6	9,7	6,08	58,98	0,250	0,4238	
7	9,7	0,02	58,39	0,220	0,3767	
8	9,7	6,20	60,14	0,290	0,4822	
Polymère 4(5%)						
1	9,7	6,03	0.5849	0,245	0,4188	0,3535
2	9,7	6,05	0.5869	0,180	0,3067	
3	9,7	5,94	0.5761	0,165	0,2863	
4	9,7	5,80	0.5626	0,250	0,4443	
5	9,7	5,98	0.5800	0,185	0,3189	
6	9,7	5,92	0.5742	0,240	0,4179	
7	9,7	5,86	0.5684	0,195	0,3430	
8	9,7	6	0.5820	0,170	0,2920	
Polymère 4 (15%)						
1	9,7	6,02	0.5839	0,145	0,2483	0,3283
2	9,7	5,89	0.5713	0,200	0,3500	
3	9,7	5,91	0.5733	0,180	0,3139	
4	9,7	6	0.582	0,225	0,3865	
5	9,7	5,76	0.5587	0,260	0,4653	
6	9,7	5,85	0.5674	0,145	0,2555	
7	9,7	6,03	0.5849	0,190	0,3248	
8	9,7	5,89	0.5674	0,160	0,2819	
Polymère 4 (25%)						
1	9,7	5,85	0.5674	0,160	0,2819	0,4254
2	9,7	5,89	0.5713	0,200	0,3500	
3	9,7	5,96	0.5781	0,230	0,3978	
4	9,7	6,05	0.5868	0,190	0,3237	
5	9,7	6,01	0.5830	0,185	0,31732	
6	9,7	5,85	0.5674	0,210	0,37010	
7	9,7	6,03	0.5849	0,190	0,32484	
8	9,7	6	0.5820	0,185	0,3178	

La figure IV.38 représente la variation de la résilience de nos polymères ainsi que de leurs mélanges en fonction de la quantité du PP vierge dans le mélange PP/ polymère recyclé.

Tous les polymères recyclés sont plus résilient que le PP vierge.

L'ajout du PP à ces polymères fait diminuer leurs résiliences.

La superposition de toutes les courbes de résilience est donnée par la figure IV38 e), nous observons sur cette courbe que les mélanges à 15% polymère recyclé (85% PP) ont des résiliences presque similaires (avoisinant la valeur 0,3 J/Cm²).

