

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche
Scientifique
Université MOULOUD MAMMERI - Tizi-Ouzou



Faculté du Génie de la Construction
Département Génie Mécanique

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

Option : Sciences Des Matériaux

**Elaboration et caractérisation de mélanges de
polymères**

(PEMD-déchets automobile)

Proposé et dirigé par :

M^{me} F.MOHELLEBI

Co-promoteur :

Mr. MOHELLEBI Mouloud

Etudié par :

RAKEM Djamel

Remerciements

Il nous est agréable de remercier les membres de jury pour nous avoir fait l'honneur d'examiner ce mémoire, qu'ils trouvent ici l'expression de notre profond respect.

Nous désirons exprimer notre reconnaissance à notre promotrice madame MOHELLEBI Fadila pour la confiance qu'elle nous a accordé pour diriger ce travail.

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

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

J'exprime ma profonde gratitude à mes chers parents et à toute la famille pour leur encouragement et leur constant soutien.

DEDICACE

À...

Mon très cher père : RAKEM Rabah

Ma chère mère : Nouara

Mon frère : menouare

A mes très chères sœurs :Baya,Linda,Farida

et leur famille

A ma chère copine Zina

A toute ma famille : cousins ; cousines ;

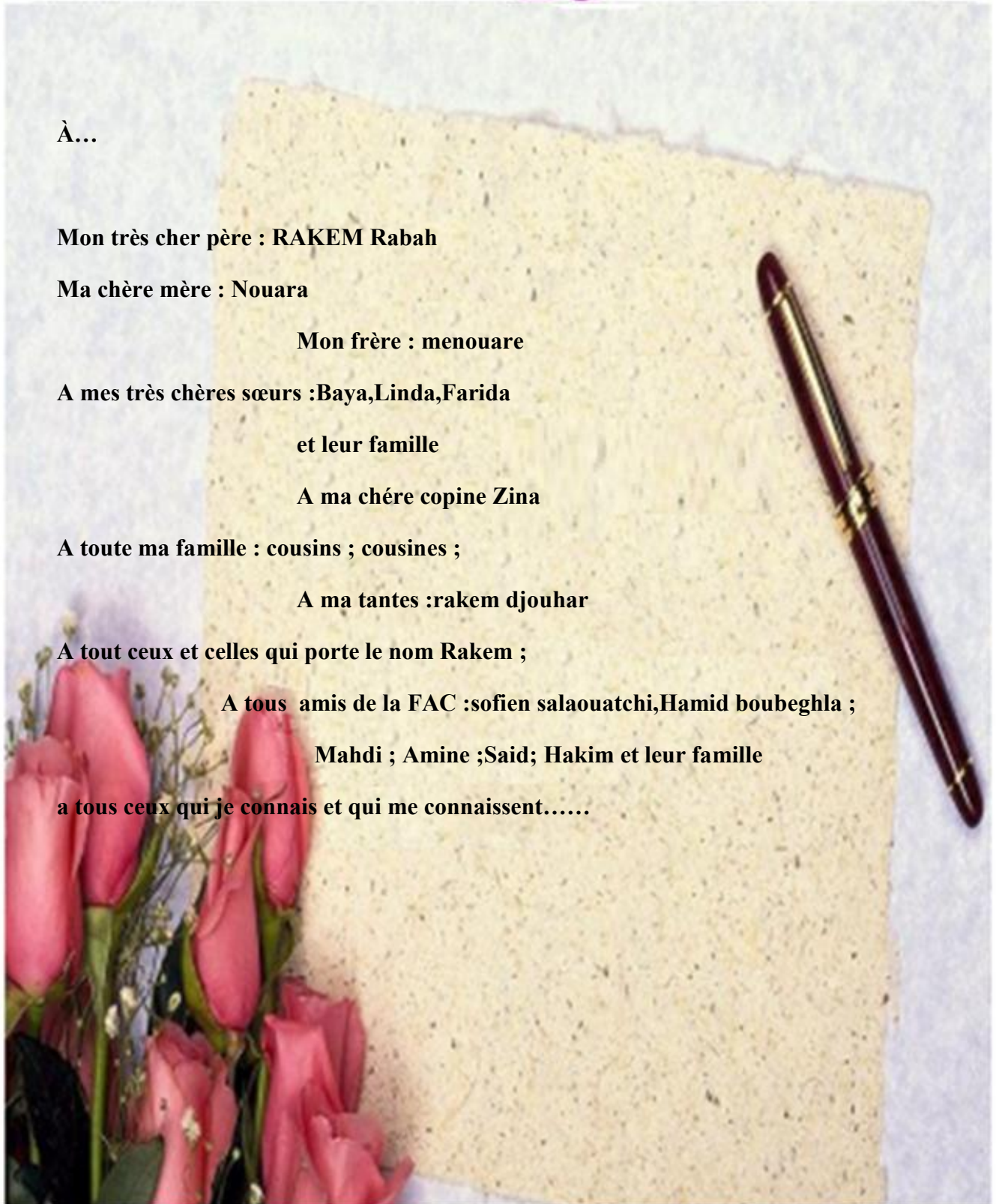
A ma tantes :rakem djouhar

A tout ceux et celles qui porte le nom Rakem ;

A tous amis de la FAC :sofien salaouatchi,Hamid boubeghla ;

Mahdi ; Amine ;Said; Hakim et leur famille

a tous ceux qui je connais et qui me connaissent.....



Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1	(-CH ₂ -CH ₂ -) est une unité de polymères	4
Figure I.2	Représentation de la chaîne d'un polymère linéaire	9
Figure I.3	Représentation schématique d'un polymère Bidimensionnel : le carbone graphite	10
Figure I.4	Représentation schématique d'un polymère Tridimensionnel	10
Figure I.5	Composition chimique de PP	13
Figure I.6	Présentation de PET	14
Figure I.7	Roulettes en POM	15
Figure I.8	Tube de PVC	15
Figure I.9	Quelques pièces moulées de polyamides	16
Figure I.10	Présentation de polyuréthanes	17
Figure I.11	Plaque en polyesters	17
Figure I.12	Répartition des procédés de mise en forme des matières plastiques par taux	21
Figure I.13	Principe de l'injection	22
Figure I.14	Machine à injection plastique	23
Figure I.15	Etapes d'injection par soufflage	24
Figure I.16	Extrudeuse	25
Figure I.17	Machine à extrusion par gonflage	26
Figure I.18	Procédé d'extrusion gonflage	27
Figure I.19	Procédé de calandrage	28
Figure I.20	Cycle de thermoformage	29
Figure I.31	Cycle de L'expansion moulage	30

CHAPITRE II

Figure II.1	Machine de traction	32
Figure II.2	Différents comportements de polymères en traction	33
Figure II.3	Formes et géométries des éprouvettes de traction	34
Figure II.4	Eprouvettes de traction obtenues :a) par injection, b) par découpe (poinçonnage)	34
Figure II.5	Définition des modules de traction	35
Figure II.6	Dispositif pour essai de Compression	36
Figure II.7	Dispositif pour essai de flexion 3 points	37
Figure II.8	Agencement expérimental et éprouvette Charpy	38
Figure II.9	Agencement expérimental Izod	38
Figure II.10	Forme de l'entaille pour l'éprouvette de résilience	39
Figure II.11	Dispositifs de dureté : a)dureté Shore, b) microduromètre, c) empreinte de microdureté	39
Figure 12	Incidence de la température sur le comportement contrainte-déformation du PMMA	40
Figure II.13	Évolution de la rigidité du Polymère en fonction de la température et du degré de cristallisation	41
Figure II.14	Incidence de la vitesse de déformation et de la température sur le comportement contrainte-déformation des polymères	41
Figure II.15	Courbe de fatigue, courbe de Wöhler	44
Figure 16	Courbes de fatigue de certains polymères	45
Figure II. 17	Influence de la température sur la courbe de fatigue	46
FigureII.18	Influence de la fréquence de l'essai sur la fatigue	47
FigureII.19	Influence de la géométrie de l'éprouvette sur les résultats en fatigue (e =épaisseur de l'éprouvette en mm)	47

CHAPITRE III

Figure III 1	Plages de températures de mise en œuvre des principaux plastiques	57
--------------	---	----

CHAPITRE IV

Figure IV.1	Granulés de polyéthylène moyen densité	60
Figure IV.2	exemple d'une casse automobile	61
Figure IV.3	Garde boue	62
Figure IV.4	Aile arrière	62
Figure IV.5	Garnitures de porte	62
Figure IV.6	Tableau de bord	62
Figure IV.7	Pare chocs arrière	63
Figure IV.8	Pare chocs avant	63
Figure IV.9	Découpage des déchets plastique automobile avec cisaille (Découpage en petits morceaux avant broyage)	63
Figure IV.10	Le broyeur	64
Figure IV.11	L'état granulaire après le broyage	64
Figure IV.12	Machine à injection	65
Figure IV.13	Présentation schématique d'une presse à injection	66
Figure IV.14	Température de service d'injection	68
Figure IV.15	Éprouvettes obtenues après injection	68
Figure IV.16	Machine de traction	69
Figure IV.17	Éprouvette de type haltère	70
Figure IV.18	Courbe contrainte-déformation	70
Figure IV.19	La machine Charpy	72
Figure IV.20	Éprouvette utilisée pour l'essai de résilience	73
Figure IV.21	Appareil d'indice de fluidité	74

CHAPITRE V

Figure V. 1	Courbe Contrainte déformation pour les déchets 100% Pare-chocs	77
Figure V. 2	Courbe Contrainte déformation moyenne pour les déchets 100% Pare-chocs	77
Figure V. 3	Courbe Contrainte déformation pour le polymère 100% PEMD	78
Figure V. 4	Courbe Contrainte déformation pour le mélange 20%pare-chocs /80% PEMD	78
Figure V. 5	Courbe Contrainte déformation moyenne pour le mélange 20%pare-chocs/80% PEMD	79
Figure V. 6	Courbe Contrainte déformation pour le mélange 60% PEMD/40%pare-chocs	79
Figure V. 7	Courbe Contrainte déformation moyenne pour le mélange 60% PEMD/40%pare-chocs	80
Figure V. 8	Courbe Contrainte déformation pour le mélange 50% PEMD/50%pare-chocs	80
Figure V. 9	Courbe Contrainte déformation moyenne pour le mélange 50% PEMD/50%pare-chocs	81
Figure V. 10	Courbe Contrainte déformation pour le mélange 60%pare-chocs/40% PEMD	81
Figure V. 11	Courbe Contrainte déformation moyenne pour le mélange 60% Pare-Chocs/40% PEMD	82
Figure V. 12	Courbe Contrainte déformation pour le mélange 80%pare-chocs/20% PEMD	82
Figure V. 13	Courbe Contrainte déformation moyenne pour le mélange 80%pare-chocs/20% PEMD	83
Figure V. 14	Courbe Contrainte déformation des différents mélanges PEMD/ Déchets pare-chocs	83
Figure V.15	Variation de la contrainte maximale en fonction de la concentration du PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets pare-chocs	84
Figure V.16	Variation de l'allongement à la rupture en fonction de la concentration	

	du PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets pare-chocs	84
Figure V.17	Représentation de la partie élastique des courbes contraintes-déformations des mélanges PEMD/Déchets pare-chocs	85
Figure V.18	Courbe de variation des modules d'élasticité des mélanges PEMD/Déchets pare-chocs	86
Figure V.19	Courbes contraintes déformations pour les mélanges PEMD/Tableau de bord	87
Figure V.20	Superposition des courbes de traction des différents mélanges	87
Figure V.21	Variation de la contrainte maximale en fonction de la concentration de PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets tableau de bord	88
Figure V.22	Variation de l'allongement à la rupture en fonction de la concentration du PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets tableau de bord	88
Figure V.23	Variation du module d'élasticité en fonction de la concentration du PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets tableau de bord	89
Figure V.24	Courbes contraintes déformations pour les mélanges PEMD/Garniture de porte	90
Figure V.25	Superposition des courbes de traction des différents mélanges PEMD/Garniture porte	91
Figure V.26	Courbes variation de la contrainte maximale des différents mélanges PEMD/Garniture porte	91
Figure V.27	Courbes variation de l'allongement à la rupture des différents mélanges PEMD/Garniture porte	92
Figure V.28	Courbes variation du module d'élasticité des différents mélanges PEMD/Garniture porte	92
Figure V. 29	Courbe de variation de la résilience des mélanges PEMD/Déchets pare-chocs	93
Figure V.30	Courbe de variation de la résilience des mélanges PEMD/Déchets Tableau de bord	94
Figure V.31	Courbe de variation de la résilience des mélanges PEMD/Déchets garniture porte	94
Figure V.32	Courbe de variation de l'indice de fluidité des mélanges PEMD/Déchets pare-chocs	95

Figure V.33	Courbe de variation de l'indice de fluidité des mélanges PEMD/Déchets tableau de bord	96
Figure V.34	Courbe de variation de l'indice de fluidité des mélanges PEMD/Déchets garniture porte	96

Liste des tableaux

Tableau I.1	Exemples de quelques polymères et leurs applications	5
Tableau I.2	Classification des polymères	12
Tableau I.3	Avantages et inconvénients des thermoplastiques	17
Tableau I.4	Avantages et inconvénients des thermodurcissables	19
Tableau II.1	Caractéristiques mécaniques de quelques polymères très répandus, à la température ambiante	35
Tableau III .1	Source de déchets plastiques	50
Tableau IV.1	Les mélanges PEMD/ différents déchets	64
Tableau III.2	Paramètre d'injection	67
Tableau V.1	Indice de fluidité des mélanges PEMD/Déchets pare-chocs	95
Tableau V.2	Valeurs des indices de fluidité des mélanges PEMD/Déchets tableau de bord	96
Tableau V.3	Valeurs des indices de fluidité des mélanges PEMD/Déchets garniture de porte	97

Sommaire

Liste des figures	i
Liste des tableaux	xii
Introduction Générale.....	1

Chapitre I : Généralités sur les polymères

I.1 Introduction	3
I.2 Historique.....	3
I.3 Notions sur les polymères.....	3
I.4 Définition.....	4
I.5 Composition d'une molécule.....	5
I.5.1 La polymérisation	5
I.5.2 Degré de polymérisation DP_n	6
I.5.3 Masse molaire	6
I.6 Classification des polymères.....	7
I.6.1 Selon leur nature chimique.....	7
I.6.2 Selon l'origine.....	8
I.6.3 Selon leur domaine d'application	8
I.6.4 Selon leur structure des chaînes (dimensionnalité).....	9
I.6.5 Selon leur comportement thermique	11
I.6.5.1 Les thermoplastiques	12
I.6.5.2 les thermodurcissables.....	16
I.6.5.3 les élastomères	18
I.6.6 Selon les usages technologiques	18
I.6.7 Selon l'importance économique	19
I.7. Les propriétés des polymères.....	19
I.7.1. Propriétés thermiques	19
I.7.2. Propriétés mécaniques.....	19
I.7.3. Propriétés chimiques.....	20
I.8 Quelques techniques de transformation des polymères.....	20
I.8.1. Le procédé d'injection des matières plastiques	21
I.8.1.1 Principe de l'injection plastique.....	21
I.8.1.2 Les Presses d'injection plastique.....	22
I.8.1.3 L'injection par soufflage.....	23
I.8.1.4 Extrusion.....	24
I.8.1.5 Extrusion gonflage.....	25
I.8.1.6 Extrusion soufflage.....	26
I.8.1.7 Calandrage.....	27
I.8.1.8 Thermoformage.....	28

Sommaire

I.8.1.9 L'expansion moulage.....	29
I.9. Conclusion	30

Chapitre II : COMPORTEMENT MECANIQUE DES POLYMERES

II.1 Introduction.....	32
II.2. Comportement contraintes-déformations.....	32
II.2.1 essai de traction.....	32
II.1.2 Essai de compression.....	36
II.1.3 Essai de Flexion 3 et 4 points :.....	36
II.1.4 Essai de résilience.....	37
II.1.5 Essai de dureté.....	39
II.2 Les éléments influents sur le comportement contraint-déformation.....	40
II.3. Comportement mécanique des polymères à la fatigue.....	44
II.3.1 Température interne du polymère lors de l'essai de fatigue.....	46
II.3.2 Paramètres influant sur la fatigue.....	46
II.4 Conclusion	47

CHAPITRE III : LE RECYCLAGE DES POLYMERES

III.1 Introduction.....	49
III. 2 Définition.....	50
III. 3 Sources des déchets plastiques.....	50
III.4 Différents types de déchets	51
III.4.1 Déchets inertes.....	51
III.4.2 Déchets industriels spéciaux.....	52
III.4.3 Déchets banals (déchets ménagers et assimilés).....	52
III.5 Origine et répartition des déchets plastiques.....	52
III.5 .1 Les déchets industriels	52
III.5.2 Déchets de distribution et commerciaux (transport, suremballage).....	53
III.5.3 Déchets des consommateurs finaux.....	53
III.6 Différentes méthodes de valorisation des déchets de matières plastiques	53
III.6.1 Valorisation énergétique	53
III.6.2 Recyclage chimique	54
III.6.3 Recyclage mécanique.....	54
III.6.4. Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères.....	56
III.7 Avantages et inconvénients du recyclage.....	57
III.7.1 Avantages.....	57
III.7.2 Inconvénients.....	58

Sommaire

CHAPITRE IV THECHNIQUES EXPERIMENTALES

IV.1 Introduction.....	60
IV.2 Matériaux utilisés.....	60
IV.2.1 le PEMD (polyéthylène moyenne densité).....	60
IV.2.2 Matériaux polymériques issus de la casse automobile.....	61
IV.3 Dispositifs expérimentaux.....	65
IV.3.1 Presse à injection.....	65
IV.3.2 Machine de traction.....	68
IV.3.3 dispositif de résilience ; Essais de résilience.....	72
IV.3.4 Dispositif de détermination de l'indice de fluidité ; le plastomètre.....	73
Conclusion.....	74

CHAPITRE V RESULTATS ET DISCUSSION

V.1 Introduction.....	76
V.2 Résultats des essais de traction.....	76
V.2.1 Résultats des essais de traction des mélanges PEMD/Pare-chocs.....	76
V.2.1.1 Courbes contraintes déformations.....	76
V.2.1.2 Contrainte maximale.....	84
V.2.1.3 Allongement à la rupture.....	84
V.2.1.4 Module d'élasticité.....	85
V.2.2 Résultats des essais de traction des mélanges PEMD/Tableau de bord.....	86
V.2.2.1 Courbes contraintes déformations des mélanges PEMD/Tableau de bord ...	86
V.2.2.2 Contraintes maximales.....	88
V.2.2.3 Allongement à la rupture.....	88
V.2.2.4 Modules d'élasticité	89
V.2.3 Résultats des essais de traction des mélanges PEMD/ Garniture de porte.....	89
V.2.3.1 Courbes contraintes déformations des mélanges PEMD/ Garniture de porte..	89
V.2.3.2 Contraintes maximales des mélanges PEMD/ Garniture de porte.....	91
V.2.3.3 Allongement à la rupture des mélanges PEMD/ Garniture de porte.....	92
V.2.3.3 Modules d'élasticité des mélanges PEMD/ Garniture de porte.....	92
V.3 Résultats des essais Charpy (résilience).....	93
V.3.1 Résultats des essais Charpy (résilience) pour les mélanges PEMD/pare-chocs..	93
V.3.2 Résultats des essais Charpy (résilience) pour les mélanges PEMD/Tableau bord	93
V.3.3 Résultats des essais Charpy (résilience) pour les mélanges PEMD/Garniture de porte.....	94
V.4 Résultats des essais des indices de fluidité.....	95
V.4.1 Résultats des essais des indices de fluidité des mélanges PEMD/ Pare-chocs...	95
V.4.2 Résultats des essais des indices de fluidité des mélanges PEMD/ tableau de bord.....	96
V.4.3 Résultats des essais des indices de fluidité des mélanges PEMD/ Garniture porte.....	97
Conclusion générale.....	99

Introduction générale

Les polymères sont de plus en plus présents dans notre vie quotidienne dans le but d'améliorer notre qualité de vie. L'homme a cherché à les exploiter pour se nourrir, produire de l'énergie, construire, améliorer et agrémenter son habitat, pour se protéger et se vêtir etc... Ces progrès ne sont pas sans conséquences sur l'environnement ; ils sont consommateurs de ressources naturelles non renouvelables et donc limitées. Ils génèrent aussi des déchets en quantité croissante, pouvant être des sources de pollution. Parmi ces déchets on retrouve ceux issus des véhicules hors d'usage (casses automobiles). Concernant l'automobile le parc mondial ne cesse d'augmenter en même temps que le taux massique de polymères utilisé dans les véhicules avec une croissance de 2% annuelle. La gestion des produits en fin de vie fait l'objet de nombreuses réglementations dans le but d'exploiter la quantité de déchets non traités et ce à partir de différentes opérations de recyclage.

Le recyclage mécanique aussi appelé valorisation " matière " consiste à récupérer les 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.

Récupérer des déchets polymériques et les mélanger avec un polymère vierge, bon marché peut constituer une alternative non négligeable pour produire de la matière première et préserver l'environnement.

Dans cette optique notre étude portera sur le recyclage des déchets polymériques issus des véhicules hors d'usage provenant des casses automobiles. Le mélange de ces déchets avec un Polyéthylène Moyenne Densité (PEMD) bon marché permet de les réintroduire dans le cycle de la production de matières premières par recyclage.

Les pièces plastiques automobiles utilisées sont un pare-chocs, un pare-chocs, un tableau de bord et une garniture de porte.

Le procédé de transformation est l'injection plastique effectuée à l'usine Siscoplast DRAA El Mizan, les mélanges sont effectués sans additifs ni conservateurs.

Pour mener à bien ce travail nous l'avons structuré de la manière suivante.

Le premier chapitre sera consacré aux généralités sur les polymères pour donner une idée globale sur les matériaux qui feront l'objet de cette étude.

Le second chapitre nous donnera un aperçu sur le comportement mécanique des polymères. Le troisième chapitre traitera du recyclage des polymères, il sera suivi du quatrième chapitre qui est matériels et dispositifs expérimentaux utilisés pour l'élaboration et la caractérisation des différents mélanges.

Introduction générale

Le cinquième chapitre sera consacré à la présentation et à l'interprétation des résultats des différents essais auxquels nous avons soumis nos éprouvettes et nous terminerons par une conclusion générale.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR

LES POLYMÈRES

Généralités sur les polymères

I.1 Introduction

Les polymères sont de plus en plus présents dans la vie quotidienne. De tout temps l'homme a cherché à les exploiter pour se nourrir, pour produire de l'énergie, pour construire, améliorer et agrémenter son habitat, pour se protéger et se vêtir, pour se déplacer et transporter, aussi pour décorer. Notre travail consiste en la valorisation de déchet polymérique et cela par l'élaboration de matériaux composites (polymère plus déchet plastique) dans le but de récupérer une partie des plastiques de véhicules hors usage (casse automobile).

I.2 Historique

Les polymères naturels ont été parmi les premiers matériaux utilisés par l'homme comme les bois et fibres végétales, cuir, tendons d'animaux, laine, etc. La notion de macromolécule n'est apparue que tardivement dans l'histoire de la science des matériaux. Bien que présagée par certains chercheurs au début du XIX^{ème} siècle, ce n'est que vers les années 1920-1930 que l'idée de macromolécule est acceptée par les chercheurs. Le développement industriel consécutif de la science macromoléculaire a été accéléré ensuite par la Seconde Guerre mondiale, quand les États-Unis ont été privés de leur approvisionnement en caoutchouc naturel en provenance d'Asie du Sud-est, lors de leur entrée en guerre, alors ils ont lancé un immense programme de recherche visant à trouver des substituts de synthèse des plastiques.[01]

I.3 Notions sur les polymères :

Ce n'est que dans les années 1920 que la notion de macromolécule a commencé à être largement acceptée par la communauté scientifique. Herman Staudinger, professeur de chimie à l'Ecole polytechnique fédérale de Zurich entre 1912 et 1926, ensuite professeur à Fribourg-en-Brisgau et notamment Prix Nobel de chimie en 1953, en a été l'un des principaux artisans.

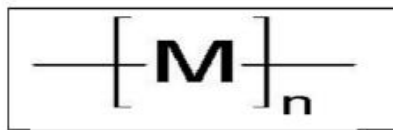
Il a démontré que les matières polymères comme la cellulose, la soie et le caoutchouc étaient formées de longues chaînes moléculaires, qualifiées de macromolécules. Cette idée a ouvert la voie à une recherche plus systématique, tant chimique que physique, sur la synthèse, la structure et le comportement des polymères solides.

Généralités sur les polymères

I.4 Définition

- **Polymère**

Les polymères – du grec 'poly' (beaucoup) et 'meros' (parties) – sont un groupe de produits chimiques qui partagent un même principe de formation. Ils consistent en de longues chaînes de molécules appelées macromolécules, qui comportent un grand nombre d'unités de répétition pro-métaboliques (monomères). Les molécules formées d'un nombre inférieur de monomères sont souvent appelées 'oligomères', ce qui signifie 'quelques parties'.



M : motif monomère (motif de répétition).

n : degré de polymérisation ; nombre de fois que l'on rencontre M dans la molécule.[02]

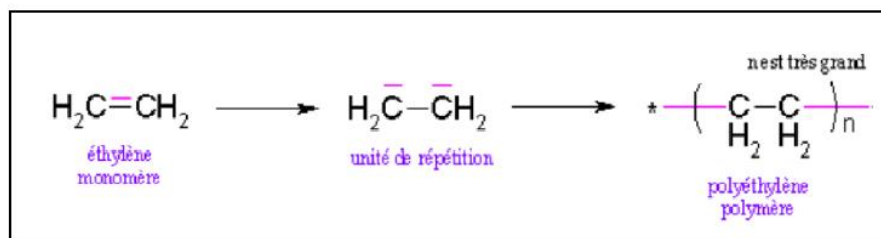


Figure I.1. (-CH₂-CH₂-) est une unité de polymères

Exemples de quelques polymères et leurs applications [3]:

Tableau I.1 : exemples de quelques polymères et leurs applications.

Monomère	Polymère	Applications
Ethylène H ₂ C=CH ₂	Polyéthylène basse densité Polyéthylène haute densité	Films, objets ménagers, emballages, câbles. Objets moulés, bouteilles, corps creux.
Propylène CH ₃ -CH=CH ₂	Polypropylène	Articles moulés pour véhicules, mobilier,

Généralités sur les polymères

		sanitaire, câbles,, etc.
Chlorure de vinyle Cl-CH=CH_2	Polychlorure de vinyle ou P.V.C.	Rigide : tuyaux, gaines électriques, bouteilles. Souple : films, feuilles, câbles, jouets, chaussures, revêtement de sol.
Styrène $\text{C}_6\text{H}_5\text{-CH=CH}_2$	Polystyrène	Bacs, cuves, jouets, ameublements. Expansé (98% d'air) : isolation, emballages antichocs.
Tétrafluoroéthylène $\text{F}_2\text{C=CF}_2$	Polytétrafluoro éthylène ou Téflon	Matériaux thermorésistants, à haute résistance chimique, pièces mécaniques.
Butadiène $\text{H}_2\text{C=CH-CH=CH}_2$	Polybutadiène	Pneumatiques, caoutchoucs.
Isoprène $\text{H}_2\text{C=C(CH}_3\text{)-CH=CH}_2$	Polyisoprène	Chambres à air, caoutchoucs.

I.5 Composition d'une molécule

I.5.1 La polymérisation [4]

La polymérisation est la réaction qui, à partir des monomères, forme en les liants des composés de masse moléculaire plus élevée, les polymères ou macromolécules. Les noyaux des monomères sont le plus souvent constitués d'un atome de carbone (molécules organiques) ou d'un atome de silicium (polymères siliconés). On distingue les homopolymères les Copolymères. Ils sont classés en deux catégories: les thermoplastiques et les thermodurcissables.

Généralités sur les polymères

Il existe essentiellement deux types de réactions de polymérisation qui se différencient par leur cinétique réactionnelle :

- a. La polymérisation polyaddition : C'est la polymérisation en chaîne dans laquelle les unités monomères sont additionnées une à une centre actif.
- b. La polymérisation polycondensation : fournissent un ensemble de molécules dotées de propriétés nouvelles et à grande valeur ajoutée : matériaux à haute résistance thermique ou chimique, fibres à haute ténacité, mousses rigides à porosité contrôlée, etc.

La réaction de polymérisations est en général aléatoire, de sorte que toutes les chaînes d'un polymère n'ont pas la même longueur. Une chaîne polymère est caractérisée par son degré de polymérisation, qui est le nombre de motifs monomères qui la constitue, et par sa masse molaire, qui est le produit de la masse molaire d'un motif par le nombre de motifs. Le polymère est alors caractérisé par sa distribution de masse molaire et par ses masses molaires moyennes en nombre et en masse, respectivement définies par :

$$M_n = \frac{\sum N_i M_i}{\sum N_i} \quad M_w = \frac{\sum N_i M_i^2}{\sum N_i M_i}$$

Avec :

N_i : Nombre de chaîne

M_i : Masse moléculaire

I.5.2 Degré de polymérisation DP_n

Le degré de polymérisation est le nombre « n » de molécule de monomère formant la macromolécule de polymère. par exemple dans le cas du polyéthylène $[CH_2-CH_2]_n$ fois, ce nombre « n » peut varier entre 500 et 50 000 unités. Il faut remarquer qu'en ce qui concerne les macromolécules sont covalentes, et donc très résistantes et très rigides. Un polymère peut également être caractérisé par son degré de polymérisation moyen en poids :

$$DP_n = \frac{M_n}{M_o}$$

M_n : poids moléculaire moyen du polymère.

M_o : poids moléculaire du monomère.

I.5.3 Masse molaire [5]

Généralités sur les polymères

Les polymères à très longues chaînes ont une masse molaire extrêmement élevée (de l'ordre de 10⁵ à 10⁷g/mole). Durant la polymérisation, les macromolécules synthétisées à partir de molécules plus petites forment des chaînes dont la longueur et la masse molaire sont variables. C'est pourquoi on donne généralement la masse molaire moyenne, que l'on détermine en mesurant diverses propriétés physiques telles que la viscosité. On définit la masse molaire moyenne de plusieurs façons.

