

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

Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou
Faculté du Génie de la Construction
Département de Génie Mécanique



Mémoire de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme de Master Académique en Génie
Mécanique

Spécialité : Sciences Des Matériaux

Thème

Étude du comportement mécanique des
déchets d'équipements électriques et
électroniques avec SBR

Présenté et réalisé par :

Mokrani Hayet

et

Yaghrouf Farid

Proposé par :

M^{me} MOHELLEBI

Fachila

Promotion 2015/2016

Remerciements

On aimerait en premier lieu remercier notre dieu qui nous a donné la volonté et le courage pour mener à bien ce travail.

On tient à remercier tout d'abord notre promotrice madame MOUHËLLËBI FADHILA de nous avoir proposée ce sujet de recherche .on la remercie infiniment de nous avoir encadré, orienté, aidé et conseillé et pour nous avoir fait confiance.

Nos remerciements iront également à monsieur MOUHËLLËBI pour la gentillesse et la patience qu'il nous a témoigné ainsi que pour ses précieux conseils et ses encouragements lors de la réalisation de ce mémoire.

On adresse nos sincères remerciements a monsieur FILLALI de nous avoir fait l'honneur de présider le jury de soutenance. On remercie également monsieur MOUHËLLËBI MOULOUD et madame BAGUËNANE pour avoir accepté de faire partie du jury de soutenance

Nos remerciements vont aussi à tous nos professeurs, enseignants et toutes les personnes qui nous ont soutenus jusqu'au bout, et qui n'ont pas cessé de nous donner des conseils très importants en signe de reconnaissance.

On tient à remercier l'ensemble du personnel de L'entreprise SISCOPLASTE ou nous avons effectué Notre stage pour leur patience, leurs conseils pleins de sens et pour le suivi et l'intérêt qu'ils ont portaient à notre travail.

On remercie également toutes les personnes qui ont participé à l'élaboration de ce mémoire de près ou de loin.

Dédicace

Je dédie ce mémoire premièrement

A Ma très chère maman :

Affable, honorable, aimable : Tu représentes pour moi le symbole de la bonté par excellence, la source de tendresse et l'exemple du dévouement qui n'a pas cessé de m'encourager et de prier pour moi. Ta prière et ta bénédiction m'ont été d'un grand secours pour mener à bien mes études. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce que tu mérites pour tous les sacrifices que tu n'as cessé de me donner depuis ma naissance, durant mon enfance et même plus à l'âge adulte. Tu as fait plus qu'une mère puisse faire pour que je suive le bon chemin dans ma vie et mes études. Tu es la personne la plus cher à mes yeux, je ne pourrais jamais oublier ce que tu as fais pour moi t'étais toujours là à mes cotés, dans les moments difficiles même le jour ou tous le monde ma tourné le dos tu as cru en moi et tu mas aidé a me relevée et a me battre pour réussir

Je te dédie ce travail en témoignage de mon profond amour. Puisse Dieu, le tout puissant, te préserve et t'accorde santé, longue vie et bonheur.

Je dédie ce mémoire ainsi a :

Mon cher papa

Mon grand frère Youcef et sa femme Karima particulièrement leur fils

Walid

Mon frère Mouhend

Ma sœur Karima et son mari da belaid surtout leurs enfants Céline et Zakaria.

Ma promotrice madame Fadhila mouhellebi

Je ne peux oublier de citer mes copines :Ryma et Karima une des connaissances que j'ai acquerir grâce a mon entrer a l'université sans oublier Tina, Nadya, Soso ,Souad et chafika et saadiya

Mes camarades de la SECTION SDM :

Naïma, Chafya, Jygurtha Samir, Youcef et mon binôme Farid

Tous mes amis sans exception : Ali, Massi, Nazym et Sidali

Liste des Tableaux

Tableau	Titre	Page
I.1	Structure de 4 polymères courants et leurs usages.	02
I.2	Caractéristique du polypropylène	11
I.3	Les propriétés mécaniques de plusieurs polymères. [Modern plastics encyclopedia'96©1995, the McGraw-hill companies.]	18
II.1	Exemple d'équipements électriques	40
IV.3	Tableau des paramètres d'injection	70
V.1	Valeurs de la résilience des mélanges DEEE/PPH. Sans SBR	95
V.2	Valeurs de la résilience des mélanges DEEE/PPH avec 5% SBR	96
V.3	Valeurs de la résilience des mélanges DEEE/PPH avec 10.% SBR	97
V.4	Valeurs de la résilience des mélanges DEEE/PPH avec 15.% SBR	99
V.5	valeurs de la résilience en fonction du taux de l'SBR de la matrice 100 PP	101

V.6	valeurs de la résilience en fonction du taux de l'SBR de la matrice 80% PP et 20% DEEE	102
V.7	valeurs de la résilience en fonction du taux de l'SBR de la matrice 60% PP et 40% DEEE	103
V.8	valeurs de la résilience en fonction du taux de l'SBR de la matrice 50% PP et 50% DEEE	104
V.9	valeurs de la résilience en fonction du taux de l'SBR de la matrice 40% PP et 60% DEEE	105
V.10	valeurs de la résilience en fonction du taux de SBR de la matrice 20% PP et 80% DEEE	106
V.11	valeurs de la résilience en fonction du taux de l'SBR de la matrice 0% PP et 100% DEEE	107
V.12	Valeurs de la micodureté des mélanges	109

Liste des Figures		
Figure	Titre	Page
I.1	Isomères géométriques du butane	4
I.2	hydrocarbures aromatiques (alkylbenzènes) Benzène Naphtalène Biphénile Suivant le nombre d'atomes de carbone, on fait précéder le suffixe -ane, -ène ou -yne par le préfixe: 1 méth-/2 éth-/3 prop-/4 but-/ 5 pent-/6 hex-/7 hept-/8 oct-/9 non-/10 déc-	6
I.3	Schématisation de la structure des polymères amorphes à différentes échelles [a]- Constitution d'un segment de chaîne, [b]- macromolécule [c]- Enchevêtrement macromoléculaire [d]- structure macroscopique homogène et isotrope	7
I.4	Structure d'un polymère semi-cristallin	8
I.5	Classification des architectures macromoléculaires selon Tomalia	9
I.6	La structure moléculaire du polypropylène	11
I.7	Courbe contrainte-déformation (essai de traction) d'un thermoplastique semicristallin et représentation schématique d'une éprouvette de traction dans les différentes zones	14
I.8	Courbe d'hystérésie du comportement viscoélastique linéaire lors d'un essai cyclique de traction-compression à vitesse de déformation constante	15
I.9	comportement contrainte -déformation des polymères a) fragiles, b) élastique, c) élastomères.	17
I.10	courbe contrainte -déformation d'un polymère plastique	17
II.1	Morphologie des mélanges (a) particulaire de 1 dans 2, (b) bicontinue et (c) particulaire de 2 dans 1	22
II.2	Analogie entre émulsifiant traditionnel et copolymère à bloc, en tant qu'espèces actives en surface d'un mélange	27

II.3	Positionnement d'un copolymère compatibilisant à l'interface en fonction de sa microstructure : (a) copolymère à bloc et (b) copolymère statistique	28
II.4	Positionnement d'un copolymère dibloc (a) ou tribloc (b) sur le polymère	28
II.5	Répartition de la production de polymères par type de produits (en %)	34
II.6	Répartition de la production des matières plastiques par grandes familles (en %)	34
II.7	Principaux domaines d'application des matières plastiques (en %)	34
II.8	Répartition des DEEE par types de polymères	41
III.1	Eprouvette plate standard	43
III.2	Machine de traction de Marque IBERTEST au niveau du laboratoire SDM	44
III.3	Propriétés mécaniques issues de la déformation d'un matériau soumis à une contrainte	45
III.4	Norme de l'éprouvette de l'essai de résilience	47
III.5	a)La fraiseuse utilisée pour entailler l'éprouvette de résilience b).éprouvette entaillée	47
III.6	a)Machine charpy de marque ZWICK b) éprouvette placée sur le dispositif Charpy	48
III.7	a) Microduromètre b) Empreinte Knoop	49
III.8	Microscope électronique à Balayage	50
IV.1	la matière première utilisée est le polypropylène (PP)	52
IV.2	Avant et après le découpage de le l'SBR	53
IV.3	Collecte des déchets des Equipements Electriques et Electroniques hors d'usage.	54
IV.4	Déchets découpés à la cisaille en petits morceaux avant broyage.	54
IV.5	Broyages des DEEE au niveau de SICOPLAST Dràa-El-Mizan.	55

IV.6	Vérification présence des particules métallique dans les déchets	55
IV.7	les DEEE a l'état granulaire âpre le broyage.	56
IV.8	L'opération de pesée des mélanges PP, SBR et les déchets de DEEE	57
IV.9	Mélangeur électrique	60
IV.10	Extrudeuse mono vis Marque NEBEL NEGRI-LUINO	60
IV.11	a) Système de refroidissement de la matière. b) La sortie de la matière de l'extrudeuse. c) Etireuse et découpage à l'aide de sécateur.	61
IV.12	Présentation de l'appareil de Découpe (a) et du broyeur (b)	61
IV.13	les mélanges après extrusion	62
IV.14	L'opération de séchage des matières broyées	62
IV.15	Machine à injection Moule éprouvette	63
IV.16	extrudeuse mono vis <i>Marque NEBEL NEGRI-LUINO</i>	64
IV.17	Zones d'une extrudeuse Mono vis	65
IV.18	Presse d'injection Marque ARBURG 305-210-700	66
IV.19	Eprouvettes obtenues après injection	66
IV.20	Les différentes phases du cycle d'injection	68
IV.21	le schéma d'une extrudeuse mono vis	68
IV.22	Dispositifs d'injection	69
IV.23	Préparation des Eprouvettes pour les différents essais	70
V.1	Courbe contrainte déformation du mélange 100% DEEE	72
V.2	Courbe contrainte déformation du mélange 100% PPH	73
V.3	Superposition des Courbes contrainte déformation des polymères 100%DEEE et 100%PPH	73

V.4	Courbe contrainte déformation du mélange 80% DEEE/20% PPH	74
V.5	Courbe contrainte déformation du mélange 60% DEEE/40% PPH	75
V.6	Courbe contrainte déformation du mélange 50% DEEE/50% PPH	75
V.7	Courbe contrainte déformation du mélange 40% DEEE/60% PPH	76
V.8	Courbe contrainte déformation du mélange 20% DEEE/80% PPH	76
V.9	Courbe contrainte déformation du mélange 95% DEEE/5% SBR	77
V.10	Courbe contrainte déformation du mélange 90% DEEE/10% SBR	78
V.11	Courbe contrainte déformation du mélange 85% DEEE/15% SBR	78
V.12	Courbe de traction des mélanges DEEE et DEEE avec SBR	79
V.13	Courbe contrainte déformation du mélange 95% /5% SBR	80
V.14	Courbe contrainte déformation du mélange 90% PPH/10% SBR	80
V.15	. Courbe contrainte déformation du mélange 85% DEEE/15% SBR	81
V.16	Courbe contrainte déformation du mélange 76% DEEE/19% PPH/5% SBR	82
V.17	Courbe contrainte déformation du mélange 72% DEEE/18% PPH/10% SBR	82
V.18	Courbe contrainte déformation du mélange 68% DEEE/17% PPH/15% SBR	83
V.19	Courbe contrainte déformation du mélange 57% DEEE/38% PPH/5% SBR	83
V.20	Courbe contrainte déformation du mélange 54% DEEE/36% PPH/10% SBR	84
V.21	Courbe contrainte déformation du mélange 51% DEEE/34% PPH/15% SBR	84
V.22	Courbe contrainte déformation du mélange 47,5% DEEE/47,5% PPH/5% SBR	85
V.23	Courbe contrainte déformation du mélange 45% DEEE/45% PPH/10% SBR	86
V.24	Courbe contrainte déformation du mélange 42,5% DEEE/42,5% PPH/15% SBR	86
V.25	Courbe contrainte déformation du mélange 37,5% DEEE/57,5% PPH/5% SBR	86
V.26	Courbe contrainte déformation du mélange 35% DEEE/55% PPH/10% SBR	87
V.27	Courbe contrainte déformation du mélange 32,5% DEEE/52,5% PPH/15% SBR	88

V.28	Courbe contrainte déformation du mélange 17,5% DEEE/77,5%PPH/5%SBR	89
V.29	Courbe contrainte déformation du mélange 15% DEEE/85%PPH/10%SBR	89
V.30	Courbe contrainte déformation du mélange 12,5% DEEE/72,5%PPH/15%SBR	90
V.31	Courbe contrainte déformation du mélange 20%DEEE/80%PPH/SBR	90
V.32	Variation du module d'élasticité en fonction du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH)	91
V.33	Variation du module d'élasticité en fonction du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH/SBR)	91
V.34	Variation de l'allongement à la rupture du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH)	92
V.35	Variation de la contrainte au seuil d'écoulement en fonction du taux de PPH' dans le mélange (DEEE/PPH) sans SBR	93
V.36	Variation de la contrainte au seuil d'écoulement en fonction du taux de PPH' dans le mélange (DEEE/PPH) avec SBR	94
V.37	Variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH)	95
V.38	Variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH/5%SBR)	97
V.39	Variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans les mélanges (DEEE/PPH/10%SBR)	98
V.40	Variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans les mélanges (DEEE/PPH/15%SBR)	100
V.41	Superposition des courbes de résilience des différents mélanges avec différents taux d'SBR	100
V.42	Variation de la résilience en fonction du taux de SBR Dans la matrice 100% PP	102
V.43	Variation de la résilience en fonction du taux d'SBR dans la matrice 80%PP	103
V.44	Variation de la résilience en fonction du taux d'SBR	104

	dans la matrice 60%PP	
V.45	Variation de la résilience en fonction du taux d'SBR Dans la matrice 50%PP	105
V.46	Variation de la résilience en fonction du taux d'SBR Dans la matrice 40%PP	106
V.47	Variation de la résilience en fonction du taux d'SBR Dans la matrice 20%PP	107
V.48	Variation de la résilience en fonction du taux d'SBR Dans la matrice 0%PP100%DEEE.	108
V.49	Variation de la microdureté pour les différents mélanges (DEEE/PPH)	109
V.50	Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 100%PPH	110
V.51	Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 100%DEEE	111
V.52	Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 80%DEEE/20%PPH	112
V.53	Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 50%DEEE/50%PPH	112
V.54	Micrographies au MEB des échantillons de PPH/SBR (a) 100%PPH, (b) PPH/5%SBR,	113

Sommaire

CHAPITRE I- Généralité sur les polymères

INTRODUCTION GENERALE

I -les matieres plastiques.....	01
I .1-introduction	01
I .2-molécules de polymeres	02
I .3-confegurations moléculaires	03
I.4. La nature chimique et la structure atomique des monomères.....	04
I.4.1-la liaison covalente	04
➤ la valence des atomes	04
➤ les familles d'hydrocarbure	05
I.5-polymeres solides amorphe et semi cristallin	06
I.6-differentes classe de polymeres	08
I.6.1-classification selon l'origine	08
I.6.2-classification selon l'architecture	08
I.6.3-classification selon la structure chimique.....	10
I.6.4 - classification selon le comportement thermique	10
I.7 application des polymères	12
I.8-comportement mécanique des polemères	13
I.8.1-introduction.....	13
I.8.2-presentation générale du comportement mécanique des polymères.....	13
I.8.3-différents processus de déformation	14
I.8.4-comportement contrainte - déformation	16
I.8.5-facteurs influencent sur les propriétés mécaniques des polymères	19
I.8.5.1-traitement thermique	19
<h3>CHAPITRE II-mélanges de polymères</h3>	
II.1-introduction	20
II.2-mélange de polymères	20
II.2.1-etat de miscibilité	20