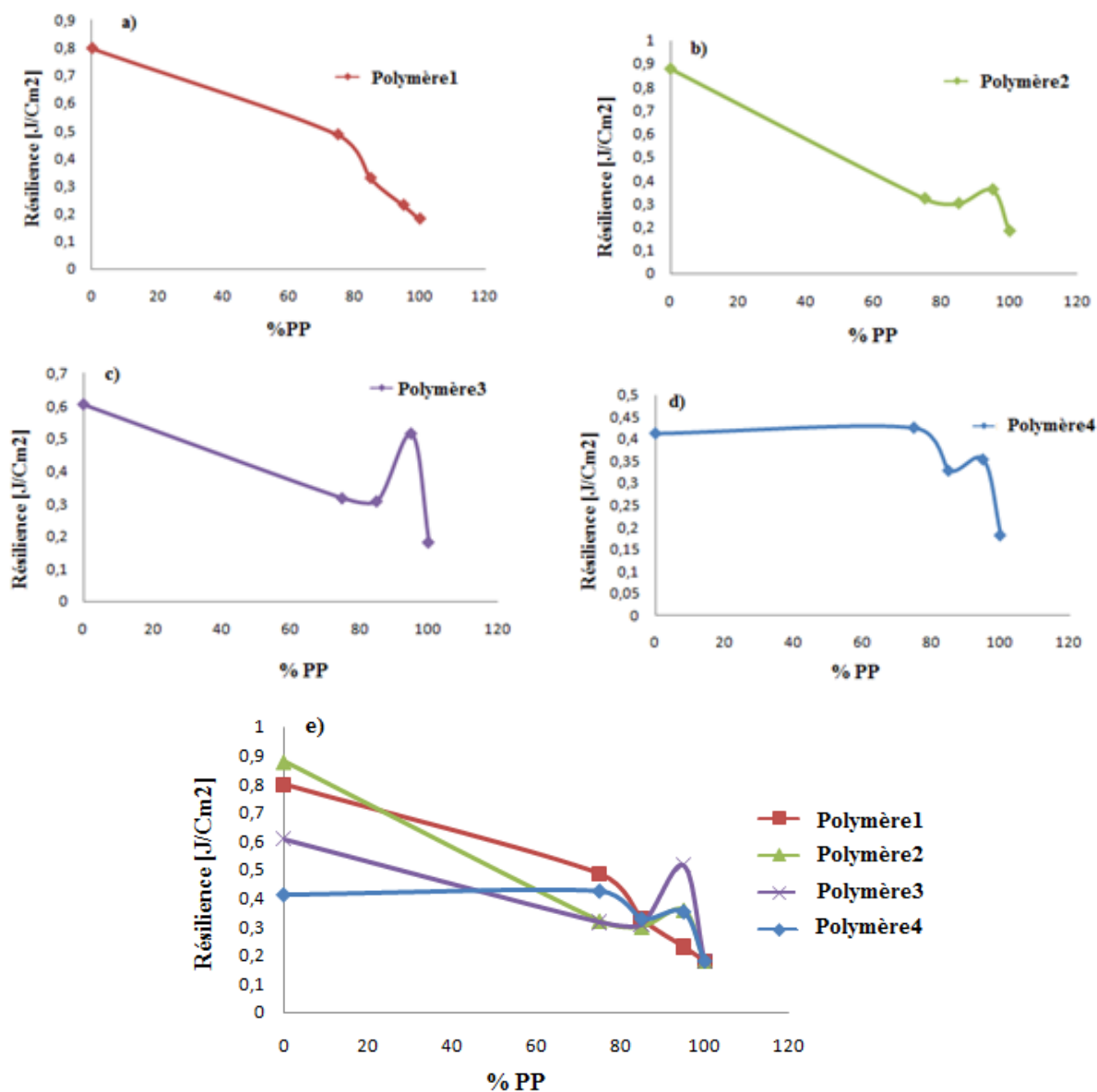


Figure IV.38 : Variation de la résilience des mélanges en fonction du % PP.

IV. Observation microscopique

IV.1 Observation au microscope optique

Nous présentons ci-dessous les micrographies de l'observation au microscope optique de nos mélanges. Nous avons observé la surface des disques de micro dureté, avec un grossissement 100.

IV.1.1 Observation au microscope optique du polypropylène (PP), polymère1 et leur mélange 25/75%

La figure IV.39 a) présente l'observation au microscope optique de la surface du PP la structure semble homogène avec la présence de taches noires (micro vides) dues à la présence de bulle d'aire lors du refroidissement après la transformation en injection du polypropylène.

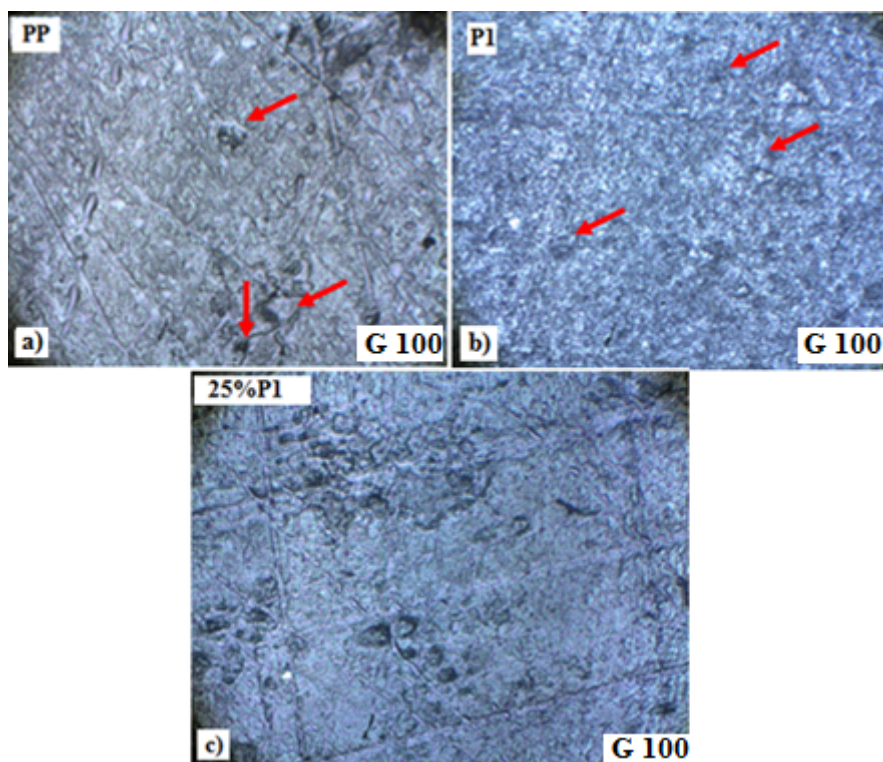


Figure IV.39 : Observation au microscope optique
:a) du polypropylène (PP), b) du Polymère 1 et c) du mélange 25% P1/75%PP
flèches rouge : Micro vides.