Pour obtenir la masse molaire moyenne en nombre M_n , on répartit les chaînes en une série de plages de masse molaire, puis on détermine la proportion numérique des chaînes faisant partie de chaque plage.

L'expression mathématique de la masse molaire moyenne en nombre est donnée par la formule suivante :

$$M_n = \sum x_i M_i$$

M_n : Masse molaire en nombre.

M_i : Masse molaire moyenne de la plage de masse molaire.

x_i : Proportion des chaînes faisant partie de cette plage.

La masse molaire moyenne en masse M_m repose sur la proportion massique des molécules faisant partie de diverses plages de masse molaire. On calcule à l'aide de l'équation suivante :

$$M_m = \sum f_i M_i$$

M_i : Masse molaire moyenne d'une plage de masse molaire.

f_i : Représente la proportion massique des molécules faisant partie de cette plage.

M_m : masse molaire moyenne en masse

I.6 Classification des polymères

Il existe plusieurs modes de classification des polymères que peuvent être classés selon divers critères :

I.6.1 Selon leur nature chimique : On distingue :

➤ Polymères minéraux :

Ils sont constitués soit de chaînes renfermant un seul corps simple : diamant, graphite, phosphore, soufre...Ou de chaînes renfermant plusieurs hétéroatomes : (silicates acides polyphosphoriques, chlorure de polyphosphonitrile).

Généralités sur les polymères

➤ Polymères organiques :

C'est la classe la plus riche comme : les polydiènes, les polyacryliques, les polyamides, les polyvinyliques.

➤ Polymères mixtes :

Doués de propriétés intéressantes dont une bonne résistance thermique ($\sim 300^{\circ}\text{C} - 350^{\circ}\text{C}$) comme les silicones.

I.6.2 Selon l'origine [6]

On distingue les polymères naturels, les polymères Artificiels et les polymères Synthétiques :

➤ Les polymères naturels

Issus des règnes végétal, animal ou minéral leur économique et le rôle qu'ils jouent dans les mécanismes vitaux leur a assuré une place de premier choix depuis une trentaine d'années.

Exemples :

- Les polysaccharides (cellulose, amidon).
- Les protéines (la laine, la soie).
- Le caoutchouc naturel.

➤ Les polymères artificiels : (dérivés des polymères naturels)

Sont obtenue par modification chimique de polymères naturels de façon à transformer certaines de leurs propriétés.

Exemples :

- les esters cellulosiques (nitrocellulose, acétate de cellulose ...etc.).
- ébonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre).

➤ Les polymères synthétiques

Les molécules monomères qui permettent de les obtenir n'existent pas dans la nature. Cependant, on peut remarquer que les structures réalisées par synthèse sont souvent proches de celles des polymères naturels.

I.6.3 Selon leur domaine d'application

On le regroupe les polymères en 3 grandes catégories :

A) Les polymères de grande diffusion

Généralités sur les polymères

Encore appelés polymères de commodité, dont la production annuelle s'évalue par millions de tonnes, sont devenus d'un emploi quotidien pour tous. Le polyéthylène, le polystyrène, le poly (chlorure de vinyle) et quelques autres sont à classer dans cette catégorie d'une importance économique considérable.

B) Les polymères techniques

Ont des caractéristique qui leur permettent de se substituer, de plus en plus aux matériaux traditionnels (métaux, céramiques) pour nombreuses application ; les polyamides, les polyacétalsfont partie de cette famille.

C) Les polymères spéciaux

Ou polymères de fonction Présentent généralement une propriété qui induit leur utilisation pour une application particulière. C'est dans cette catégorie que se trouvent les polymères conducteurs, photo actifs, thermostables, adhésifs, etc.

I.6.4 Selon leur structure des chaines (dimensionnalité)

Les polymères peuvent encore être classés en trois catégories :

A) Polymères linéaires ou monodimensionnels

Pour lesquels, chaque chaine macromoléculaire est constituée d'un nombre (éventuellement) élevé mais fini d'unités monomères de tels systèmes correspondent à la polymérisation de monomères bivalents et une macromolécule linéaire peut être très schématiquement représentée par un trait continu divisé en intervalles figurant chacun une unité monomère (**Figure I.2**) chaines polymères est constitué de longueur variable, propriété désignée par le terme poly molarité.

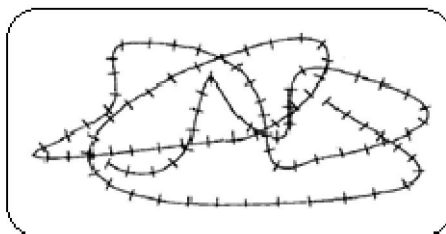


Figure I.2: Représentation de la chaine d'un polymère linéaire.

B) Polymères bidimensionnels

Généralités sur les polymères

Dont certains peuvent être produits par la nature (carbone graphite, kératine...) ; dans le domaine des polymères synthétiques ce sont encore des curiosités de laboratoire. Ils se présentent sous la forme de feuillets bidimensionnels, d'épaisseur comparable à celle des molécules simples (**Figure I.3**).

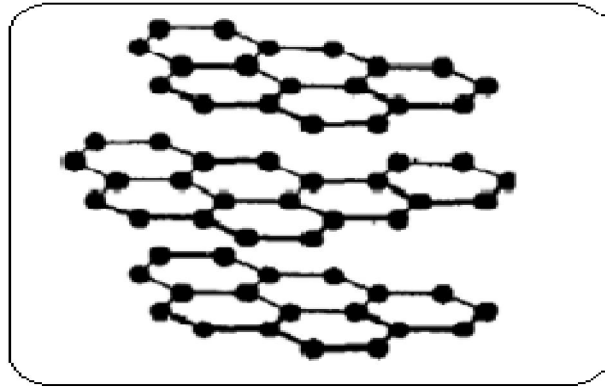


Figure I.3 : Représentation schématique d'un polymère
Bidimensionnel : le carbone graphite.

C) Polymères tridimensionnels

Qui résultent de la polymérisation de monomères dont la valence moyenne est supérieure à deux ou encore de la réticulation (formation d'un réseau tridimensionnels), par voie physique ou chimique, de polymères linéaires.

Leur dimension moléculaire peut être considérée comme infini puisque toutes les unités monomères constituées d'un objet sont liées de façon covalente pour former une seule macromolécule.

Les liaisons se développent dans les trois dimensions et un élément de volume d'un tel peut être représenté sur la (**Figure I.4**).

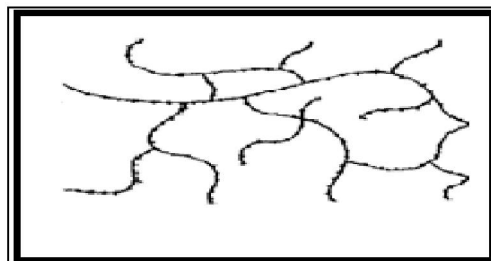


Figure I.4: Représentation schématique d'un polymère
Tridimensionnel.

Généralités sur les polymères

I.6.5 Selon leur comportement thermique

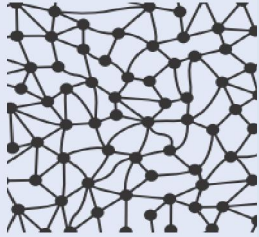
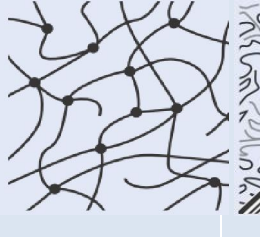
Les propriétés des polymères permettent des usages très variés. On peut ainsi les regrouper dans trois familles :

- a. Les thermoplastiques.
- b. Les thermodurcissables.
- c. Les élastomères.

Tableau I.2 classification des polymères :

Propriétés	Thermodurcissables	Thermoplastiques	Élastomères	Élastomères thermoplastiques
Structure	Macromolécules unies par liaison chimique en structure tridimensionnelle fortement réticulée	Macromolécules en chaînes linéaires ou avec peu de ramifications Amorphe Structure non organisée des chaînes de polymères Semi-cristalline Structure partiellement organisée, avec des zones d'alignement des chaînes de polymères	Macromolécules de caoutchouc unies par liaison chimique en tridimensionnelle faiblement réticulée	Copolymères composés de blocs rigides et souples ou Mélange d'un polymère thermoplastique avec un caoutchouc (non/partiellement) réticulé État caoutchouteux/souple et état vitreux/rigide

Généralités sur les polymères

				
Comportement à température normale	Durs et fragiles à viscoplastiques	Mous à solides et durs ou fragiles et durs	Élasticité du caoutchouc	Élasticité du caoutchouc
Déformation	Aucune déformation plastique après réticulation	Déformation plastique à température élevée	Déformation élastique uniquement	Déformation plastique à température élevée (état liquide)
Fusibilité	Non	Oui	Non	Oui
Réaction aux solvants	Non	Oui	Oui	Oui
■ Gonflement	Non	Oui	Non	Oui
■ Solubles				
Compatibilité chimique	Élevée	Élevée	Moyenne	Élevée
Soudabilité	Non	Oui	Non	Oui
Adhérence	Oui	Généralement oui	oui	Généralement oui
Usinabilité	Oui	Oui	Oui	Oui
Aptitude au recyclage	Non	Oui	Non	Oui

Généralités sur les polymères

I.6.5.1 Les thermoplastiques

Les polymères ou les résines thermoplastiques sont des composés, dérivés d'éléments constitutifs organiques se formant naturellement, qui fondent lorsqu'on les chauffe. Ce sont des matières « transformables à l'état fondu », ce qui signifie qu'on peut leur donner des formes utilisables lorsqu'elles sont en phase liquide (fondues) ou visqueuse. Dans la plupart des procédés de fabrication, les thermoplastiques sont chauffés, puis formés par moulage par injection, extrusion ou thermoformage, avant d'être refroidis afin que le produit fini conserve sa forme.[7]

➤ Les Polyéthylènes (PE)

Cette matière plastique représente à elle seule environ un tiers de la production totale des matières synthétiques et constitue la moitié des emballages plastiques. Grâce à sa structure chimique simple, le polyéthylène prime sur la plupart des autres matériaux car il peut être réutilisé. Au cours de ces dernières années, le recyclage des produits usés en PE a pris de plus en plus d'importance : 50% du PE constituant les sacs poubelle sont recyclés. Le polyéthylène est translucide, inerte, facile à manier et résistant au froid. Il existe différents polyéthylènes classés en fonction de leur densité. Celle-ci dépend du nombre et de la longueur des ramifications présentes dans le matériau. On distingue deux familles : le PEBD ou polyéthylène basse densité et le PEHD polyéthylène haute densité.

➤ Le polypropylène (PP)

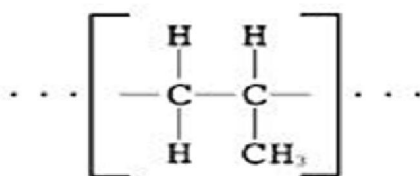


Figure I.5 : composition chimique de PP

C'est aussi un polymère très polyvalent qui sert à la fois comme thermoplastique et comme fibre. Il est très facile à colorer et n'absorbe pas l'eau. On en trouve beaucoup sous forme de pièces moulées dans les équipements automobiles (pare-chocs, tableaux de bord, habillage de l'habitacle) et dans le mobilier de jardin. Ce matériau sert à fabriquer des boîtes à aliments qui résistent au lave-vaisselle parce qu'il ne fond pas en dessous de 160°C. Le polypropylène est aussi utilisé dans la fabrication de fibres synthétiques (tapis, moquettes, cordes, ficelles) mais aussi pour les emballages alimentaires en raison de son aspect brillant et de sa résistance (flacons, films, pots).

Généralités sur les polymères

➤ Le polystyrène (PS)

Le polystyrène est un plastique dur, cassant et transparent. C'est un produit industriel courant largement diffusé, offrant de très nombreux usages. On le reconnaît facilement à un blanchissement sur les zones de contraintes avant la rupture ou à sa fumée noire et à son odeur caractéristique lors de sa combustion. On l'utilise pour fabriquer du mobilier, des emballages, des grilles de ventilation, des jouets, des verres plastiques

Il existe sous trois types de polystyrènes :

- Polystyrène cristal
- Polystyrène choc (HIPS)
- Polystyrène expansé

➤ polycarbonate (PC)

Le polycarbonate est un matériau qui présente d'excellentes propriétés mécaniques et une bonne résistance thermique jusqu'à 120°C. On l'utilise pour la fabrication des casques de moto ou des boucliers de police. Comme il est très transparent, il sert aussi à la fabrication des CD et des DVD. Enfin, sa neutralité physiologique permet son utilisation dans le domaine médical pour la fabrication de matériel et de prothèses. Par contre, il résiste mal aux contacts prolongés avec l'eau, aux agents chimiques et aux rayons ultraviolets.

➤ Les polyesters et le polyéthylène téréphtalate (PET)

C'est un polymère obtenu par la polycondensation de deux composants :

Le diméthyltéréphtalate et l'éthylène glycol. Les chaînes vont s'arranger et former des fibres résistantes. Le PET est surtout employé pour la fabrication de fils textiles, de films et de bouteilles.

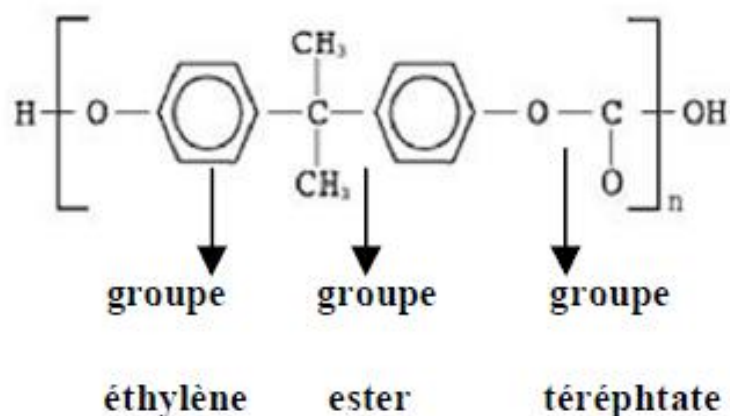


Figure I.6 : présentation de PET

Généralités sur les polymères

➤ Les polyacétals ou polyoxyméthylène (POM)

Les polyacétals ont des propriétés qui les rendent irremplaçables pour des pièces à fortes exigences mécaniques comme les engrenages et les poulies. Ils sont solides, présentent les qualités de métaux tels que l'acier, l'aluminium ou le zinc. Ils résistent à la plupart des agents chimiques et ont un faible coefficient de frottement. Par contre, ils ont une densité élevée et une assez faible résistance à la température. La recherche vise à augmenter leur résistance au choc pour permettre la réalisation de plus grosses pièces.



Figure I.7. Roulettes en POM

➤ Le polychlorure de vinyle PCV

Il est obtenu par la polymérisation des monomères de chlorure de vinyle $\text{CH}_2=\text{CH}-\text{Cl}$

Ce polymère de formule $-(\text{CH}_2 - \text{CH} - \text{Cl})_n -$, Il peut être soit rigide soit souple selon les ingrédients qu'on lui incorpore. Le PVC rigide qui a un aspect lisse et dur est utilisé pour les tuyaux de canalisation.

Le PVC souple qui recouvre certaines pièces comme les manches de pinces a un aspect brillant. C'est après le PE, le plastique le plus utilisé au monde. Il est largement employé dans l'industrie de l'ameublement et dans le bâtiment ou le génie civil.



Figure I.8 : Tube de PVC

Généralités sur les polymères

➤ Les polyamides (PA)

Les polyamides sont utilisés pour réaliser des pièces moulées dans l'appareillage ménager et automobile, des tapis et des moquettes, de la robinetterie, de la serrurerie, des engrenages, des textiles (lingerie et voilages)... L'inconvénient principal de tous les polyamides est qu'ils sont hydrophiles ce qui limite leur usage pour certaines pièces mécaniques.



Figure I.9 : Quelques pièces moulées de polyamides

Le tableau ci-dessous montre les avantages et inconvénients des T.P

Tableau I.3 : Avantages et inconvénients des thermoplastiques

Avantages	Inconvénients
Ils peuvent, en théorie, être refondus et remodelés un grand nombre de fois tout en conservant leurs propriétés. Insensibles à l'humidité, aux parasites, aux moisissures (sauf polyamides) ils peuvent être fabriqués dans une gamme de couleurs très étendue.	Fluage élevé; coefficient de dilatation linéaire élevé, entraînant un retrait important au moment du moulage; combustible ; sensibles aux ultraviolets; électrostatiques, qui "attirent les poussières".

I.6.5.2 les thermodurcissables

Les thermodurcissables sont des plastiques qui prennent une forme définitive au premier refroidissement. La réversibilité de forme est impossible car ils ne se ramollissent plus une fois moulés. Sous de trop fortes températures, ils se dégradent et brûlent (carbonisation). Les molécules de ces polymères sont organisées en de longues chaînes dans lesquelles un grand nombre de liaisons chimiques solides et tridimensionnelles ne peuvent pas être rompues et se

Généralités sur les polymères

renforcent quand le plastique est chauffé. La matière thermodurcissable garde toujours sa forme en raison de ces liaisons croisées et des pontages très résistants qui empêchent tout glissement entre les chaînes.

➤ Les polyuréthanes (PUR)

Ce sont des matériaux dont les caractéristiques sont très variées avec une grande diversité de textures et de duretés. Les polyuréthanes sont les polymères les plus utilisés pour faire les mousses. En fonction des associations chimiques réalisées avec différents monomères on peut obtenir des colles, des élastomères, des fibres (Licra) des mousses souples ou rigides grâce à des agents d'expansion, des polyuréthanes solides et compacts que l'on peut renforcer par de la fibre de verre. On les utilise pour fabriquer des matelas, des sièges de voiture, des tableaux de bord, des roues de patins à roulettes ou des chaussures de ski...

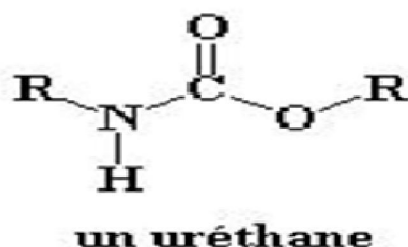


Figure I.10 présentation de polyuréthanes

➤ Les polyesters insaturés

Les polyesters insaturés sont obtenus par réaction de condensation entre différents polyacides et des glycols (éthylène glycol, propylène glycol) Ces produits appelés époxydes sont des substances chimiques comportant un oxygène ponté sur une liaison carbone-carbone. Le polyester sert surtout à fabriquer des fibres textiles artificielles, Les tissus produits sont brevetés sous les noms de Dacron, de Tergal ou de Térylène. La fibre polyester est la plus produite dans le monde car son utilisation très répandue dans l'habillement. Ses applications se sont aussi diversifiées dans l'industrie, notamment sous forme de films destinés à l'agriculture, aux travaux publics, aux coques et cabines de bateaux, aux carrosseries d'automobiles, aux piscines.

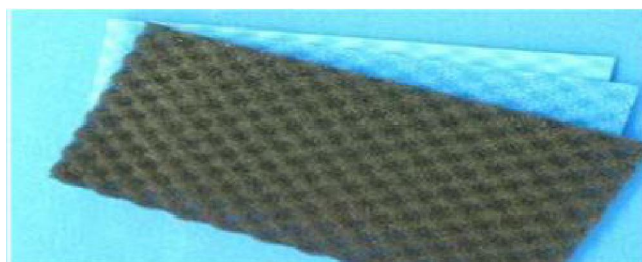


Figure I.11 : plaque en polyesters

Généralités sur les polymères

➤ Les phénoplastes (PF)

Dans ce groupe, une des plus anciennes matières plastiques connue est la Bakélite. Ce matériau providentiel a eu d'innombrables applications dans les domaines scientifiques et dans la réalisation d'objets: téléphones, postes de radio. Ces résines thermodurcissables résistent très bien aux produits chimiques et à la chaleur. Elles sont également électriquement isolantes. On peut les transformer par moulage et par compression pour fabriquer les poignées de casserole, de fer à repasser et des plaques de revêtement.

➤ Les aminoplastes (MF)

Ces produits résineux sont essentiellement utilisés en stratification sur des textiles plastifiés, les panneaux de bois agglomérés pour le mobilier de cuisine et les plans de travail.

Le tableau ci-dessous montre les avantages et inconvénients des T.D

Tableau I.2 : Avantages et inconvénients des thermodurcissables

Avantages	Inconvénients
Ils présentent une bonne tenue aux températures élevées ($> 200\text{ }^{\circ}\text{C}$), aux attaques chimiques, une meilleure résistance au fluage que les thermoplastiques (conservent une meilleure stabilité dimensionnelle dans le temps), une bonne rigidité pour un prix de matière première peu élevé et faible retrait au moulage.	L'inconvénient principal de ces matériaux tient au fait d'une mise en œuvre moins pratique et plus lente que les thermoplastiques.

I.6.5.3 Les élastomères [8]

Ces polymères présentent les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est constitué de longues chaînes moléculaires repliées sur elles-mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et se déformer. Pour que le matériau de base présente une bonne élasticité il subit une vulcanisation. C'est un procédé de cuisson et de durcissement qui permet de créer un réseau tridimensionnel plus ou moins rigide sans supprimer la flexibilité des chaînes moléculaires. On introduit dans l'élastomère au cours de la vulcanisation du soufre, du carbone et différents agents chimiques

Généralités sur les polymères

I.6.6 SELON LES USAGES TECHNOLOGIQUES

On peut distinguer :

- Les fibres synthétiques (nylon, tergal) ou naturelles (coton, soie).
- Les plastiques : ce sont les plastiques au sens large, regroupant les thermodurcissables et les thermoplastiques.
- Elastomères : Doués de propriétés élastiques et / ou caoutchoutiques.
- Caoutchoucs synthétiques : polymères du butadiène de l'isoprène chloroprène.
- Caoutchoucs naturels.

I.6.6 Selon l'importance économique

Pour les polymères, comme pour tous produits industriels, il existe une corrélation entre le tonnage et le prix, ceci permet de distinguer trois grandes catégories de polymères commerciaux :

- Les polymères de grande diffusion : dont le volume des ventes et de production est élevé et dont le prix est faible. Comme : PE, PP, PS, PVC.
- Les polymères à hautes performances : dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés.
- Les polymères techniques : dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes, comme : polyamides, Polyéthylène.

I.7. Les propriétés des polymères [9], [10]

Le succès des plastiques dans les secteurs de l'industrie s'explique par leurs propriétés spécifiques, dont les plus importantes sont :

I.7.1. Propriétés thermiques

- La conductibilité thermique est faible (inférieur à 0,1 W/Km) ; cette conductivité thermique peut être encore améliorée (plus faible) si la matière plastique est moussée.
- Vieillessement accéléré sous l'effet des rayonnements ultra-violets du à la rupture des liaisons intermoléculaire du polymère ;
- Les polymères thermoplastiques se mettent à l'état fondu à une température suffisante appelée la température de fusion (plus de 200°C);
- Les thermodurcissables durcissent même à température ambiante ;

Généralités sur les polymères

- Au froid, ils se rigidifient puis ses propriétés mécaniques diminuent rapidement et ils deviennent fragile au choc ;
- Toutes les matières plastiques peuvent brûler vu leur structure organique, mais le comportement au feu peut être très varié.

I.7.2. Propriétés mécaniques :

- Les polymères thermodurcissables sont souvent rigides et fragiles, tandis que les polymères thermoplastiques et les élastomères montrent une résistance mécanique médiocre.
- Une bonne ténacité et une excellente résistance au choc pour certains types de polymères comme le PE et le PVC ;
- Une rigidité et une résistance mécanique moins élevées que celle des métaux ;
- Leur résistance à la traction, entre 20 MPa et 800 MPa ;
- Le fluage, quand un thermoplastique, comme le PE, est chargé, il subit une déformation immédiate, suivie d'une déformation lente au cours de la durée de cette charge. Ce phénomène est plus prononcé quand la température est plus élevée.
- Des fissurations sous contraintes ou en présence de solvants peuvent apparaître

I.7.3. Propriétés chimiques :

- Une faible masse volumique, permettant une manipulation aisée et une construction légère
- Une résistance chimique, exceptionnelle, même dans des milieux extrêmement corrosifs pour la plupart des polymères
- Certains acides mettent en jeu une liaison hydrogène avec les fonctions amides, à température plus élevée, ils peuvent provoquer la rupture de liaison et donc dégrader le polymère chimiquement
- Le vieillissement ou la dégradation sous l'influence de la radiation solaire UV par rupture des liaisons moléculaires en atmosphère avec O₂ ou O₃ ;
- Certains plastiques (PS) sont très sensibles, d'autres ne vieillissent pas (PMMA), selon la structure du polymère, car les structures linéaires se réticulent alors que les structures ramifiées se dégradent
- Certains polymères vieillissent sous l'action d'une attaque lente ou par l'interaction avec des solvants organiques chlorés ou oxygénés

Généralités sur les polymères

I.8. Quelques techniques de transformation des polymères

Les matières plastiques destinées à la transformation se présentent sous forme de liquides, de poudres ou de granulés. Pour les transformer, il faut les mélanger et les fondre, y ajouter parfois des additifs (colorants, plastifiants...) et les façonner en choisissant parmi les principaux procédés, celui qui est le plus adapté à l'objet ou à l'emballage que l'on souhaite obtenir. [11]

L'obtention des pièces en plastique de formes données est faite par des procédés de mise en forme permettant de réaliser des séries importantes ou de produit en continu.

Pour les matières thermoplastiques, on emploiera principalement les procédés suivants

- L'injection.
- L'injection soufflage.
- L'extrusion.
- L'extrusion soufflage.
- Calandrage
- Le thermoformage.
- Le rotomoulage

Ces procédés sont aussi utilisés pour les matières thermodurcissables, mais qui nécessitent une attention particulière pour la température, d'autres procédés prennent place comme la compression.

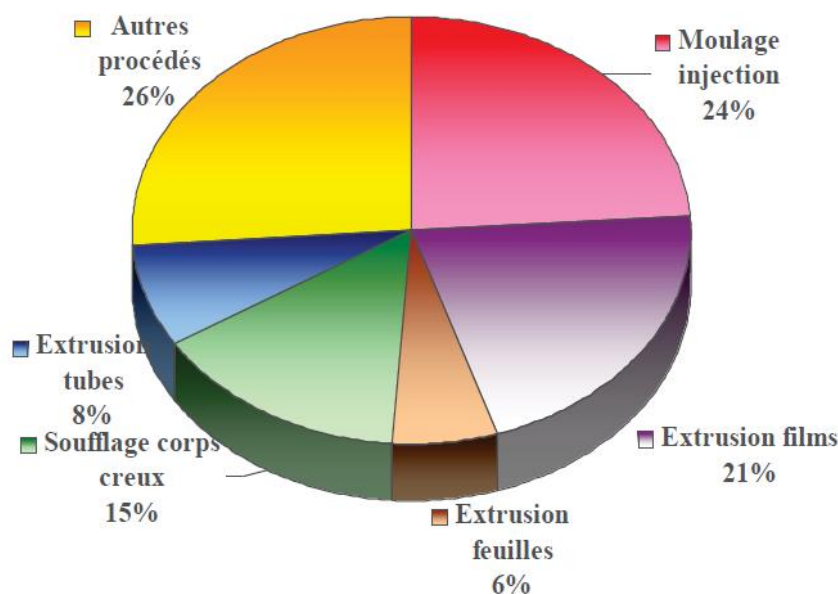


Figure I.12 : Répartition des procédés de mise en forme des matières plastiques par taux

Généralités sur les polymères

I.8.1. Le procédé d'injection des matières plastiques [11]

Le procédé injection est destiné à produire très rapidement des objets en très grandes quantités. Cette technique permet d'obtenir en une seule opération des pièces finies en matière plastique, de formes complexes, dans une gamme de poids allant de quelques grammes à plusieurs kilogrammes.

I.8.1.1. Principe de l'injection plastique

La matière, en granulés, ramollie par la chaleur est injectée dans un moule sous forte pression. Après refroidissement ces moules permettent la réalisation d'objets de dimensions et formes variables, ainsi que de pièces techniques très complexes et de grandes précisions.