II.2.2-morphologies des mélanges de polymères	22
II.3-critères simple de compatibilité	23
II.3.1-transparence des films	23
II.3.2-la transition vitreuse	23
II.3.3-abaissement du point de fusion	24
II.4-objectif de la compatibilisation	24
II.5-classification des melanges	25
II.5.1-mélanges de polymères totalement incompatible	25
II.5.2-mélanges de polymères miscible	25
II.5.3-mélange de polymères partiellement miscible	25
II.5.4- mélange de polymères compatibles.....	26
II.6-les différentes méthodes de comptabilisation.....	26
II.6.1-utilisation d'un copolymère préformé.....	26
II.6.1.1-principe	26
II.6.1.2-influence de la nature du copolymère.....	27
II.6.1.3-effet de taux de copolymère	29
II.6.1.4-influence de la masse molaire du copolymère.....	29
II.8-le recyclage des polymères	30
II.8.1-introduction.....	30
II.8.2-généralité sur les déchets plastique	30
II.8.2.1-les dechets plastique industriels.....	30
II.8.2.2-les dechets plastiques de poste - consommation	31
II.8.3-la valorisation des matière Plastique	33
II.8.3.1-le recyclage	33
II.8.3.2-procédé en voie de développement.....	37
II.8.3.2.1-biodégradation	37
II.8.3.2.2-biodégradation	37
II.8.4-la valorisation par mélange ou " coumpounding ".....	37

II.8.4.1-les charges.....	38
II.8.4.2-la comptabilisation.....	38
II.8.5-recyclages des DEEE.....	39
II.8.5.1-définition.....	39
II.8.5.2-Qu'est-ce qu'un équipement électrique et électronique ?.....	39
II.8.5.3-Répartition des DEEE par type de polymères	40

CHAPITRE III-technique expérimentale matériels et dispositifs expérimentaux

III.1-Introduction	42
III.2-Essai de traction	42
III.2.1-La machine de traction	42
III.2.2-Principe de fonctionnement et de mesure de la machine de traction.....	44
III.3-Essai de résilience (choc).....	46
III.3.1-Mesure de la Résistance à l'impact.....	46
III.4-Essai de micro dureté	48
III.4.1-Principe.....	48
III.5-Microscopie à balayage électronique.....	49
III.5.1-Principe.....	49
III.6-Conclusion	51

CHAPITRE IV-élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes

IV.1-Introduction.....	52
IV.2-Présentation de différents composants des mélanges élaborés.....	52
IV.2.1-Polypropylène (PP).....	52
IV.2.2-Styrène butadiène (SBR).....	53

IV.3-DEEE étudiées au cours de ce travail.....	54
IV.4-Procédé de recyclage réalisé dans le cadre de notre étude	54
IV.4.1-Décontamination des déchets.....	54
IV.4.2-Lavage et nettoyages	54
IV.4.3-Broyage des déchets	55
IV.5-Réalisation et Elaboration des mélanges.....	56
IV.5.1-1 ^{er} étape : préparation des mélanges	56
IV.5.2-2 ^{ème} étape : L'étape d'extrusion	60
IV.5.3-3 ^{ème} étape : opération du broyage	61
IV.5.4-4 ^{ème} étape : l'étape de l'injection	63
IV.6-Présentation de l'extrudeuse et de la machine à injection.....	63
IV.6.1-Procédure d'extrusion.....	63
IV.6.2-Procédure d'injection	65
IV.6.2.1-Principe de l'injection	67
IV.7-Conclusion	70

CHAPITRE V- résultats et discussion

V.1-Introduction	71
V.2-Characterisation Mécanique.....	71
V.2.1-Courbes Contrainte-Déformation	71
V.2.2-Variations du module d'élasticité des différents mélanges	91
V.2.2.1-Variations du module d'élasticité des différents mélanges sans SBR	91
V.2.2.2-Variations du module d'élasticité des différents mélanges avec SBR.....	91
V.2.3-Variations de l'allongement à la rupture des différents mélanges.....	92
V.2.4-Variations de la contrainte au seuil d'écoulement pour les mélanges	93
V.2.4.1-Variations de la contrainte au seuil d'écoulement pour les mélanges DEEE/PPH sans SBR.....	93

V.2.4.2-Variations de la contrainte au seuil d'écoulement pour les mélanges DEEE/PPH avec SBR.....	94
V.3-La résilience	94
V.3.1-La résilience des mélanges sans SBR.....	94
V.3.2-La résilience des mélanges avec SBR.....	96
V.3.2.1-La résilience des mélanges avec 5% SBR.....	96
V.3.2.2-La résilience des mélanges avec 10 % SBR.....	97
V.3.2.3-La résilience des mélanges avec 15 % SBR.....	99
V.3.3-L'influence de l'SBR sur la résilience des mélanges	101
V.4-Microdureté Knoop.....	108
V.4.1-Characterisation morphologique.....	110
V.4.1.1-Observation des éléments du mélanges: 100%PPH et 100%DEEE.....	110
V.4.1.2-Observation des mélanges : DEEE/PPH sans SBR.....	111
V.4.1.3.Observation des éléments des mélanges avec SBR.....	112
V.5.Conclusion.....	113

Conclusion générale

Présentation de l'Entreprise *SISCOPLAST*

De Draa EL MIZAN

1. Présentation

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

L'entreprise SISCOPLASTE (Société d'Injection Plastique et de fabrication des Articles Scolaires) de Draa EL Mizan a été créée en 1981 et est gérée par un conseil de direction. C'est une société par action. La superficie de cette entreprise s'étend sur 30 000 m². Elle a réussi à occuper une place prépondérante dans le marché locale de l'industrie de la plasturgie malgré le marché concurrentiel ouvert contre d'autres produits importés et locaux. Ses produits multiples ont été, au fil des années et grâce à l'apport considérable des compétences composées de techniciens, d'ingénieurs et de cadres dirigeants formés dans les différents instituts et universités algériennes, améliorés. Et gagnent la satisfaction du client. L'entreprise SISCOPLASTE est certifiée ISO 9001 version 2008 depuis l'année passée. Cette norme intègre la politique de gestion de la qualité et a pour objectifs principaux de répondre aux exigences du client et apporter des améliorations sur tous les plans de la gestion de l'entreprise.

2. Gamme de produits fabriqués

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

- **Le secteur d'injection** : Actuellement ce secteur fabrique, bouchon moubyd en polypropylène(PP), les fusettes en polyéthylène haute densité injection et bouchon Naftal en PP.
- **Le secteur d'extrusion** : Par ce procédé l'entreprise fabrique principalement, les tubes en PEHD pour AEP, tubes en PEBD pour l'irrigation et des gaines électriques.
- **Le secteur de souples** : ce dernier secteur fabrique, protèges cahiers en PVC et pochettes vignettes en PVC.

Introduction générale

L'évolution de l'humanité, qui se traduit par l'amélioration de notre qualité de vie, est liée aux évolutions technologiques et industrielles. Mais ces progrès ne sont pas sans conséquences sur l'environnement. Ces progrès sont consommateurs de ressources naturelles non renouvelables et donc limitées. Ils génèrent des déchets en quantité croissante, pouvant être des sources de pollution, parmi eux les déchets des matériaux polymères

Ces déchets de matières plastiques constituent un gisement très important, réparti depuis le secteur industriel jusqu'au niveau du consommateur, en passant par les différents réseaux de distribution et de commercialisation. Cette masse mondiale de matière plastique utilisée ne cesse de s'accroître à cause de fait qu'ils ne sont pas biodégradables ainsi que leurs quantités de déchets s'accumulent de manière inquiétante.

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 des différentes opérations de recyclage.

Le recyclage mécanique aussi appelé valorisation " matière " consiste à récupérer les polymères issus 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 bon marché peut constituer une alternative non négligeable pour produire de la matière première et préserver l'environnement mais les mélanges des polymères ne donnent pas vraiment des résultats fiables car les matériaux polymères sont très rarement miscibles.

Les polymères forment en général des mélanges immiscibles, caractérisés par l'existence d'une tension à l'interface entre les phases limitant les propriétés mécaniques de ces matériaux. Pour améliorer les propriétés mécaniques d'un mélange immiscible est de modifier l'interface par la compatibilisation . Cette modification permet d'améliorer l'adhésion entre les phases et entraîne une diminution de la taille des particules de la phase dispersée. Elle est faite par l'introduction d'un composé tensioactif (agent interfacial) qui migre à l'interface des phases et qui possède une affinité avec les deux polymères du matériau. En utilisant cette technique, de nombreuses propriétés peuvent être améliorées.

Cette étude portera sur le recyclage des déchets polymériques issus des équipements électriques et électronique. Le mélange avec un PPH bon marché permet de les réintroduire dans le cycle de la production de matières premières par recyclage. Nous avons aussi procédé à l'ajout d'un élastomère en l'occurrence le Styrène Butadiène RUBBER (SBR) pour une éventuelle amélioration des propriétés mécaniques.

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 les mélanges de polymères. Le troisième chapitre abordera le matériel et les dispositifs expérimentaux utilisés pour la réalisation des mélanges et leur caractérisation. Dans le quatrième chapitre nous présenterons la procédure expérimentale utilisée pour l'élaboration des mélanges et la réalisation des éprouvettes. Le cinquième chapitre sera consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats. Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

GÉNÉRALITÉS SUR

LES POLYMÈRES

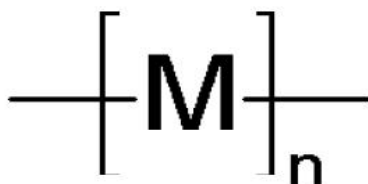
Généralités sur les polymères

I. Les Matières Plastiques

I.1- Introduction

Le mot « polymère » est d'origine grec. Il est composé de deux parties. La partie « poly » signifie plusieurs et « meros » c'est des parties ou des unités. Un matériau polymère ou macromoléculaire est composé de longues chaînes. Les unités de la répétition sont soit toutes les mêmes (homopolymère) soit de natures différentes (copolymère). Les liaisons chimiques fortes assurent la cohésion des atomes sur la même chaîne. Les raccordements entre les chaînes (interchaînes) sont faibles. La présence des raccordements faibles et forts apportent des propriétés physico-chimiques particulières aux matériaux polymères. Le concept des macromolécules a été établi par H. Staudinger (prix Nobel de chimie 1953) dans les années 1920. W.H. Carothers de la compagnie Dupont de Nemours et son équipe (1920) ont effectué la synthèse d'un matériau macromoléculaire: polyamide. Les premières fibres du polyamide 6-6 étaient raffinées depuis 1935 et ont été lancées sur le marché en 1939. [01]

Les polymères sont des matériaux composés de molécules de grande dimension (macromolécules) construites par la répétition d'un motif monomère :



M: raison monomérique (raison de répétition)

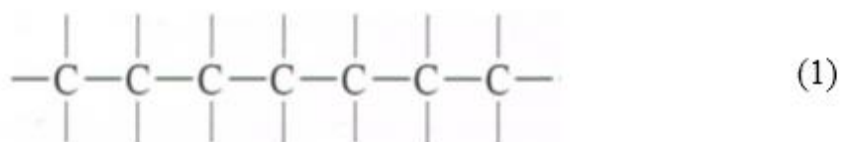
N: degré de polymérisation [02]

Leurs propriétés mécaniques particulières et leur aptitude pour obtenir des polymères en vue de leur utilisation dans divers application sont motivantes. Ces qualités sont étroitement liées à leur structure et il est possible, à partir d'une structure moléculaire donnée, de prévoir une morphologie et des propriétés qui lui sont attachées [01].

Généralités sur les polymères

I.2 Molécules de polymères

Les molécules de polymères sont gigantesques, comparativement aux molécules d'hydrocarbures vues jusqu'ici; c'est pourquoi on les appelle souvent macromolécules. Des liaisons covalentes unissent entre eux les atomes de chaque molécule. Les molécules de la plupart des polymères sont constituées de longues chaînes flexibles dont le squelette est un ensemble d'atomes de carbone. Souvent, chaque atome de carbone possède une liaison simple avec chacun des deux atomes de carbone qui lui sont adjacents, comme le montre la représentation bidimensionnelle suivante :



Chacun des deux électrons de valence restants de chaque atome de carbone peut être lié latéralement à des atomes ou à des radicaux contigus à la chaîne. Bien entendu, les liaisons de chaîne et les liaisons latérales peuvent aussi être doubles. Ces longues molécules sont composées d'entités structurales appelées monomères, qui se répètent tout au long de la chaîne. «Monomère» vient du mot grec *meros*, qui signifie «partie ». Un polymère comporte donc plusieurs monomères [15].

Monomère	Polymère	Quelques usages
Ethylène $\text{CH}_2 = \text{CH}_2$	Polyéthylène ..- $\text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2 - \text{CH}_2$ -..	Emballages, sacs poubelle, bouteilles, bassine
Styrène $\text{CH} = \text{CH}_2$	Polystyrène ..- $\text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH} - \text{CH}_2$ -..	Emballages, plaques isolantes
Chlorure de vinyle $\text{CH}_2 = \text{CHCl}$	Polychlorure de vinyle (P.V.C.) $\text{CH}_2 \text{ CHCl CH}_2 \text{ CHCl CH}_2 \text{ CHCl}$	Tuyaux, disques, bouteilles d'eau
Propylène $\text{CH}_2 = \text{CH} - \text{CH}_3$	Polypropylène ..- $\text{CH}_2 - \text{CH} - \text{CH}_2 - \text{CH} - \dots$ $\text{CH}_3 \quad \text{CH}_3$	Habillement, tapis, tissus industriels, cordages

Tableau I.1 : Structure de quatre polymères courants et leurs usages

Généralités sur les polymères

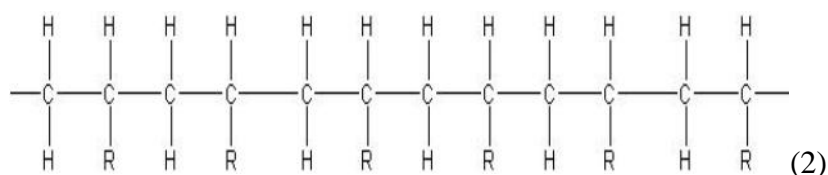
I.3 Configurations moléculaires

Lorsque plus d'un atome latéral ou plus d'un groupe latéral d'atomes (par exemple, Cl, CH₃) sont liés à la chaîne principale d'un polymère, la régularité et la symétrie de l'arrangement latéral peuvent grandement influencer sur les propriétés.

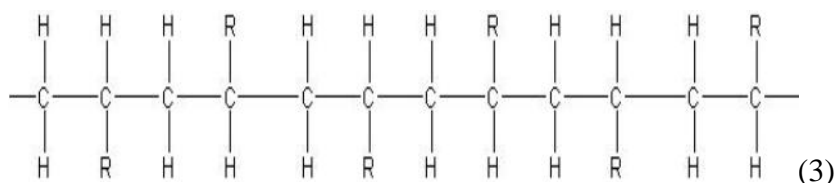
L'isomérisation caractérise également les molécules des polymères. C'est-à-dire que différentes configurations atomiques sont possibles pour la même composition. Les sections suivantes traitent de deux sous-classes d'isomérisation, la stéréoisomérisation et l'isomérisation géométrique.