La figure IV.39 b) présente l'observation au microscope optique de la surface du polymère 1 la structure semble plus ou moins homogène avec la présence de taches noires (micro vides) dues à la présence de bulle d'aire lors du refroidissement après la transformation en injection du polymère 1.

La figure IV.39 c) représente l'observation au microscope optique du mélange 25/75% (P1/PP), des cavités plus importantes en nombre et en surface sont visibles sur cette micrographies. Les caractéristiques mécaniques des mélanges P1/PP sont les plus importantes

que les caractéristiques des autres mélanges, cela s'explique sûrement par l'homogénéité de l'état de surface de ces mélanges.

IV.1.2 Observation au microscope optique du polymère 2 et du mélange 15/85% (P2/PP)

La figure IV.40 présente l'observation au microscope optique du polymère 2 et son mélange à 15% avec du PP.

Sur la micrographie a) de la figure, nous observons l'état de surface du polymère 2 ; c'est un état semblable à celui du PP et du polymère 1 ; structure homogène avec présence de cavité et de porosité. Sur la micrographie b) nous observons un état de surface ayant deux contrastes, le premier de couleur claire représentant le PP et le second d'une couleur foncée représentant le polymère 2, polymère recyclée (flèches jaunes sur la micrographie). Les flèches rouges montrent les porosités (vides) existant sur la surface du mélange.

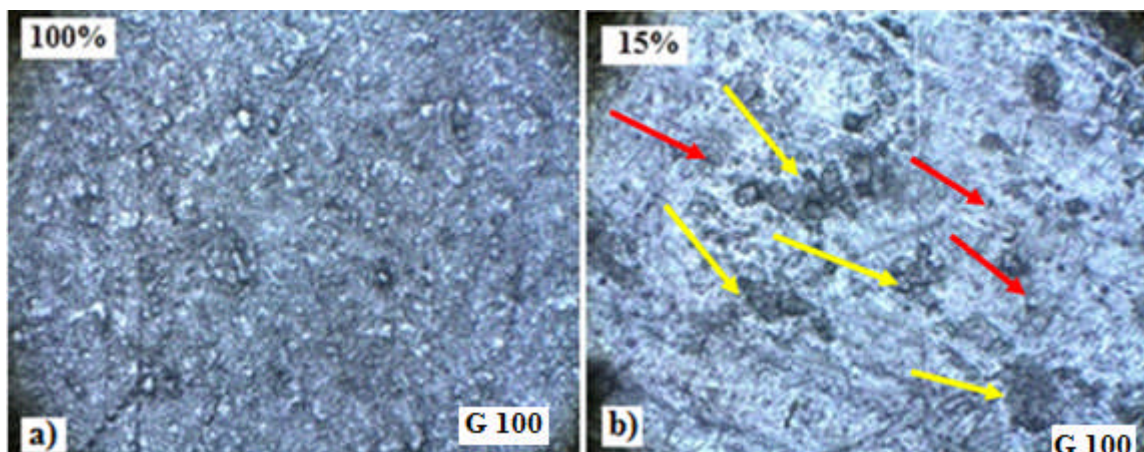


Figure IV.40 : Observation au microscope optique.

a) du polymère 2 et b) du mélange 15/85% (P2/PP)

Flèches rouge : Micro vides. Flèches jaunes: Polymère 2.

IV.1.3 Observation au microscope optique du polymère 3 et du mélange 15/85% (P3/PP)

La figure IV.41 présente l'observation au microscope optique du polymère 3 et son mélange à 15% avec du PP.

Sur la micrographie a) de la figure, nous observons l'état de surface du polymère 3 ; c'est un état semblable à celui du PP, du polymère 1 et du polymère 2; structure homogène avec présence de cavité et de porosité (flèches rouges). Sur la micrographie b) nous observons un état de surface ayant deux contrastes, le premier de couleur claire représentant le PP et le second d'une couleur foncée représentant le polymère 3, polymère recyclée (flèches jaunes sur la micrographie).