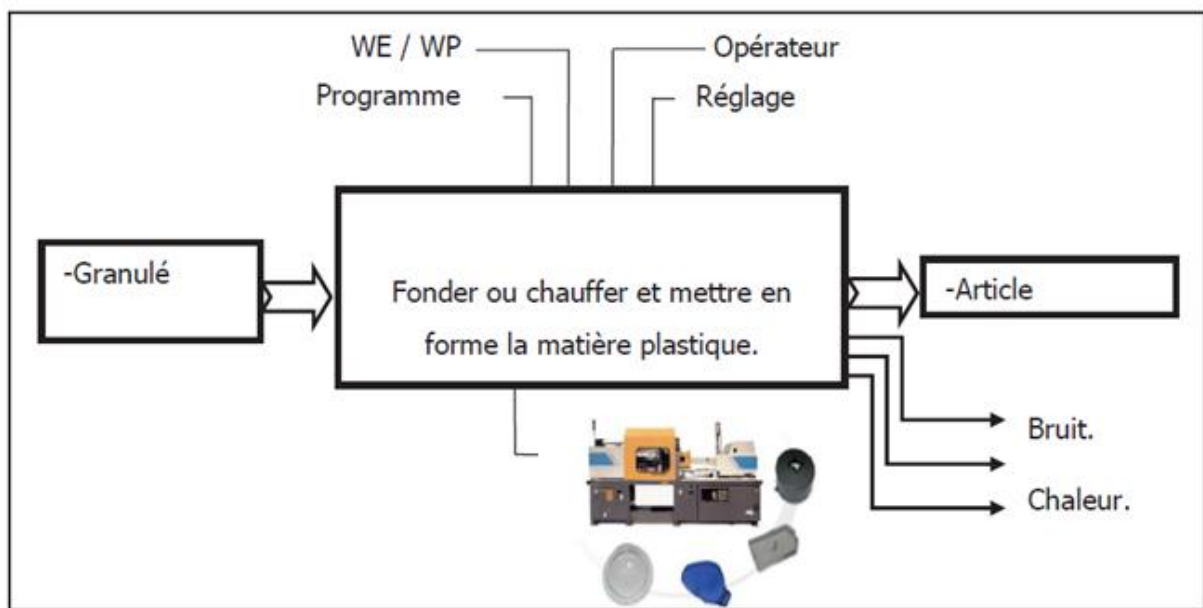


Figure I.13. Principe de l'injection

I.8.1.2 Les Presses d'injection plastique :

Une presse d'injection des thermoplastiques est composée par les ensembles suivants :

- Ensemble d'injection et de plastification (trémie, fourreau, vis).
- Ensemble de fermeture (moule, vérin de fermeture).
- Ensemble hydraulique (système hydraulique).
- La partie commande

Une machine est caractérisée par :

- la force de fermeture qui est comprise entre 50 tonnes et 3000 tonnes
- la pression sur la matière injectée qui peut atteindre 2000 bars
- la capacité d'injection (en cm³ ou en kg)

Suivant le sens d'injection on distingue :

Généralités sur les polymères

- les presses verticales (faible capacité)
- les presses horizontales (machines plus fréquentes)

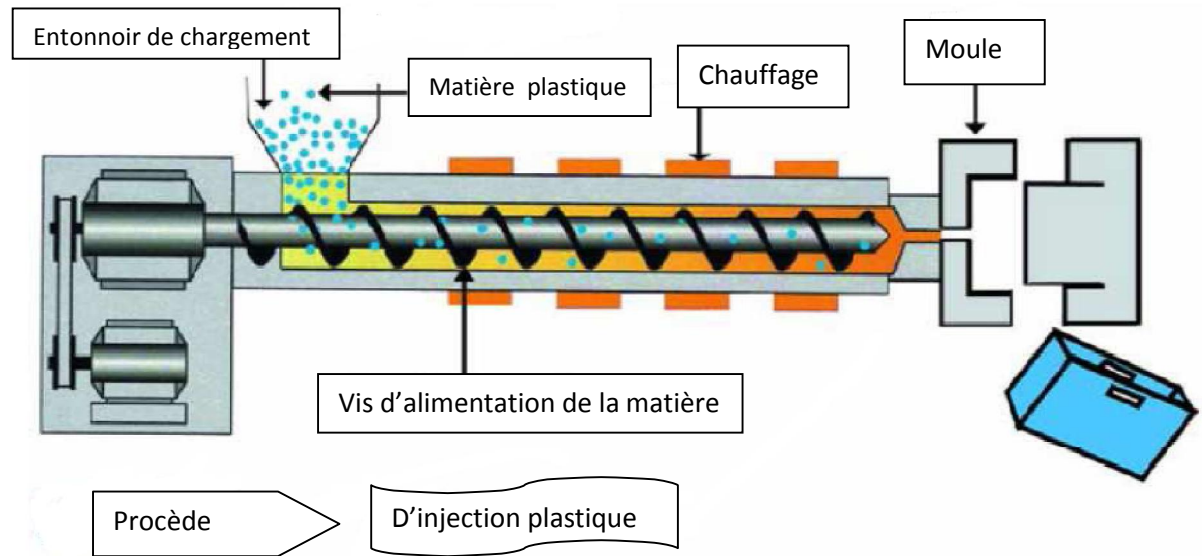


Figure I.14 : machine à injection plastique

Application

- Médical : Instruments médicaux à usage unique
- Automobile : tableau de bord voiture, pièce sous capot moteur
- Loisir : télévision, téléphone portable...
- Electroménager : cafetière, robot...
- Emballages : préformes de bouteilles, seaux, pots

I.8.1.3 L'injection par soufflage

Ce procédé est utilisé pour fabriquer la plupart des bouteilles et flacons. On utilise des pièces semi-finies obtenues par injection.

Par exemple pour les bouteilles d'eaux minérales, le cycle de fabrication se compose de quatre étapes :

- Le plastique est préformé mais le goulot est déjà entièrement formé.
- Le corps de la préforme est chauffé puis une tige étire la préforme jusqu'au fond du moule.
- Un très puissant jet d'air plaque la matière contre les parois du moule.

Généralités sur les polymères

- La préforme prend alors la forme et le moule est refroidi puis ouvert pour faire sortir la bouteille. Comme pour l'injection, pour changer la forme de la bouteille, il suffit de changer de moule.

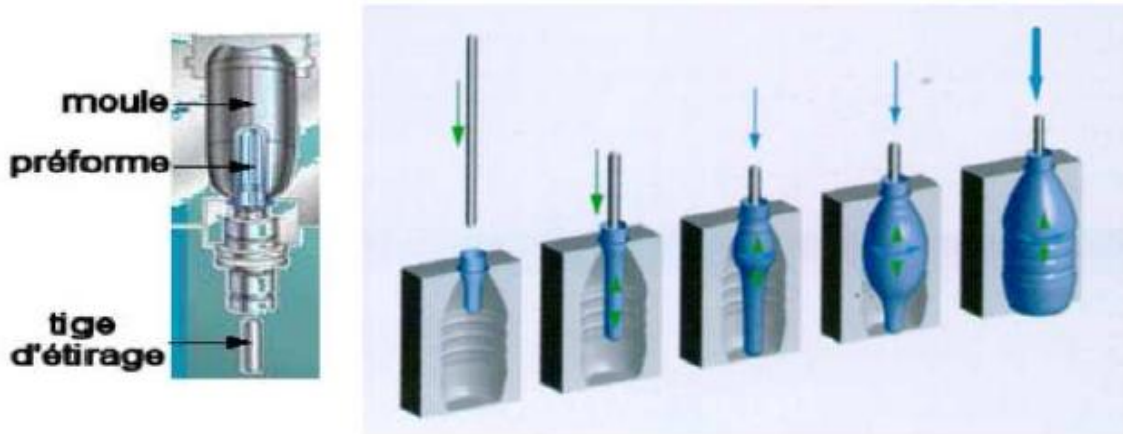


Figure I.15: étapes d'injection par soufflage.

Vu l'orientation de la matière pendant le soufflage, les propriétés mécaniques sont améliorées dans le sens perpendiculaire à l'axe de l'objet. Pour obtenir une amélioration également dans l'axe du récipient, on pratique le soufflage bi-orienté, qui comporte une étape supplémentaire de pré-étirage mécanique de la paraison dans le sens axial avant le soufflage. Cet étirement assure l'amélioration des caractéristiques dans le sens de l'axe, ce qui n'est pas le cas dans le soufflage simple.

I.8.1.4 Extrusion [11]

L'extrusion est le procédé de transformation qui sert à fabriquer des pièces en longueur comme des tuyaux, des gouttières ou des tubes... De dentifrice par exemple.

➤ Principe

- On verse le polymère sous forme de granulés ou de poudre solide dans la trémie de l'extrudeuse.
- La matière est entraînée par la vis sans fin qui tourne dans un cylindre chauffé.
- Elle se liquéfie sous l'effet de la chaleur et de la friction.
- La vis entraîne le plastique vers la sortie. La tête de sortie (pièce en acier aux formes variées) donne sa forme au produit au plastique qui est ensuite refroidi.

Généralités sur les polymères

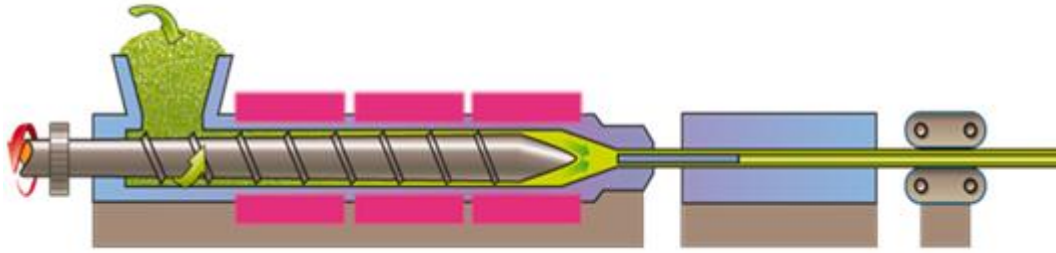


Figure I.16 : Extrudeuse.

➤ Applications

- Bâtiment : profilés des fenêtres, gouttières, tubes d'évacuation
- Médical : tubes, perfusion
- Emballages : tubes, pailles...

I.8.1.5 Extrusion gonflage

Ce procédé est un dérivé de l'extrusion, il consiste à souffler en continu de l'air à l'intérieur d'un tube appelé paraison pour la faire gonfler. Ce procédé ne nécessite pas de moule, c'est l'air soufflé qui donne la forme et le refroidissement. Cette technique permet de fabriquer des sacs plastiques.

➤ Principe

En phase initiale, le principe est le même que celui de l'extrusion classique mais il n'y a pas de forme à la sortie de l'extrudeuse. On insuffle de l'air comprimé dans le plastique ramolli.

- 1) Il se gonfle alors et s'élève verticalement comme une bulle de film très fin. On le laisse ensuite refroidir.
- 2) Avant de l'aplatir entre des rouleaux, on forme des soufflets et on prédécoupe les sacs.
- 3) On les enroule sur des bobines ou on forme des rouleaux.

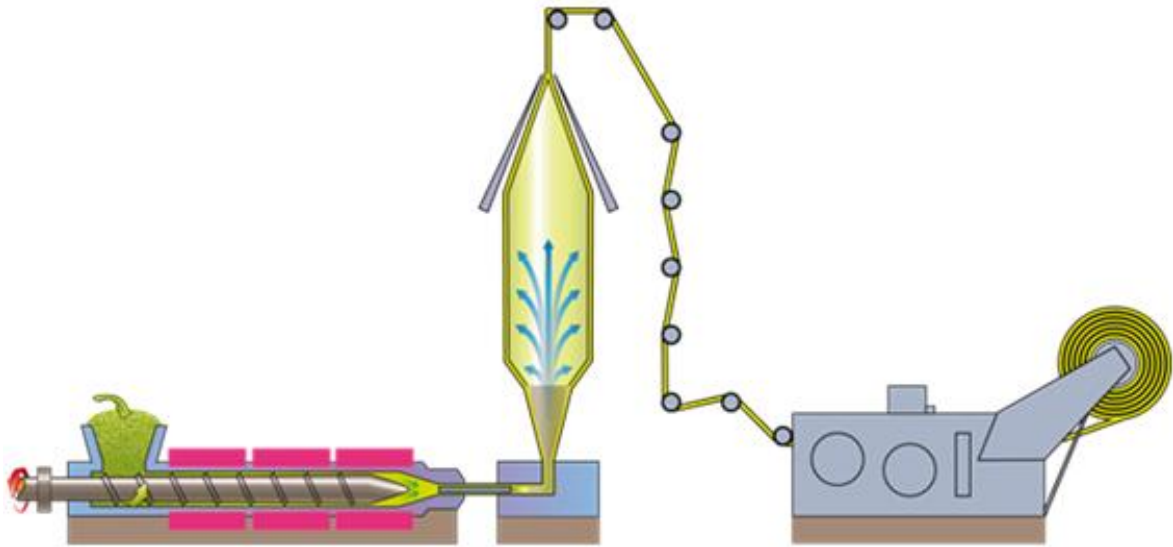


Figure I.17 machine à extrusion par gonflage

➤ Applications

Fabrication des sacs plastiques, de sacs poubelles, films étirables

I.8.1.6 Extrusion soufflage

Ce procédé consiste à combiner la technique de l'extrusion avec celle du soufflage. Il permet de fabriquer des objets creux comme les bouteilles de lait ou les flacons de lessive

➤ Principe

machine à extrusion par gonflage machine à extrusion par gonflage machine à extrusion par gonflage On réalise d'abord un tube par extrusion simple.

1. Le tube extrudé (appelé paraison) est enfermé dans un moule de soufflage (demi-coquilles ayant la forme désirée).
2. La paraison présente un orifice à son extrémité, qui est pincée (là où sera l'ouverture finale du récipient).
3. Puis de l'air est injecté dans le moule afin que le tube adopte parfaitement les parois où il est très rapidement refroidi. Il suffit alors de démouler l'objet ainsi fabriqué et le tour est joué.

Généralités sur les polymères

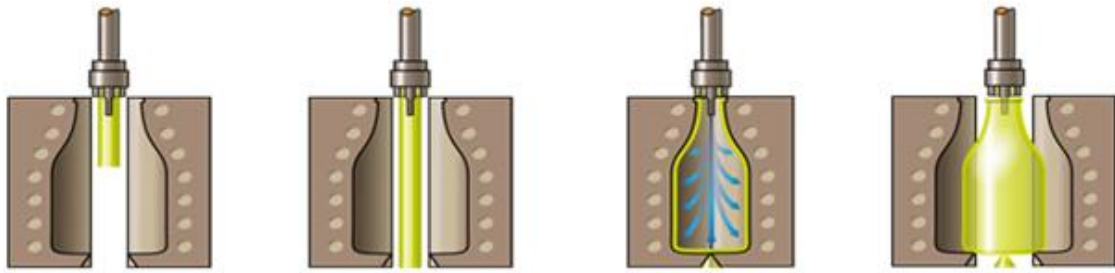


Figure I.18 : procédé d'extrusion gonflage

Applications

- Flacons, bouteilles, bidons
- Pièces pour l'automobile

I.8.1.7 Calandrage [11]

Le calandrage permet de fabriquer des produits semi-finis, comme des films. Dans une machine appelée calandre, les matières thermoplastiques, mélangées à des additifs et des stabilisants, sont écrasés entre plusieurs cylindres parallèles.

➤ Principe :

La matière est chauffée puis malaxée par une vis sans fin spéciale, pour donner une pâte épaisse.

1. Elle le passe plusieurs fois entre les rouleaux pour une homogénéisation parfaite, un peu comme une guimauve.
2. Pour permettre la gélification de la matière, celle-ci passe entre 2 calandres chauffées, réglées selon différents paramètres (température calandres, pressions, vitesse rotation...).
3. L'écartement, la pression et le type de rouleaux vont donner les dimensions et les aspects des films (le grainage).
4. Les films sont mis en bobine ou coupés et empilés pour faire des feuilles, aux dimensions et épaisseurs souhaitées des objets à former

Généralités sur les polymères

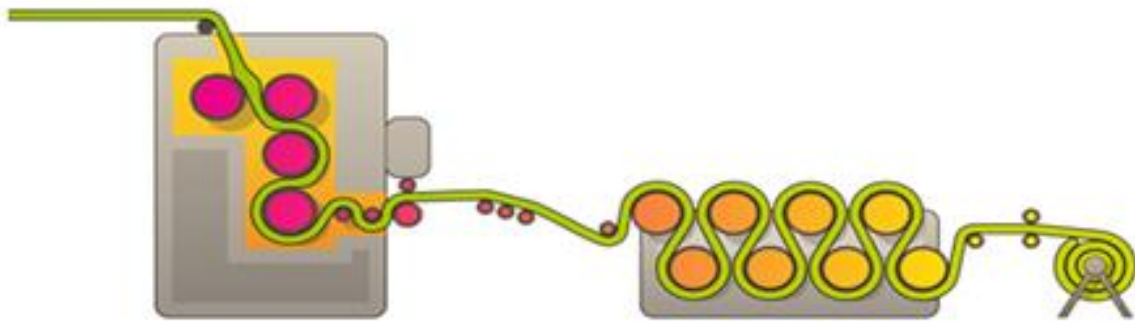


Figure I.19: Procédé de calandrage

➤ Applications

Le calandrage permet de fabriquer des produits semi-finis : des feuilles ou des films qui seront transformés par la suite pour devenir des pots, des barquettes ou des gobelets.

I.8.1.8. Thermoformage [11]

Derrière ce terme compliqué se cache le procédé de fabrication qui permet de réaliser toutes sortes d'objets aux formes creuses. Concrètement, pour les emballages, le thermoformage permet de créer des barquettes, des gobelets ou encore des pots de yaourt.

➤ Principe :

Le thermoformage est une technique de moulage.

- 1) Mise en place de la feuille et chauffage par un plateau chauffant supérieur et inférieur.
- 2) Montée du moule : la feuille est ramollie et le moule monte pour emboutir la feuille.
- 3) Formage / Refroidissement : une fois le moule en position haute, le vide est fait entre le moule et la feuille.
- 4) La feuille se plaque sur le moule et en prend sa forme. De l'air ou de petites gouttelettes d'eau sont projetées sur la pièce pour la refroidir et lui donner sa forme finale.
- 5) De l'air est soufflée à l'intérieur du moule pour décoller la pièce du moule et celui-ci descend pour libérer la pièce.

Généralités sur les polymères

6) Une fois le moule descendu, la pièce peut être enlevée puis décortiquée pour enlever



les chutes de production (cercle rouge)

Figure I.20. Cycle de thermoformage

➤ **Applications :**

- Jouets (bac à sable, toboggans)
- Pots de yaourt
- Blister
- Gobelets et barquettes

I.8.1.9L'expansion moulage

Le dernier procédé de transformation est appelé expansion moulage. Il sert à fabriquer toutes sortes d'emballages en polystyrène expansé.

➤ **Principe**

- 1) Avant d'être expansé, le polystyrène se présente sous forme de petites billes qui renferment des micro-inclusions de gaz (à l'état liquide).
- 2) Au contact de la vapeur d'eau, la matière plastique se ramollit et le gaz qu'elle contient se dilate.
- 3) Les billes gonflent grâce à l'air qu'il contient, comme le pop-corn, mais avec une forme plus régulière.
- 4) Cette première expansion est réalisée en usine dans de grandes cuves en inox et permet d'obtenir jusqu'à 30 fois le volume initial des petites billes de polystyrène
- 5) Ensuite, on sèche les billes pré-expansées dans un silo et on les introduit dans un moule fermé, soumis à une nouvelle injection de vapeur d'eau. Les billes

Généralités sur les polymères

reprennent leur expansion, occupent tout l'espace du moule et se soudent entre elles pour obtenir la forme désirée de l'emballage.

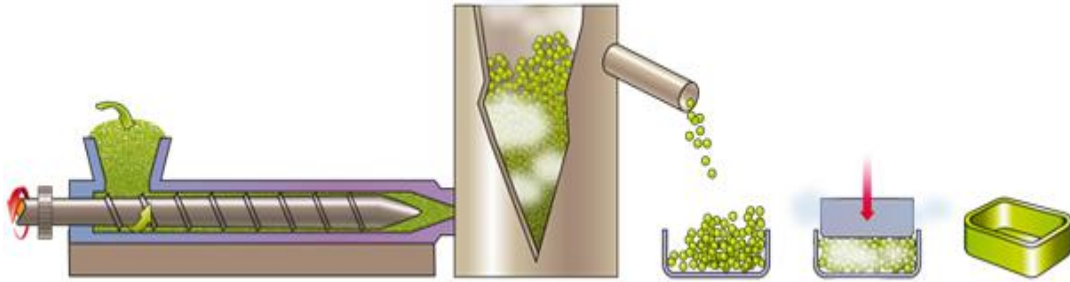


Figure I.21.cycle de L'expansion moulage

➤ Applications

Caisses à poissons, barquettes...

I.9. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons exposé les différentes techniques de transformation des plastiques, pour l'élaboration de nos éprouvettes nous avons adopté la technique d'injection plastique.

CHAPITRE II

COMPORTEMENTS

MÉCANIQUES DES

POLYMÈRES

Comportements mécaniques des polymères

II.1 Introduction

Un grand nombre des paramètres utilisés pour caractériser les polymères ; tel que le module d'élasticité ; la résistance à la traction, la résistance aux chocs et la limite à la fatigue, servent également à décrire les propriétés mécaniques des polymères.

La plupart des caractéristiques mécaniques des polymères varient beaucoup en fonction de la vitesse de déformation, de la température et la nature chimique du milieu (présence d'eau, d'oxygène, de solvants organiques,...)

Le but implicite des essais mécaniques est d'établir l'équation d'état : $f(\sigma, \varepsilon, \dot{\varepsilon}, t, T) = 0$ permettant de prédire le comportement du polymère en toutes circonstances.

II.2. Comportement contraintes-déformations

II.2.1 essai de traction

Parmi tous les essais mécaniques, l'essai de traction est certainement l'essai le plus fondamental. Il sert à déterminer les principales caractéristiques mécaniques usuelles telles que le module d'élasticité, la contrainte au seuil d'écoulement, la contrainte au plateau de plasticité, la contrainte et l'allongement à la rupture.



Figure II.1 Machine de traction

Comportements mécaniques des polymères

La figure ci-dessous présente 3 types de comportements contrainte- déformation des matériaux polymères issus des essais de traction.

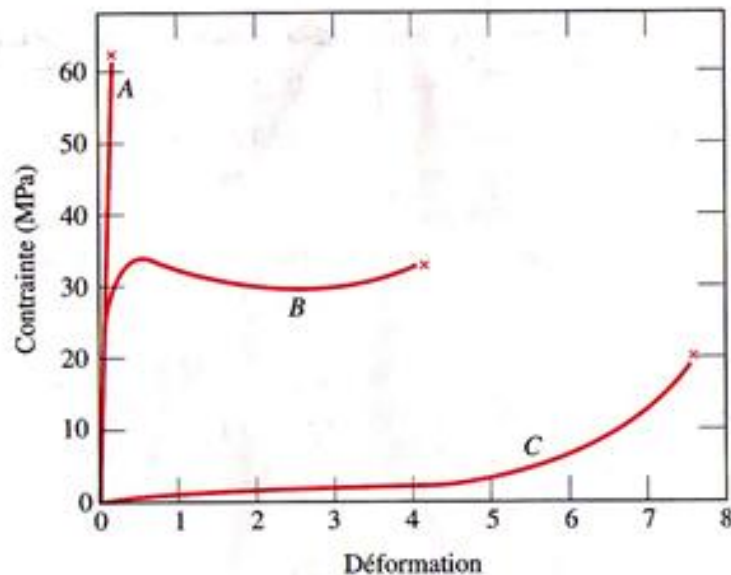


Figure II.2 : différents comportements de polymères en traction

- La courbe A illustre le caractère en contraintes déformation d'un polymère fragile dont la rupture s'accompagne d'une déformation élastique.
- La courbe B montre que le matériau polymère ressemble à celui de nombreux matériaux métalliques : la déformation élastique initiale est suivie d'une déformation plastique. C'est le comportement d'un matériau élasto-plastique avec seuil d'écoulement.
- La courbe C correspond à des déformations entièrement élastiques, analogue à celle des caoutchoucs (déformations réversibles prononcées résultant d'une contrainte faible), c'est le comportement mécanique des élastomères.
- La figure II.2 donne la forme de certaines éprouvettes de traction, ces éprouvettes polymériques peuvent être obtenues de différentes manières : moulage, prélèvement dans des plaques ou des produits finis par découpe ou usinage.

Comportements mécaniques des polymères

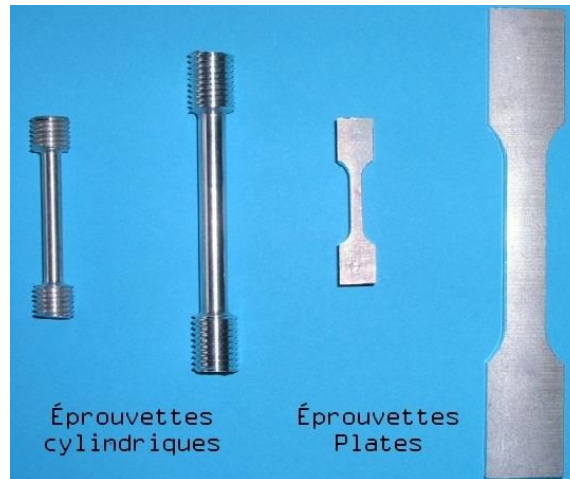


Figure II.3 : Formes et géométries des éprouvettes de traction

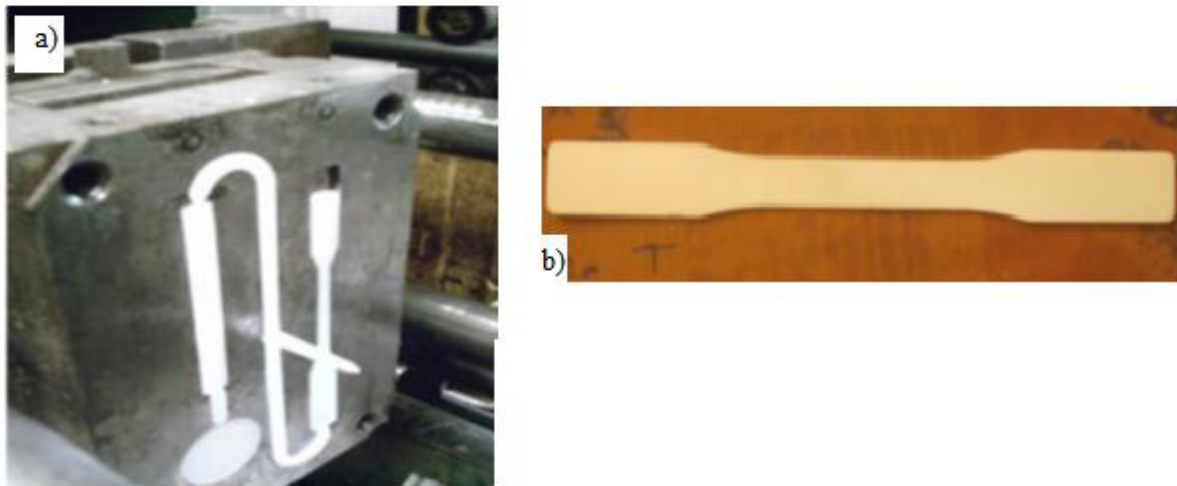


Figure II.4 Eprouvettes de traction obtenues :a) par injection, b) par découpe (poinçonnage)

A partir du diagramme contraintes déformations et de la géométrie, on détermine :

- La limite d'élasticité R_e des polymères plastiques (courbe B de la figure II.2) équivaut à la valeur maximale de la courbe, qui se situe à la toute fin de la région d'élasticité linéaire, elle est aussi appelée contrainte au seuil d'écoulement.
- La contrainte de rupture R_m : correspond à la contrainte entraînant une rupture ; quotient de la force appliquée au moment du bris par la section initiale. Elle peut prendre une valeur supérieure ou inférieure à R_e .
- Le module d'élasticité : il n'y a pas souvent, comme pour les métaux, une partie linéaire au début de la courbe ; nous sommes alors conduit à définir deux sortes de modules.

Comportements mécaniques des polymères

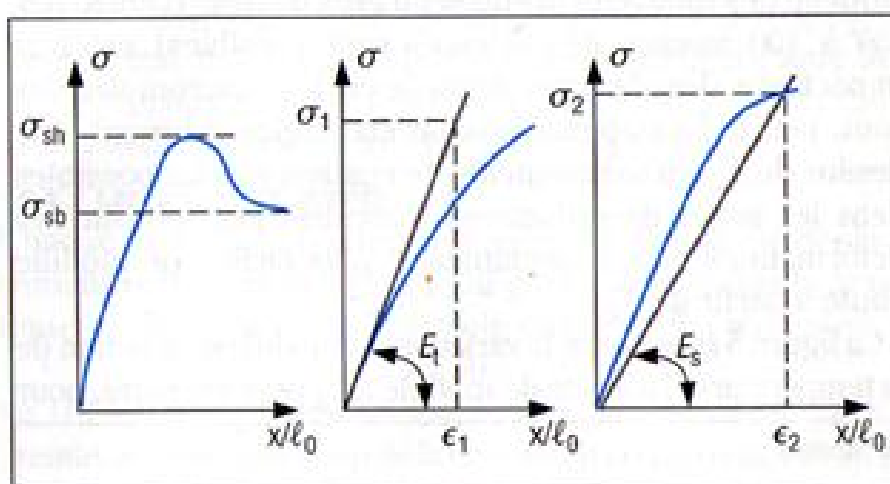


Figure II.5 : Définition des modules de traction

- Le module tangent : il est déterminé à partir de la tangente à l'origine de la courbe contrainte-déformation. Pente de la tangente $E_t = \sigma_1 / \epsilon_1$
- Le module sécant : il est déterminé pour une déformation conventionnelle $E_s = \sigma_2 / \epsilon_2$ (ϵ_2 fixé).
- Les allongements : soit au seuil d'écoulement ; soit à la rupture, sont donnés par :

$$A(\%) = \Delta L / L_0 * 100$$

Le tableau 1 présente les propriétés mécaniques de plusieurs polymères.

Tableau 1 Caractéristiques mécaniques de quelques polymères très répandus, à la température ambiante

Matériau	Massa spécifique (g/cm³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance à la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Allongement à la rupture (%)
Polyéthylène (faible densité)	0,917–0,932	0,17–0,28	8,3–31,4	9,0–14,5	100–650
Polyéthylène (haute densité)	0,952–0,965	1,06–1,09	22,1–31,0	26,2–33,1	10–1200
Polychlorure de vinyle	1,30–1,58	2,4–4,1	40,7–51,7	40,7–44,8	40–80
Polytétrafluoroéthylène	2,14–2,20	0,40–0,55	20,7–34,5	—	200–400
Polypropylène	0,90–0,91	1,14–1,55	31,0–41,4	31,0–37,2	10–600
Polystyrène	1,04–1,05	2,28–3,28	35,9–51,7	—	1,2–2,5
Polyméthacrylate de méthyle	1,17–1,20	2,24–3,24	48,3–72,4	53,8–73,1	2,0–5,5
Phénol-formaldéhyde	1,24–1,32	2,76–4,83	34,5–62,1	—	1,5–2,0
Nylon 6,6	1,13–1,15	1,58–3,80	75,9–94,5	44,8–82,8	15–300
Polyester (polytéréphtalate d'éthylène)	1,29–1,40	2,8–4,1	48,3–72,4	59,3	30–300
Polycarbonate	1,20	2,38	62,8–72,4	62,1	110–150

Comportements mécaniques des polymères

II.1.2 Essai de compression

Cet essai est conduit sur une éprouvette de forme : cylindre droit ou prisme droit, ou tube droit. La norme NF EN ISO 604 définit les conditions d'essais. On déterminera les mêmes paramètres qu'en traction. Des éprouvettes aux faces planes et parallèles sont indispensables pour l'obtention de résultats satisfaisants, un rapport d'effilement est à respecter (Voir le tableau II.1) pour éviter le flambage. Cet essai permet d'obtenir : la contrainte de compression et le module d'élasticité en compression.