- Stéréoisomérisation

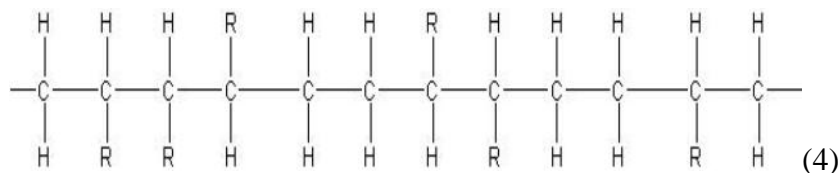
La configuration isotactique : tous les groupes R sont du même côté de la chaîne



La configuration syndiotactique : les groupes R alternent d'un côté à l'autre de la chaîne:



La configuration atactique : les emplacements sont aléatoires



- Isomérisation géométrique

Les monomères à liaison double entre les atomes de carbone d'une chaîne peuvent adopter d'autres configurations importantes: ce sont les isomères géométriques. Dans un tel cas, un atome ou un radical est lié latéralement, d'un côté ou de l'autre de la chaîne, à chacun des atomes de carbone participant à la liaison double. Observons le monomère d'isoprène (figure

Généralités sur les polymères

I.1a), où le groupe CH₃ et l'atome H sont du même côté de la chaîne: une telle structure est dite *cis* ; le polymère résultant, le *cis*-polyisoprène, est le caoutchouc naturel.

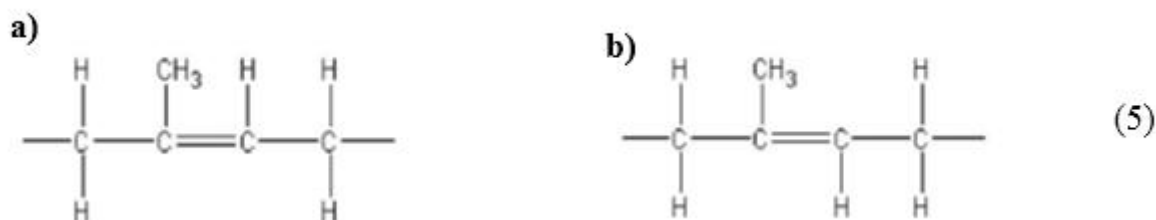


Figure I.1 Isomères géométriques du butane

Dans le cas de l'isomère alterné (figure I.1b) la structure est dite **trans**, car le groupe CH₃ et l'atome H se trouvent de chaque côté de la chaîne. Cette modification de la configuration rend les propriétés du *trans*-polyisoprène, distinctement différentes de celles du caoutchouc naturel. La transformation de *trans* à *cis*, ou vice versa, ne peut s'obtenir par une simple rotation de liaisons de la chaîne, parce que la liaison double de la chaîne est extrêmement rigide. [15]

I.4. La nature chimique et la structure atomique des monomères [19]

I.4.1. La liaison covalente :

Les hydrocarbures sont des composés chimiques, le plus souvent liquides formés par des molécules plus ou moins « lourdes » selon le nombre d'atomes qu'elles contiennent. Comme leur nom l'indique, ils sont formés essentiellement par des atomes d'hydrogène et de carbone. Ces deux éléments, d'électro- -négalivité voisine, se lient par une liaison dite covalente dans laquelle chaque atome met en commun un ou plusieurs électrons de sa couche externe. Généralement, la liaison covalente est simple car elle implique le partage équitable d'une seule paire d'électrons, chaque atome fournissant le sien pour former une paire délocalisée. Les liaisons covalentes sont fortement directionnelles et tendent à former des molécules aux formes caractéristiques possédant des angles de liaison spécifiques.

➤ La valence des atomes :

L'atome d'hydrogène est dit monovalent car il ne dispose que d'une seule liaison et ne peut se lier qu'à un seul atome. Le carbone, en revanche, est tétravalent c'est-à-dire qu'il peut établir 4 liaisons avec des atomes voisins. Il arrive aussi que dans une molécule, deux atomes

Généralités sur les polymères

de carbone partagent deux ou trois paires d'électrons. On parle alors une liaison double ou d'une liaison triple.

Ces liaisons doubles ou triples entre carbones donnent des composés insaturés souvent instables car elles s'établissent par manque d'atomes hydrogène disponibles. Les hydrocarbures insaturés tendent à se saturer en captant soit d'autres atomes d'hydrogène ou des atomes d'oxygène. C'est pour cette raison qu'il n'est pas fréquent de les trouver en grandes quantités dans la nature. Cette insaturation permet aux chimistes de faire toutes sortes de réactions afin d'obtenir des composés nouveaux.

➤ Les familles d'hydrocarbure :

Selon le type de liaisons saturées ou insaturées, il existe plusieurs familles d'hydrocarbures. La forme spatiale des molécules est variable d'une famille à l'autre.

- Dans les composés saturés, les atomes de carbone se disposent à la suite les uns des autres. On parle de forme aliphatique ou de composés paraffiniques pour désigner ces molécules linéaires dont la plus fréquente est le méthane. Quelques composés insaturés comme l'éthylène ont aussi une forme linéaire. Dans les molécules saturées comprenant un petit nombre d'atomes, il y a peu de ramifications. Au-delà de quatre atomes de carbone, des éléments ayant la même formule brute peuvent avoir différentes ramifications : on parle alors d'isomères de constitution ou d'énantiomères.

- De nombreux composés insaturés dits aromatiques se caractérisent par la présence d'un cycle d'atomes de carbone disposés en hexagone de type benzène avec trois doubles liaisons alternées avec trois liaisons simples. Les électrons de valence délocalisés se déplacent autour de cet arrangement circulaire d'atomes: on parle alors de liaison pi. Les liaisons sont considérées comme hybrides entre une liaison covalente simple ou double mais les six liaisons sont identiques. Ces composés insaturés se prêtent facilement à des transformations par réactions chimiques et donnent naissance à des produits nouveaux, surtout dans le domaine des matières plastiques.

Le plus simple des hydrocarbures aromatiques est le benzène C_6H_6 . Avec deux cycles benzène accolés, on a le naphthalène $C_{10}H_8$ et le biphenyle [$C_{12}H_{10}$] (2 cycles liés par liaison simple). Dans les alkylbenzènes, on aura le toluène [$C_6H_5-CH_3$].

Généralités sur les polymères

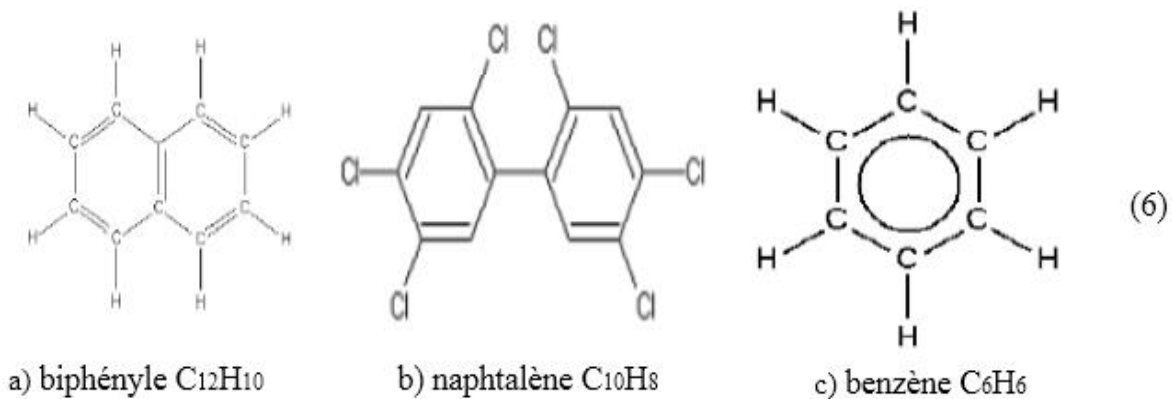


Figure. I.2 hydrocarbures aromatiques (alkylbenzènes) Benzène Naphtalène Biphénile
 Suivant le nombre d'atomes de carbone, on fait précéder le suffixe -ane, -ène ou -yne par le préfixe: 1 méth-/2 éth-/3 prop-/4 but-/ 5 pent-/6 hex-/7 hept-/8 oct-/9 non-/10 déc-

ALCANES	ALCENES	ALCYNES
Liaison covalente simple (liaisons sp ³)	Liaison covalente double (liaisons sp ²)	Liaison covalente triple (liaisons sp)
Composés saturés	Composés insaturés	Composés très insaturés
Hydrocarbures saturés à chaîne ouverte. Formule générale C _n H _{2n+2} Synonyme : PARAFFINE.	Hydrocarbures insaturés acycliques présentant une double liaison carbone-carbone. Formule générale C _n H _{2n} Synonyme : OLÉFINE.	Hydrocarbures insaturés acycliques comportant une triple liaison carbone-carbone. Formule générale C _n H _{2n-2}
Méthane CH ₄ Ethane C ₂ H ₆ ...	Ethylène C ₂ H ₄ Propène C ₃ H ₆ ...	Acétylène C ₂ H ₂ Propyne C ₃ H ₄ ...

I.5. Polymère solide amorphe et semi cristallin

Le polymère est dit amorphe si le désordre moléculaire est complet. Il n'y a pas de distance constante entre les macromolécules et aucune régularité dans l'arrangement et l'orientation de celles-ci dans des zones submicroniques. Les chaînes sont enchevêtrées sous forme de pelotes statistiques (figure I.3). Les segments de chaînes sont capables de créer une

Généralités sur les polymères

certaine mobilité moléculaire si des espaces libres sont régulièrement distribués dans tout le volume du matériau. Ces espaces constituent le volume libre du matériau qui détermine la mobilité des macromolécules et l'aptitude du polymère à changer de conformation.

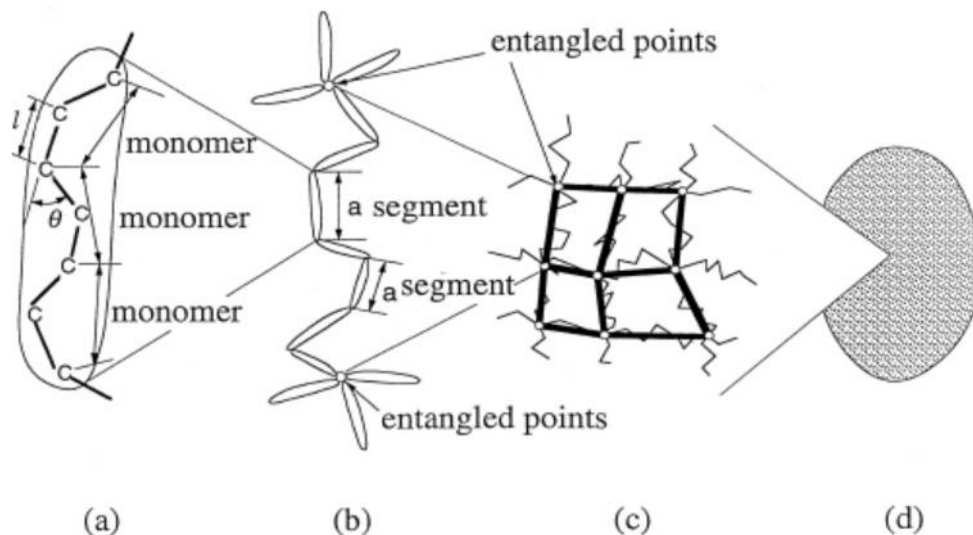


Figure I.3. Schématisation de la structure des polymères amorphes à différentes échelles [16]

[a]- Constitution d'un segment de chaîne, [b]- macromolécule

[c]- Enchevêtrement macromoléculaire [d]- structure macroscopique homogène et isotrope

Sous l'influence de certaines actions physiques, des zones ordonnées, caractérisées par un ordre à grande distance, pourront apparaître au sein du polymère. C'est la structure semi cristalline. Sa morphologie se présente localement comme un ensemble de lamelles cristallines, séparées entre elles par une phase amorphe (Figure I.4). Les deux phases sont liées entre elles par des segments de chaînes macromoléculaires appelés molécules de lien, car ces dernières peuvent participer à la formation de plusieurs lamelles cristallines en même temps [17, 18].

Généralités sur les polymères

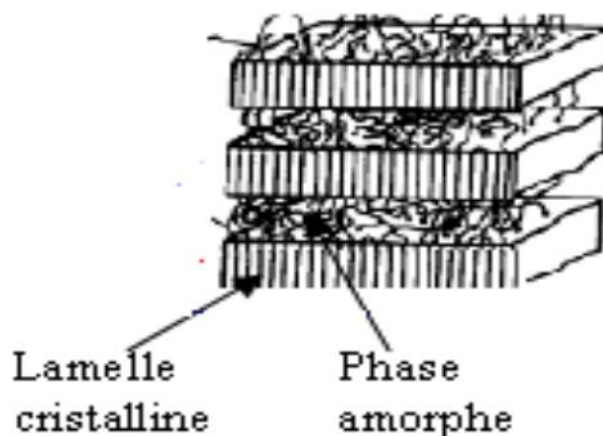


Figure I.4. Structure d'un polymère semi-cristallin

I.6. Différentes classes de polymères

Il y a plusieurs classifications des composés macromoléculaires selon qu'on choisisse l'origine, le type d'architecture, la structure chimique des motifs ou le type de polymérisation.

I.6.1 Classification selon l'origine:

Les polymères classés selon l'origine peuvent être :

- des polymères normaux (naturels): ils sont les composés organiques formant la matière vivante, comme les protéines, les acides nucléiques, la cellulose, chitine...
- des polymères obtenus par modification chimique d'un polymère naturel, par exemple la cellulose méthylique.
- des polymères synthétiques: ils sont les plastiques, les élastomères, les fibres, les adhésifs [03].

I.6.2. Classification selon l'architecture [04]

Selon Tomalia [06], les architectures macromoléculaires peuvent être divisées en quatre grandes familles: linéaires, ramifiées, réticulées et plus récemment polymères dendritiques (fig. I.5).

Généralités sur les polymères

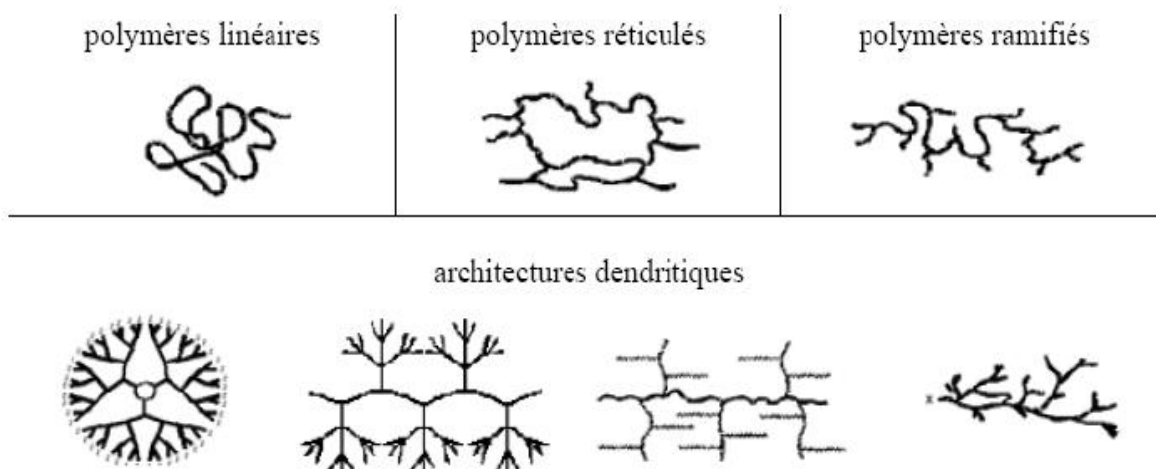


Figure .I.5. Classification des architectures macromoléculaires selon Tomalia [05].