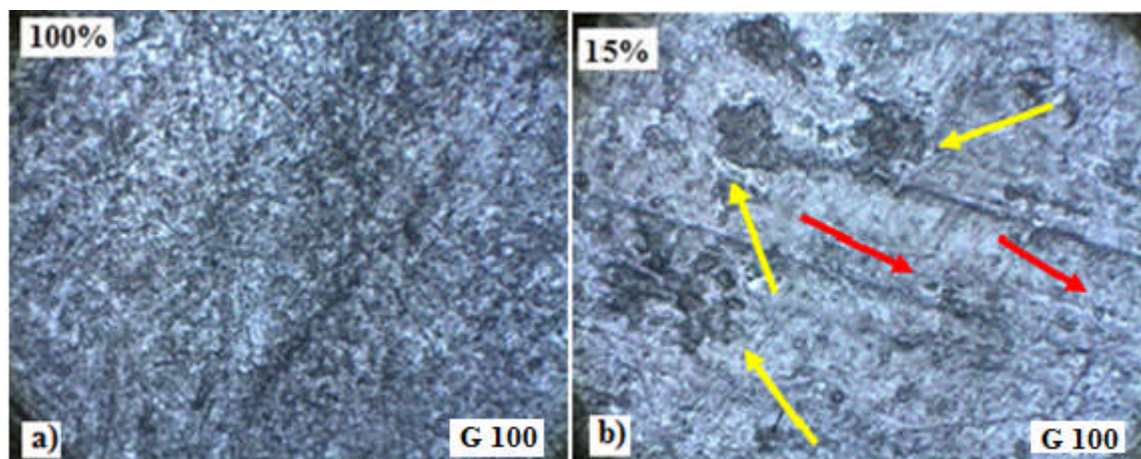


Figure IV.41 : Observation au microscope optique.
a) du polymère 3 et b) du mélange 15/85% (P3/PP)
 Flèches rouge : Micro vides. Flèches jaunes: Polymère 3.

IV.1.4 Observation au microscope optique du polymère 4 et du mélange 25/75% (P4/PP)

La figure IV.42 présente l'observation au microscope optique du polymère 4 et son mélange à 25% avec du PP.

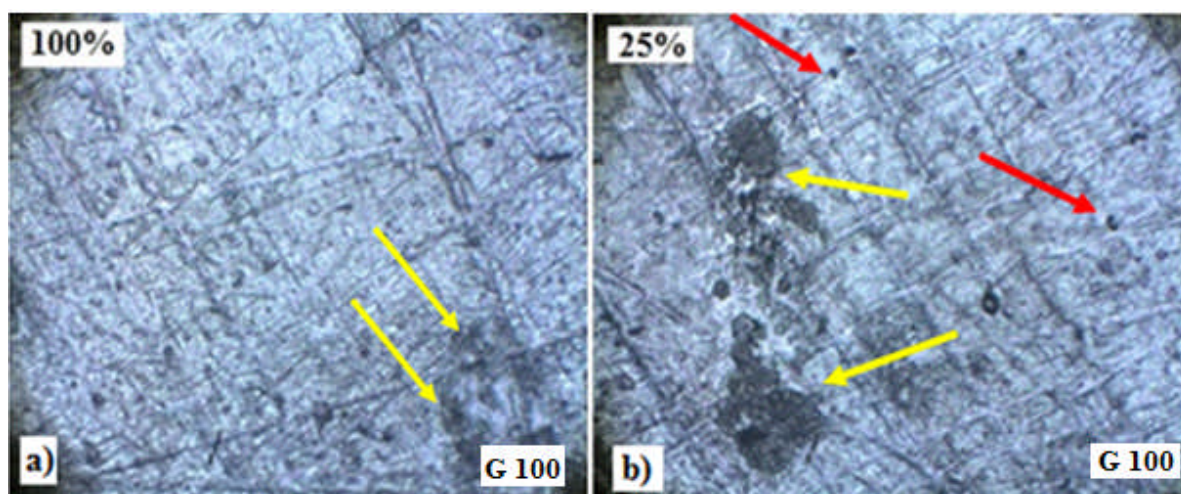


Figure IV.42 : Observation au microscope optique.
a) du polymère 4 et b) du mélange 25/75% (P4/PP).
 Flèches rouge : Micro vides. Flèches jaunes: Polymère 4.

Sur la micrographie a) nous observons la présence de matière foncée dans notre polymère 4, cela signifie que le polymère 4 est un mélange de PP et d'une autre matière probablement un élastomère (comme l'EPDM).

Sur la micrographie b) nous constatons les mêmes observations que dans le cas des mélanges PP avec les polymères 2 et 3, la présence d'une matière foncée dans le mélange indique le non homogénéité du mélange PP/P4.