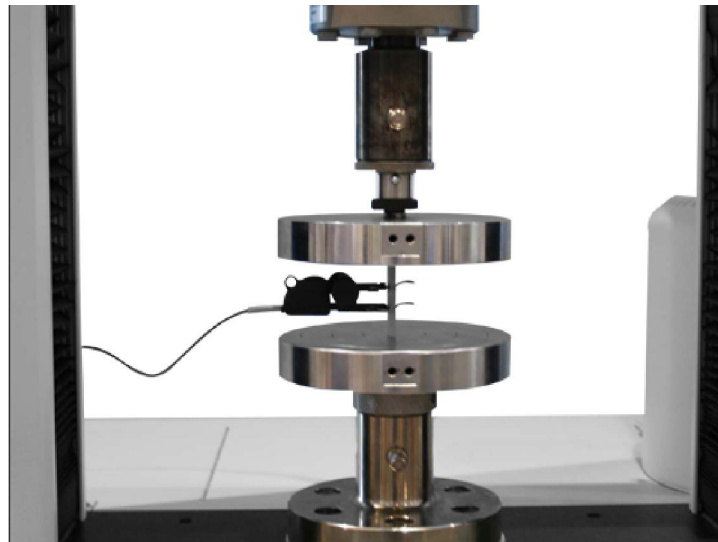


Figure II.6 : dispositif pour essai de Compression

Cylindrique	Prisme carré	Prisme rectangulaire	Tube cylindrique
$h = 2,5 \cdot d$	$h = 2,9 \cdot a$	$h = 2,9 \cdot b$	$h = 2,5 \sqrt{D^4 + d^4}$
$h_1 = 1,5 \cdot d$	$h_1 = 1,74 \cdot a$	$h_1 = 1,74 \cdot b$	$h_1 = 1,5 \sqrt{D^4 + d^4}$

II.1.3 Essai de Flexion 3 et 4 points :

Les informations obtenues par cet essai sont : contraintes et flèche à la rupture et le module d'élasticité en flexion

Comportements mécaniques des polymères



Figure II.7 :Dispositif pour essai de flexion 3 points

II.1.4 Essai de résilience

Les essais au choc ont pour objectif de déterminer l'énergie de rupture.

Les polymères cristallins tout comme les polymères amorphes sont fragile à basse température et ont une résistance aux chocs relativement faible.

Le principe de mesure de la résistance aux chocs (résilience) consiste en la sollicitation rapide d'une éprouvette polymérique pour qu'elle casse et de mesurer l'énergie dissipée dans la rupture. Cet essai permet de déterminer la sensibilité à l'entaille, les vitesses de sollicitations peuvent atteindre

$\dot{\epsilon} = 20 \text{ à } 50 \text{ s}^{-1}$ soit des vitesses de déplacement de 1 à 5 m/s

les essais standards

Les essais standards les plus courants sont les essais Charpy et Izod.

- **Essai Charpy**

Un marteau d'un mouton-pendule vient frapper un barreau entaillé ou non (la géométrie de l'entaille, le rayon de fond d'entaille en particulier, est normalisée), posé horizontalement entre deux enclumes (appuis), avec une énergie connue. La remontée de l'impacteur après la rupture correspond à l'énergie non utilisée dans la rupture. La résistance au choc est caractérisée par l'énergie absorbée par l'éprouvette rapportée à la section de l'éprouvette.

Le résultat est exprimé KJ.m^{-2} .

Comportements mécaniques des polymères

La température de l'essai est en général de 23° C ; mais on le pratique également à -30 et -40°C.

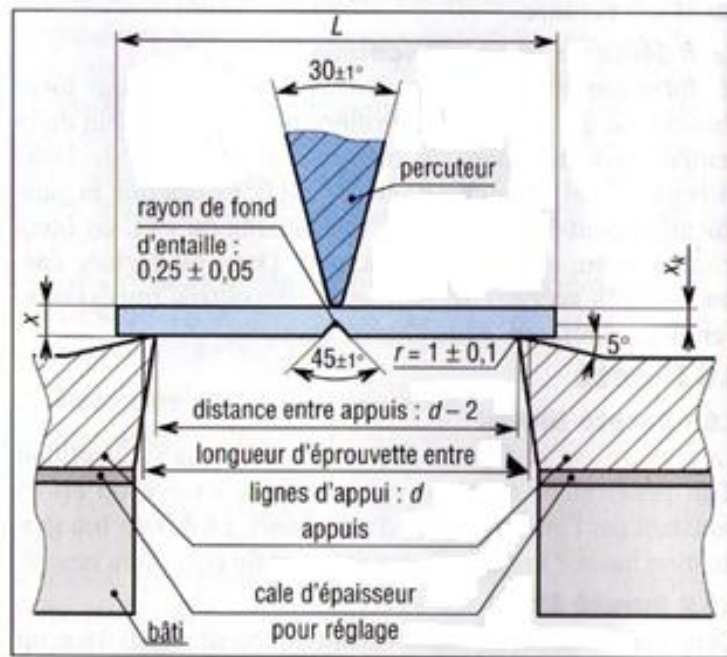


Figure II.8 Agencement expérimental et éprouvette Charpy

➤ Essai Izod

Le principe de mesure de l'énergie est le même que pour l'essai Charpy. La différence entre les deux essais est le système de fixation du barreau. Dans l'essai Izod, le barreau est bloqué en position verticale. Le résultat est exprimé en $J.m^{-1}$ (rapport de l'énergie de rupture à l'épaisseur du barreau). On peut aussi l'exprimer en $KJ.m^{-2}$ comme pour l'essai Charpy.

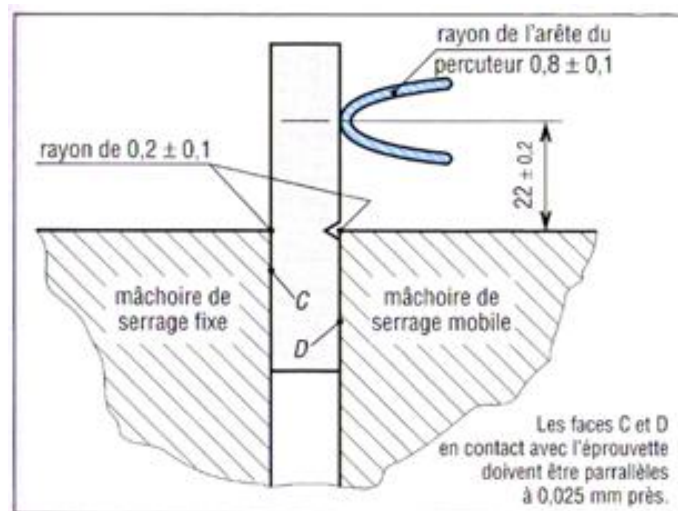


Figure II.9 Agencement expérimental Izod

Comportements mécaniques des polymères

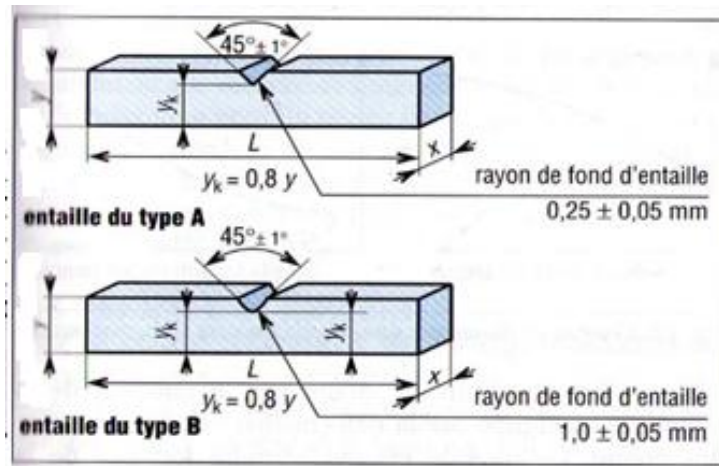


Figure II.10 Forme de l'entaille pour l'éprouvette de résilience

II.1.5 Essai de dureté

Ses essais simples et rapides permettent de déterminer la dureté superficielle. L'essai de dureté Shore D est fréquemment utilisé, rarement la dureté Rockwell. On peut effectuer des mesures de micro dureté, pour différencier les phases existant dans les mélanges de polymères. Les précautions d'usage pour l'essai de dureté est le respect de la charges à appliquer et de la durée d'application, l'éprouvette doit être suffisamment épaisse pour ne pas avoir l'influence du plateau de la machine.

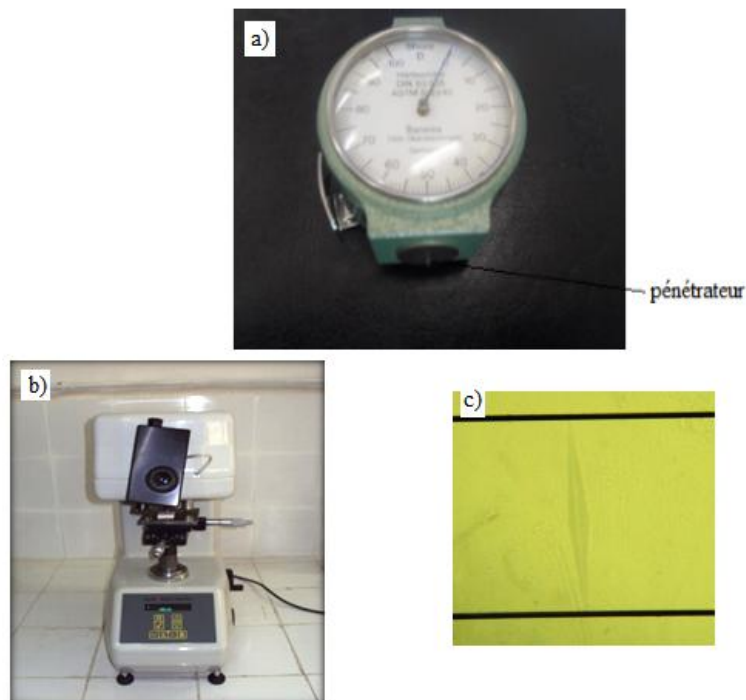


Figure II.11 Dispositifs de dureté : a) dureté Shore, b) microduremètre, c) empreinte de microdureté

Comportements mécaniques des polymères

II.2 Les éléments influents sur le comportement contrainte-déformation

➤ Incidence de la température sur le comportement contrainte- déformation

La température a une influence sur le comportement contrainte-déformation. Une augmentation de température entraîne :

- 1) Une diminution du module d'élasticité,
- 2) Une baisse de la résistance à la traction,
- 3) Une hausse de la ductilité.

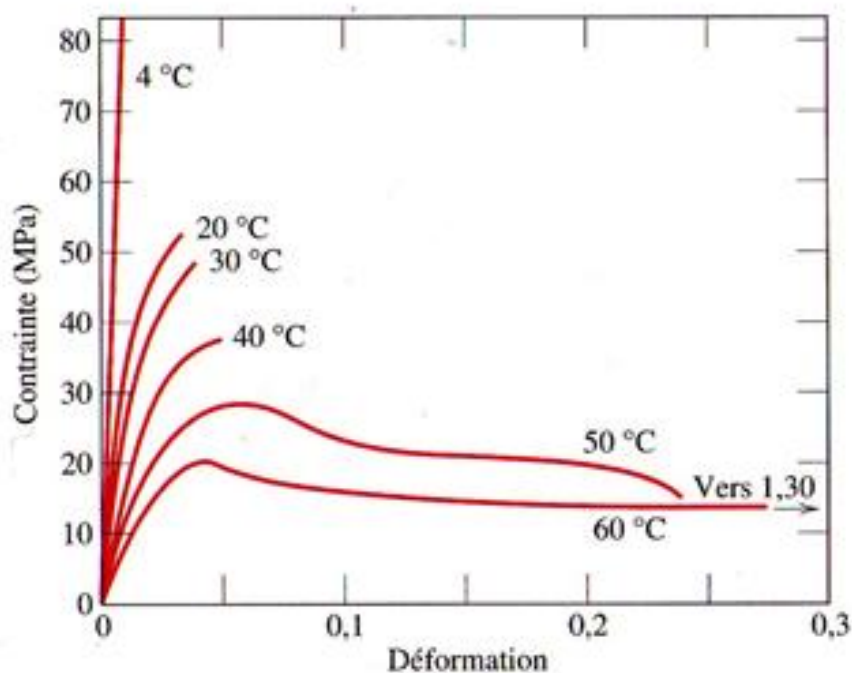


Figure 12 : incidence de la température sur le comportement contrainte-déformation du PMMA

La figure 10 illustre le comportement contrainte déformation du Plexiglas, le matériau est entièrement fragile à $T=4^{\circ}\text{C}$ et devient parfaitement ductile à $T=50^{\circ}\text{C}$ et 60°C (déformation plastique très importante).

La température de transition vitreuse T_g :

La température de transition vitreuse T_g est très importante, en dessous de cette température, les macromolécules sont peu déformables et rigides (état vitreux). Au-dessus de cette température, les mouvements des chaînes est rendus possibles dans les zones désordonnées amorphes permettrons des déformations plus importantes. Et plus facile (le module chute à partir de T_g).

Comportements mécaniques des polymères

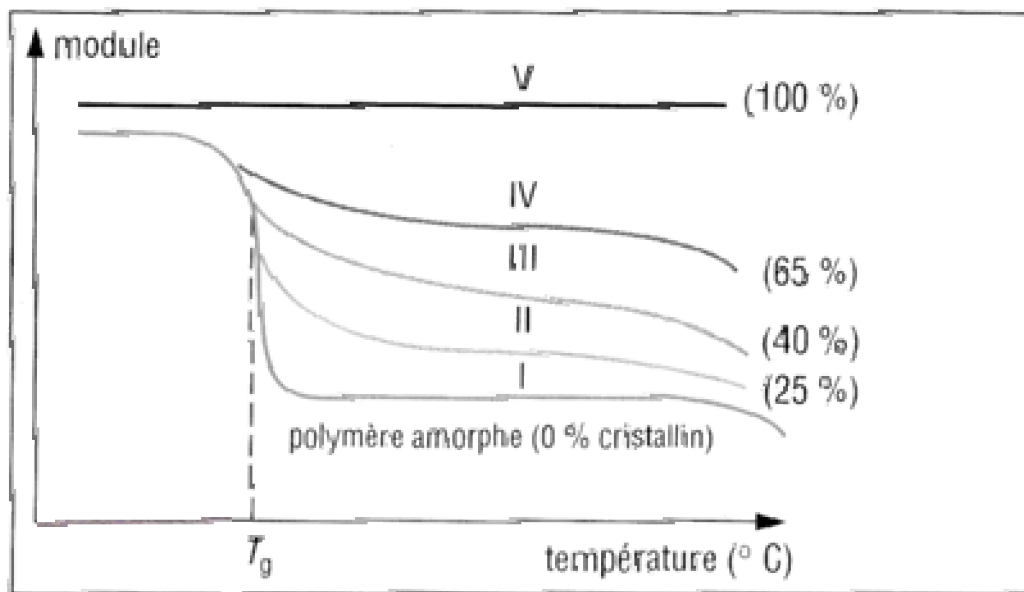


Figure II.13 Évolution de la rigidité du Polymère en fonction de la température et du degré de cristallisation

➤ Incidence de la vitesse de déformation sur le comportement contrainte-déformation

La vitesse de déformation peut également exercer une influence importante sur mécanique. En général toute diminution de la vitesse de déformation a la même influence qu'une augmentation de la température, c.à.d. que le matériau devient plus mou et plus ductile.

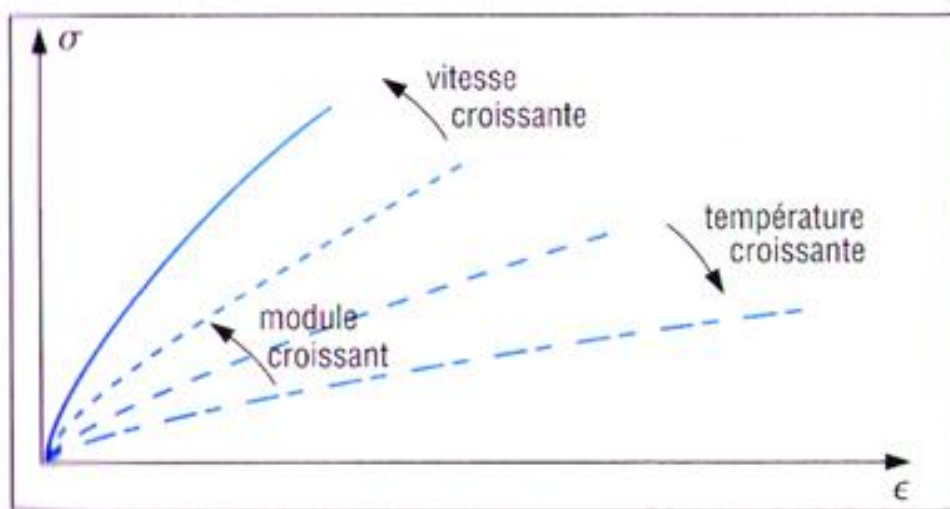


Figure II.14: Incidence de la vitesse de déformation et de la température sur le comportement contrainte-déformation des polymères

Comportements mécaniques des polymères

➤ Incidence de la masse molaire sur le comportement contrainte- déformation

On observe que la résistance à la traction des polymères augmente avec la masse molaire :

-plus le degré d'enchevêtrement dans la zone amorphe est grand, plus la masse molaire en nombre est grande, plus le polymère est résistant (de petites chaînes se démêlent plus facilement pour casser).

-la liaison inter cristallites, partie amorphe (de grandes chaînes participant à différents domaines cristallins assurent la liaison inter cristallites), plus ces liaisons sont importantes plus le polymère semi-cristallin est résistant.

En termes mathématiques, la résistance à la traction (R_m) est fonction de la masse molaire moyenne en nombre selon l'équation suivante :

$$(R_m) = R_{m\infty} - \frac{A}{M_n}$$

Où $R_{m\infty}$ est la résistance à la traction pour une masse infinie, et A, une constante.

➤ Incidence du degré de cristallinité sur le comportement contrainte- déformation

Pour les polymères partiellement cristallins, le taux de cristallinité (c.à.d. le volume de matière bien ordonnée) influence les propriétés mécaniques.

Les liaisons de van der Waals existant entre les segments adjacents de chaînes moléculaires sont d'autant plus fortes que les chaînes deviennent serrées et compactes. Ces liaisons deviennent moins importantes dans les régions amorphes en raison du défaut d'alignement des chaînes. En conséquence, le module d'élasticité des polymères semi-cristallin augmente fortement avec le degré de cristallinité. Par exemple, le module d'élasticité des polyéthylènes augment d'environ un ordre de grandeur lorsque le degré de cristallinité passe de 0,3 à 0,6. (Tableau 1)

➤ Incidence de la préformation par étirage sur le comportement contrainte- déformation

Parmi les procédés employés sur une base commerciale pour accroître la résistance mécanique et le module d'élasticité d'un polymère, on recourt fréquemment à la déformation de traction permanente. Ce procédé appelé étirage des polymères correspond au durcissement structural des métaux. Lorsque le polymère est étiré avec chauffage, il ne conserve sa structure moléculaire orientée que s'il est rapidement refroidi à la température ambiante. Le degré de rigidité et de résistance varie selon l'ampleur de la déformation du matériau. Par ailleurs les propriétés des polymères étirés sont fortement anisotropes.

Comportements mécaniques des polymères

Par rapport à un matériau non étiré, le **module d'élasticité** peut prendre une valeur environ trois fois plus élevée dans la direction de l'étirage. En revanche, à un angle de 45° par rapport à l'axe de traction, cette valeur chute et ne représente qu'un cinquième de celle du polymère non étiré.

La résistance à la traction parallèle à la direction de l'orientation peut s'accroître d'un facteur de deux à cinq par rapport à sa valeur dans le matériau non étiré. Par ailleurs, la résistance à la traction est réduite d'un facteur de 1/3 à 1/2 si elle est perpendiculaire à la direction de l'alignement.

➤ **Incidence du traitement thermique sur le comportement contrainte- déformation**

Le traitement thermique (ou recuit) des polymères semi-cristallin modifie la taille et le degré de pureté des cristallites ainsi que la structure sphérolitique.

L'augmentation de la température du recuit des matériaux non étiré a les conséquences suivantes :

- un accroissement du module d'élasticité ;
- une augmentation de la limite d'élasticité ;
- une diminution de la ductilité.

Ces effets imputables au recuit des polymères sont contraires à ceux généralement observés dans les métaux.

Les effets du recuit sont contraires lorsqu'il s'agit d'un polymère étiré (fibres et pellicules)

❖ **Les éléments influant l'essai de résilience**

• **Influence de la masse molaire**

Une augmentation de masse molaire favorise une meilleure résistance au choc.

• **Influence de la température**

On peut définir pour certains polymères des températures dites de transition ductile-fragile, au-dessous de cette température le matériau casse brusquement de façon fragile et au-dessus de cette température le polymère présente une certaine déformation au choc.

• **Influence de la géométrie**

La forme et la dimension de l'entaille influencent les résultats de l'essai de choc rendant les corrélations entre essais délicates. Le mode d'usinage de l'entaille, et son rayon à fond d'entaille, peuvent justifier de grandes variations.

Comportements mécaniques des polymères

II.3. Comportement mécanique des polymères à la fatigue

De nombreuses pièces conçus en matière plastiques sont soumises à des efforts variables dans le temps ; engrenages, cames, biellettes, ressort....

Les polymères peuvent donner lieu à la rupture par fatigue en situation de chargement cyclique. La représentation graphique des courbes de fatigue des polymères ressemble à celle des métaux même si les polymères n'ont pas fait sujets d'expérimentation en fatigue comme les métaux.

Les courbes de Wöhler sont des courbes fondées sur l'amplitude de la contrainte appliquée en fonction du nombre de cycle avant la rupture (à l'échelle logarithmique). Cette courbe nous permet de déterminer la limite d'endurance d'une pièce, qui renvoie à l'amplitude de la contrainte au-dessous de laquelle la contrainte de rupture devient indépendante du nombre de cycles, la contrainte à la rupture devient infinie.

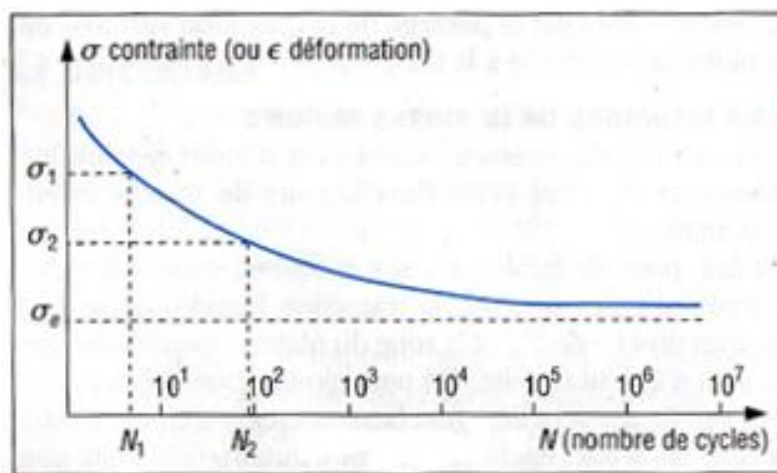


Figure II.15 courbe de fatigue, courbe de Wöhler

Les essais de fatigues à la suite de sollicitations cycliques sont menés de trois façons :

- en traction à valeur moyenne nulle (une alternance de tensions et de compressions dont les valeurs maximales ont des valeurs absolues égales).
- en traction entre une tension nulle et une tension maximale ;
- en traction a valeur moyenne non nulle, (on superpose une petite variation de la valeur de traction autour d'une valeur moyenne élevée).

Comportements mécaniques des polymères

La figure ci-dessous donne les courbes de fatigue de quelques polymères (courbes de Wöhler), cette courbe est fondée sur l'amplitude de la contrainte appliquée en fonction du nombre de cycles à la rupture (à l'échelle logarithmique).

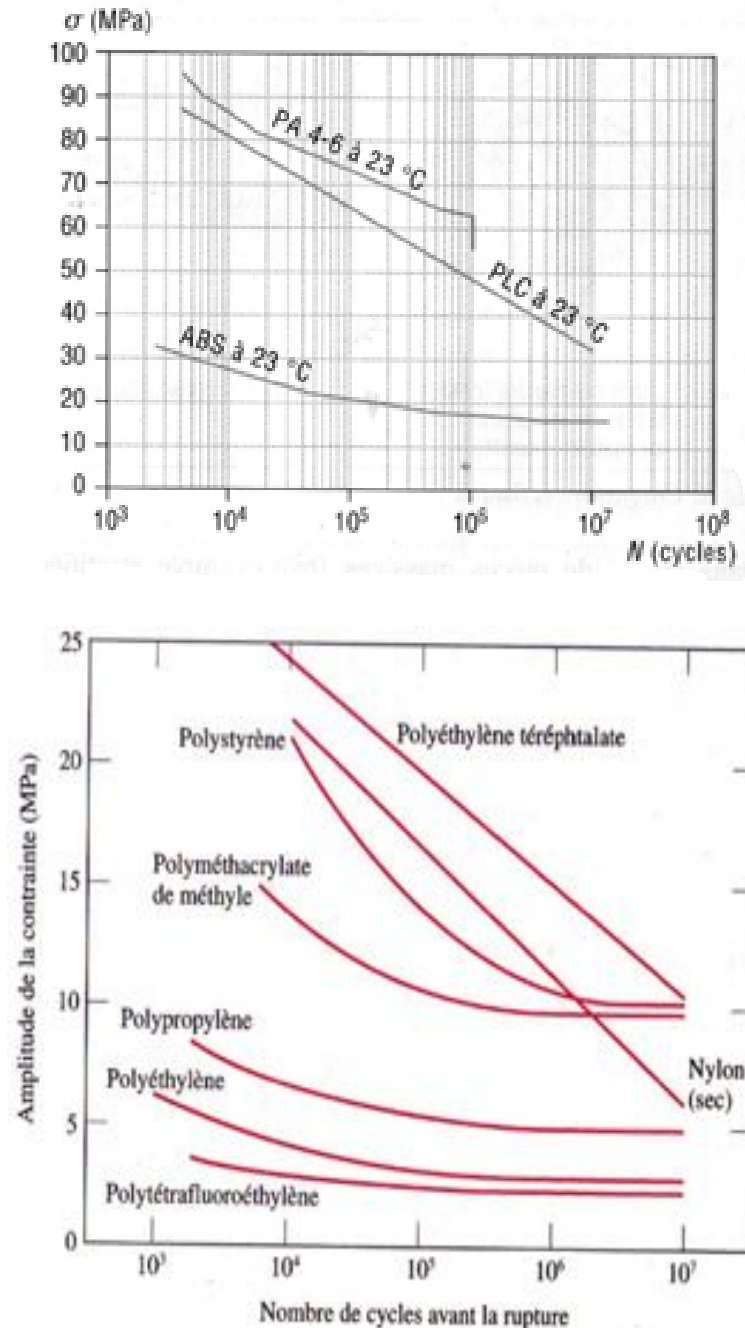


Figure 16 : Courbes de fatigue de certains polymères

Comportements mécaniques des polymères

II.3.1 Température interne du polymère lors de l'essai de fatigue

Lorsqu'un polymère est sollicité (travaille), il conserve une partie du travail qu'on lui fournit et s'échauffe, cet échauffement peut être suffisant pour amener le matériau à une température interne supérieure à la transition vitreuse, avec les conséquences connues sur le module (diminution très nette).

Ainsi même si on fixe la température du milieu ambiant, on sait que la température du matériau est beaucoup plus élevée.

II.3.2 Paramètres influant sur la fatigue

- **La température ambiante et atmosphère de l'essai**

La température ambiante sera, comme pour tous les essais un paramètre déterminant.

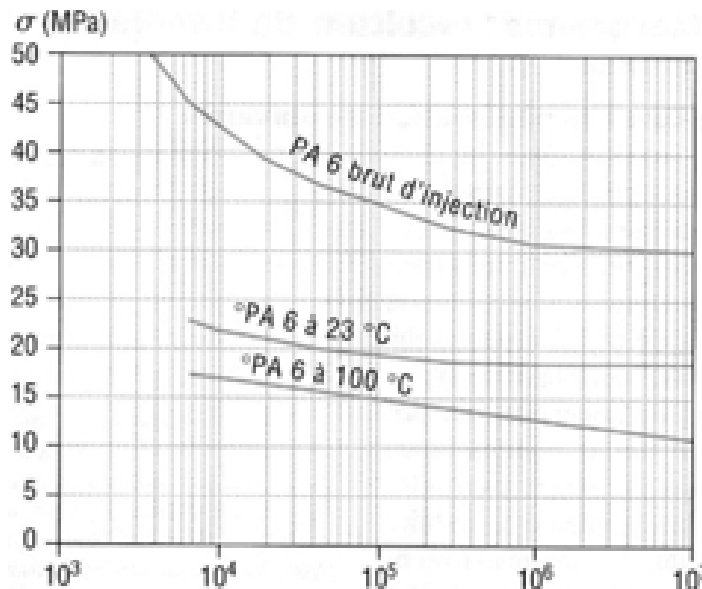


Figure II. 17 Influence de la température sur la courbe de fatigue

L'ambiance de l'essai peut intervenir comme paramètre important, l'humidité par exemple agit comme un plastifiant pour un polyamide 6.6, le résultat de l'essai sera fonction du taux d'humidité relative.