- Les polymères de l'architecture linéaire sont principalement obtenus par des techniques de polymérisation en chaîne depuis beaucoup d'années, radicalaire contrôlée ou des réactions de polymérisation par des étapes ou la polycondensation.

- Les architectures ramifiées : proviennent du transfert de chaînes ou produits par des réactions de la greffe. Dans tous les cas, ces architectures linéaires ou ramifiées définissent le champ du thermoplastique. Le nylon, le plexiglas (polymère linéaire) dont la production a commencé dans les années 1930, le polyéthylène faible densité (polymère branché) produit à partir des années 1960, sont des exemples de thermoplastiques.

- les polymères réticulés ou «crosslinked polymers » : l'introduction des liaisons covalentes entre les chaînes des polymères linéaires ou ramifiées donne cette troisième famille. Paul Flory a étudié le premier ces nouvelles architectures au début des années 1940. Généralement, elles définissent le champ des thermodurcissables. Les résines époxydes et les caoutchoucs sont des exemples des systèmes polymères réticulés. Les systèmes dendritiques constituent la quatrième famille d'architecture macromoléculaire. C'est Paul Flory en 1953, le premier qui a évoqué, dans son livre célèbre "Principles of Polymer Chemistry" [07], la possibilité de synthétiser des dendrimères à partir des monomères multifonctionnels. Mais, c'est à la fin des années 1970 que la première synthèse des dendrimères a été décrite par Vögtle (qu'il a appelé arborols) [08], suivie par Tomalia [09] et Newkome [10].

Généralités sur les polymères

I.6.3. Classification selon la structure chimique

La structure chimique permet une classification des composés macromoléculaires en homopolymères et copolymères.

a) Les homopolymères

Sont les polymères qui ont seulement une unité. Ces homopolymères sont des longues chaînes constituées par la répétition d'un monomère. Leurs propriétés mécaniques, écoulement à l'état fondu, optique, sont dues à la structure chimique des monomères et à la longueur des chaînes [11]. Il existe différentes familles dans les homopolymères, homopolymères linéaires, branchés et étoilés.

b) Les copolymères

Sont les polymères qui ont plusieurs unités. Les copolymères peuvent être classifiés dans différentes familles, citant les modes statistique, alternatif, séquencé et greffé.

I.6.4. Classification selon le comportement thermique

Les polymères sont souvent classifiés selon leurs propriétés thermodynamiques en trois types:

- Les thermoplastiques.
- Les thermodurcissables.
- Les élastomères.

Dans ce qui suit, nous nous intéressons aux thermoplastiques et, plus exactement, aux thermoplastiques techniques polypropylène, PP, qui fait objet de cette étude.

a) Les thermoplastiques

Ils sont ramollis sous l'effet de la chaleur. Ils deviennent flexibles, malléables et durcissent quand ils sont refroidis. Ces matériaux préservent leurs propriétés et ils sont facilement recyclables. Leurs polymères de base sont constitués par des macromolécules linéaires reliées par des liaisons faibles qui peuvent être cassés sous l'effet de la chaleur ou des contraintes fortes. Ils peuvent alors glisser les uns par rapport aux autres pour prendre une forme

Généralités sur les polymères

différente et quand la matière se refroidit, les liaisons sont reformées et les thermoplastiques gardent leurs nouvelles formes [12]. On peut citer :

a)-1 Thermoplastiques techniques : polypropylène (PP)

Le polypropylène (ou polypropène) PP est de formule chimique : $(-\text{CH}_2-\text{CH}(\text{CH}_3)-)_n$, est un polymère thermoplastique semi-cristallin de grande consommation. Le polypropylène est une polyoléfine résultant de la polymérisation des monomères propylènes $[(\text{CH}_2=\text{CH}-\text{CH}_3)]$ en présence de catalyseurs suivant principalement le procédé Ziegler-Natta [20].

Propriétés du polypropylène	
Densité	0.905
Température de fusion	165 – 170 °C
Module élastique	1.0 – 1.4 GPa
Limite d'élasticité	25 – 38 MPa
Déformation à la rupture	300%
Coefficient de dilatation	$175 \cdot 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}$
Température de mise œuvre	190 – 285 °C

Tableau. I.2 : caractéristique du polypropylène [21].

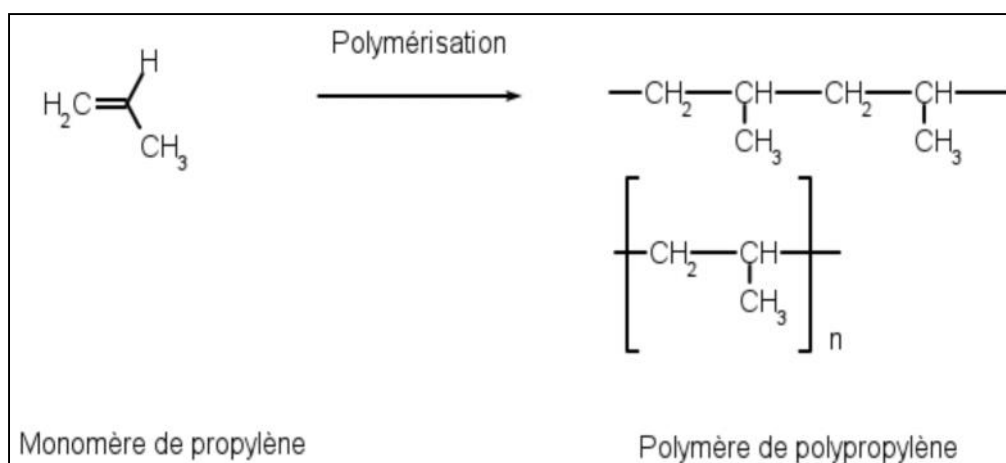


Figure I.6. La structure moléculaire du polypropylène [21]

Généralités sur les polymères

b) les thermodurcissables :

Les matériaux thermodurcissables sont les produits dont la transformation mène, par une réaction chimique, aux composés macromoléculaires tridimensionnels qui sont des matériaux thermodurcis ou des thermorigides. Dans ce cas, les chaînes de départ sont beaucoup plus courtes et plus réactives. Ces chaînes sont liées ensemble chimiquement. Cette réaction mène aux liaisons chimiques rigides et met en jeu toutes les molécules pour former un réseau tridimensionnel [13].

c) Les élastomères :

Ces polymères ont les mêmes qualités élastiques que le caoutchouc. Un élastomère au repos est composé de longues chaînes moléculaires pliées vers le haut sur eux mêmes. Sous l'action d'une contrainte, les molécules peuvent glisser les unes par rapport aux autres et devenir déformées [14].

I.7. Applications des polymères

Les polymères sont devenus le composant essentiel d'un nombre très important d'objets habituels et courant, dans lesquels, ils ont souvent remplacé les substances naturelles. Les cinq familles les plus utilisés sont :

- ✓ Les polychlorures de vinyles (PCV): utilisés en tant que pièces rigides, tuyauterie, films de cachetage.
- ✓ Les polyéthylènes (PE): utilisés en tant qu'emballage transparent et pièces rigides.
- ✓ Les polypropylènes (pp) et les polystyrènes (PS): pièces rigides et fibres.
- ✓ Les polyesters saturés: dans les produits de beauté, surface d'enduit, peintures, vernis, plastifiants pour d'autres polymères, polyester insaturés, films de textile, fibres, matières composites.
- ✓ Les polyuréthanes (PU). Citons également les élastomères qui viennent pour de diverses familles et/ou du caoutchouc normal et dont l'utilisation principale est dans le domaine des pneumatiques.

Généralités sur les polymères

I.8. Comportement mécanique des polymères

I.8.1 Introduction

Le comportement mécanique des polymères est caractérisé par une très grande diversité apparente. En effet, pour les mêmes conditions d'utilisation, et d'un point de vue technologique, on peut trouver des polymères qui sont, soit rigides fragiles, soit ductiles, soit caoutchoutiques.

Ainsi, dans la famille des polymères, on peut retrouver un grand nombre de types de comportement : viscoélastique, visco plastique, hyper élastique, durcissant, endommageable.

Cette diversité se retrouve, pour un même polymère, si l'on fait varier certaines de ses caractéristiques, ou simplement ses conditions d'utilisation. Il peut être rigide fragile, ductile ou élastique etc.

Ceci ne veut pas dire que le comportement d'un polymère est variable, voire incontrôlé. Ce sont les paramètres contrôlant son comportement et les processus élémentaires envisageables qui sont nombreux.

I.8.2 Présentation générale du comportement mécanique des polymères

Les matériaux polymères sont formés d'unités structurales qui sont les motifs monomères liés entre eux par des liaisons intermoléculaires faibles appelées liaisons de "Van Der Waals". Ces liaisons assurent la cohésion d'un polymère surtout aux basses températures. De plus, dans la plupart des polymères, principalement les thermoplastiques, qui nous intéressent dans cette étude, les mouvements relatifs de segments macromoléculaires devenant possibles dans un certain domaine d'état lié à la température (manifestations thermiquement activées), font naître des phénomènes dissipatifs traduits globalement par la viscoplasticité. Par conséquent, d'un point de vue mécanique, un matériau polymère se caractérise par un comportement possédant simultanément trois composantes :

- Une composante élastique réversible, qui prédomine dans les basses températures, notamment en deçà de la température de transition vitreuse T_g , pour des vitesses de sollicitation élevées, ou pour des chargements très faibles, avec un module et une loi de comportement de Hooke

Généralités sur les polymères

- $(\sigma = E \epsilon)$;
- Une composante viscoplastique irréversible dépendant du temps, qui prévaut aux températures élevées et aux grandes vitesses de sollicitation. Dans ce cas, la contrainte est liée à la vitesse de déformation par la loi de Newton $(\sigma = \eta \dot{\epsilon})$;
- Une composante visqueuse ou élastoviscoplastique combinant les deux caractères précédents à un domaine de températures intermédiaires supérieures à la température de transition vitreuse. La déformation est non seulement fonction de la température, mais aussi du temps (ou de la vitesse de déformation). Lorsque la contrainte est supprimée, il subsiste une déformation rémanente qui disparaît au cours du temps parfois lentement (viscoélasticité linéaire) ou tend vers une faible composante irréversible (élastoviscoplasticité).

Il est primordial de noter que parmi les différentes catégories de matériaux polymères, la viscoélasticité donne sa nature au comportement mécanique essentiellement chez les matières thermoplastiques. Ainsi, pour cette classe de polymères, l'effet viscoélastique peut être très prononcé et se caractérise par sa forte dépendance de la température et du temps.

I.8.3. Différents processus de déformation [26].

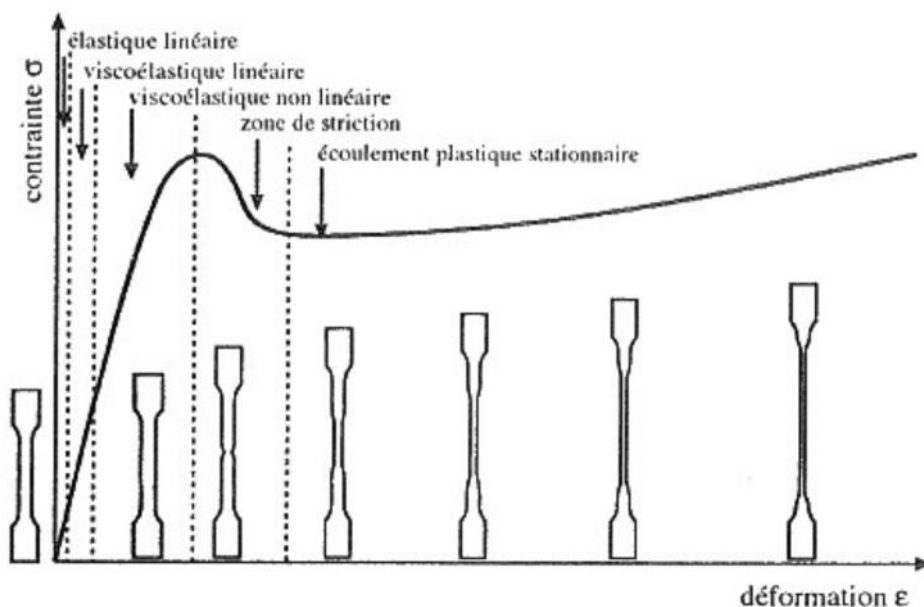


Figure. I.7 Courbe contrainte-déformation (essai de traction) d'un thermoplastique semicristallin et représentation schématique d'une éprouvette de traction

Dans les différentes zones

Généralités sur les polymères

En observant la (figure I.7) on peut définir dans l'ordre, le long du trajet de chargement, les processus de déformation suivants :

-l'élasticité linéaire a lieu pour les très petites déformations au voisinage de l'instant $t = 0$

Du début du chargement. C'est un régime dit à réversibilité instantanée [27] ; c'est-à-dire

Que le chemin suivi dans le plan. (σ, ϵ) est réversible.

-la viscoélasticité linéaire se produit pour les petites déformations, cette partie du trajet du chargement, le module de fluage n'est pas constant, comme le module d'Young en élasticité linéaire, mais dépend du temps. Ce phénomène est dit à "réversibilité retardée" [27]

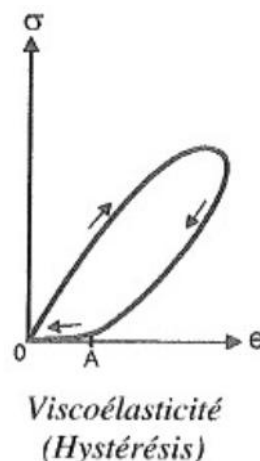


Figure. I.8 Courbe d'hystérésis du comportement viscoélastique linéaire lors d'un essai cyclique de traction-compression à vitesse de déformation constante

-Au-delà de la zone de viscoélasticité linéaire, pour les petites et moyennes déformations, la courbe contrainte-déformation parcourt un domaine où le module de fluage ne dépend plus uniquement de la durée du chargement, mais également de l'intensité du chargement ; il s'agit ici de la viscoélasticité non linéaire. Dans cette partie de la courbe, les composantes irréversibles de la déformation totale deviennent non négligeables et dominant de plus en plus. Cette irréversibilité est de nature visqueuse, à savoir issue du glissement entre les segments de chaînes que l'on nomme écoulement plastique.

Généralités sur les polymères

-Lorsque l'on atteint le seuil d'écoulement σ_y , appelé aussi seuil de plasticité, le phénomène de striction survient et on rentre dans le domaine élastoviscoplastique des grandes déformations.