IV.2 Observation au microscope électronique à balayage monophasique du polymère.

Les observations à la microscopie électronique à balayage (MEB) des faciès de rupture obtenue par essai de résilience de nos mélanges PP/Polymères recyclés sont données dans ce qui suit.

IV.2.1 Observation au MEB du faciès de rupture en résilience du polypropylène (PP)

Le PP est un polymère résistant de faible résilience, le faciès de rupture en résilience présente des surfaces franches, surfaces sombres sur la micrographie a), agrandissement 200 μm . Ces surfaces sont représentées sur la micrographie par des flèches rouges.

Les surfaces claires sur la micrographie représentent la partie de matière résiliente du PP. La zone entourée d'un cercle noir sur la micrographie b) est un agrandissement de la zone entourée de la micrographie a), cette zone correspond à la partie résiliente du PP.

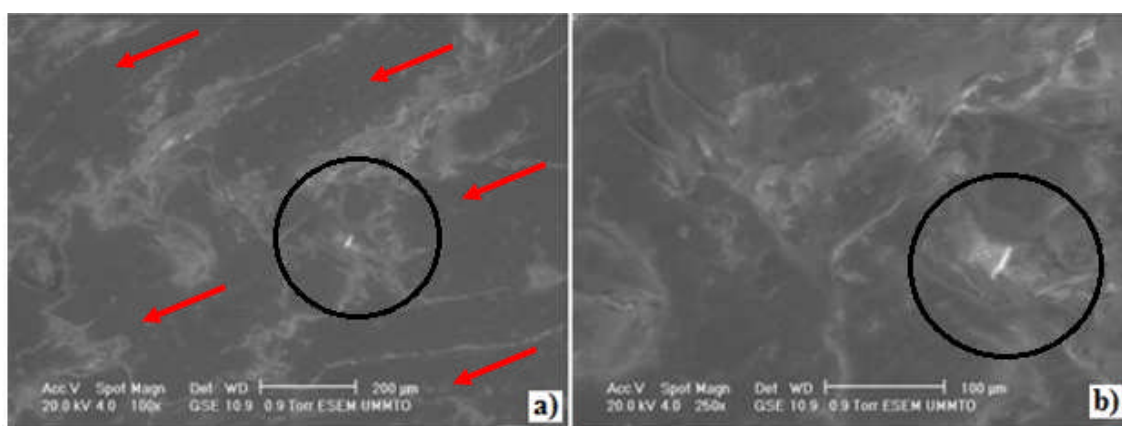


Figure IV.43 : *Micrographie MEB du polypropylène (PP)*
a) [G200 μm] et b) [G100 μm].

IV.2.2 Observation au MEB du faciès de rupture en résilience du polymère 2

Le faciès de rupture en résilience du polymère 2 est donné par la micrographie de la figure IV.44

Le polymère 2 est le polymère le plus résilient de tous les polymères utilisés pour l'élaboration de nos mélanges et du PP.

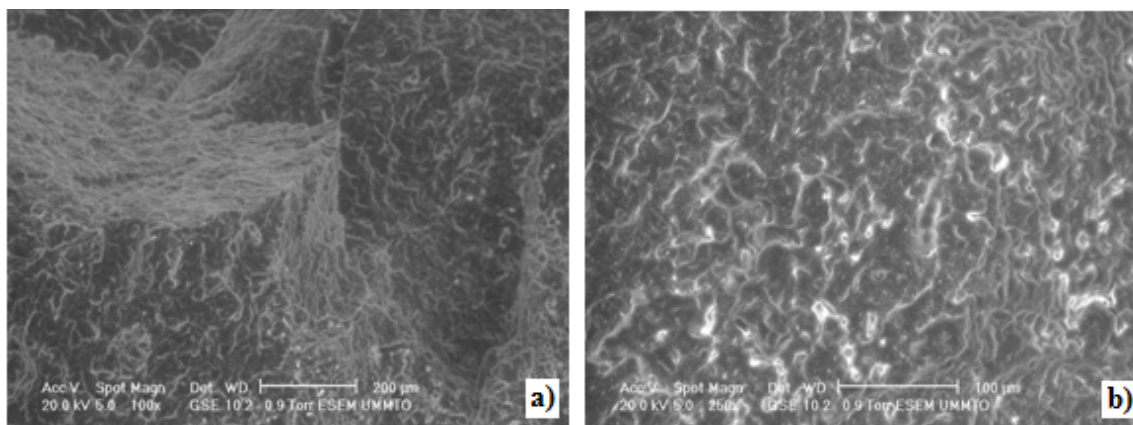


Figure IV.44 : Micrographie MEB du polymère 2
a) [G200 µm] et b) [G100 µm]

Ce comportement de résilience apparaît clairement sur la micrographie par le caractère fibrillaire de la surface.