- **La fréquence de l'essai**

La fréquence augmente le travail perdu au sein du matériau par unité de temps.

Plus la fréquence augmente plus le travail perdu au sein du matériau par unité de temps augmente. Plus la fréquence est grande plus l'endurance est faible.

Comportements mécaniques des polymères

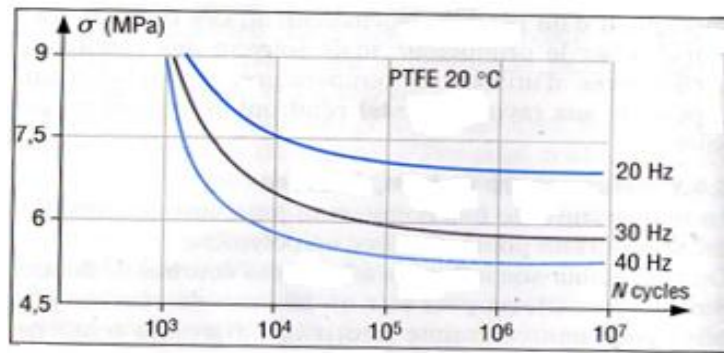


Figure II.18 influence de la fréquence de l'essai sur la fatigue

- **La géométrie de l'éprouvette**

Influe sur l'échange thermique avec le milieu ambiant. Un échantillon plat offre un meilleur échange qu'un échantillon compact.

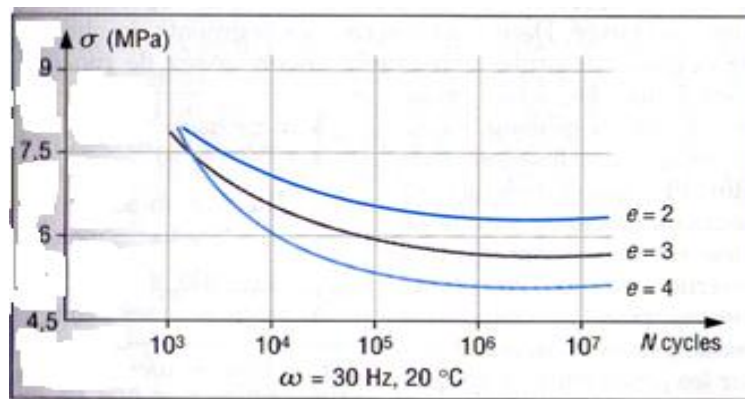


Figure II.19 : Influence de la géométrie de l'éprouvette sur les résultats en fatigue
(e = épaisseur de l'éprouvette en mm)

- **Le mode de sollicitation**

Il faut différencier l'essai à amplitude de contrainte constante, d'un essai à amplitude de déformation constante. Dans le premier cas, l'amplitude de la contrainte sinusoïdale étant maintenue constante, la déformation imposée au matériau devra augmenter comme la température augmente, ou que le matériau faiblit, car alors E le module d'élasticité décroît. Inversement, pour une amplitude de déformation sinusoïdale constante, si E décroît, alors la contrainte induite dans le matériau décroît.

II.4 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons exposé les différents comportements mécaniques des polymères avec l'influence de différents paramètres intrinsèques ou extrinsèques aux matériaux

CHAPITRE III

RECYCLAGE DES

POLYMÈRES

Recyclage des polymères

III.1 INTRODUCTION

L'intérêt porté à la valorisation des matières plastiques peut être lié à la diminution des ressources mondiales en matières premières et à la législation concernant la protection de la nature et la préservation de la qualité de l'environnement.

Le recyclage des matières plastiques dans les pays du Sud (Afrique centrale, Afrique du nord) connaît depuis quelques années un développement important. Si au Nord (Europe), il est devenu nécessaire pour des raisons écologiques et sous la contrainte de lois, dans le Sud, on le considère, avant tout, comme une activité économique rentable, génératrice de revenus et créatrice d'emplois. Le recyclage des matières plastiques n'est pourtant pas une activité aussi simple qu'elle ne paraisse. Cela est principalement dû à une grande diversité de produits et de techniques de traitement. Derrière le terme « plastique » se cachent des produits fabriqués à partir du pétrole (4% du pétrole est utilisé pour fabriquer la totalité des matières plastiques). Nous les avons classé en trois grandes familles : les thermoplastiques qui fondent au chauffage et qui sont les plus faciles à transformer lors du recyclage (PVC, PET, HDPE, PP, PA, PS, etc.), les thermodurcissables qui durcissent lors de leur première mise en œuvre et qui sont très difficile à recycler (PU, silicone, etc.) et les élastomères qui ne peuvent pas faire l'objet d'une transformation (caoutchouc). Ces différents plastiques ne peuvent que rarement être mélangés entre eux, leur recyclage demande un travail de tri et de nettoyage des déchets importants ainsi qu'une sélection rigoureuse du procédé.

Certaines mesures réglementaires sont actuellement prises pour encourager le recyclage en vue de conserver les ressources naturelles pour les générations futures dans des perspectives de développement durable. D'où la nécessité de trouver des techniques non polluantes de recyclage de ces matériaux polymères.

Le recyclage de la matière n'est réalisable économiquement et écologiquement que si des quantités suffisantes de déchets homogènes, séparés et triés sont présentes pour donner une seconde vie à une bouteille de PET, un châssis de fenêtre, un emballage de polystyrène expansé, un tuyau et un réservoir à essence...etc. ; par réutilisation, recyclage ou récupération d'énergie

Recyclage des polymères

III. 2.Définition

La notion de déchet semble relever de sens commun et pourtant, il n'est pas toujours facile de la définir. Le déchet lui semble au moins inutile, souvent encombrant et même parfois dangereux, on cherche donc généralement à s'en débarrasser. D'après la législation japonaise ne considère comme déchet que ce qui ne peut plus être utilisé ou valorisé.

Le recyclage de matière plastique est la refusions et la transformation de déchets de matières plastiques en nouveaux produits. Le plastique utilisé est d'abord trié, nettoyé et lavé puis broyé, extrudé pour donner des granulés. Parfois, il ne faut pas extruder la matière, mais uniquement la lacérer ou la broyer. Les granulés servent de matière première secondaire pour la production de nouveaux produits plastiques.

III. 3. Sources des déchets plastiques

Il existe deux principales sources de déchets plastiques :

Tableau III : Source de déchets plastiques

Les déchets issus des sous-produits industriels	Les déchets de post-consommation
- faciles à collecter car les stocks sont homogènes - non pollués et facilement identifiables - ces déchets sont généralement directement recyclés par le producteur.	- ils sont principalement collectés dans les ordures ménagères - ces matériaux sont généralement pollués - mélangés et incompatibles entre eux

III.4 Différents types de déchets [12]

Pour définir des classes de déchet et leurs modalités de prise en charge, on répartit les déchets en trois grandes catégories que sont les déchets inertes, les déchets spéciaux et les déchets banals.

III.4.1 Déchets inertes

Les déchets inertes sont des déchets n'ayant pas d'action sur le milieu ambiant et non susceptibles d'évolution physico-chimique ou biologique importante au cours de temps.

En particulier, ils ne se décomposent pas, ne sont pas biodégradable et ne brûle pas.

Origines des déchets inertes

Les déchets inertes ont de nombreuses origines :

Chantiers : démolition, réhabilitation, construction

Entretien des ouvrages existants

Travaux publics

Mines et carrières Etc.

Exemples de déchets inertes

Quelques exemples de déchets inertes :

- briques, pierres, parpaings ;
- béton ;
- carrelage, céramique, faïence ;
- tuiles, ardoises ;
- terre non polluée, etc.

Déroulement du recyclage des déchets inertes

Le recyclage des déchets inertes s'effectue dans des filières dédiées :

Recyclage des polymères

- Il consiste en un tri par taille, puis en une réduction de taille.
- Les éléments qui ne font pas partie de cette filière de recyclage (métal, plastique, bois, plâtre, etc.) sont triés et mis à part.

III.4.2. Déchets industriels spéciaux

Les déchets industriels spéciaux (DIS) sont des déchets dangereux. Leur nature nécessite des protections particulières vis-à-vis de l'environnement lors de leur collecte, de leur traitement et de leur éventuel stockage. Les déchets industriels spéciaux ne peuvent être déposés dans des installations de stockage recevant d'autres déchets.

Les déchets de matériaux polymères en tant que tels ne présentent, sauf cas particuliers, aucun caractère dangereux pour le monde vivant et ne seront donc que très rarement classés dans les déchets spéciaux.

III.4.3. Déchets banals (déchets ménagers et assimilés)

Les déchets banals sont des déchets non inertes et non dangereux. On les retrouvera donc principalement dans les ordures ménagères mais aussi dans les déchets des entreprises. En général, les déchets plastiques se retrouveront dans cette catégorie. L'emploi des matières plastiques dans la vie courante, et principalement sous forme d'emballages dont la durée de vie est généralement très courte, conduit à retrouver une large part des plastiques dans les ordures.

III.5 Origine et répartition des déchets plastique :

On est amené à classer les déchets de matières plastique en :

III.5 .1 Les déchets industriels :

Ces déchets sont le plus souvent homogènes, bien identifiés et peu souillés, ils sont vendus à des récupérateurs ou recycleurs. Ces déchets peuvent représenter des quantités notables mais ils sont propres, bien identifiés. On distingue :

➤ Les déchets thermoplastiques homogènes :

Ces déchets sont produits lors des mises en route et des arrêts des machines où sont inhérents aux procédés eux-mêmes : chutes de découpage de films ou de profilés, etc. Sauf en cas de

Recyclage des polymères

produits souillés ou oxydés, ils sont réintégrés dans le procédé de transformation après broyage et granulation, ou de séchage pour les plastiques sensibles à l'humidité

➤ les déchets thermoplastiques complexés, imprimés ou collés

Ces produits sont propres, bien identifiés mais multicouches, donc hétérogènes. Il est souvent difficile de les recycler sur le site de fabrication et ils sont vendus à l'extérieur pour une valorisation thermique ou pour fabriquer une matière ultérieure

III.5.2 Déchets de distribution et commerciaux (transport, suremballage)

Ces déchets concernent les emballages industriels et commerciaux et ce présentent essentiellement sous la forme de films de polyoléfine, dans une proportion très importante de films étirables et rétractables qui nécessitent des traitements appropriés, compte tenu de leur comportement particulier, notamment lors des opérations de broyages.

III.5.3. Déchets des consommateurs finaux

Parmi ces déchets on trouve :

- Déchets d'emballages plastiques dans les ordures ménagères.
- Déchets plastiques du bâtiment et travaux publics.
- Déchets plastiques de l'automobile et du secteur des pièces industrielles.
- Déchet dans le domaine de l'agriculture.

III.6 Différentes méthodes de valorisation des déchets de matières plastiques :

En dehors de la mise en décharge, polluante et de plus en plus réglementée, trois voies principales de valorisation des déchets plastiques sont possibles :

III.6.1. Valorisation énergétique :

Il s'agit du traitement des déchets plastiques par incinération (combustion totale), avec ou sans récupération d'énergie. Les déchets plastiques constituent un apport calorifique non négligeable qui peut être valorisé par récupération de la chaleur produite utilisable directement pour le chauffage ou sous forme d'énergie électrique. Pratiquement tous

Recyclage des polymères

les plastiques peuvent être incinérés. Cependant, la dégradation de certains matériaux peut dégager des composés toxiques (acide chlorhydrique dans le cas du polychlorure de vinyle, acide nitrique pour le polyamide, acide sulfurique pour certains caoutchoucs...).

III.6.2. Recyclage chimique :

Cette valorisation vise à décomposer les molécules constituant des déchets plastiques en matières premières (monomères, oligomères ou combustibles) réutilisables dans les raffineries, la pétrochimie et la chimie. On distingue :

- **La pyrolyse :** c'est la décomposition des molécules par chauffage sous vide. Ce procédé conduit à des hydrocarbures liquides ou gazeux utilisables ultérieurement dans les raffineries.
- **'hydrogénation :** C'est le traitement par l'hydrogène et la chaleur des macromolécules qui sont craquées en huiles hydrocarbonées utilisables dans les raffineries et les usines de produits chimiques.
- **La gazéification :** les plastiques sont chauffés en présence d'air ou d'oxygène. Le gaz de synthèse résultant est constitué de monoxyde de carbone et d'hydrogène qui peut être utilisé dans la production de méthanol, d'ammoniac ou comme agent réducteur dans la production d'acier.
- **La décomposition chimique proprement dite:** On applique des procédés tels que l'hydrolyse, l'alcoolyse, etc.

Les applications de cette voie de recyclage, attrayante dans son principe, sont jusqu'à présent limitées, à des polymères comme le polyamide (PA), le polyéthylène téréphtalate (PET) et le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), du fait de problèmes pratiques et de rentabilité. Ce principe de recyclage n'en est encore qu'à un stade pilote.

III.6.3. Recyclage mécanique :

Le principe de ce type de valorisation des déchets est plus ou moins complexe et est envisagé depuis de nombreuses années. Il regroupe l'ensemble des méthodes de valorisation des déchets plastiques dans lesquelles les matériaux sont réutilisés tels quels ou après modification chimique. Il apparaît de loin comme la meilleure solution pour le traitement des déchets solides puisque toutes les méthodes citées auparavant sont de nature destructive.

Recyclage des polymères

Un certain nombre d'opérations doit être prévu avant le recyclage mécanique : il s'agit de la collecte, du tri, de la ségrégation des plastiques, du déchiquetage, du lavage, du séchage et de la granulation.

➤ La collecte :

La collecte constitue une contrainte majeure, ce qui impose une organisation efficace afin de diminuer le coût de transport, qui une fois maîtrisé réduira considérablement le problème de la récupération. Les déchets en phase post-consommation sont généralement mélangés et pollués lorsqu'on les récupère dans le flux des déchets municipaux. C'est pour cette raison que des efforts ont été faits pour encourager les consommateurs à séparer les types de déchets en matières plastiques, au moins ceux qui sont faciles à identifier. Il peut s'agir par exemple de bouteilles ou de sacs de supermarché. Il existe plusieurs types de collecte :

- La collecte globale : c'est une collecte multi matériaux où la phase organique des ordures ménagères est mélangée avec l'ensemble des autres déchets.
- La collecte sélective : elle a pour objectif de sélectionner, au départ des ménages, un ou plusieurs types de matériaux afin de faciliter leur valorisation ou leur élimination ultérieure.
- La collecte spécifique : exemple : bouteilles PET transparentes.

➤ Le Tri :

La récupération des matières plastiques dans les déchets municipaux mélangés, demande actuellement beaucoup de main-d'œuvre et il faudra se concentrer sur la mise au point de systèmes automatisés économiques. La capacité à séparer les matières plastiques pour un coût raisonnable est un facteur clef dans le développement éventuel d'une technologie de recyclage.

Il s'agit de séparer la fraction plastique des autres fractions à savoir : les papiers, les textiles, les métaux et les verres et de séparer ensuite les différents types de matières plastiques.

Il s'effectue généralement en plusieurs étapes :

- Le tri généralement manuel sur un tapis convoyeur ;

Recyclage des polymères

- Le broyage grossier d'abord, puis fin des matières plastiques;
- Le lavage ;
- Le tri automatique des constituants qui met à profit les différences de propriétés physiques caractérisant les composants des déchets : la taille, la densité, la susceptibilité magnétique, la conductivité électrique, la couleur, etc.
- La séparation par voie chimique peut également parfois permettre d'extraire préférentiellement un polymère du mélange de déchets par dissolution et précipitation différentielle.

Cette technique de recyclage semble aisée, mais elle se heurte à de nombreux problèmes. En effet, les méthodes de séparation et de tri des matières plastiques sont onéreuses et ne se justifient que pour des produits d'un coût élevé. D'autre part, les déchets en phase post-consommation sont généralement pollués lorsqu'on les récupère dans le flux des déchets municipaux. La pollution par les contenus (huile, graisse, produits chimiques...), les étiquettes, les bouchons, les charges, les inserts et les stabilisants qui sont entrés en contact avec le polymère lors de son utilisation peut entraîner une forte modification des propriétés du matériau après une seconde mise en œuvre (plastification, dégradation accélérée) et même un faible taux de polluants peut modifier de façon importante les propriétés. Ces polluants peuvent donc constituer des obstacles sérieux au recyclage parce qu'ils sont difficiles et coûteux à éliminer. Enfin, les propriétés mécaniques des produits recyclés sont généralement différentes de celles des polymères purs de départ, dans le sens où ils peuvent contenir des additifs et subir une dégradation de leurs propriétés du fait du vieillissement subi lors de la transformation, de la phase d'utilisation et du processus de recyclage ? Il est donc difficile de réutiliser les polymères pour les mêmes applications que les matériaux initiaux. Pour pallier aux problèmes de dégradation, le « remède » est généralement la dilution dans de la matière vierge et, dans le contexte industriel, on ne cherche quasiment jamais à « restaurer » parfaitement la microstructure du polymère (architecture et masse molaire des chaînes macromoléculaires)

III.6.4. Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères :

Il peut s'avérer pratiquement (séparation délicate) ou économiquement (diminution du coût de recyclage en évitant l'étape de tri) intéressant de recycler des déchets plastiques sous forme de mélanges contenant deux produits ou plus ; le problème est que les polymères impliqués sont généralement incompatibles, lorsqu'on veut faire un mélange, on essaye de

Recyclage des polymères

dispenser au mieux une phase dans l'autre. Pour cela, on est parfois amené à utiliser un composé supplémentaire qui permettra de comptabiliser le mélange en améliorant ses propriétés.

Plusieurs causes peuvent expliquer les problèmes de mise en pratique du recyclage des matières plastiques en mélanges :

- le contrôle de la source des déchets est délicat, mais semble indispensable pour connaître la composition précise des déchets, de sorte à traiter des mélanges de composition reproductible.
- la plage de température de mise en œuvre d'un plastique est souvent limitée. Quand il s'agit de mélanges, le choix de la température de transformation est critique car elle est liée à la dégradation et au comportement à l'état fondu, un mauvais choix peut entraîner des altérations de propriétés dans le mélange final (Figure III).

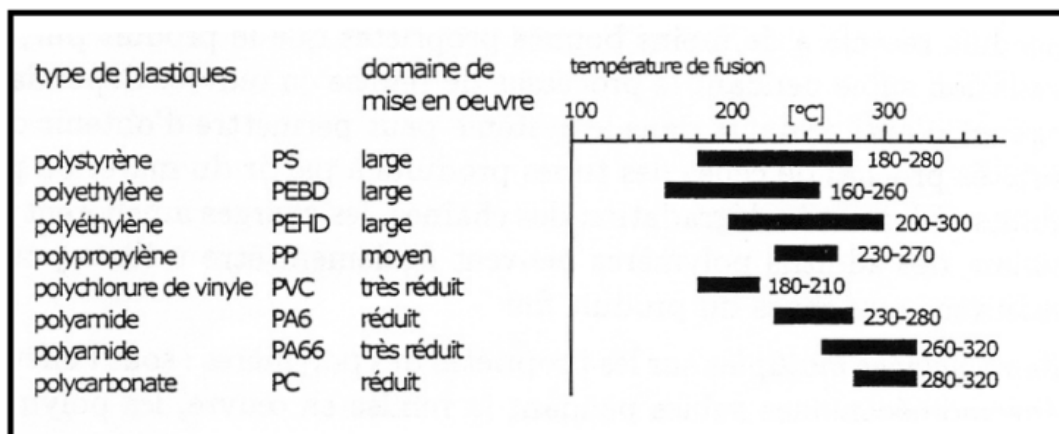


Figure III1: Plages de températures de mise en œuvre des principaux plastiques

III.7 Avantages et inconvénients du recyclage

III.7.1 Avantages

- Le recyclage évite la mise en décharge ou l'incinération qui sont des modes de gestion des déchets favorisant la pollution des sols et de l'air. Le recyclage est plus économique que l'incinération.
- Utiliser un déchet comme ressource, c'est aussi préserver les matières premières naturelles. Et cela peut être plus économique.

Recyclage des polymères

III.7.2 Inconvénients

- Pour que le recyclage soit le plus écologique possible, il est nécessaire que les filières de valorisation soient assez proches du lieu de production de déchets, afin de réduire le transport des déchets et donc la pollution induite.
- D'un point de vue économique, il est important que le tri préalable des habitants soit le plus correct possible.

CHAPITRE IV

MATÉRIELS ET

DISPOSITIFS

EXPÉRIMENTAUX

Matériels et dispositifs expérimentaux

IV.1 Introduction

Notre travail consiste à mélanger du polyéthylène moyenne densité (PEMD) avec des plastiques issus du recyclage des véhicules hors usages. Après récupération des déchets automobiles, nous les avons broyés, et effectuer des mélanges massiques selon des proportions différentes.

Les mélanges sont transformés par injection plastique ensuite caractérisés par plusieurs techniques.

Ce travail a été réalisé au niveau de l'entreprise National de Plastique e de Caoutchouc, Filiale SISCOPLAST de Draa-EL-Mizan.

IV.2 Matériaux utilisés

Notre étude porte sur la caractérisation d'un matériau élaboré par mélangeage par procédé d'injection d'un PEMD et de polymères issus de la casse automobile,

IV.2.1 le PEMD (polyéthylène moyenne densité)

Le polyéthylène moyen densité (PEMD) est un type de polyéthylène ayant une masse volumique comprise entre 0,926 et 0,940 g/cm³. Cette masse volumique est intermédiaire entre celle du polyéthylène basse densité et celle du polyéthylène haute densité.



Figure IV.1 :Granulés de polyéthylène moyen densité

La formule brute de PEMD : $(C_2H_4)_n$

Matériels et dispositifs expérimentaux

Propriétés

Les PEMD ont une bonne résistance aux chocs. Ils possèdent les caractéristiques suivantes :

- module de Young : 172 à 379 MPa ;
- résistance à la traction : 12,4 à 19,3 MPa ;
- allongement à la rupture : 100 à 150 % ;
- point de ramollissement Vicat : 99 à 124 °C ;
- chaleur spécifique : $1\,916\text{ J}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$.
- Masse volumique : $0,926\text{--}0,940\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$

Le PEMD, utilisé dans notre étude est fourni par l'entreprise Siscoplast, ce matériau est choisi pour son caractère d'usage courant il est aussi bon marché.

IV.2.2 Matériaux polymériques issus de la casse automobile

Le deuxième matériau du mélange est récupéré au niveau de la casse automobile, il s'agit de :

- Un pare-chocs ;
- Un tableau de bord ;
- Une garniture de porte

Pour la récupération de ces déchets on a suivi les étapes suivantes :

- La collecte des pièces

Elle s'est faite au niveau des casses automobile



Figure IV.2 : exemple d'une casse automobile

Matériels et dispositifs expérimentaux

Les pièces récupérées pour notre étude sont représentées dans les figures suivantes :



Figure IV.3 : garde boue



Figure IV.4 : aile arrière

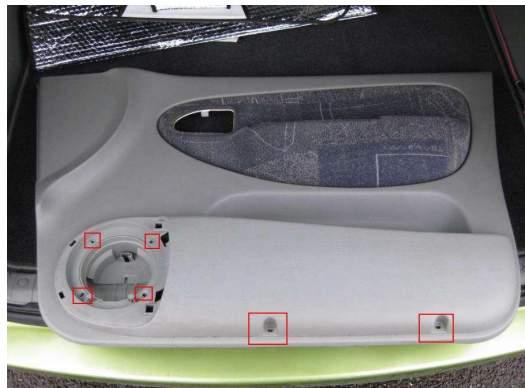


Figure IV.5 : garnitures de porte



Figure IV.6: Tableau de bord

Matériels et dispositifs expérimentaux

Les deux par choc arrière et avant :



Figure IV.7 : pare chocs arrière **Figure IV.8 :** pare chocs avant

➤ **découper les pièces récupérées :**

on a découpé les pièces récupérées à l'aide d'une cisaille (au niveau du laboratoire de génie civil de la faculté), comme le montre la figure suivante :



Figure IV 9: découpage des déchets plastique automobile avec cisaille

(Découpage en petits morceaux avant broyage).

Matériels et dispositifs expérimentaux

➤ Etape du broyage

Le broyage consiste à réduire des morceaux de matériaux solides d'une taille donnée à une taille plus petite. Le principe est la fragmentation des morceaux par l'action mécanique de pièces plus résistantes

Les pièces préalablement découpée avec la cisaille sont broyées dans le but d'être transformées par injection.



Figure IV.10: le broyeur



Figure IV.11: l'état granulaire après le broyage.

➤ élaboration des mélanges

Nous avons mélangé le PEMD vierge avec la matière plastique issue du déchet automobile broyé.

Pour chaque pièce auto broyée on l'a mélangé avec du PEMD, à des concentrations différentes : suivant le tableau ci-dessous :

Tableau IV.1 Les mélanges PEMD/ différents déchets

Déchets	0%	20%	40%	50%	60%	80%	100%
Pare choc	*	*	*	*	*	*	*
Tableau de bord	*	*	*	/	*	*	*
Garniture de porte	*	*	*	/	*	*	*

Matériels et dispositifs expérimentaux

IV.3 Dispositifs expérimentaux

IV.3.1 Presse à injection

Le procédé d'injection sous haute pression des résines thermoplastiques est important : il intéresse en valeur, plus de 40% de l'industrie de transformation des matières plastiques. Les presses d'injection représentent 60% du parc-machine des transformateurs.

L'injection permet de fabriquer des pièces de géométrie complexe en grande série, suivant un principe simple de fonctionnement.

En effet, le polymère utilisé est chauffé afin de lui donner la consistance d'un liquide visqueux. Ce liquide est ensuite injecté dans un moule, réalisé en plusieurs parties. Le polymère se refroidit jusqu'à l'état solide à la suite de quoi la pièce est extraite après ouverture de l'outillage. Une nouvelle injection est réalisée quand l'outillage est à nouveau fermé.

Une machine d'injection présente toujours l'allure qui suit (Figure IV.12)



Figure IV.12 : Machine à injection

Matériels et dispositifs expérimentaux

Pour procéder à la fabrication d'une pièce par injection plastique, il faut pour commencer un moule qui a l'empreinte inversée de la pièce souhaitée. Dans notre cas on a une éprouvette de type barreau de dimensions $127 \times 12.7 \times 12.7 \text{ mm}^3$, une éprouvette de type haltère et un disque d'épaisseur 3mm et de diamètre égal à 50mm. Le moule est formé d'au moins deux parties (appelées mors) qui sont capables de s'écarter une fois la pièce terminée afin de la laisser s'échapper du moule. Ce moule doit également être très résistant à la pression ainsi qu'à la chaleur car le plastique est coulé à chaud dans le moule

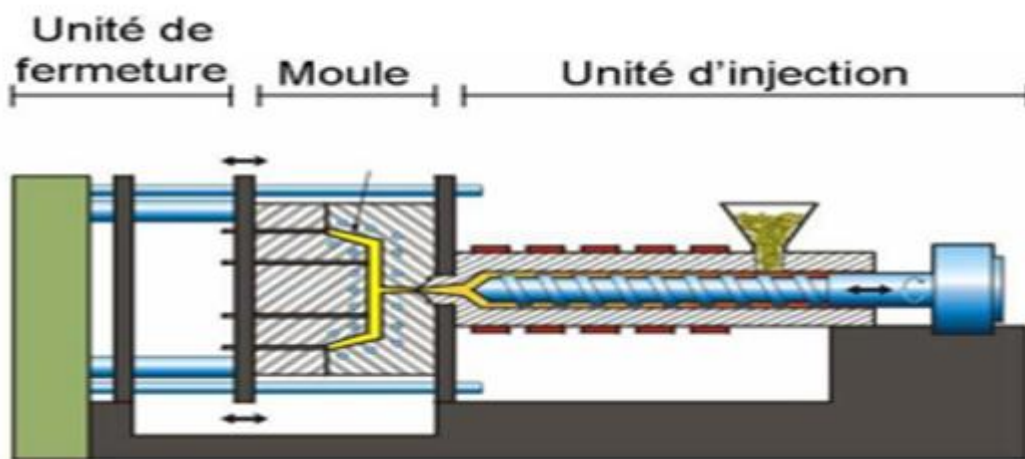


Figure IV .13 présentation schématique d'une presse à injection

Pour commencer la fabrication, le plastique en granulés est inséré dans l'unité d'injection par un entonnoir qui donne sur une vis sans fin. C'est cette vis qui permet au polymère d'avancer jusqu'au moule. Pendant que le plastique avance, il est chauffé afin d'atteindre la température voulue, qui permettra au polymère d'entrer facilement et rapidement dans le moule sans toutefois brûler. Une fois que le plastique est dans le moule, la vis s'arrête de tourner afin de laisser le plastique refroidir et se rigidifier. Une fois la pièce formée et rigide, la seconde partie du moule, le mors mobile s'écarter pour permettre à la pièce de tomber.