I.8.4. Comportement Contrainte-Déformation

Un grand nombre des paramètres utilisés pour caractériser les métaux, tel que le module d'élasticité, la résistance à la traction la résistance au choc et la limite d'endurance, servent à décrire les propriétés des polymères. Un simple essai de traction permet de faire ressortir certains des paramètres mécaniques de nombreux polymères [22] la plupart des caractéristiques mécaniques des polymères variant beaucoup en fonction de la vitesse de déformation, de la température et de la nature chimique de milieu (présence d'eau, d'oxygène des solvant organiques, etc...). Certaines modifications doivent être apportées aux méthodes d'essai et aux configurations d'éprouvette propres aux métaux lorsqu'elles sont appliquées aux polymères, notamment aux matériaux fortement élastiques tels que les caoutchoucs. La figure I.8 présente trois types de comportement contrainte-déformation des matériaux polymères, la courbe (A) illustre le caractère en contrainte-déformation d'un polymère fragile dont la rupture s'accompagne d'une déformation élastique. La courbe (B) montre que le comportement des matériaux plastiques ressemble à celui de nombreux matériaux métalliques ; la déformation élastique est toujours suivie par un écoulement plastique. Pour ça part, la courbe (C) correspond à un matériau entièrement élastique, analogue à celle des caoutchoucs (déformation réversibles prononcées résultant d'une contrainte faible), qui manifeste un élastomère.

Généralités sur les polymères

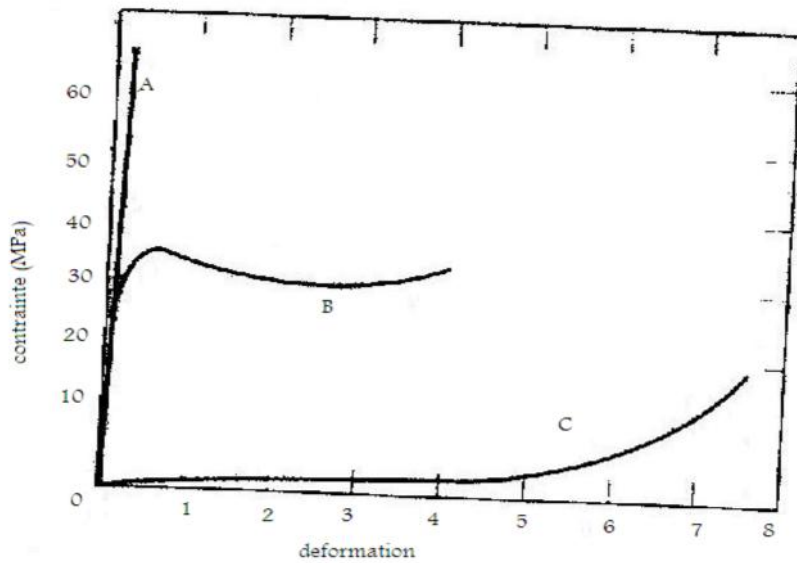


Figure I.9 Comportement Contrainte –Déformation des polymères a) fragiles, b) élastique, c) élastomères.

Le module d'élasticité (aussi appelé module de traction dans le cas des polymères) et l'allongement à la rupture des polymères ce détermine de la même façon que les ceux des métaux [23] la limite d'élasticité (R_e) des polymères plastique (courbe B) équivaut à la valeur maximale de la courbe, qui se situe à la toute fin de la région d'élasticité linière. De plus, la résistance à la traction (R_m) correspond à la contrainte entraînant une rupture (Figure I.10) et peut prendre une valeur supérieure ou inférieure à R_e .

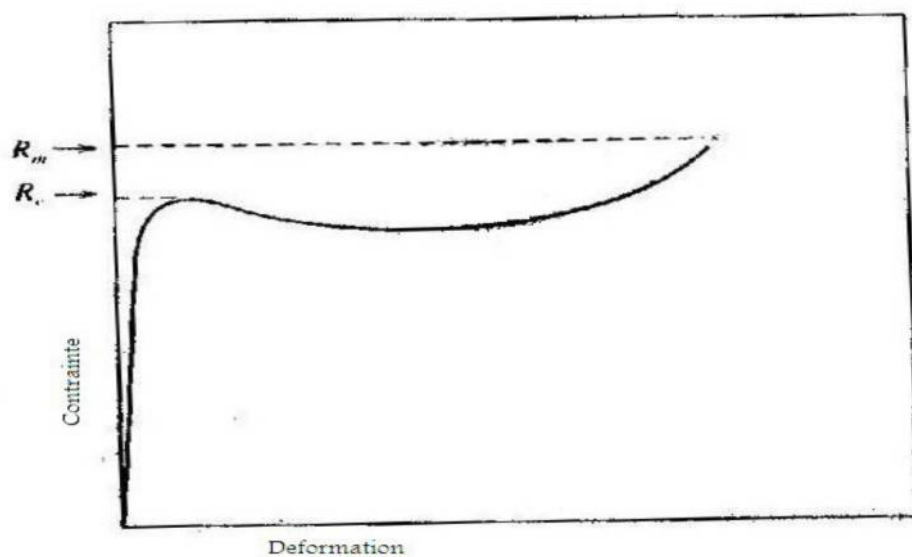


Figure I.10 Courbe Contrainte -Déformation d'un polymère plastique

Généralités sur les polymères

En ce qui concerne ces polymères plastique, la résistance évoquée renvoie généralement a la résistance a la traction.

Le tableau I.3. Présente les propriétés mécaniques de plusieurs polymères. [Modern plastics encyclopedia'96©1995, the McGraw-hill companies.] [24]

matériau	Masse Spécifique (g/cm ³)	Module d'élasticité (GPa)	Résistance a la traction (MPa)	Limite d'élasticité (MPa)	Allongement a 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
Polytetrafluoroéthylène	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	34.5-62.4	-	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(polytétréphthalate 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

Les propriétés mécaniques des polymères se distinguent à maints égards de celles des métaux .ainsi, le module d'élasticité de certains polymères fortement élastique ne dépasse pas 7 MPa, tandis que celui de certains polymères très rigides atteint 4 GPa. Par cotre, le module d'élasticité des métaux est beaucoup plus élevé et peut prendre des valeurs allant de 48GPa à 410 GPa .quant la résistance a la traction maximal, elle est de l'ordre de 100MPa pour les polymères, alors qu'elle atteint 4100MPa dans certain alliage métallique .de plus, si, pour les métaux en atteint rarement un allongement plastique supérieur a 100%, certain polymères fortement élastique subissent parfois un allongement pouvant atteint quelque 1000% !

Généralités sur les polymères

Il faut également souligné que les caractéristiques mécaniques des polymères se modifient sensiblement en fonction des variations de température de part et d'autre de la température ambiante.

I.8.5. Facteurs influencent sur les propriétés mécaniques des polymères

I.8.5.1 Le traitement thermique

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

L'augmentation de la température de recuit des matériaux non étirés qui sont soumis a des traitements thermiques isopériodiques aux conséquences suivantes :

- 1) un accroissement du module d'élasticité.
- 2) une augmentation au module d'élasticité.
- 3) une diminution de la ductilité. il faut noter ici que les effets imputables au recuit sont contraires à ceux généralement observés dans les matériaux métalliques [McCrum1997] [25], soit un affaiblissement, un adoucissement et une augmentation de la ductilité.

En ce qui a tait à certaines fibres polymères étirées, le recuit a des effets inverses sur le module d'élasticité a ceux qu'il a sur les matériaux non étires ; le module d'élasticité décroît avec la hausse de la température de recuit en raison de l'orientation des moins prononcé de la chaîne et de la cristallinité induite par la déformation.

CHAPITRE II

MÉLANGES

DES

POLYMÈRES

Mélange des polymères

II.1. Introduction

L'intérêt porté depuis ces vingt dernières années aux mélanges de polymères provient du fait qu'ils constituent un moyen peu onéreux de réaliser de nouveaux matériaux offrant des propriétés intermédiaires et parfois même supérieures à celles de leurs constituants, en partant de monomères et de polymères facilement accessibles. Une autre justification réside dans la nécessité de plus en plus pressante de recycler les déchets industriels et ménagers, recyclage qui est d'autant plus délicat que les polymères sont le plus souvent triés de façon imparfaite à cause de contraintes économiques. En effet, plus la matière triée sera pure, plus la quantité récupérée sera faible.

II.2. Mélanges de polymères - Rappel théorique

La principale difficulté rencontrée dans la préparation des mélanges de polymères aux propriétés intéressantes, est la non miscibilité quasi-générale des polymères de structure chimique différente. Il est donc essentiel de cerner le phénomène de démixtion.

II.2.1. Etat de miscibilité

Les espèces chimiques en général, et les espèces polymères en particulier, sont le plus souvent non miscibles "spontanément". D'après le second principe de la thermodynamique, l'état de miscibilité de tout mélange est gouverné par l'enthalpie libre de mélange G_m qui s'exprime par

$$\Delta G_m = \Delta H_m - T \cdot \Delta S_m \quad (1)$$

Où H_m et S_m sont respectivement l'enthalpie et l'entropie du mélange. La condition nécessaire, mais non suffisante, pour qu'un mélange soit miscible est que G_m soit négative. A l'inverse, le mélange se sépare en deux phases dès lors que G_m est positive.

L'approche thermodynamique la plus largement utilisée pour exprimer G_m est la théorie de réseau de Flory-Huggins (1) selon laquelle l'enthalpie libre G_m par site, dans le cas d'un mélange binaire de constituants isomoléculaires, est donnée par :

Mélange des polymères

$$\frac{\Delta G_m}{RT} = \frac{\Phi_1}{Z_1} \cdot \ln \Phi_1 + \frac{\Phi_2}{Z_2} \cdot \ln \Phi_2 + \chi_{12}(T) \cdot \Phi_1 \cdot \Phi_2 \quad (2)$$

Avec R : constante des gaz parfaits

T : température absolue

Φ_1 et Φ_2 : fractions volumiques des constituants 1 et 2

Z_1 et Z_2 : définis à partir des volumes molaires V_1 et V_2 des constituants 1 et 2 et du volume de référence V

$$Z_1 = \frac{V_1}{V_R} \quad \text{et} \quad Z_2 = \frac{V_2}{V_R} \quad (3)$$

χ_{12} : Paramètre d'interaction binaire

Toute étude de la miscibilité d'un mélange de polymères va finalement permettre de classer le système considéré dans l'une des trois catégories suivantes [28] :

- les polymères sont **non miscibles**, quelles que soient leurs proportions relatives et la température considérée,
- les polymères sont **miscibles** en toutes proportions sur tout le domaine de température où ils sont stables,
- les polymères sont **partiellement miscibles** : selon les conditions (température, composition), l'état thermodynamiquement stable correspond soit à l'existence d'une phase unique homogène, soit à l'existence de deux phases distinctes, dont chacune est enrichie en l'un des deux constituants.

Mélange des polymères

II.2.2. Morphologies des mélanges de polymères

L'optimisation des possibilités d'application des mélanges de polymères passe nécessairement par le contrôle de leur morphologie finale. Les principales morphologies rapportées à l'échelle macroscopique dans la littérature sont finalement assez bien résumées sur les illustrations de la Figure 2-1. A cette échelle, la morphologie globale d'un mélange de deux polymères 1 et 2 pourrait se limiter à l'une des trois possibilités suivantes :

- une morphologie particulaire où le polymère 1 est dispersé au sein du polymère 2,
- une morphologie bicontinue où les phases 1 et 2 sont interconnectées,
- une morphologie particulaire, mais correspondant cette fois à la dispersion du polymère 2 dans le polymère 1.

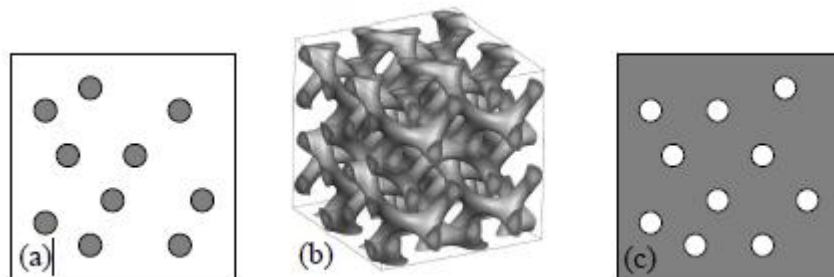


Figure II.1: Morphologie des mélanges (a) particulaire de 1 dans 2, (b) bicontinue et (c) particulaire de 2 dans 1

Bien évidemment, le passage à une échelle d'observation inférieure révèle que la réalité est beaucoup plus complexe [29].

Dans le cas particulier des copolymères à blocs qui peuvent, à l'extrême, être considérés comme des mélanges de polymères. A leur sujet, la littérature [30] recense un grand nombre de morphologies (dites *ordonnées*) selon la composition des copolymères. Prenons l'exemple d'un copolymère diblocs poly(A-*b*-B) contenant majoritairement le composant A. Trois morphologies peuvent être envisagées (dans chacun des cas, le composant A constitue la phase continue ou matrice) [30] :

Mélange des polymères

- la morphologie du copolymère correspond tout d'abord à une dispersion de particules sphériques de B dans une matrice A selon un arrangement correspondant à celui de la maille cristallographique d'un réseau cubique centré.
- Puis, au fur et à mesure que le pourcentage molaire du monomère B augmente, l'arrangement s'effectue en cylindres de B disposés en réseau hexagonal dans la matrice A.
- Enfin, pour un copolymère où la dissymétrie de composition est quasiment nulle, une morphologie de type bicontinu est obtenue.

II.3 Critères simple de compatibilité

L'éventuelle transparence des films constitue la première propriété qui est prise en considération pour discuter de la compatibilité d'un couple de polymères non cristallisables

(La partie amorphe). Une seconde propriété intéressante, que les polymères soient cristallisables ou non, est le phénomène de transition vitreuse. Enfin, une troisième propriété peut être mise à profit dans le cas particulier où un polymère est cristallisable: l'abaissement du point de fusion [31].

II.3.1 Transparence des films

Il s'agit-là d'un test simple, puisque une observation visuelle peut suffire. L'opacité du film est révélatrice de la présence d'hétérogénéité dans le mélange, dans la mesure où elle traduit la diffusion du rayonnement visible par des domaines de grande taille. Elle constitue donc un critère positif d'incompatibilité. La méthode ne peut pas convenir lorsque la différence d'indice de réfraction entre les deux partenaires du mélange est très faible car l'intensité de lumière diffusée est également très faible [31].

II.3.2 La Transition vitreuse

Le phénomène de transition vitreuse constitue une seconde façon d'estimer la compatibilité. L'existence de deux transitions vitreuses bien distinctes dans un mélange de 2

Mélange des polymères

polymères A et B constitue un critère positif d'incompatibilité. L'observation d'une transition unique mais étalée sur une gamme de températures allant quasiment de T_{vA} à T_{vB} est révélatrice d'une limite de miscibilité entre les 2 constituants. En effet, des systèmes réellement homogènes présentent une transition unique T_{vAB} , mais aussi peu étalée en température que celles des polymères purs [31].