IV.2.3 Observation au MEB du faciès de rupture en résilience du polymère 3

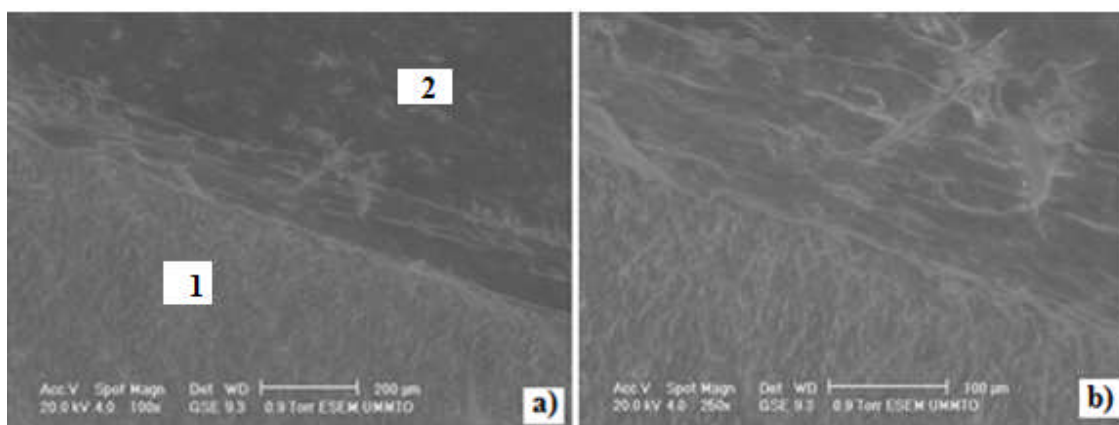


Figure IV.45 : Micrographie MEB du polymère 3.
a) [G200 µm] et b) [G100 µm].

La figure IV. 45 est l'observation au MEB du polymère3. Sur la micrographie a) nous voyons un contraste de couleur sur le faciès de rupture que nous marquons par 1 et 2. La zone 1 de couleur claire, ressemble à la surface de rupture du polymère 2, zone fibrillaire, alors que la zone 2, où la matière semble être des lignes allongées parallèles entre elles. En se référant à la composition de la matière de la garniture de portière 3, cette portière est composée de

polymère et élastomère, donc du PP et de l'élastomère. Par conséquent nous considérons que la zone 2 est constituée d'un élastomère. La résilience de ce polymère 3 est légèrement inférieure à celle du polymère 2 est beaucoup plus grande que celle du PP.

IV.2.4 Observation au microscope électronique à balayage du mélange polymère 3 /PP (25/75%)

La figure IV.46 représente le faciès de rupture en résilience du mélange P3/PP à la composition 25/75%.

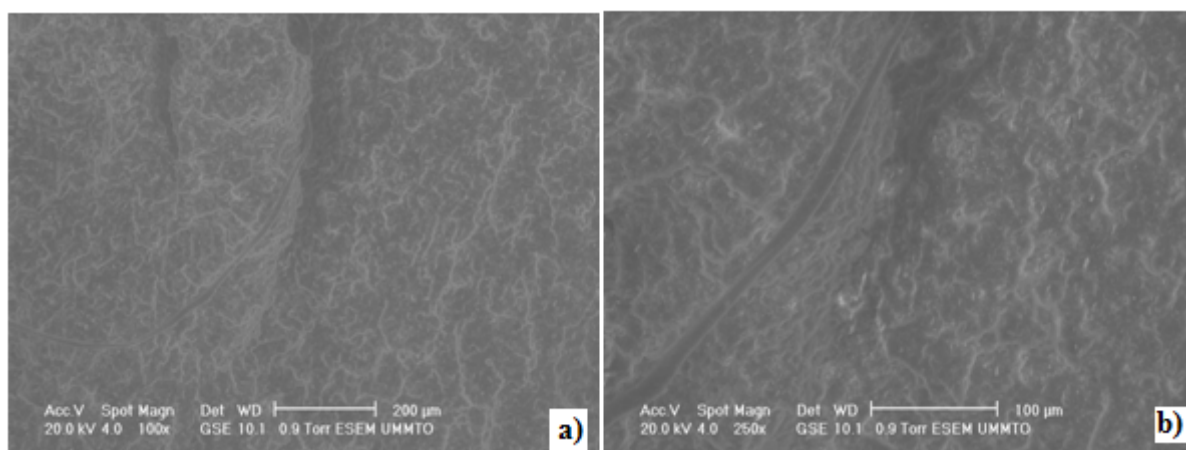


Figure IV.46 : Micrographie MEB du mélange polymère 3 /PP (25%/75%)
a) [G200 μm] et b) [G100 μm]