Les paramètres qui sont pris en considération sont :

- Pression en (Bars)
- Vitesse en (m/s)
- Température (C°)
- Temps en (S)

Matériels et dispositifs expérimentaux

Les différents paramètres d'injection sont représenté dans le tableau s forme de tableaux III.3

Tableau IV.2 : Paramètre d'injection

Paramètre	Valeur
Pression d'Injection	170 bars
Pression Ouverture de moule	60 bars
pression de fermenteur de moule	80 bars
Contre pression	15 bars
Vitesse de fermenteur de moule	3.1 trs/min
Vitesse d'ouverture de moule	2.8 trs/min
Vitesse d'injection	2.2 trs/min
Vitesse d'injecteur	4 trs/min
Vitesse de rechargement	3.2 trs/min
Le temps de fermenteur de pose de moule	8 s
Le temps d'injection	2.4 s
Le temps de refroidissement	12.9 s

La zone d'application des températures de service de la presse à injection se présenter comme suite :

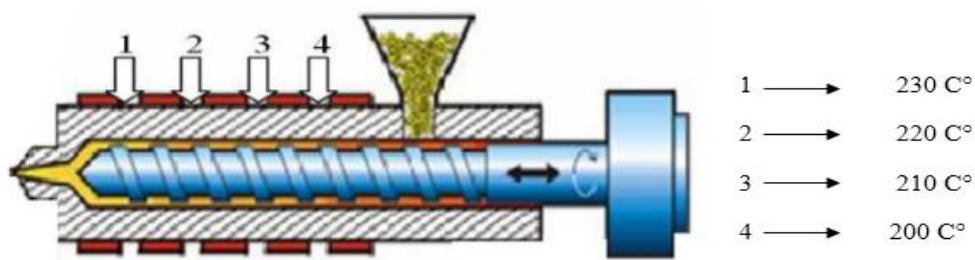


Figure IV.14 température de service d'injection

Matériels et dispositifs expérimentaux

➤ Éprouvettes obtenues après injection

Le gradient de température est croissant de l'alimentation à la buse d'injection, et la pression est adaptée afin d'assurer le meilleur remplissage possible du moule. Ce dernier permet de mouler une éprouvette de type barreau de dimensions 120 x 12 x 6 mm, une éprouvette de type haltère, et un disque d'épaisseur 3mm et de diamètre égal à 50mm



Figure IV.15 : Éprouvettes obtenues après injection.

IV.3.2 Machine de traction

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus fréquemment utilisé, il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à une traction et à mesurer son allongement. Une simple courbe contrainte-déformation constituera un bon élément de base pour connaître le comportement mécanique d'un matériau donné.

Les essais de traction permettent de :

- déterminer limite d'élasticité
- déterminer charge et allongement à la rupture
- déterminer qualitativement si un matériau est fragile ou ductile (rigide ou souple).

L'essai de tractions ont été réalisés au laboratoire au niveau de l'entreprise National de Plastique et de Caoutchouc, Filiale SISCOPLAST de Draa-EL-Mizan. Avec l'apport des ingénieurs et des opérateurs qualifiés.

Matériels et dispositifs expérimentaux

La machine de traction est constituée essentiellement d'une traverse inférieure fixe sur laquelle repose un dynamomètre servant à mesurer le déplacement et la force appliquée à l'éprouvette et d'une traverse supérieure mobile entraînée par deux vis sans fin mises en rotation par un moteur électrique situé dans le compartiment inférieur de la machine.

Sur chacune des traverses se trouvent des mors permettant de fixer l'éprouvette. La machine est pilotée automatiquement par un microordinateur.

Le mouvement de la traverse mobile est assuré soit par une commande hydraulique, soit par des vis sans fin. La charge imposée à l'éprouvette est mesurée par un dynamomètre, et l'allongement par un extensomètre, ce qui permet d'obtenir un enregistrement de la courbe brute de traction.



Figure IV.16 : machine de traction.

Les éprouvettes utilisées

L'essai de traction nous permettra d'obtenir les résultats de la force (KN) en fonction de l'allongement ΔL , la course (mm), nous allons transformer ces résultats de la machine, en divisant la force (F) sur la surface initiale (S_0) pour obtenir de la contrainte σ (MPa) et en divisant l'allongement (ΔL) par la longueur initiale (L_0) pour avoir la déformation ($\epsilon\%$).

Les dimensions de l'éprouvette sont par la figure ci-dessous:

Matériels et dispositifs expérimentaux

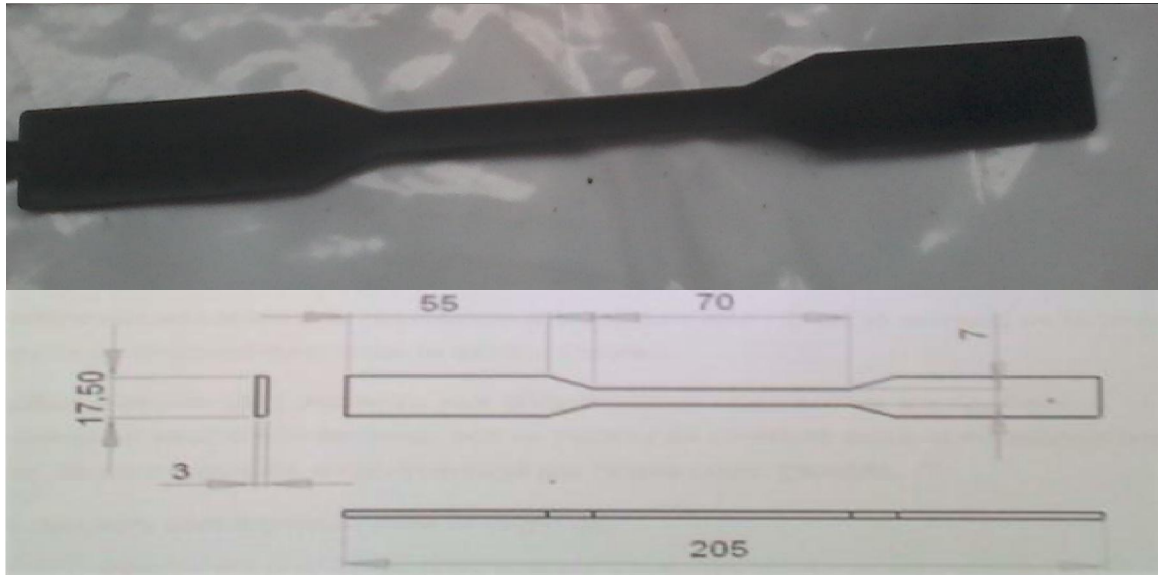


Figure IV.17: éprouvette de type haltère

Toutes ces opérations effectuées à l'aide de Microsoft office Excel 2007, la courbe schématique est représentée dans la figure IV.18

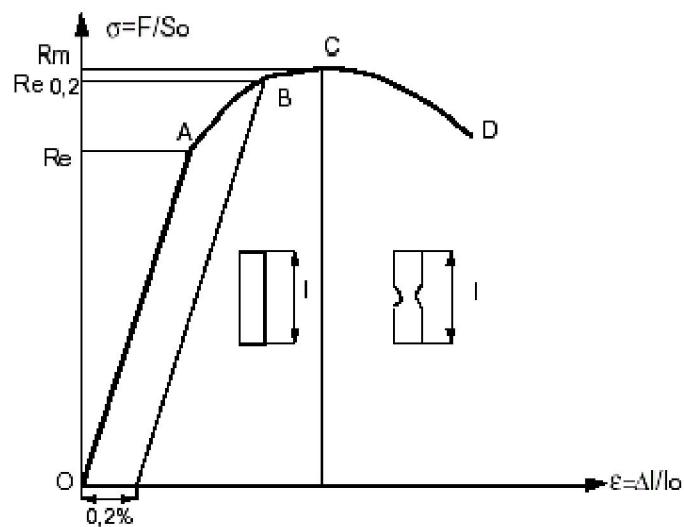


Figure IV.18 Courbe contrainte-déformation

σ : contrainte, MPa

F : force, N

ϵ : déformation = $\Delta L / l_0$; Δl est l'allongement.

Matériels et dispositifs expérimentaux

La droite OA correspond à la déformation élastique totalement réversible : quand les forces sont appliquées sur le corps, celui-ci change sa forme, mais retrouve sa forme initiale quand les forces extérieures sont retirées.

La relation entre la contrainte et la déformation (loi de Hooke), est définie par la théorie d'élasticité linéaire des milieux continus ; les deux principales hypothèses de cette théorie sont :

- Les propriétés du corps sont homogènes et ne varient pas d'un point à l'autre.
- Elles sont les mêmes dans toutes les directions, cette deuxième hypothèse implique que le matériau est isotrope

D'où cette relation est : $E = \sigma / \varepsilon$; E est le module d'Young (module d'élasticité), il représente la pente de la droite OA.

R_e : contrainte à la limite élastique, correspond au seuil d'écoulement plastique (MPa). Quand OA n'est pas rectiligne, on doit utiliser la limite conventionnelle d'élasticité $R_{e0,2}$ qui correspond à un allongement plastique de 0,2 %.

La courbe AC est le domaine de déformation plastique homogène (déformation visqueuse): si on supprime la force de traction, il y a un retour élastique suivant une parallèle à OA et il reste une déformation permanente contrairement à la déformation élastique, elle est irréversible et dépend du temps et l'état d'origine n'est pas retrouvé.

R_m : la résistance à limite de traction, cette valeur est utilisée pour estimer la limite d'endurance à la fatigue.

Pour CD (domaine de striction) : la déformation n'est pas homogène et la force nécessaire pour déformer le matériau diminue alors que l'allongement continue d'augmenter : cette instabilité est appelée instabilité plastique. La striction apparaît. En D il y a rupture de l'éprouvette.

Matériels et dispositifs expérimentaux

IV.3.3 dispositif de résilience - Essais de résilience

La résilience, de symbole général K , caractérise la capacité d'un matériau à absorber les chocs sans se rompre. Elle est mesurée sur des machines du type Charpy (éprouvette sur deux Appuis) ou Izod (éprouvette encastrée).

Le but de cette essai est mesurer la résistance d'un matériau à la rupture. Il est fréquemment appelé *essai de résilience Charpy* ou même *essai Charpy*. Il porte le nom de l'ingénieur français Georges Charpy (1865-1945) qui en fut un des principaux théoriciens et promoteurs. Il mit en particulier au point la machine qui permet de réaliser l'essai et qui est appelée *Mouton Charpy*

Principe de l'essai

Cet essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette préalablement entaillée. On utilise un mouton-pendule muni à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc. Cette énergie est classiquement, dans le cas de la norme européenne, de 75 Joules

L'énergie absorbée est obtenue en comparant la différence de l'énergie potentielle au départ du pendule et à la fin de l'essai. La machine est munie d'index permettant de connaître la hauteur du pendule au départ ainsi que la position la plus haute que le pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette

La machine utilisée :



Figure IV.19: la machine Charpy

Matériels et dispositifs expérimentaux

Les éprouvettes utilisées pour l'essai de résilience

L'éprouvette est constituée d'un barreau de section carrée (12.7mm x12.7mm) comprenant en son milieu une entaille de forme v à 45^0 et d'une épaisseur 2.5mm. Elles ont toutes une longueur 63.5mm.

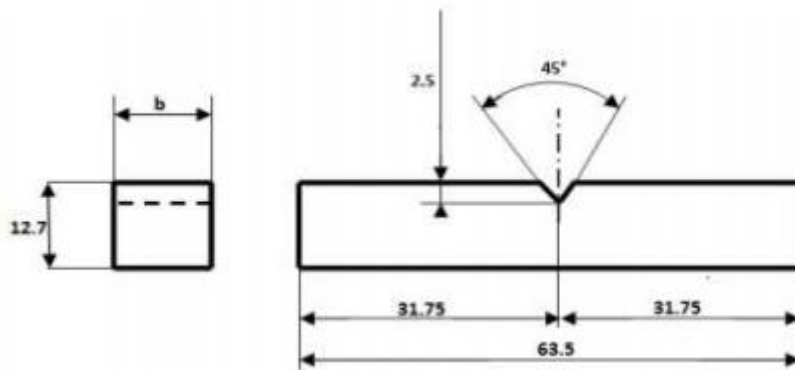


Figure IV.20: éprouvette utilisée pour l'essai de résilience.

IV.3.4 Dispositif de détermination de l'indice de fluidité ; le plastomètre

La connaissance de l'indice de fluidité (MFI : melt flow index) est un moyen simple et rapide pour appréhender les différences de viscosité de plusieurs matériaux plastique, fournissant ainsi une indication utile de leur fluidité lors de la transformation.

Principe

Nous mesurons la masse de matière fondue qui s'écoule à travers une filière donnée sous l'action d'une masse donnée pendant un temps fixé et à une température donnée. Nous déterminons l'indice de fluidité de la matière (IF).

Appareillage

L'appareil se compose principalement d'un plastomètre d'extrusion (rhéomètre capillaire) opérant à température fixe. La forme générale est représentée sur la figure suivante. Le thermoplastique, contenu dans un cylindre vertical, est extrudé à travers une filière au moyen d'un piston chargé.

Matériels et dispositifs expérimentaux

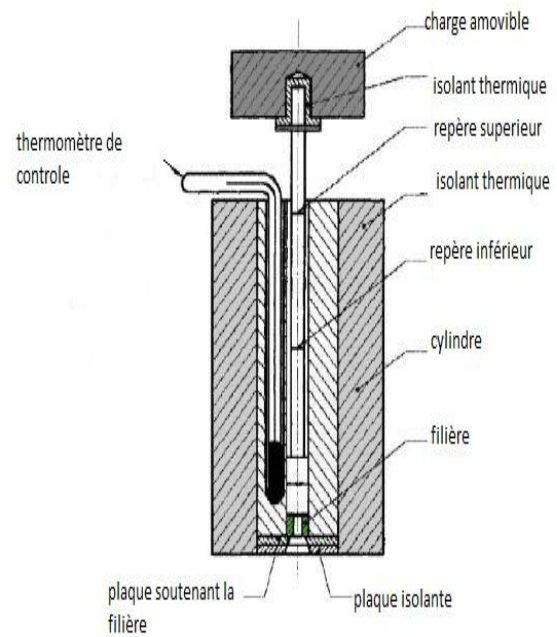


Figure IV.21: appareil d'indice de fluidité

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes techniques expérimentales utilisées pour caractériser nos mélanges après élaboration.

CHAPITRE V

RÉSULTATS ET

DISCUSSION

Résultats et discussion

V.1 Introduction

Les mélanges PEMD/Déchets polymériques sont élaborés sans additifs. L'objectif de notre travail consiste donc à élaborer ces mélanges en considérant plusieurs concentrations de déchets dans la matrice PEMD. L'élaboration se fait par procédé d'injection puis le mélange est caractérisé par l'essai de traction et de résilience.

La machine de traction utilisée est de type MTS Criterion, modèle 42 (machine de traction spéciale polymère). Nous traçons les courbes contraintes-déformation à partir des données de la machine de traction.

Nous exposons dans ce qui suit l'essentiel des résultats ;

V.2 Résultats des essais de traction

- A partir des acquisitions numériques de la machine de traction nous traçons les courbes contraintes déformations à l'aide de Microsoft office Excel 2007. On déduit à partir de la courbe contrainte-déformation les caractéristiques mécaniques suivantes :
- **La contrainte maximale ($\sigma_{\max}$)**: C'est le rapport de la force appliquée début de la striction par la section initiale. On se sert généralement de cette contrainte comme limite d'Elasticité.
- **L'allongement à la rupture (A%)** : c'est la capacité d'un matériau à s'allonger sous charge avant sa rupture.
- **Le module d'Elasticité E (MPa)**: C'est le module tangent déterminé, à partir de la tangente à l'origine de la courbe contrainte-déformation, c'est-à-dire la pente de la Tangente ($E = d\sigma/d\varepsilon$).

V.2.1 Résultats des essais de traction des mélanges PEMD/Pare-chocs

V.2 .1.1 Courbes contraintes déformations

Résultats de traction pour les éprouvettes mélanges Pare-chocs / EPMD

La figure V.1 représente la courbe contrainte- déformation pour le polymère issu de la récupération du plastique dans la casse automobile, le polymère constituant le pare-chocs présent, selon sa courbe de traction, un caractère ductile. Les éprouvettes sont rompues après des déformations allant de 380% jusqu'à 500%, la contrainte maximum atteint une valeur de

Résultats et discussion

17 MPa, La matière plastique récupérée des pare-chocs issus de la casse automobile sont une bonne source de matière plastiques à réutiliser.

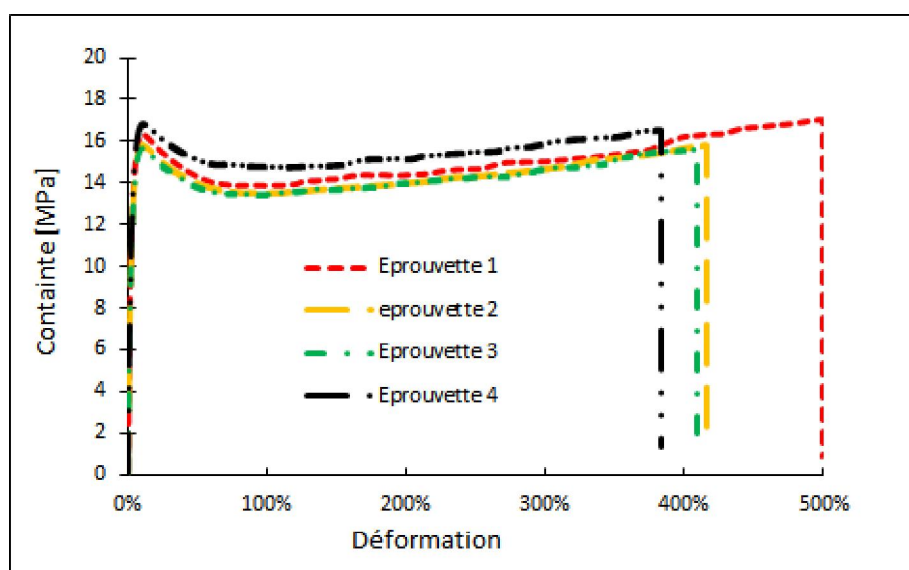


Figure V. 1 : Courbe Contrainte déformation pour les déchets 100% Pare-chocs

La courbe V.2 représente la moyenne des courbes contrainte déformation du polymère 100% pare-chocs

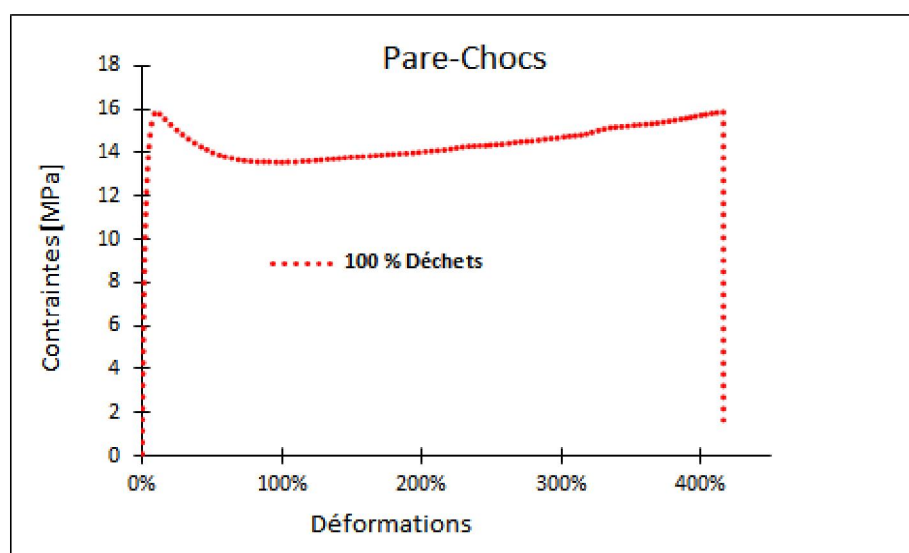


Figure V. 2 : Courbe Contrainte déformation moyenne pour les déchets 100% Pare-chocs

Résultats et discussion

➤ Essai de traction pour le mélange 100 PEMD

Le polyéthylène moyen densité est le polymère choisi pour valoriser les déchets plastiques récupérés de la casse automobile. Ce PEMD présente des caractères moyens de ductilité et de résistance. Sa déformation varie entre 63% et 65%,(valeur inférieure à la norme qui de 100%-150% et cela est dû à la vitesse de déformation lors de l'essai de traction, qui est de 5mm/mn pour nos éprouvettes) ; la résistance du PEMD varie entre 12 MPa et 14MPa (conforme à la norme).

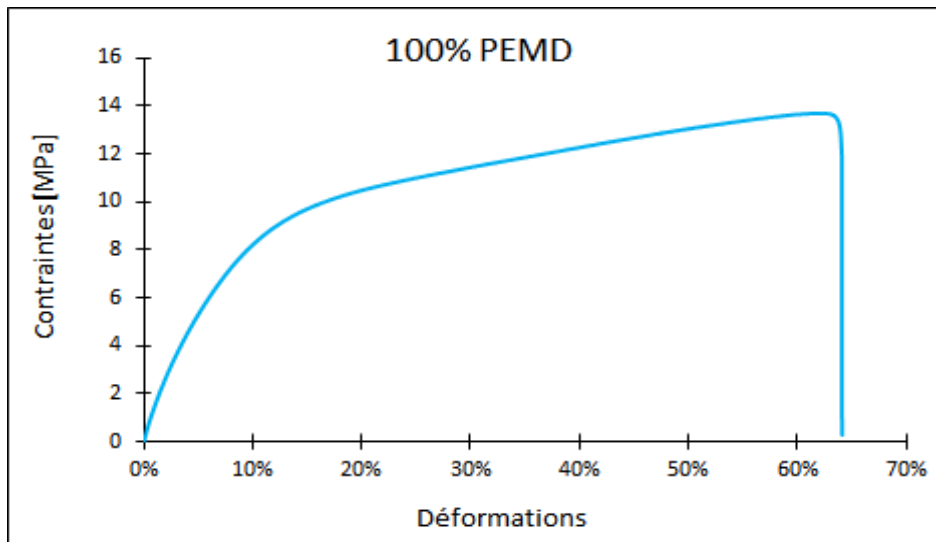


Figure V. 3: Courbe Contrainte déformation pour le polymère 100% PEMD

➤ Essai de traction pour le mélange 20% Pare-chocs/ 80%PEMD

A partir de l'élaboration d'un mélange de 20% pare-chocs/ 80% PEMD, on obtient un matériau dont le comportement en traction est donné par la courbe illustrée dans la figure ci-dessous :

Résultats et discussion

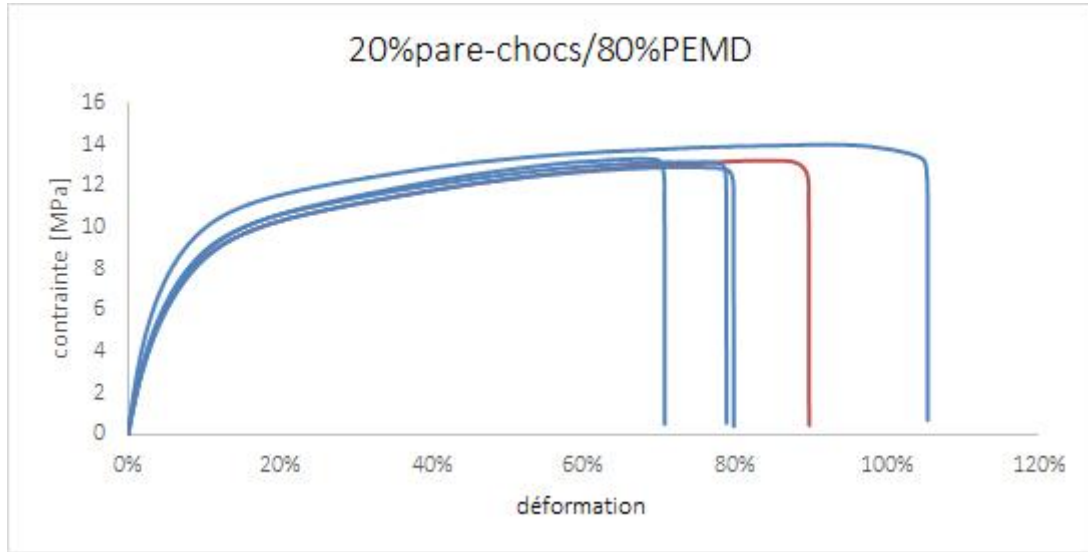


Figure V. 4: Courbe Contrainte déformation pour le mélange 20%pare-chocs /80% PEMD

Le mélange élaboré avec ces deux pourcentage, (20%pare-chocs80% PEMD)présente des propriétés intéressantes , sa déformation a augmenté jusqu'à 78% (supérieur à celle du PEMD), sa résistance reste équivalente à celle du PEMD, le comportement en traction du mélange est voisin de celui du PEMD.

La courbe représentée dans la figure V.5 est courbe de traction moyenne pour le mélange 20%pare-chocs/80% PEMD.

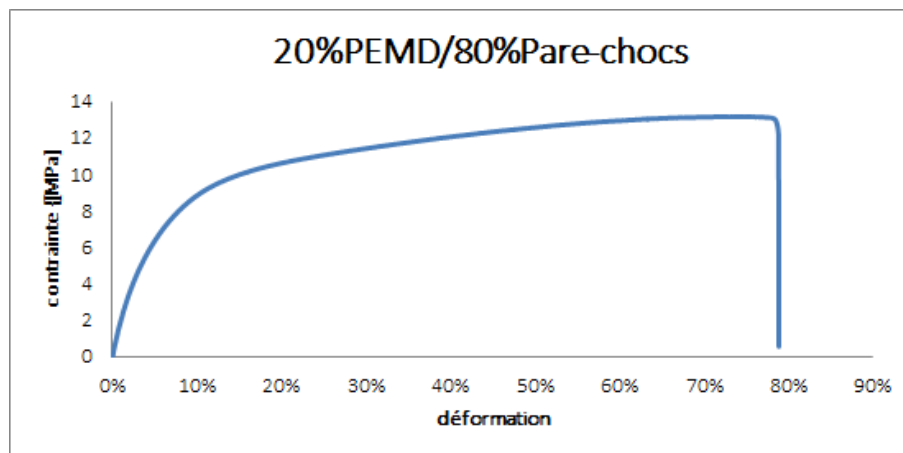


Figure V. 5: Courbe Contrainte déformation moyenne pour le mélange 20%pare-chocs/80% PEMD

➤ Essai de traction pour le mélange 40% Pare-chocs/ 60 EPMD

La figure V.6 représente la courbe contrainte- déformation du mélange 40% pare-chocs / 60 PEMD. Le matériau devient de plus en plus ductile, sa déformation varie entre 110% et 150% .La contrainte maximum reste comparable à celle du PEMD.

Résultats et discussion

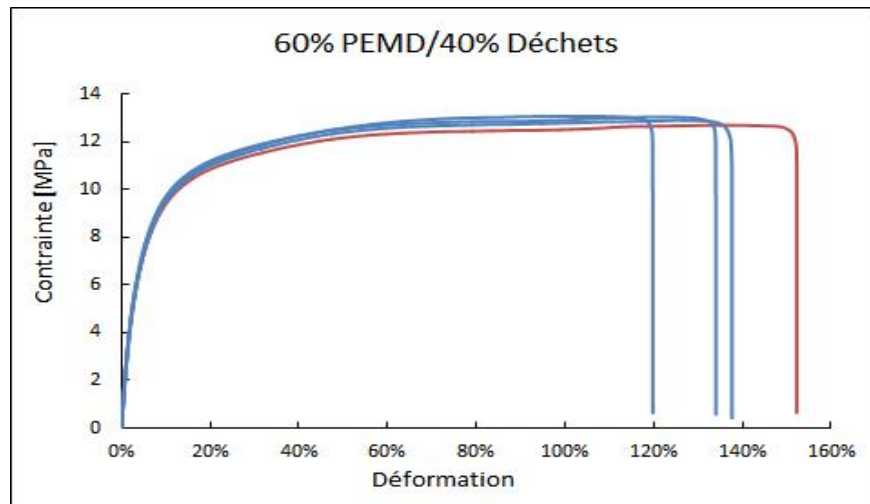


Figure V. 6: Courbe Contrainte déformation pour le mélange 60% PEMD/40%pare-chocs

La figure V.7 représente la courbe contrainte- déformation moyenne du mélange 60% PEMD/40%pare-chocs

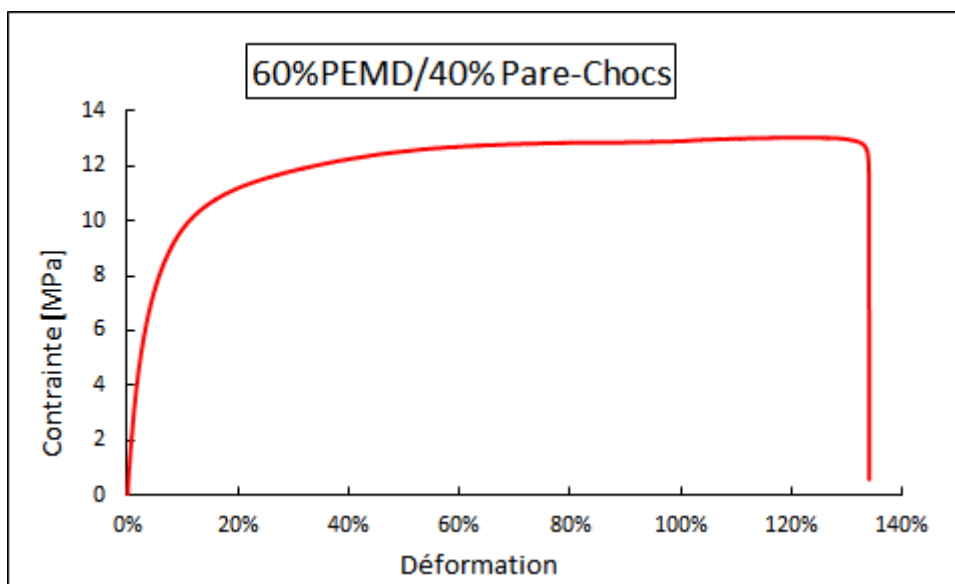


Figure V. 7: Courbe Contrainte déformation moyenne pour le mélange 60% PEMD/40%pare-chocs

➤ Essai de traction pour le mélange 50% Pare-chocs/ 50 EPMD

La figure V.8 représente la courbe contrainte- déformation du mélange 50% pare-chocs / 50%PEMD, la déformation augmente et atteint des valeurs entre 220% et 320%.