II.3.3 Abaissement du point de fusion

Dans le cas particulier de mélange polymère-polymère dont un des constituants est cristallisable, l'observation d'un abaissement du point de fusion des cristallites est souvent présentée comme un critère de compatibilité des constituants dans la phase amorphe. Ce phénomène, dont l'ampleur croît avec la teneur en polymère non cristallisable, est expliqué par le rôle de diluant que joue le composé amorphe : l'effet est similaire à celui rencontré dans les mesures cryométriques ou la présence d'un soluté entraîne un abaissement de point de fusion du solvant [31].

II.4 Objectif de la comptabilisation

Les trois effets principaux recherchés lors de la comptabilisation d'un mélange sont :

- 1- Diminution de la tension inter faciale pour faciliter la dispersion.
- 2- Stabilisation de la morphologie afin d'éviter l'évolution de celle-ci au cours d'étapes de transformation et de mise en œuvre du matériau.
- 3- Augmentation de l'adhésion entre phases et donc amélioration des propriétés mécaniques du mélange.

En fonction de la méthode de comptabilisation choisie et du type de comptabilisant utilisé, chacun des trois objectifs précédents peut être plus au moins bien atteint.

Mélange des polymères

II.5 Classification des mélanges :

Il existe plusieurs types de mélanges de polymères: les systèmes homogènes obtenus à partir de polymère miscibles, les systèmes hétérogènes obtenus à partir de polymères non miscibles et les systèmes obtenus par mélange de polymères partiellement miscibles. Les mélanges de polymères peuvent consister en deux phases continues ou en une phase continue et une phase dispersée dans la première [32].

On peut constater que, du point de vue miscibilité et compatibilité, il est possible de diviser les mélanges de polymères en quatre groupes :

II.5.1 Mélanges de polymères totalement incompatibles

Cette incompatibilité des composants est due soit à la structure chimique complètement différente, comme dans le cas du mélange PVC/PE, soit à la masse molaire relative très élevée. L'incompatibilité des composants provoque la formation d'une structure polyphasique composée de grosses particules ou plutôt de petits domaines ayant une mauvaise adhésion interfaciale. Une telle structure donne généralement des propriétés mécaniques médiocres [33].

II.5.2 Mélange de polymères miscibles

On peut citer quelques exemples de mélanges miscibles, mutuellement solubles à toute proportion, capables de former une seule phase dans une gamme bien déterminée de température, de pression et de composition. Le PS avec le PPO (polystyrène/ poly(oxyde de phénylène) et le PVC avec le polymères &-méthylstyrène-méthacrylonitrile [34].

II.5.3 Mélange de polymères partiellement miscibles

Se sont les mélanges dont la miscibilité mutuelle correspond seulement à certains rapports. On peut citer à titre d'exemple le mélange de polystyrène avec le polycarbonate (PS/PC) [35].

Mélange des polymères

II.5.4 Mélange de polymères compatibles

Il s'agit d'un groupe de mélanges de polymères mutuellement non miscibles mais compatibles de telle sorte qu'un malaxage convenable permet de former des structures dont la taille des domaines de phases miscibles est inférieure aux domaines de phases des polymères incompatibles. Les propriétés mécaniques, surtout la résistance aux chocs, sont améliorées grâce aux forces d'adhésion inter faciales [36].

II.6. Les différentes méthodes de comptabilisation

Les deux stratégies les plus fréquemment utilisées dans la comptabilisation des mélanges de polymères non miscibles sont :

1. L'ajout d'un copolymère préformé, de nature et de structures adaptées, susceptible d'interagir avec chacune des phases en présence ;
2. La formation in-situ d'un copolymère par réaction chimique à l'interface entre les phases au cours de la préparation du mélange.

II.6.1. Utilisation d'un copolymère préformé

II.6.1.1.Principe

Cette voie de comptabilisation est similaire à l'utilisation des surfactants traditionnels pour la préparation et la stabilisation des émulsions liquide/liquide (figure II.2). Pour jouer son rôle, le copolymère doit venir se positionner à l'interface entre les deux phases afin d'interagir avec les constituants du mélange. Dans cette voie de comptabilisation, un phénomène important doit être pris en compte : celui de la diffusion du copolymère à l'interface liquide/liquide ; en effet, la mobilité de ce dernier, dans le milieu fondu, est beaucoup plus réduite [39].

Le choix du copolymère comme comptabilisant est basé sur la miscibilité de ses segments, avec au moins un des composants du mélange. Les copolymères sont considérés comme agents inter faciaux vrais, puisqu'ils tendent à se concentrer et à agir à l'interface comme émulsifiants [38] (figureII. 2).

Mélange des polymères

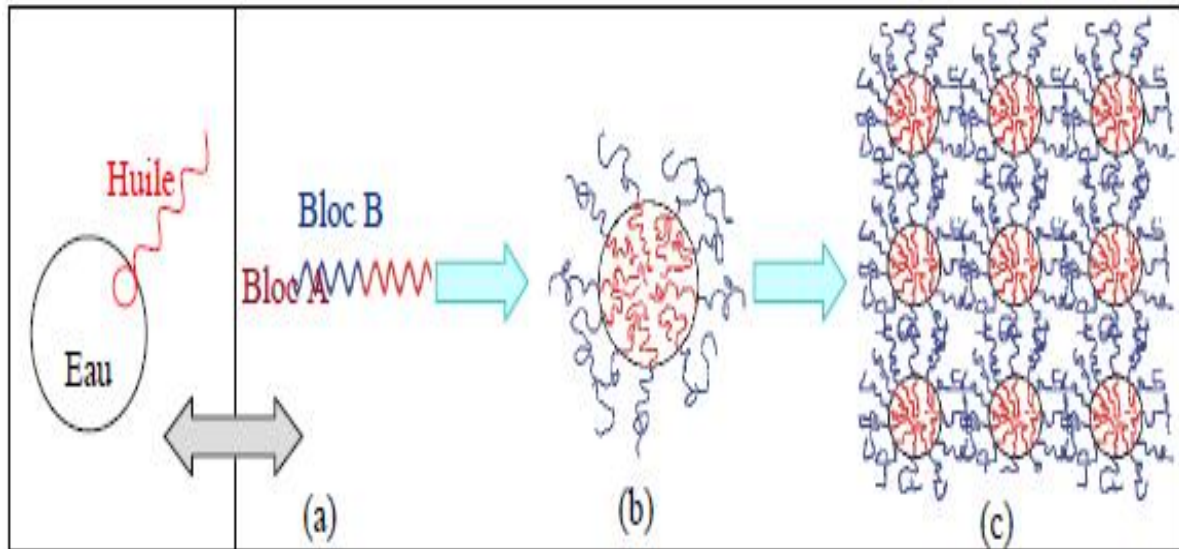


Figure II. 2: Analogie entre émulsifiant traditionnel et copolymère à bloc, en tant qu'espèces actives en surface d'un mélange

II.6.1.2 Influence de la nature du copolymère :

Pour les mélanges à comptabiliser, le choix du comptabilisant est basé sur la miscibilité des séquences de ce dernier avec les composants du mélange. De même, la faible masse molaire des chaînes de cet agent comptabilisant va faciliter leur diffusion dans le milieu fondu (viscosité élevée) et va privilégier leur accessibilité et leur concentration dans les zones d'interaction c'est-à-dire l'interface entre les deux phases du mélange [38]. La solubilité des séquences du comptabilisant dans les homopolymères, est un facteur clef [39 40] ; elle contrôle la morphologie du mélange, sa stabilité ainsi que l'adhésion à l'interface.

Les effets observés sur la morphologie sont liés à des organisations très différentes à l'interface (figure II.3). Le copolymère à bloc s'organise en monocouche autour des particules, alors que les chaînes de copolymère statistique se positionnent de façon désordonnée. De ce fait, la couche de copolymère à l'interface a tendance à s'épaissir quand le taux de copolymère statistique dans le mélange augmente.

Mélange des polymères

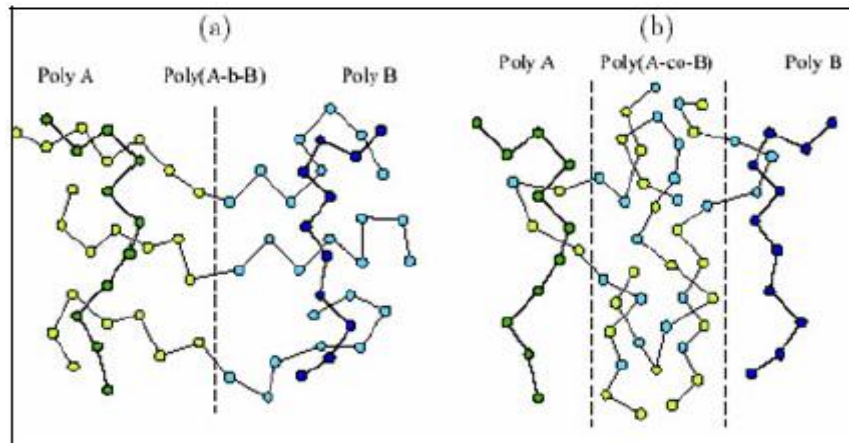


Figure II. 3 : Positionnement d'un copolymère comptabilisant à l'interface en fonction de sa microstructure : (a) copolymère à bloc et (b) copolymère statistique [30]

En comparant les effets des copolymères dibloc et tribloc, il a été mis en évidence qu'un copolymère dibloc était plus efficace sur la dispersion de la phase minoritaire. Par contre, l'utilisation d'un copolymère tribloc donne de meilleurs résultats sur les propriétés mécaniques [41] et la stabilisation de la morphologie [42]. Ceci pourrait résulter de la différence d'ancrage de ces deux types de copolymères à l'interface (figure II.3).

Tous les copolymères dibloc n'ont pas forcément le même effet comptabilisant. Un copolymère symétrique (même longueur de blocs) semble plus efficace qu'un copolymère dissymétrique [43]. L'utilisation d'un copolymère dibloc partiellement alterné au centre a, par contre, le même effet émulsifiant qu'un copolymère dibloc pur.

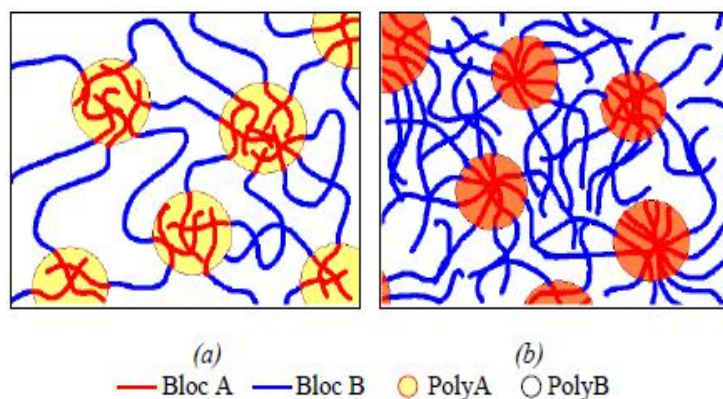


Figure II. 4: Positionnement d'un copolymère dibloc (a) ou tribloc (b) sur le polymère

Mélange des polymères

II.6.1.3 Effet du taux de copolymère

Expérimentalement, la taille des particules de phase dispersée a tendance à diminuer quand le taux de copolymère ajouté dans le milieu augmente, puis se stabilise ou augmente en fonction de la nature du copolymère [43, 45]. Cependant, quelques pourcents en poids de copolymère dibloc symétrique sont suffisants pour diminuer fortement la taille moyenne des domaines de phase dispersée [46, 47]. Ceci a également été montré théoriquement [48]. Cette quantité n'est pas forcément suffisante pour stabiliser le mélange. Il a été estimé que 5% à 20% de la surface des particules doivent être recouverts pour limiter la coalescence [46-48].

Parfois, un taux de copolymère plus important est nécessaire. Les écarts observés entre la théorie et l'expérience résultent de deux phénomènes superposés :

- Les chaînes de copolymère doivent diffuser vers l'interface. La cinétique de diffusion dépend de la viscosité du milieu mais aussi de la longueur des chaînes du copolymère.
- Il est possible que des micelles de copolymère se forment dans l'une des phases.

II.6.1.4 Influence de la masse molaire du copolymère

La concentration de copolymère à bloc symétrique nécessaire pour atteindre la taille minimale de phase dispersée diminue lorsque la masse molaire globale du copolymère augmente [45]. Par contre, cette taille minimale semble être indépendante de la longueur du copolymère. A taux égal de compatibilisant dans le milieu, la morphologie du mélange est d'autant plus stable que la masse molaire du copolymère est élevée. Ces constatations peuvent s'expliquer par le meilleur ancrage des longues branches dans chacune des phases par enchevêtrement. Les blocs doivent donc être d'une masse molaire supérieure ou égale à la masse molaire critique d'enchevêtrement, pour que le copolymère soit efficace pour la comptabilisation.

En revanche, plus la masse molaire du copolymère est élevée plus la concentration à partir de laquelle des micelles peuvent se former diminue. De plus, plus les copolymères sont de masses molaires élevées, plus leur cinétique de diffusion vers l'interface est lente. Il faut donc choisir au mieux le copolymère, de sorte à prendre en compte ces deux facteurs [44].

Mélange des polymères

II.8 Le recyclage des polymères

II.8.1 Introduction

Si des matériaux tels que l'acier, l'aluminium ou le papier, bénéficient depuis longtemps de filières de recyclage en place, il n'en est pas de même pour les plastiques pour lesquels la question du devenir des déchets a été posée beaucoup plus tard [49]. Les plastiques en fin de vie ont donc une très mauvaise image de marque du point de vue de l'environnement, d'autant plus qu'ils sont très voyants: ce qui fait la qualité de ces matériaux lors de leur utilisation pose problème lors de leur rejet. Les plastiques, légers, flottent dans l'eau, sont rejetés sur les berges et les plages ; ils résistent à l'humidité, aux agents chimiques, à la biodégradation. Ils sont brillants et de couleurs vives et claires. Cette pollution est surtout visuelle ; les plastiques ont, en effet, dans la plupart des cas un comportement neutre en décharge [49,50]. Mais, le fait que la durée de vie des produits en utilisation est plus courte que la durée de vie effective des matériaux pose donc problème. Il est dès lors clair que, pour éviter le gaspillage des ressources naturelles (les matières plastiques étant essentiellement produites à partir de la pétrochimie) et préserver l'environnement, le plastique, comme les autres matériaux, doit être recyclé.

II.8.2 Généralités sur les déchets plastiques [57]

On entend par déchet plastique, les résidus de processus de production, de transformation et de consommation, ou encore les produits plastiques destinés à l'abandon.

Il existe donc plusieurs types de déchets plastiques.

II.8.2.1 Les déchets plastiques industriels

Il s'agit de l'ensemble des déchets issus des processus de production des résines (essentiellement trouvés dans les sites pétrochimiques) et de transformation des résines en objets finis (principalement trouvés dans la filière de la plasturgie) :

- **Les déchets de production**

Ils proviennent des arrêts de réacteur de polymérisation, des purges de réacteurs et des

Mélange des polymères

Lots déclassés.

Ils sont homogènes et présentent la particularité d'avoir un degré de pollution faible, voire Inexistant. On y retrouve, en très grande majorité, les polymères de grande diffusion (PE, PP, PS et PVC).

- **Les déchets de transformation**

Ils proviennent de toutes les opérations de plasturgie permettant l'obtention de produits finis (extrusion, injection, soufflage, calandrage, . . .). On y retrouve, précisément, les carottes, lisières et bordures de ces opérations de thermoformage, les pièces présentant des défauts, ou encore, les chutes de démarrage et d'arrêt de machine.