Le mélange des deux polymères PP/ P3 recyclé donne une structure qui semble homogène avec existence de zone sombres indiquant la présence de la phase élastomère (déjà existant dans le polymère 3 en figure IV. 45). Ce mélange est moins résilient que le polymère 3.

V. Conclusion

Après l'élaboration des mélanges par procédé d'extrusion (pour l'homogénéisation des composants du mélange) puis par injection (pour avoir des éprouvettes normalisées), nous avons analysé les échantillons par les différentes méthodes de caractérisation physico chimique et mécanique.

Les polymères de récupération P1, P2, P3 et P4 sont tous du PP (analyse DSC), et sont tous plus résilients que le PP vierge (test de résilience).

L'ajout des matières recyclées au PP permet d'obtenir des formulations intéressantes du point de vue résistance mécanique à l'image du mélange 5/95% (P1/PP) (σ_{\max} et σ_{rup}), le mélange 15/85% (P1/PP) est le plus ductile de tous les mélanges étudiés.

Les observations au microscope optique des nos mélanges montre une homogénéité dans le mélange P1/PP (qui a induit de très bonnes caractéristiques mécaniques de résistance) et une non homogénéité des mélanges P2/PP, P3/PP et P4/PP.

L'observation au microscope électronique à balayage à révélé le caractère de faible résilience du PP par l'existence d'un faciès de rupture ayant des surfaces franches. Les faciès de rupture en résilience du polymère recyclé P2 a un aspect fibrillaire reflétant un caractère très ductile. Nous avons observé l'existence de matière élastomère (EPDM) dans le faciès de rupture en résilience du polymère P3 et son mélange P3/PP.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Notre travail porte sur la valorisation des déchets polymères issus des véhicules en fin de vie (VHU) récupérés dans les casses automobiles. Nous nous sommes intéressées au recyclage des garnitures intérieures de portières des véhicules automobiles.

Après la collecte, le lavage (pour éliminer le maximum d'impuretés), nous avons découpé et broyé (granulé) les garnitures (quatre garnitures de marques automobile différentes).

L'étude consiste en l'élaboration et la caractérisation physico chimique (test à feu, densité, indice de fluidité, et la DSC) et mécanique (essai de traction, essai de résilience) des mélanges polymères recyclés / PP vierge.

Nous avons choisi le polymère PP (polypropylène) comme matrice car c'est un polymère de grande diffusion (peu coûteux et très utilisé en industrie), doté de propriétés mécaniques acceptables en termes de résistance et de ductilité.

La transformation des mélanges et l'élaboration d'éprouvettes normalisées s'est faite par le procédé d'extrusion puis d'injection. Les compositions des mélanges élaborés sont : (5/95%), (15/85%) et (25/75%) polymère recyclé / PP vierge.

Les résultats obtenus révèlent que :

- la caractérisation par DSC montre que les polymères formant les différentes garnitures automobiles utilisées sont du polypropylène, et cela par la détermination de leurs températures de fusion qui sont toutes proches de celle du PP.
- Le test de densité indique que deux garnitures auto ont des densités proches de celle du PP (0,89 et 0,90) et que deux autres garnitures ont des densités supérieures à celle du PP soit (1,04 et 1,01).
- Tous les polymères recyclés ont des indices de fluidité supérieurs à 25 g/10min donc ils sont tous des grades injection.
- l'essai de traction, qu'ont subi nos polymères, montre que le PP a un comportement élasto viscoplastique avec seuil d'écoulement, comportement des polymères thermoplastiques résistant. Alors que le comportement mécanique des polymères des différentes garnitures auto est un comportement élasto viscoplastique sans seuil d'écoulement, c'est le comportement des polymères résilients.
- La comparaison entre les différentes caractéristiques mécaniques de tous les mélanges élaborés ainsi que des polymères de base (PP, P1, P2, P3 et P4) donne :
 - Le mélange 5/95% (P1/PP) a les caractéristiques (contrainte max, contrainte à la rupture et le module d'élasticité) les plus optimales.
- La résilience de tous les polymères des garnitures auto ainsi que de leurs mélanges est supérieure à celle du PP.
- Les observations au microscope optique de nos mélanges montrent que les mélanges P1/PP sont homogènes (ce qui conduit à de très bonnes propriétés de résistance mécanique), alors que les mélanges P2/PP, P3/PP et P4/PP sont hétérogènes.