Résultats et discussion

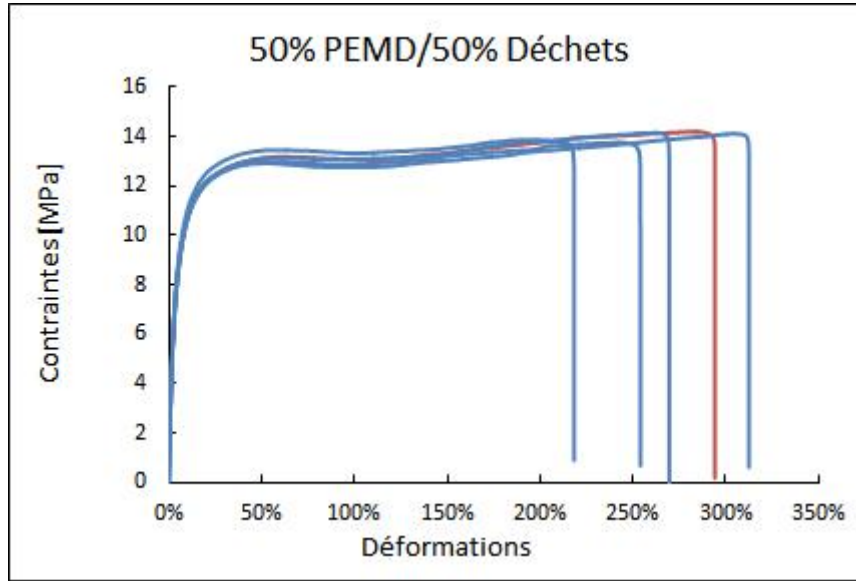


Figure V. 8: Courbe Contrainte déformation pour le mélange 50% PEMD/50%pare-chocs

La figure V.9 représente la courbe contrainte- déformation moyenne du mélange 50% PEMD/50%pare-chocs

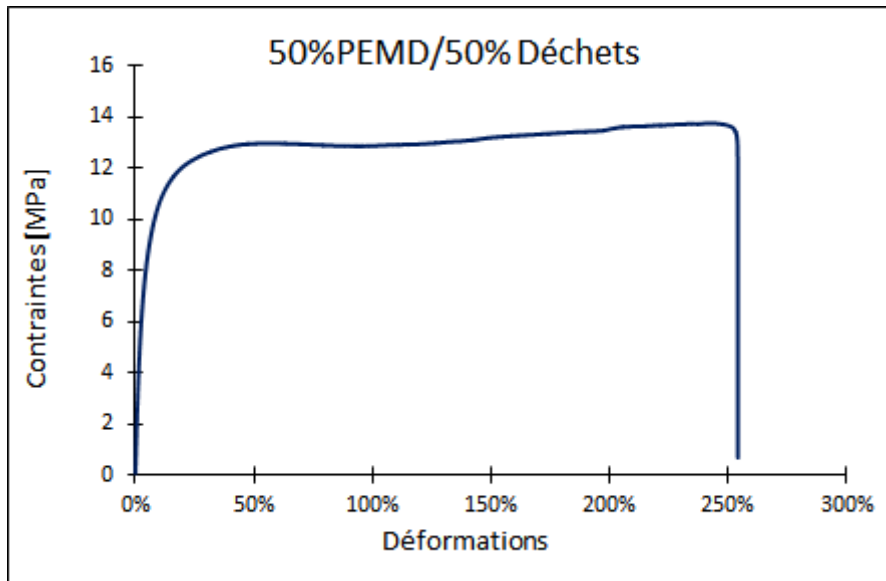


Figure V. 9: Courbe Contrainte déformation moyenne pour le mélange 50% PEMD/50%pare-chocs

➤ Essai de traction pour le mélange 60% Pare-chocs/ 40 EPMD

La figure V.10 représente la courbe contrainte- déformation du mélange 60% pare-chocs / 40 PEMD, en plus de l'allongement qui a augmenté pour ces derniers mélange, on remarque que la résistance maximum a augmenté également, et passe à 15Mpa.

Résultats et discussion

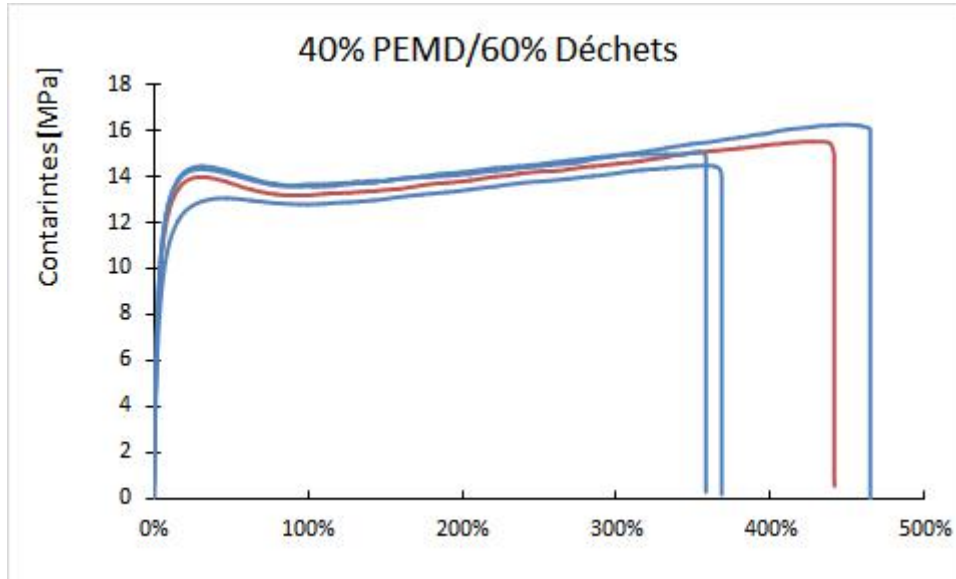


Figure V. 10: Courbe Contrainte déformation pour le mélange 60%pare-chocs/40% PEMD

La figure V.11 représente la courbe contrainte- déformation moyenne du mélange 60%pare-chocs /40% PEMD

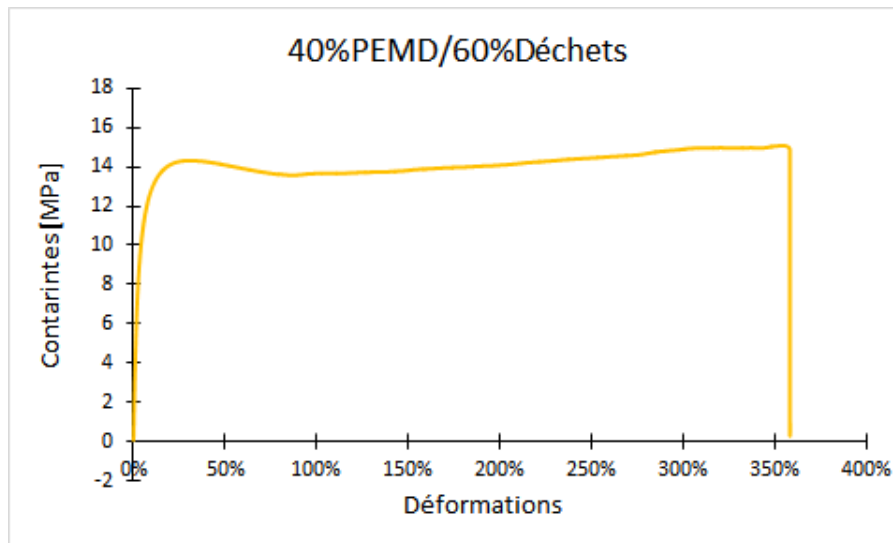


Figure V. 11: Courbe Contrainte déformation moyenne pour le mélange 60% Pare-Chocs/40% PEMD

➤ Essai de traction pour le mélange 80% Pare-chocs/ 20%PEMD

La figure V.12 représente la courbe contrainte- déformation du mélange 80% pare-chocs / 20% PEMD, le même comportement est observé, un important allongement de l'éprouvette a lieu avant la rupture. La résistance augmente lentement.

Résultats et discussion

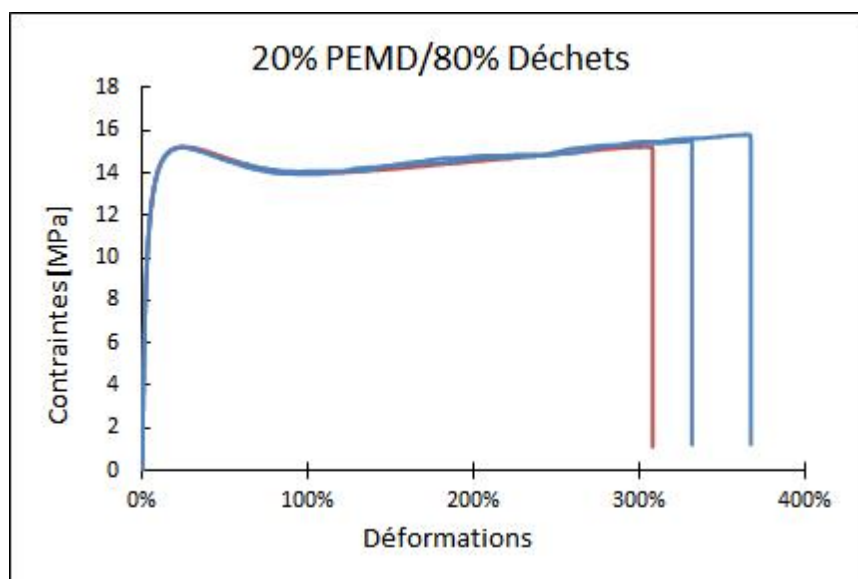


Figure V. 12: Courbe Contrainte déformation pour le mélange 80%pare-chocs/20% PEMD

La figure V.13 représente la courbe contrainte- déformation moyenne du mélange 80%pare-chocs/20% PEMD

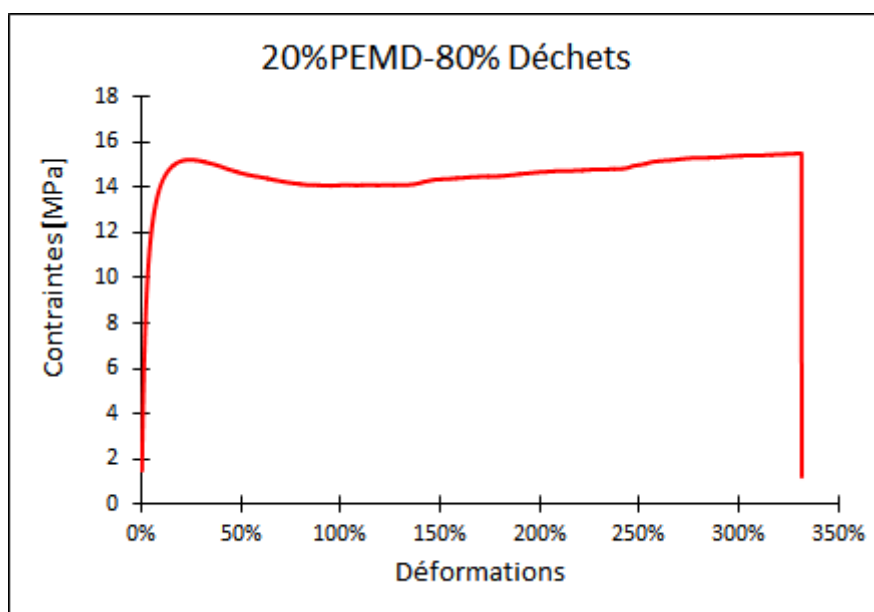


Figure V. 13: Courbe Contrainte déformation moyenne pour le mélange 80%pare-chocs/20% PEMD

La figure ci-dessous représente la superposition des courbes de traction pour les différents mélanges

Résultats et discussion

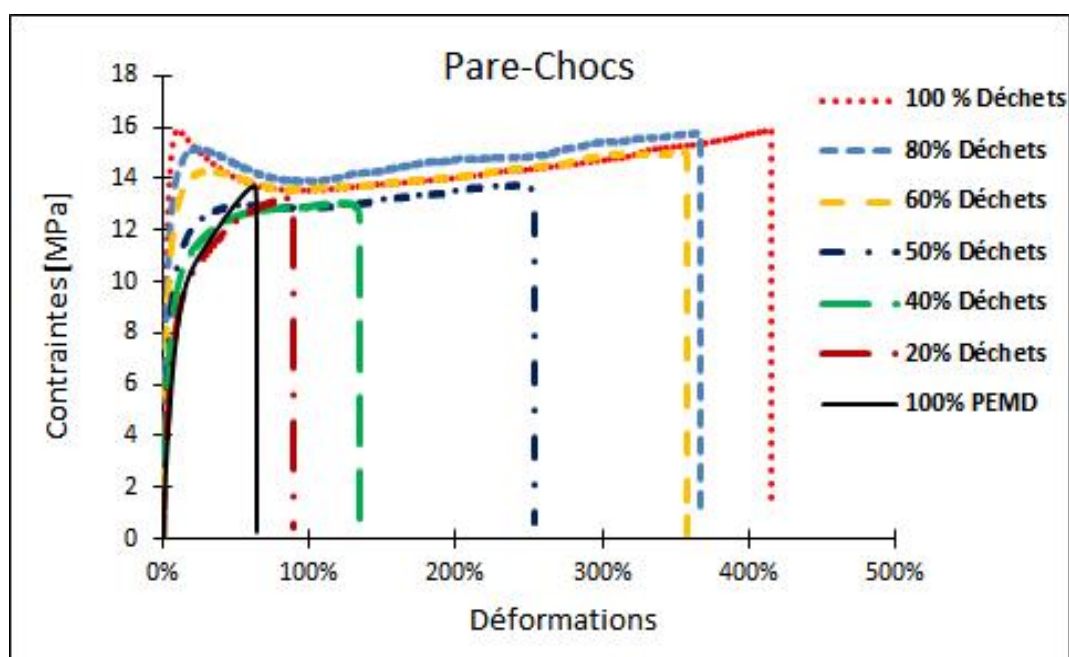


Figure V. 14: Courbe Contrainte déformation des différents mélanges
PEMD/ Déchets pare-chocs

Analyse des résultats de l'essai de traction sur les échantillons des mélanges PEMD/ Déchets pare-chocs

V.2.1.2 Contrainte maximale

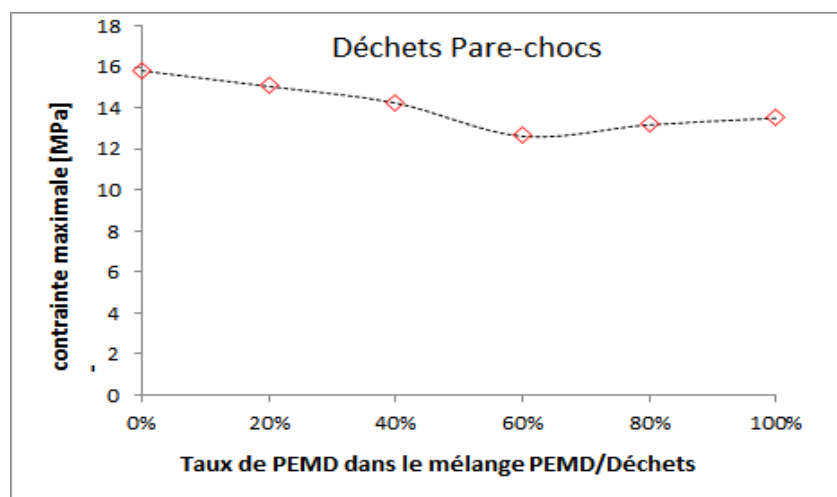


Figure V.15 Variation de la contrainte maximale en fonction de la concentration du PEMD
dans les mélanges PEMD/Déchets pare-chocs

Résultats et discussion

On observe sur la figure ci-dessus que la contrainte maximale diminue faiblement en fonction de l'augmentation de la concentration du PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets pare-chocs. La variation ne dépasse pas les 14%.

V.2.1.3 Allongement à la rupture

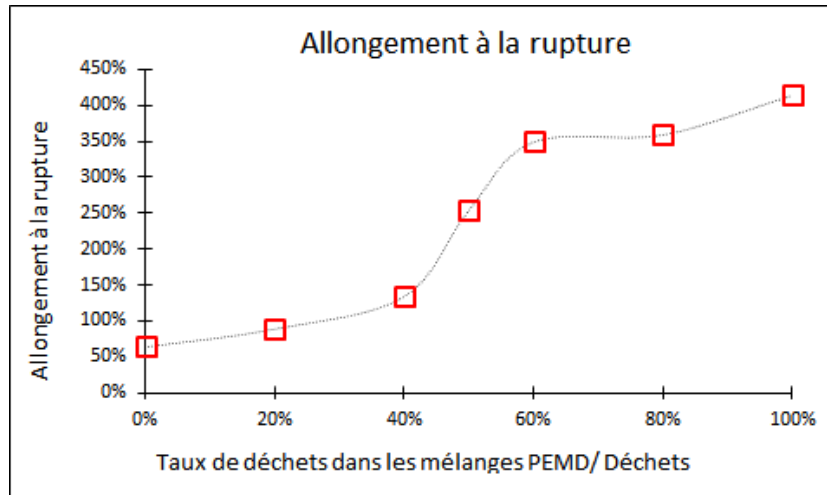


Figure V.16 Variation de l'allongement à la rupture en fonction de la concentration du PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets pare-chocs

La figure 16 montre que l'allongement à la rupture augmente considérablement avec l'augmentation de la concentration du PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets pare-chocs

V.2.1.4 Module d'élasticité

Pour déterminer les modules d'élasticité des mélanges nous considérons les tangentes aux parties linéaires des courbes contraintes-déformations.

La figure ci-dessous donne un premier aperçu de la variation des modules d'élasticité pour les différents mélanges.

Résultats et discussion

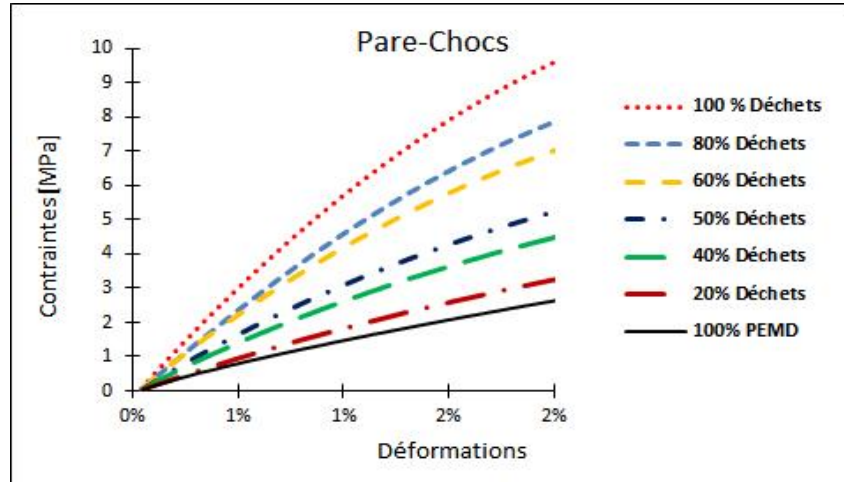


Figure V.17 Représentation de la partie élastique des courbes contraintes-déformations des mélanges PEMD/Déchets pare-chocs

On remarque que le module d'élasticité augmente avec l'augmentation de la concentration de déchets dans les mélanges

La figure ci-dessous représente la variation des valeurs du module d'élasticité des mélanges

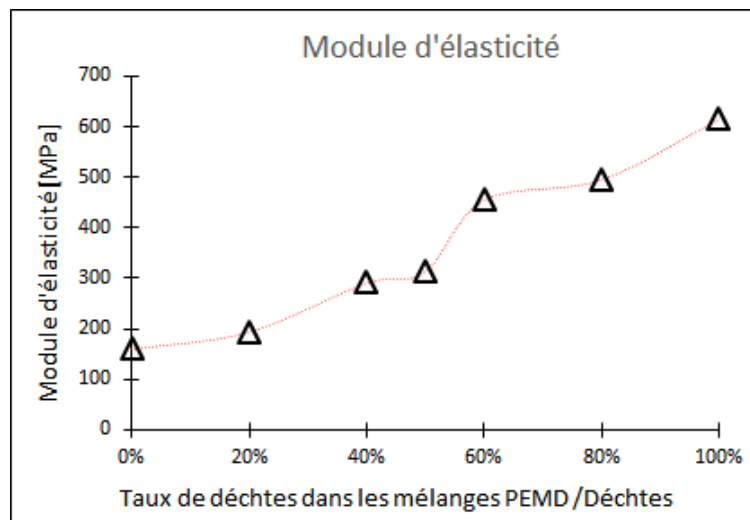


Figure V.18 courbe de variation des modules d'élasticité des mélanges PEMD/Déchets pare-chocs

On note une variation importante du module d'élasticité des mélanges en fonction

V.2.2 Résultats des essais de traction des mélanges PEMD/ Tableau de bord

Nous avons aussi procédé à la caractérisation des mélanges obtenus par recyclage du tableau de bord du même véhicule. Les figures ci-dessous représentent les courbes moyennes des résultats des essais de traction pratiqués sur chaque mélange.

Résultats et discussion

V.2.2.1 Courbes contraintes déformations des mélanges PEMD/Tableau de bord

Nous regroupons ci-dessous les courbes contraintes déformations des mélanges

PEMD/Tableau de bord :

PEMD/Tableau de bord

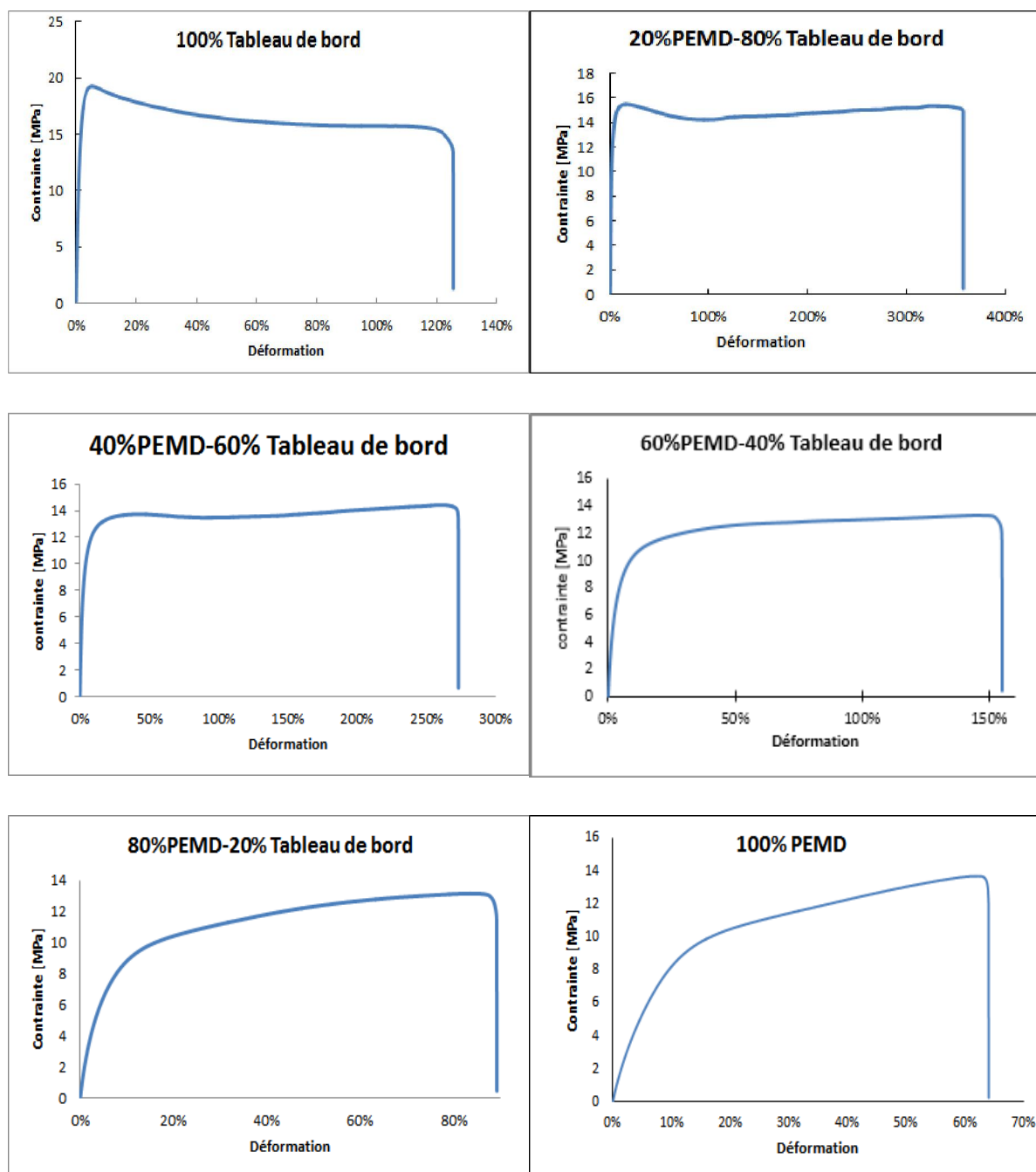


Figure V.19 courbes contraintes déformations pour les mélanges PEMD/Tableau de bord

Résultats et discussion

Sur la figure ci-dessous nous représentons la superposition des courbes moyennes, contraintes déformations ; de tous les mélanges

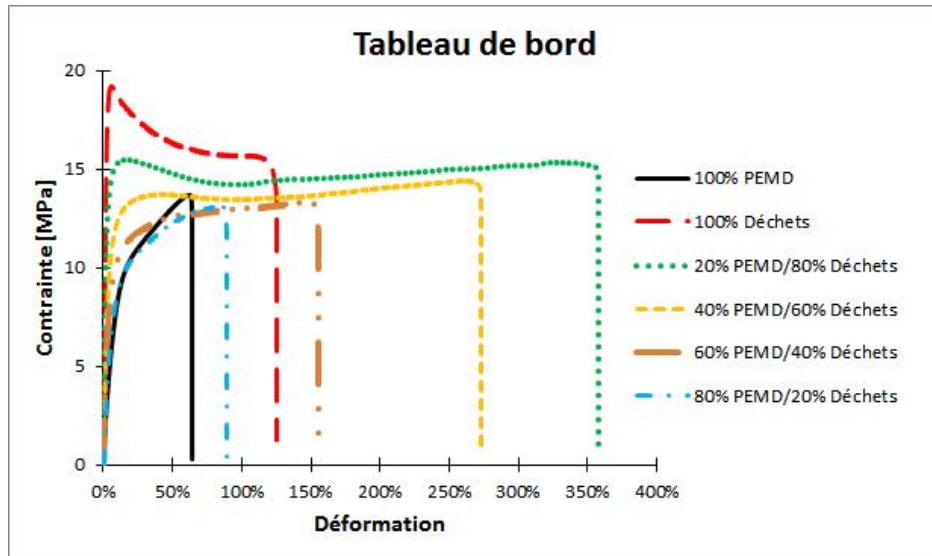


Figure V.20. Superposition des courbes de traction des différents mélanges

L'analyse de déterminer les différents caractéristiques mécaniques des mélanges qui sont les suivantes

V.2.2.2 Contraintes maximales

A partir des courbes contraintes déformations ci-dessous, nous déterminons les contraintes maximales des différents mélanges PEMD/ Tableau de bord

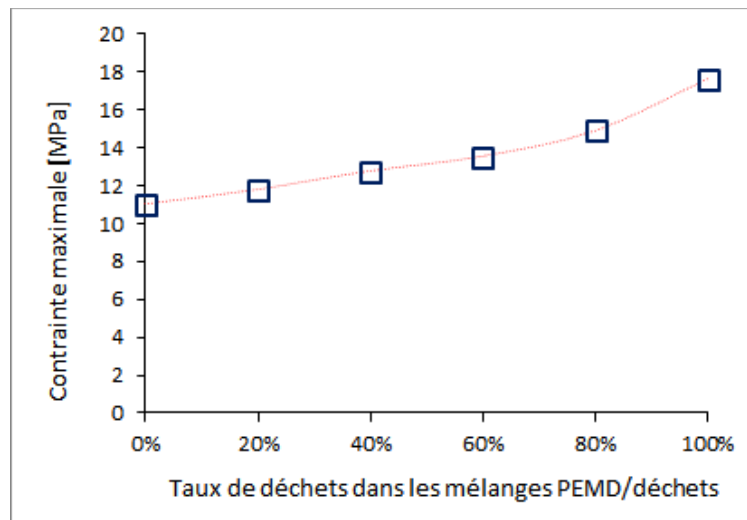


Figure V. 21 Variation de la contrainte maximale en fonction de la concentration de PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets tableau de bord

Résultats et discussion

La figure ci-dessus montre que la contrainte maximale augmente avec l'augmentation de la concentration de déchets dans les mélanges.