Ces déchets peuvent être homogènes comme fortement hétérogènes (mélanges provenant

De la co-extrusion, co-injection, . . .) sont, en général, très peu souillés.

II.8.2.2 Les déchets plastiques de post-consommation

Comme leur nom l'indique, il s'agit de l'ensemble des déchets issus de la consommation industrielle ou des particuliers. On distingue :

- **Les déchets agricoles**

On retrouve essentiellement les films, sacs, liens, fûts et bidons de produits phytosanitaires.

La particularité de ce gisement réside dans ses fortes contamination (terre, cailloux) et pollution.

Il s'agit pour l'essentiel de polyoléfines (PE-bd, PE-hd et PP).

- **Les déchets commerciaux ou de distribution**

Il s'agit des emballages industriels et commerciaux qui sont en général de bonne qualité. Il y a également les fûts, bidons, sacs de grande contenance, conteneurs présents dans

Mélange des polymères

les secteurs de la chimie, l'agroalimentaire, le bâtiment et les travaux publics, pour le conditionnement et le transport de divers autres produits. Ces deux premiers gisements sont le domaine prépondérant des polyoléfines en majorité écrasante. Enfin, on peut aussi citer le cas des emballages en polystyrène expansé utilisés pour le calage lors du transport de produits fragiles, et dans une proportion moindre, pour les caisses à poisson et les plateaux horticoles.

- **Les déchets électriques et électroniques**

C'est un gisement issu de la filière de tous les produits électriques et électroniques tels que les ordinateurs, téléphones, appareils électroménagers et câbles en tout genre.

- **Les déchets ménagers**

Ils sont essentiellement constitués par les emballages.

Pour ce gisement, trois matières principales sont concernées: le PET (bouteilles de boissons gazeuses, eaux minérales, . . .), le PEhd (bouteilles de lait, produits lessiviels, . . .), et le PVC (bouteilles d'eau minérale, . . .).

- **Les déchets du bâtiment et des travaux publics**

On peut citer parmi eux, ceux provenant de l'huissierie, les tuyaux, revêtements de sols, profilés de fenêtre, conduits électriques, câbles, mousses d'isolation, . . .

Ces matériaux sont très fortement mélangés et leur degré de pollution est souvent élevé.

- **Les déchets de véhicules de transport**

Ils sont représentés par l'ensemble des plastiques constituant les véhicules hors d'usage (VHU) (en moyenne 14% en masse du véhicule).

Ces déchets constituent une fraction très hétérogène par rapport à la nature et l'âge. On y retrouve des polyoléfines, du PVC plastifié et additive, des polycarbonates, ABS et polystyréniques divers, des polyamides, des polyuréthanes, des résines thermodurcissables diverses, sans oublier les élastomères. Cette fraction ne cesse de croître du fait que les

Mélange des polymères

véhicules s'allègent de plus en plus et les équipements de sécurité sont en plein développement.

II.8.3 La valorisation des matières plastiques

La valorisation des matières plastiques prend une ampleur de plus en plus considérable, du fait de l'évolution des réglementations sur l'écologie et les demande sociétale et associative pour la préservation et la qualité de l'environnement.

Cette valorisation s'effectue dans le but de lutter contre la pollution de l'environnement, l'impact néfaste de certaines matières plastiques sur la santé, comme les emballages plastiques en PVC possédant du chlorure, et le gaspillage d'énergie. En effet, la majeure partie des matériaux plastiques sont des dérivés du pétrole et représentent près de 4% de la consommation mondiale des produits pétroliers.

Aujourd'hui, les domaines où la valorisation des déchets plastiques est la plus pratiquée sont l'automobile, avec le recyclage des VHU, l'électrique et l'électronique (EEE), l'emballage..

Outre la valorisation énergétique qui consiste à récupérer, par incinération, l'énergie thermique "stockée" dans le matériau plastique, il existe plusieurs formes de valorisations : le recyclage et l'utilisation des matériaux biodégradables.

II.8.3.1 Le recyclage

Le recyclage est préféré à la valorisation énergétique et est considéré comme l'une des meilleures voies de prise en compte du développement durable et est devenu, à cet effet, une priorité en terme de gestion du développement durable. En Union Européenne, les plastiques recyclés représentent en moyenne 23% de la consommation totale et un sujet particulièrement important dans leur recyclage.

Parmi la masse des déchets plastiques, nous retrouvons pratiquement toujours les mêmes polymères qui sont, en toute logique, les thermoplastiques de grande diffusion les plus produits. (Les figures II.1, II.2 et II.3) donnent une idée du pourcentage de production des

Mélange des polymères

différents polymères, de leurs grandes familles, ainsi que leur présence dans les différents domaines d'application.

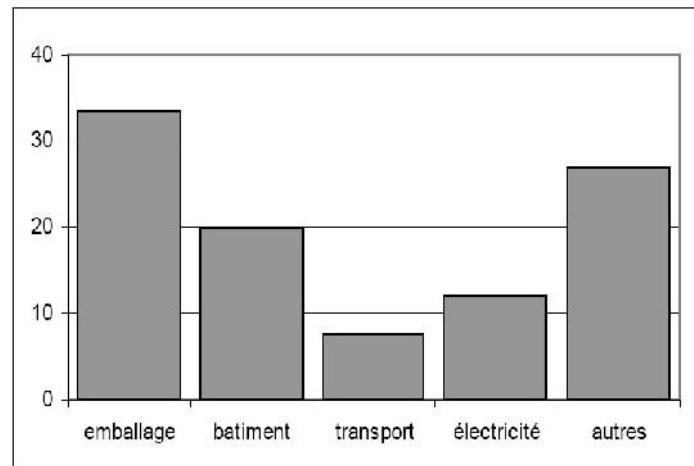


Fig. II.7 Principaux domaines d'application des matières plastiques en %

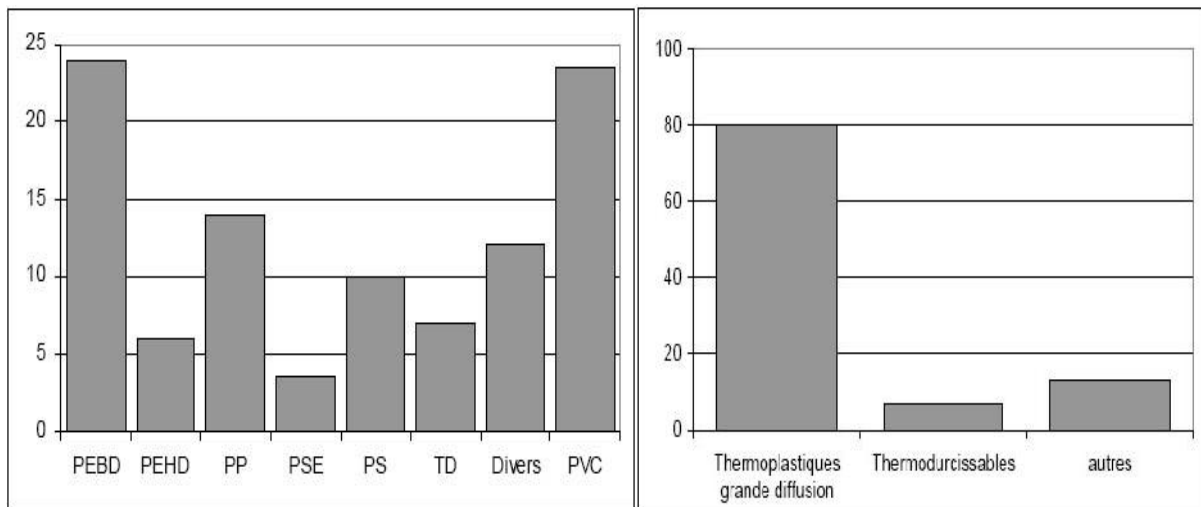


Fig. II.5 Répartition de la production de Polymères par type de produits en %

Fig. II.6 Répartition de la production des matières plastiques par grandes familles en %

Le recyclage peut lui-même se scinder en deux grandes familles qui sont le recyclage chimique et le recyclage mécanique. [57]

Mélange des polymères

a- Le recyclage chimique

Le recyclage des matières pour la chimie vise à décomposer les molécules constituantes des résines en matières premières utilisables à nouveau dans les raffineries, la pétrochimie et la chimie [49,50,51]. Un certain nombre de techniques sont actuellement à l'étude [51-52] :

- **Pyrolyse** : décomposition des molécules par chauffage sous vide ; ce procédé conduit à des hydrocarbures liquides ou gazeux utilisables ultérieurement dans les raffineries.
- **Hydrogénation** : traitement par l'hydrogène et la chaleur des polymères qui sont craqués en huiles hydrocarbonées utilisables dans les raffineries et les usines de produits chimiques.
- **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 ou d'ammoniac ou encore comme agent réducteur dans la production d'acier.
- **Décomposition chimique proprement dite** : certains polymères peuvent être décomposés pour obtenir les monomères ou les produits de base correspondants, réutilisables pour une nouvelle polymérisation.

Toutefois tous ces procédés n'ont pas encore prouvé leur rentabilité économique.

b- valorisation énergétique

Les plastiques constituent une source de chaleur considérable qui enrichit celle des ordures ménagères. En effet, alors qu'ils n'en représentent que 4 à 5 %, ils constituent de 15 à 20 % de l'énergie contenue valorisant ainsi la récupération de la chaleur produite qui peut être utilisée directement pour le chauffage ou sous forme d'énergie électrique [50, 51].

Cette solution n'est cependant pas parfaite car :

- Des matériaux coûteux partent en fumée.
- Elle peut induire une pollution par les gaz de combustion rejetés dans l'atmosphère.

Mélange des polymères

La récupération de la chaleur restera toutefois une alternative intéressante tant que l'on ne saura pas séparer les produits.

c- Recyclage mécanique ou valorisation matière

Le recyclage mécanique des plastiques consiste en une réduction dimensionnelle des produits suivie d'une refusions directe et d'un remoulage comme nouvelle matière, éventuellement après addition de produit vierge et/ou additifs permettant de restaurer (en partie) les propriétés initiales. Le produit ainsi obtenu est qualifié de régénéré [49, 50,51]. L'inconvénient de cette méthode est que toute contamination ou tout mélange peut diminuer la chance de recycler le déchet d'une manière valorisante.

Suivant les diverses procédés intervenant dans le cycle du recyclage mécanique, il existe plusieurs métiers du recyclage :

❖ La récupération

Elle consiste à préparer les matières à recycler. Les étapes de cette première phase du recyclage mécanique sont la collecte, le tri et le broyage des déchets qui sont ensuite revendus. Ces activités ne sont pas récentes ; le ramassage des déchets ménagers existant depuis longtemps. Par contre, la valeur ajoutée créée sur ce genre de matières est un projet dont la pratique effective n'a vu le jour que dans les années 90. Après broyage, les déchets plastiques sont généralement achetés par des "générateurs".

❖ La séparation-régénération

La régénération est une opération qui consiste à éliminer les impuretés présentes dans les polymères. Elle s'accompagne très souvent d'une séparation des différents composants polymères d'un mélange. On obtient ainsi un isolement des différents polymères présents dans le déchet hétérogène et impur de départ, ces polymères étant débarrassés de leurs impuretés à un taux inférieur à 1%. L'inconvénient de cette étape de recyclage est son coût onéreux de mise en œuvre qui constitue, de loin, le plus élevé du cycle du recyclage

Mélange des polymères

Cette opération se divise toujours en quatre étapes principales : le broyage, le lavage, la séparation et le séchage.

II.8.3.2. Procédés en voie de développement

II.8.3.2.1. Biodégradation

Bien que les polymères de synthèse soient prévus dans leur grande majorité pour avoir les meilleures résistances possibles à l'eau et aux micro-organismes et pour garder leurs propriétés mécaniques et leur stabilité dans l'environnement, on a essayé de développer des plastiques susceptibles de biodégradation [53- 54]. Ce type de matériaux est déjà agréé en Allemagne pour la fabrication d'articles à usage alimentaires (gobelets, assiettes et couverts jetables) [55].

III.8.3.2.2 Photo dégradation

Par exposition aux radiations solaires, les matières plastiques (en général des films) dans lesquelles on a incorporé des agents sensibilisateurs photodégradants deviennent fragiles et se fragmentent. On arrive à régler ainsi la durée de vie du film en fonction de la durée et de l'intensité de l'ensoleillement [50,51,53].

II.8.4 La valorisation par le mélange ou "coumpounding" [57]

Dans la majeure partie des cas, les appellations industrielles et commerciales des matières plastiques ne traduisent pas leur composition réelle. En effet, un des exemples que nous pouvons citer est celui du matériau utilisé pour la production de pare-chocs de véhicules, où le matériau de nomination "PP" est en réalité composé de PP, du copolymère du PP, du PE, du copolymère EPDM (éthylène propylène diène monomère) et de talc : [PP/copolymère PP-PE/EPDM/talc]. Ainsi, alors que l'appellation industrielle définit un matériau homogène, il s'agit, la plupart du temps, d'un mélange, avec un constituant polymère majoritaire à plus de 50% (souvent thermoplastique de type polyoléfine), et un autre constituant polymère minoritaire, sans compter les agents comptabilisant et charges de type organique ou minéral.

Mélange des polymères

De la même manière, la formulation par une transformation thermomécanique conventionnelle, qui est une méthode très étendue en vu du recyclage mécanique, vise à reproduire les mêmes type de mélanges, aussi appelés "compounds". D'ailleurs, les procédés de formulation utilisés tant au niveau de la production de matières plastiques neuves que pour le recyclage sont nommés "coumpounding".

Par conséquent, les déchets plastiques et les matières plastiques recyclées sont en réalité des "coumpounds", constitués d'une résine thermoplastique de base, dans laquelle sont injectés des charges

II.8.4.1 Les charges

On désigne sous le nom général de charge toute substance inerte, minérale ou organique qui, ajoutée à un polymère de base, permet de modifier de manière sensible les propriétés mécaniques, électriques ou thermiques, d'améliorer l'aspect de surface ou bien, simplement, de réduire le prix de revient du matériau transformé [56].

II.8.4.2 La compatibilisation

La comptabilisation est une technique qui réside sur l'addition, en très faible concentration, d'éléments dans un mélange de polymères, ces éléments ayant pour fonction spécifique de renforcer la cohésion du mélange, autrement dit, d'améliorer la miscibilité entre les différentes phases polymères présentes.

Dans le domaine de la plasturgie, la comptabilisation est un processus essentiel et une pratique très fréquente, car les matériaux polymères sont très rarement miscibles entre eux. En effet, d'ordinaire, les polymères possèdent souvent des structures chimiques trop différentes pour permettre leurs chaînes macromoléculaires de créer des liaisons chimiques ou physiques permettant leur mélange d'être homogène. De plus, rares sont les espèces de polymères dont les mailles sont suffisamment voisines pour permettre une co-crystallisation. Cette rareté de trouver des polymères miscibles est davantage accentuée par l'existence de polymères non-miscibles et de structures chimiques pourtant identiques ; tel est le cas des PEHD et PEBD.