Conclusion Générale

- Les observations au microscope électronique à balayage montrent que le PP a de faibles propriétés de résilience en raison de la présence d'un faciès de rupture ayant des surfaces franches. Les faciès de rupture en résilience du polymère recyclé P2 présente un aspect fibreux traduisant un caractère très ductile. Nous avons observé la présence de matériau élastomère (EPDM) dans la phase de rupture résiliente du polymère P3 et de son mélange P3/PP.

A partir de cette étude, nous dirons que les décharges automobiles à ciel ouvert, qui sont source de pollution peuvent être une source de matière première de polymères. La valorisation des plastiques issus des VHU peut aider à préserver l'environnement, économiser l'énergie et présenter de nouvelles formulations de mélanges de polymères ayant des caractéristiques physico chimique et mécaniques très intéressantes.

Des analyses par spectroscopie infra rouge à transformée de Fourier (IRTF), pourrait être envisagées pour déterminer la composition exacte de nos polypropylène et recenser les éléments d'adition tel que l'EPDM...

Un vieillissement accéléré de nos mélanges, sera intéressant à effectuer pour prévoir le comportement mécaniques de ces matériaux élaborés dans le temps, leurs durée de vie doit être analysée et comparée avec la durée de vie du polypropylène vierge soumis aux mêmes conditions de vieillissement.

Bibliographie

Bibliographie

- [1] George Odian, La polymérisation. Principes et applications, Paris, Polytechnica, (1994).
- [2] L. Allinger, P. Cava, R. Johson, C. Dejongh, A. Lebel, L. Stevens. Chimie organique, Volume 3, Edition Mc Graw-Hill, Paris, (1983).
- [3] G.W. Ehrenstein et F. Montagne, Matériaux polymères. Structure, propriétés et applications, Hermès, Paris (2000).
- [4] Badis KHENNAOUI. Etude, synthèse et obtention de matériaux Composites à parti de Cellulose de Polyacrylamide et de Polystyrène. Thèse de magister, UNIVERSITE MENTOURI CONSTANTINE, (2009).
- [5] Michel Fontanille, Yves Gnanou. Chimie et Physico-chimie des Polymères. Dunod, Paris, 4-8, (2005).
- [6] J.Mertin «Traité des matériaux»; tome 14, (2001).
- [7] Jean-luc, cours de polymère, Université de Rennes.
- [8] Houria LADJABI, Etude Expérimentale du Comportement Mécanique des Polymères, thèse de magister, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA, (2011).
- [9] AssiaBessi, étude des propriétés thermiques et caractérisation des mélanges à base polystyrène-polyéthylène, thèse de magistère, UNIVERSITE DE BISKRA, (2004).
- [10] Rabah FERHOUM, Etude expérimentale et modélisation numérique du comportement mécanique du PEHD à l'état vierge et après vieillissement thermique, thèse de doctorat, UNIVERSITE DE MOLOUD MAMMERI DE TIZI-OUZOU, (2012).
- [11] D. C. Miles et J. H. Briston. Technologie des polymères. Dunod, Paris, (1968).
- [12] H. Coria. Introduction à la chimie organique, Inter édition, Paris, (1987).
- [13] G. Champetier. Traité de chimie macromoléculaire, Herman, Paris, (1970).
- [14] J.M. Dorlot, J.P. Ballon, J. Masounave, Des matériaux, Éditions de l'école Polytechnique de Montréal, (1986).
- [15] Abdoulaye SEYNI, Propriétés physico-chimiques et d'usage de matériaux composites à charge dégradable produits par co-broyage, thèse de doctorat, UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, (2008).
- [16] J. MARTIN et al, Traité des matériaux, Tome 14, (2001).
- [17] G. Scott, Atmospheric Oxidation and Antioxidants, London and New York Elsevier, (1965).
- [18] <https://www.technologuepro.com/cours-conception-moules-sb/chapitre-2-techniques-mise-en-forme-materiaux-plastiques.pdf>
- [19] : N. Mnif ; élaboration et caractérisation de mélanges complexes à base de polymère en vue de son éco-conception et de son recyclage dans les véhicules hors d'usage ; (2008).
- [20] : Autofocus 59 ; le démontage et le recyclage automobile ; avril (2015).

Bibliographie