V.2.2.3 Allongement à la rupture

A partir des courbes contraintes déformations ci-dessous, nous déterminons les allongements à la rupture pour les des différentes mélanges PEMD/ Tableau de bord

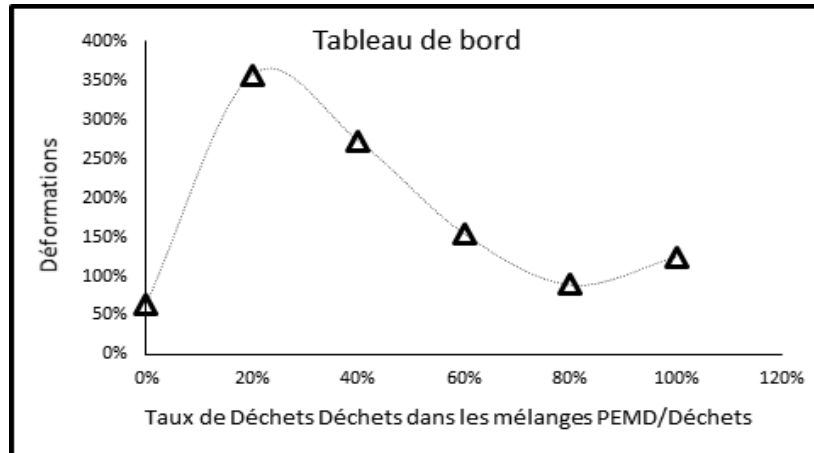


Figure V22 Variation de l'allongement à la rupture en fonction de la concentration du PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets tableau de bord

La figure ci-dessus montre que l'allongement à la rupture augmente dès l'ajout de 20% de déchets à la matrice PEMD puis diminue pour les concentrations de 41, 60, et 80% puis augmente pour les déchets tableau de bord

V.2.2.4 Modules d'élasticité

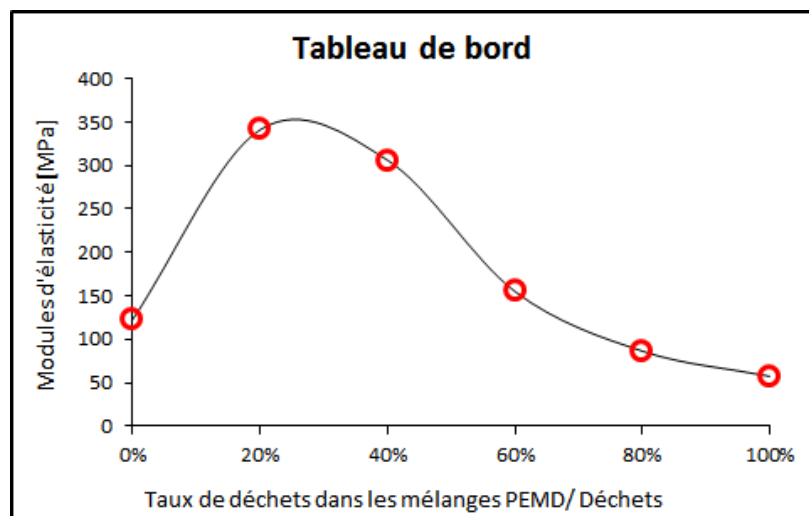


Figure V23 Variation du module d'élasticité en fonction de la concentration du PEMD dans les mélanges PEMD/Déchets tableau de bord

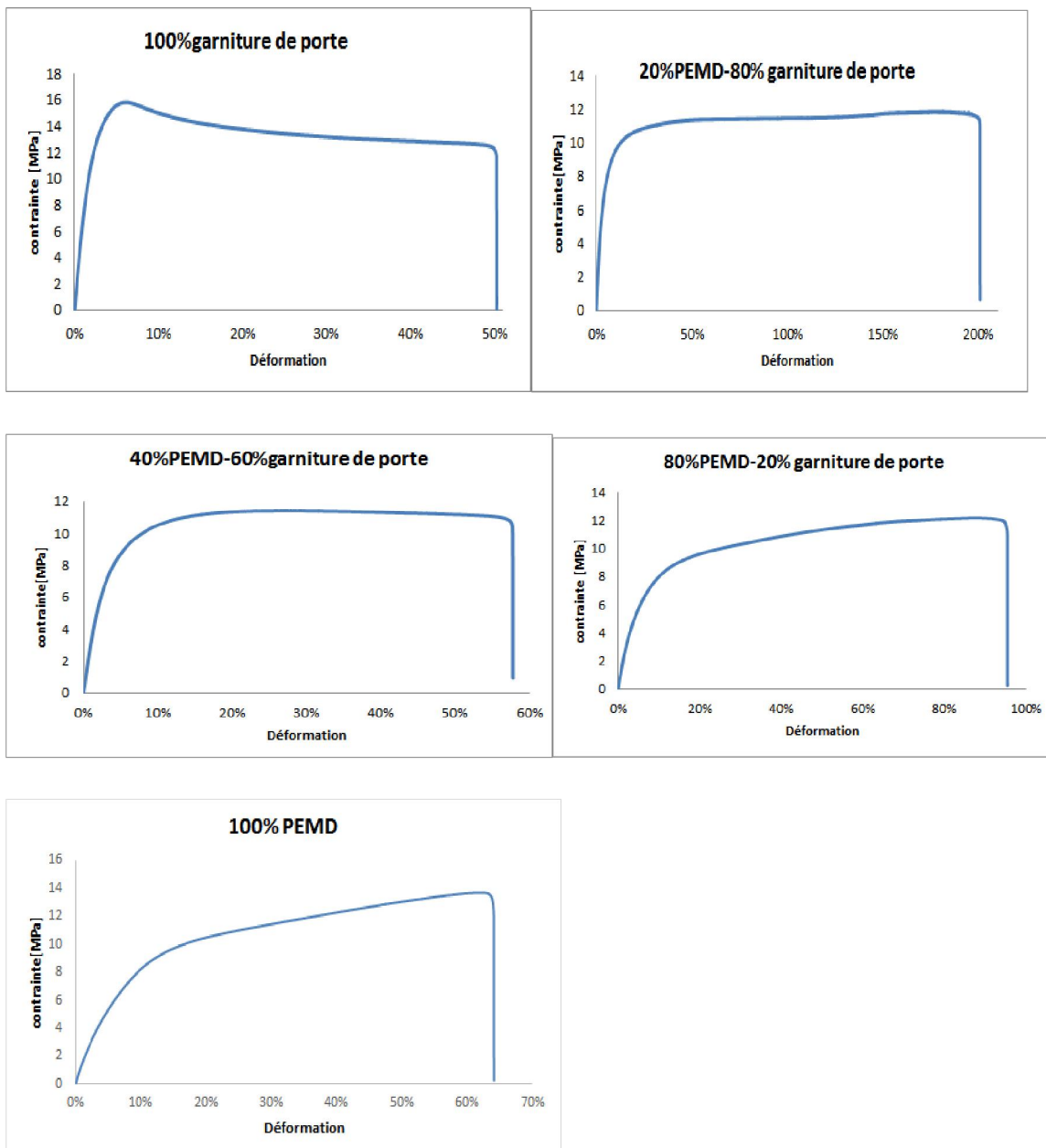
Résultats et discussion

La figure ci-dessus montre que le module d'élasticité augmente dès l'ajout de 20% de déchets à la matrice PEMD puis diminue pour les concentrations de 41, 60, 80% et pour les déchets tableau de bord

V.2.3 Résultats des essais de traction des mélanges PEMD/Garniture de porte

V.2.3.1 Courbes contraintes déformations des mélanges PEMD/ Garniture de porte de porte

Nous regroupons ci-dessous les courbes contraintes déformations des mélanges PEMD/Garniture de porte



Résultats et discussion

Figure V.24 courbes contraintes déformations pour les mélanges PEMD/Garniture de porte

La figure ci-dessous représente la superposition des courbes moyenne contraintes–déformation moyennes des différents mélanges.

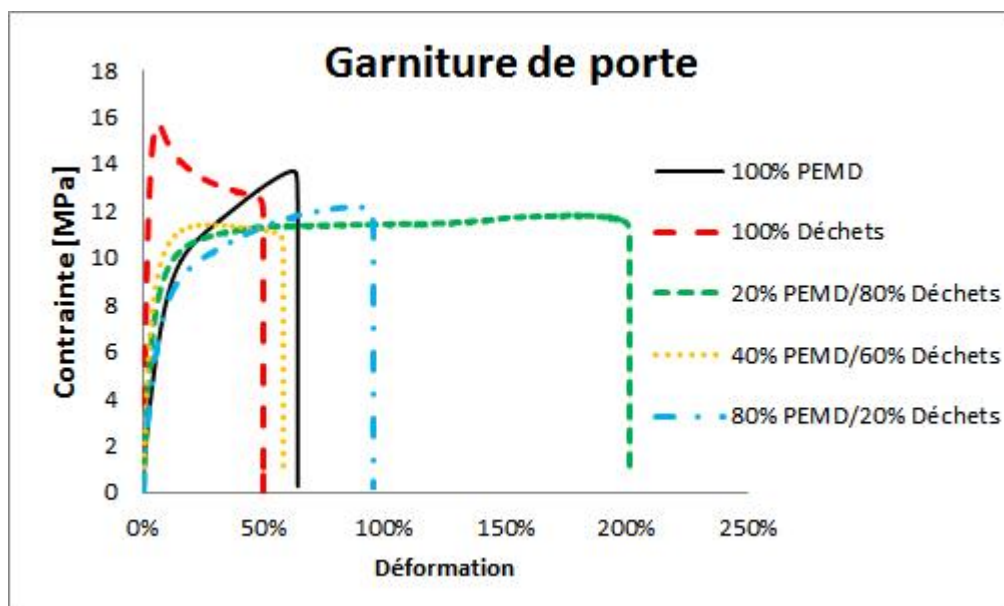
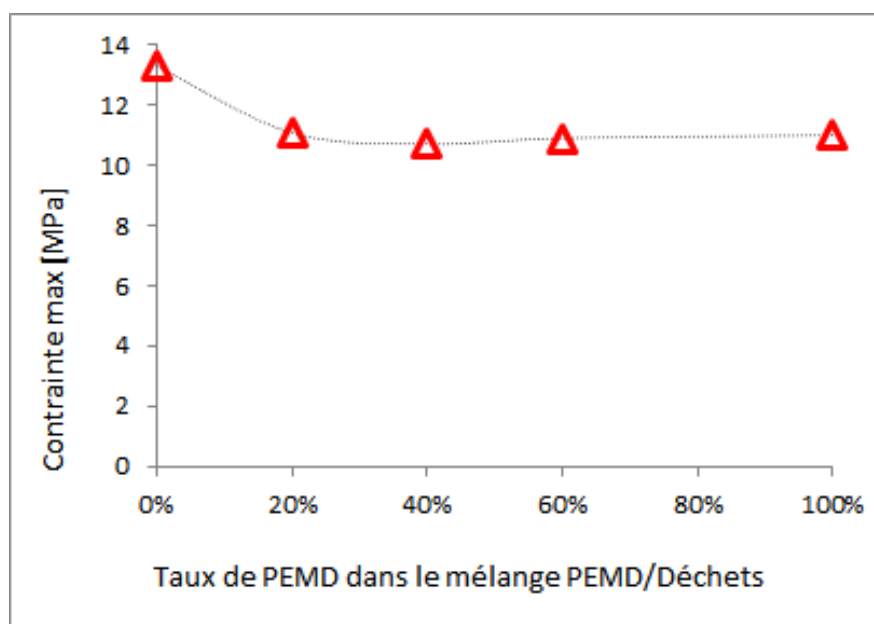


Figure V.25. Superposition des courbes de traction des différents mélanges PEMD/Garniture porte

V.2.3.2 Contraintes maximales des mélanges PEMD/Garniture de porte



Résultats et discussion

Figure V.26 courbes variation de la contrainte maximale des différents mélanges PEMD/Garniture porte

V.2.3.3 Allongement à la rupture des mélanges PEMD/Garniture de porte

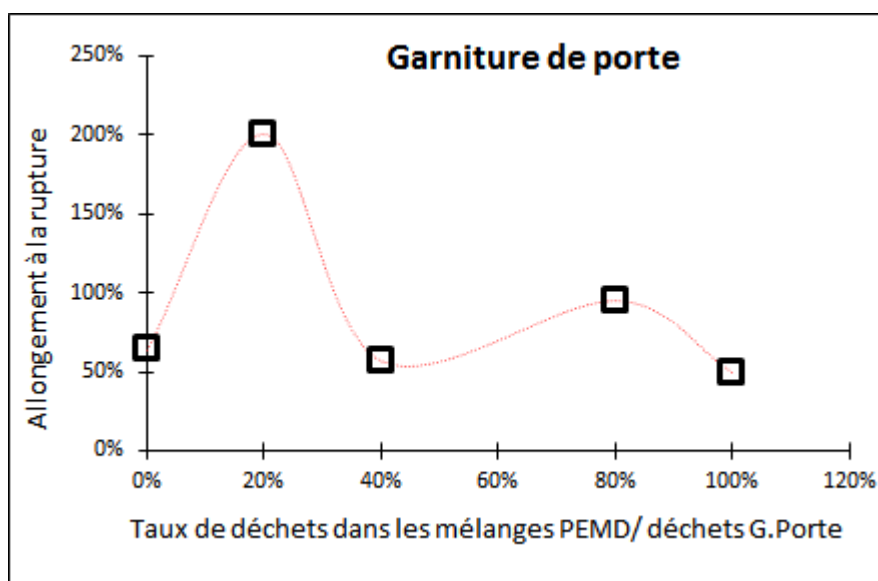


Figure V.27 courbes variation de l'allongement à la rupture des différents mélanges PEMD/Garniture porte

V.2.3.3 Modules d'élasticité des mélanges PEMD/Garniture de porte

Résultats et discussion

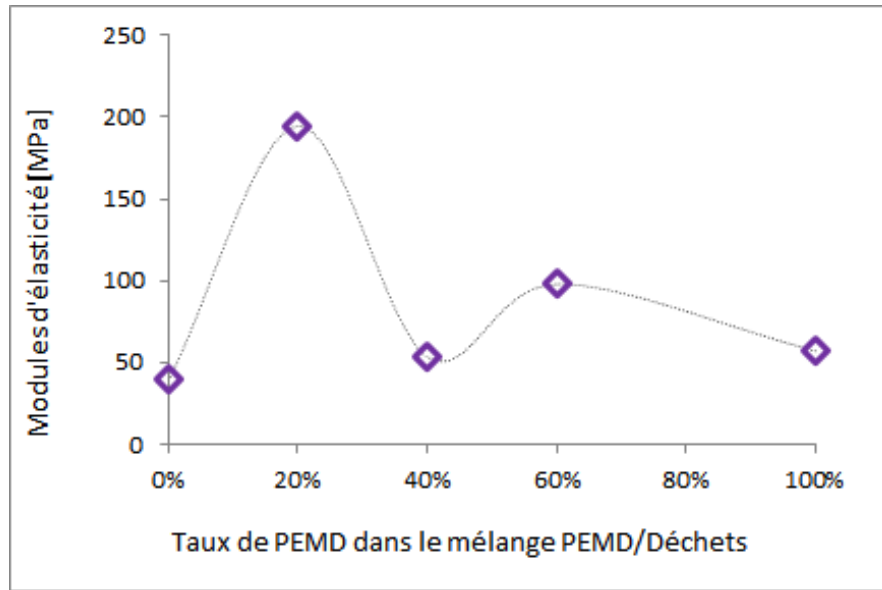


Figure V.28 courbes variation du module d'élasticité des différents mélanges
PEMD/Garniture porte

V.3 Résultats des essais Charpy (résilience)

Nous avons aussi procédé à l'essai de résilience pour déterminer la résistance aux chocs des différents mélanges. La figure V.29 Représente le résultat de ces essais

V.3.1 Résultats. Des essais Charpy (résilience) pour les mélanges PEMD/pare-chocs

La résilience traduit la capacité que possède un corps à emmagasiner de l'énergie avant sa rupture, nous notons dans le tableau ci-dessous les valeurs de la résilience pour le mélange PEMD/pare-chocs

Résultats et discussion

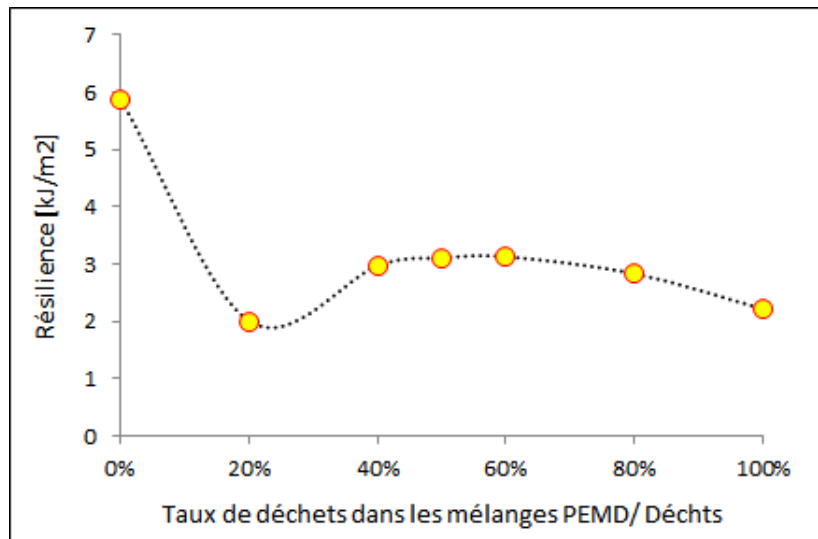


Figure V.29. Courbe de variation de la résilience des mélanges PEMD/Déchets pare-chocs

La figure ci-dessus montre que le PEMD vierge est beaucoup plus résilient que les mélanges. On note une diminution de la résilience pour le mélange 80%PEMD/20% Déchets pare-chocs, puis une légère augmentation à partir 40% et relative diminution pour les mélanges ???/

V.3.2 Résultats des essais Charpy (résilience) pour les mélanges PEMD/Tableau de bord

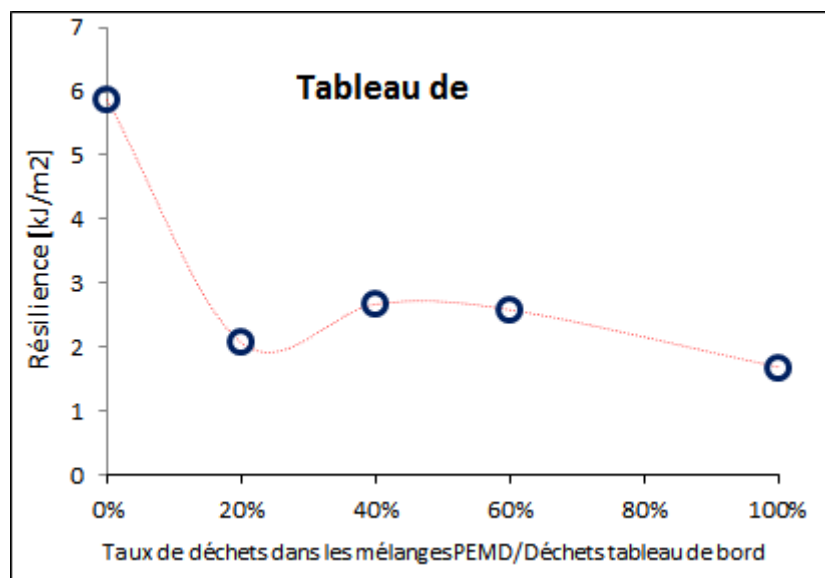


Figure V 30. Courbe de variation de la résilience des mélanges PEMD/Déchets Tableau de bord

Résultats et discussion

V.3.3 Résultats des essais Charpy (résilience) pour les mélanges PEMD/Garniture porte

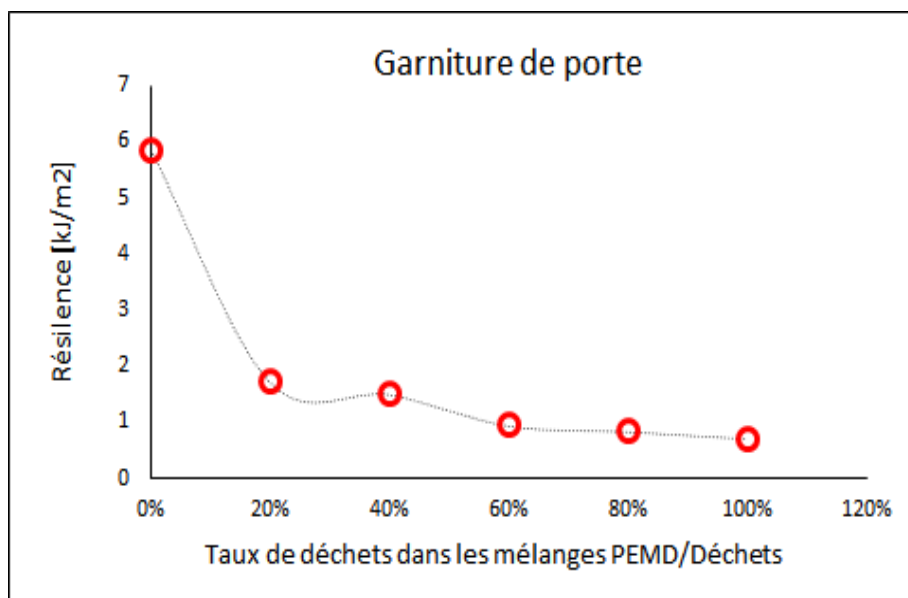


Figure V 31. Courbe de variation de la résilience des mélanges PEMD/Déchets garniture porte

V.4 Résultats des essais des indices de fluidité

V.4.1 Résultats des essais des indices de fluidité des mélanges PEMD/ Pare-chocs

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 mélange PEMD/ Pare-chocs, nous avons noté les résultats dans le tableau suivant

Tableau V.1 Indice de fluidité des mélanges PEMD/Déchets pare-chocs

Désignation du mélange	Indice de fluidité [g/10min]
100%	0,255
80%	2,107
60%	1,48

Résultats et discussion

50%	0,75
40%	0,256
20%	0,336
0%	3,025

A partir des valeurs du tableau ci-dessus on trace la courbe de la variation des indices de fluidité en fonction du taux de recyclé dans la matrice PEMD

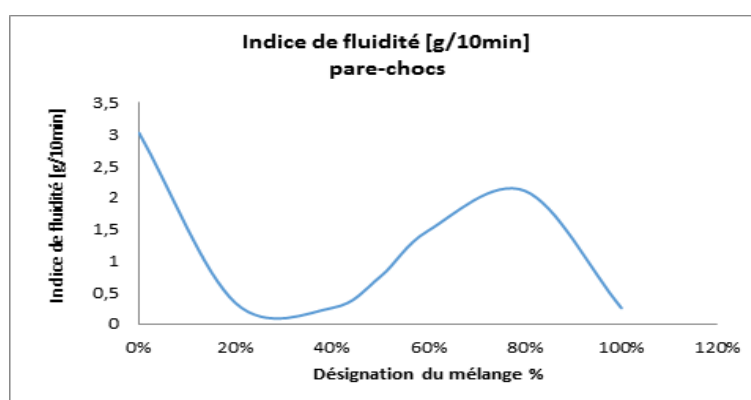


Figure V.32 courbe de variation de l'indice de fluidité des mélanges PEMD/Déchets pare-chocs

V.4.2 Résultats des essais des indices de fluidité des mélanges PEMD/ tableau de bord,

Nous représentons ci-dessous le tableau des valeurs des indices de fluidité des mélanges PEMD/Déchets tableau de bord

Tableau V.2 Valeurs des indices de fluidité des mélanges PEMD/Déchets tableau de bord

Désignation du mélange	Indice de fluidité [g/10min]
100%	0,255
80%	0,284
60%	0,404
40%	0,828
20%	1,463

Résultats et discussion

0%	3,646
----	-------

Figure. V.32 courbe de variation de l'indice de fluidité des mélanges PEMD/Déchets
tableau de bord

La figure V.33 représente la courbe de variation de l'indice de fluidité des mélanges en fonction du taux de déchets dans les mélanges PEMD/Déchets tableau de bords

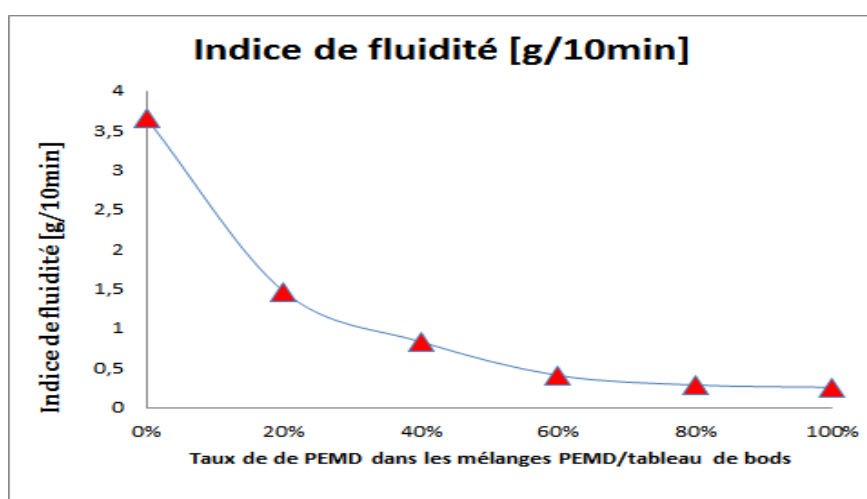


Figure V.33 courbe de variation de l'indice de fluidité des mélanges PEMD/Déchets
Tableau de bord

Le PEMD Reste toujours plus résilient que le déchet tableau de bord.

V.4.3 Résultats des essais des indices de fluidité des mélanges PEMD/Garniture porte

Nous représentons ci-dessous le tableau des valeurs des indices de fluidité des mélanges PEMD/Déchets garniture de porte

Tableau V.2 Valeurs des indices de fluidité des mélanges PEMD/Déchets garniture de porte

Désignation du mélange	Indice de fluidité [g/10min]
100%	0,255
80%	0,223
60%	0,456
40%	0,92
20%	3,99

Résultats et discussion

0%	8,24
----	------

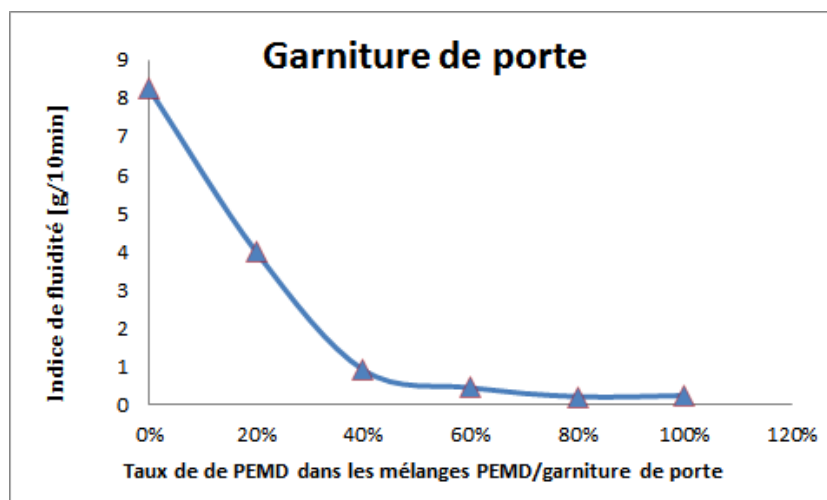


Figure. V.34 courbe de variation de l'indice de fluidité des mélanges PEMD/Déchets garniture porte

La résilience du PEMD est affectée par la présence de déchets garniture portes dans les mélanges.

V.5 Conclusion

Dans le travail que nous venons d'exposer, nous notons l'influence de l'ajout du déchet dans le plastique vierge (PEMD). Cette influence est observée pour toutes les caractéristiques mécaniques ainsi que pour la résilience et l'indice de fluidité.

Conclusion générale

Ce travail a porté sur le recyclage de déchets polymériques issus des véhicules hors d'usage récupérés des casses automobiles. D'un véhicule réformé entreposé dans une casse automobile à ciel ouvert, nous avons récupéré des déchets polymériques constitués du pare-chocs avant, du tableau de bord et de la garniture intérieure de porte pour procéder à leur recyclage.

Après la collecte, nous les avons lavés pour les débarrasser du maximum d'impuretés telles que les graisses et les poussières puis découpés et broyés pour les mettre sous forme granulée.

Nous avons aussi choisi le polymère vierge PEMD (Polyéthylène moyenne Densité) comme matrice. Ce choix est motivé par le fait que le PEMD est un polymère bon marché et d'usage courant avec des propriétés mécaniques de résistance et ductilité acceptable. Nous avons rajouté ces déchets à la matrice PEMD aux concentrations de 0%, 20%, 40%, 60%, 80% et 100%). L'élaboration des éprouvettes normalisées s'est faite par procédé d'injection. Les échantillons ont été soumis aux essais de traction et de résilience et nous avons aussi déterminé les indices de fluidité de chaque mélange.

Après analyse des courbes de traction, nous avons constaté que les déchets automobiles utilisés ont des résistances, des modules d'élasticité et des déformations plus élevés que ceux du polymère utilisé comme matrice (PEMD). L'ajout de déchets à la matrice PEMD engendre une nette amélioration de la contrainte maximale et du module d'élasticité ainsi que pour la déformation. Le PEMD étant plus résistant aux chocs que les déchets automobiles, dégradés par vieillissement thermique et ultra violet, ce ci conduit à des mélanges peu résilients. Nous avons aussi déterminé les indices de fluidité des mélanges où on a obtenu de faibles valeurs pour les différents mélanges.

En conclusion nous pouvons proposer ces mélanges de déchets/PEMD comme matière première pour la réalisation de produits plastiques d'utilisations quotidiennes courantes.

En perspective à notre étude, nous proposons des analyses DSC pour les déchets, des analyses I R, les mélanges seront extrudés, broyés et puis broyés.

Bibliographies

- [1] I. Teraoka, Polymer Solutions, An introduction to physical properties, Ed. Polytechnic University Brooklyn, New York. 2002.
- [2] Introduction-polymères-composites. Etudier.com. à partir de:
<http://www.etudier.com/dissertations/Introduction-Polymeres-Composites/519312.html>
- [3] : C. Charlier ; la chimie industrielle des polymères ou étude des matériaux ; les polymères et consorts.
- [4] : C. Bathias ; matériaux composites ; édition l'usine nouvelle ; Dunod ; 2005.
- [5] : P. Galez ; polymères et composites ; mesures physiques Annecy ; 2011.
- [6] : A. Bellel ; traitement de surface de polymères par décharge couronne et plasma ; thèse de doctorat ; université Mentouri ; Constantine ; 2004.
- [7] "Différents types de matières plastiques":http://capsciences.net/upload/differents_plastiques
- [8] M. Fontanille et V. Jean-Pierre, Polymérisation, Traité plastiques et composites, Technique de l'Ingénieur, A3040, 1994.
- [9] : J. Mertin et al ; traité des matériaux ; tome 14 ; 2001.
- [10] : M. Fontanille et Y. Gnanou ; chimie et physico-chimie des polymères (cours) ; 2ème et 3ème cycles ; Dunod ; Paris ; 4-8 ; 2005.
- [11] : Transformation des plastiques ; dossier enseignant (voyage en industrie) cap sciences ; 2006
- [12] M. Coulibaly , Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastoviscoplastiques. Application à la valorisation des polymères recyclés 01/07/2008.