Mélange des polymères

II.8.5. Recyclages des DEEE

II.8.5.1. Définition

Les DEEE sont les déchets d'équipement électriques et électroniques. Ils correspondent aux déchets produits de façon courante par l'utilisation de matériel bureautique ainsi que d'équipement en fin de vie ou mis hors d'usage en raison d'une évolution très rapide des performances. En fin de vie, un EEE devient un DEEE à partir du moment où le propriétaire du EEE le destine à l'abandon car il n'en a plus aucune utilité.

L'AG RBC du 18/07/2002 [58] contient 10 catégories d'équipements électriques et électroniques dont les principaux sont : les petits et gros appareils ménagers, les équipements informatiques et de télécommunications, le matériel d'éclairage, les outils électriques et électroniques, etc.

Les DEEE en construction sont principalement des appareils informatiques, des outils de communication, des éléments de bureautique, des outils électriques pour forer, scier, souder, etc.

II.8.5.2. Qu'est-ce qu'un équipement électrique et électronique (EEE) ?

Les EEE sont des équipements qui fonctionnent grâce à des courants électriques ou à des champs électromagnétiques, sur prise électrique, pile ou accumulateur. L'OCDE les regroupe en trois catégories principales :

- les produits bruns, c'est-à-dire le matériel audiovisuel : radio, téléviseurs, caméscopes, lecteurs DVD, chaînes hi-fi, et instruments de musique.
- Les produits gris : les équipements informatiques et de télécommunications comme les imprimantes, photocopieuses, téléphones portables, ordinateurs, répondeurs, etc. Cette catégorie regroupe le secteur des IT (Information & Télécommunication).
- Les produits blancs : cette catégorie concerne le gros électroménager, c'est-à-dire les appareils de lavage (lave-linge, lave-vaisselle), de cuisson (fours) ou de conservation (réfrigérateurs, congélateurs), et les petits électroménagers (aspirateurs, machines à coudre, fer à repasser...). Pour les distinguer, les sous-catégories de GEM froid (Gros

Mélange des polymères

Electroménager de production de froid), GEM hors froid (Gros Electroménager sauf froid), et PAM (Petit appareil en mélange) sont usuellement utilisées.

Produits bruns	Produits gris	Produits blancs
 Téléviseur	 Minitel	 <i>Réfrigérateur - Machine à laver</i>
 Radio	 Téléphone	 Fer à repasser

Tableau II.1: Exemple d'équipements électriques

II.8.5.3. Répartition des DEEE par type de polymères

Les types de polymères issus des Déchet d' Equipement Electrique et Electronique DEEE sont représentés dans la figure II.4.

Mélange des polymères

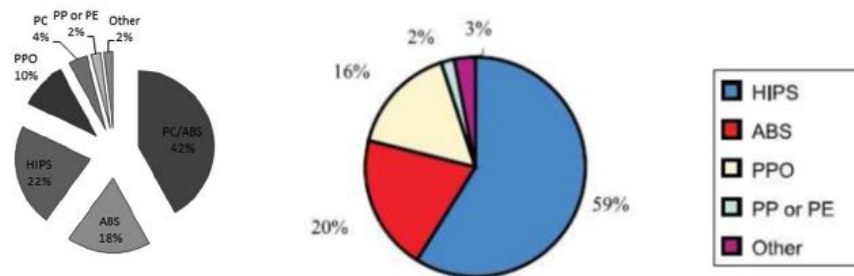


Figure II.4. : Répartition des DEEE par types de polymères

Les polymères ou mélanges de polymères qui composent ces DEEE sont l'ABS, le HIPS, le PP, le PS, le SAN, le PU, le PA, les mélanges PC/ABS et HIPS/PPO.

Les deux polymères majoritaires sont le polystyrène choc (HIPS) et l'acrylonitrile-butadiène styrène (ABS), utilisés pour leur propriété de résistance aux chocs. [59].

CHAPITRE III
MATÉRIELES ET
DISPOSITIFS
EXPÉRIMENTAUX

Matériels et dispositifs expérimentaux

III.1.Introduction

Dans ce chapitre nous allons déterminer les propriétés mécaniques usuelles des différents mélanges élaborés (PP/DEEE, PP/DEEE/SBR) au niveau de l'entreprise Nationale de plastique et de caoutchouc, de DRAA ALMIZAN

Dans ce travail, nous allons solliciter via des essais de traction, essais de la résilience, et la micro dureté, des éprouvettes normalisées. Les résultats et les diagrammes contraintes-déformations seront ensuite analysés.

Divers outils ont été utilisés dans le but de caractériser les propriétés morphologiques et mécaniques des mélanges après leur mise en œuvre, nous allons présenter ci dessous les différentes techniques utilisées.

III.2 .Essai de traction

L'essai de traction uni axiale est un essai « simple » à mettre en œuvre. Il consiste à soumettre une éprouvette du matériau à étudier à une traction et à mesurer l'allongement correspondant à une force F . Sa simplicité ainsi que l'existence de techniques poussées autorise une instrumentation riche des essais. En raison de son dépouillement simple, il permet d'établir des lois de comportement fiables et par conséquent permet d'accéder aux caractéristiques du matériau telles que le module d'Young, la contrainte au seuil d'écoulement et la contrainte à la rupture. En outre, il présente une reproductibilité remarquable [60-61].

Les essais de traction permettent de déterminer qualitativement si un matériau est fragile ou ductile (rigide ou souple). Ils permettent aussi de quantifier des propriétés mécaniques telles que le module d'élasticité, la résistance maximale ou la contrainte et l'allongement à la rupture en traction. Les essais de traction ont été réalisés sur de éprouvettes normalisées :

Matériels et dispositifs expérimentaux

III.2.1. La machine de traction

Les tests de tractions ont été réalisés au laboratoire de génie mécanique à l'aide d'une machine de traction de type (IBERTEST) de capacité 100KN. Elle 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.

Les essais ont été réalisés à température ambiante (30° C), pour une vitesse de traverse égale à 10mm/min. Pour chaque lot, cinq éprouvette sont testées à fin de vérifier la répétitivité des résultats obtenus. Ainsi à partir de ces tests, le module d'Young, la contrainte au seuil d'écoulement ainsi que l'allongement à la rupture ont été déterminés.

Les dimensions de l'éprouvette sont inscrites dans la figure **III.1**

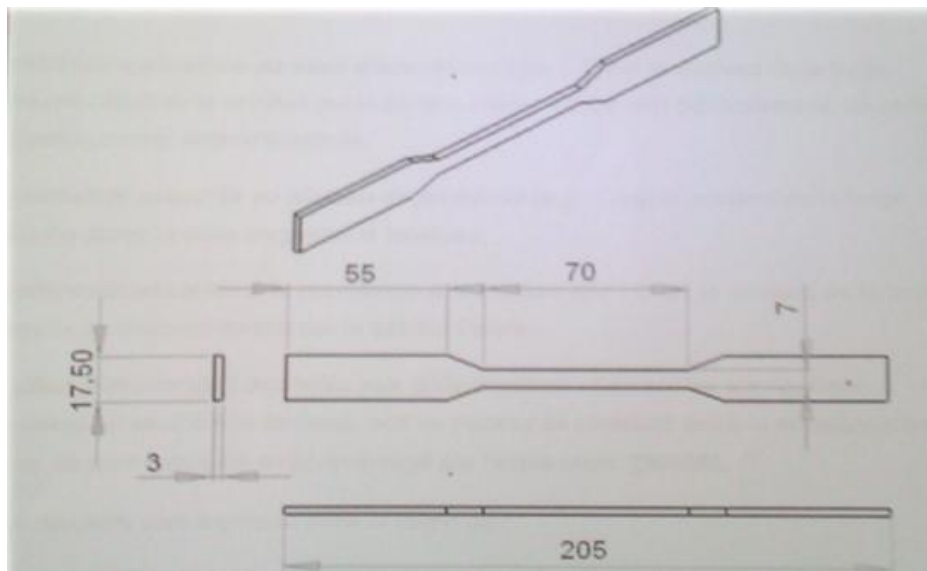


Figure III.1: Eprouvette plate standard

Matériels et dispositifs expérimentaux



Figure III.2: Machine de traction de Marque IBERTEST au niveau du laboratoire SDM

III.2.2 : Principe de fonctionnement et de mesure de la machine de traction

Après avoir mesuré les dimensions caractéristiques des éprouvettes normalisées, ces spécimens seront placés entre les mâchoires de l'appareil de traction.

Cette machine, nous donne des résultats, de la force (KN) en fonction de l'allongement L , 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 (L) par la longueur initiale (L_0) pour avoir la déformation (ϵ (%)). Toutes ces opérations effectuées à l'aide de Microsoft office Excel 2007, la courbe schématique est représentée dans la figure III.3.

On déduit à partir de la courbe contrainte-déformation de la figure II.4 les caractéristiques mécaniques suivantes :

- ☞ **Le module d'Elasticité E (MPa)** : C'est le module tangent, c'est-à-dire la pente de la tangente ($E = \frac{d\sigma}{d\epsilon}$), déterminé, à partir de la tangente à l'origine de la courbe contrainte-déformation dans le domaine élastique de la courbe,

Matériels et dispositifs expérimentaux

- ☞ **La contrainte associée à la résistance à la rupture (σ_r)** : C'est le quotient de la force appliquée au moment de la rupture par la section initiale
- ☞ **La déformation à la rupture (ϵ_r)** c'est le rapport de la course finale au moment de la rupture par la longueur initiale (L_0)

Les propriétés mécaniques d'un polymère semi-cristallin sont couramment déterminées à partir d'un essai de traction (uni axiale) dont la courbe schématique est représentée dans la figure III.3

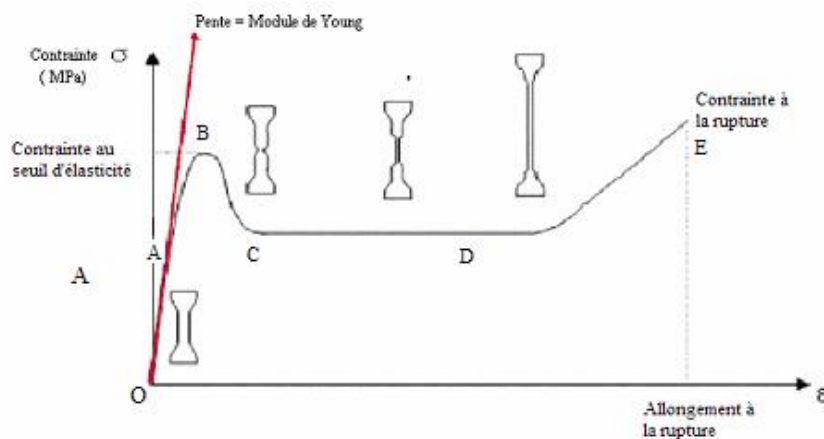


Figure. III.3 : Propriétés mécaniques issues de la déformation d'un matériau soumis à une contrainte


Ces courbes sont réparties en cinq grands domaines :

- ✓ . Zone OA : zone de déformation viscoélastique homogène, la déformation ne dépasse pas alors quelques pourcents et est réversible. La phase amorphe est mise sous tension, ce qui explique le caractère réversible du comportement à ce stade de déformation.
- ✓ . Zone AB : seuil d'élasticité où le processus inter lamellaire prédominant. Le passage par un maximum sur la courbe s'accompagne d'une déformation plastique qui n'est plus réversible et se manifeste par l'apparition d'une striction.
- ✓ . Zone BC : la zone strictionnée cesse de diminuer de section et s'étend progressivement à tout l'échantillon (Zone CD)

Matériels et dispositifs expérimentaux

- ✓ . Zone DE : la force augmente en fonction de l'allongement jusqu'à rupture de l'éprouvette.

Tous les résultats sont donnés en valeurs apparentes (nominales) :

 Contrainte = F/S_0

Avec F =force et S_0 = surface initiale.

 Allongement = L/L_0

Avec L = variation de longueur et L_0 longueur initiale.

III.3 Essai de résilience (choc)

Il arrive souvent que les matériaux de très bonnes qualités plastiques deviennent très fragiles sous l'action du choc. La résilience caractérise la résistance aux chocs des matériaux. C'est une caractéristique mécanique importante. L'essai est destiné à mesurer l'énergie nécessaire pour rompre en une seule fois une éprouvette préalablement entaillée (Fig. III.5).

On utilise un mouton-pendule munit à son extrémité d'un couteau qui permet de développer une énergie donnée au moment du choc. L'essai consiste à rompre d'un seul coup de mouton l'éprouvette entaillée en son milieu et reposant sur deux appuis.

L'énergie absorbée est obtenu en comparant la différence d'énergie potentielle entre le départ du pendule et 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 la pendule atteindra après la rupture de l'éprouvette.

La résilience est définie par la lettre K son unité est le (joules / cm^2), c'est l'énergie absorbée /rapportée à la section de l'éprouvette à l'endroit de l'entaille.

III.3.1 Mesure de la Résistance à l'impact

Les éprouvettes injectées de type barreau de dimensions $(12-2.5)*9$ mm = 57mm^2 ont été découpées selon la norme exigée par le test Charpy (Figure II.4)

Matériels et dispositifs expérimentaux

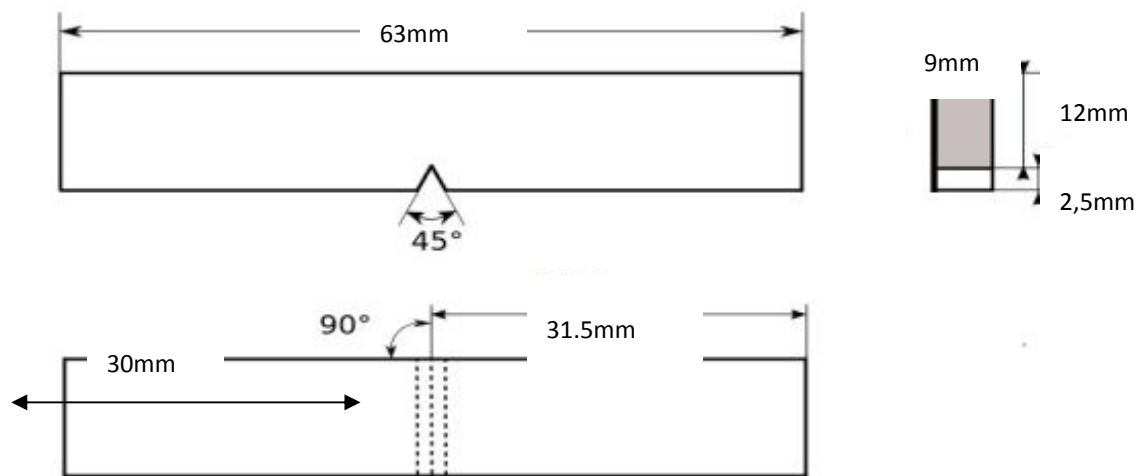


figure II.4 Norme de l'éprouvette de l'essai de résilience

L'entaille des éprouvettes de résilience est élaborée à l'aide d'une fraiseuse au hall technologique d'OUED AISSI, suivant les paramètres donnés ci-dessous :

☞ Paramètres de la fraiseuse :

La vitesse de rotation de la fraise est de 500 tours/minute (1 tour=2 mm et $\frac{1}{4}$ tour =0.5 mm).

La profondeur de l'empreinte est de 2,5 mm et L'angle est de 45° .



b)

Figure III.5.a) La fraiseuse utilisée pour entailler l'éprouvette de résilience b).éprouvette entaillée

Matériels et dispositifs expérimentaux

Les essais sont réalisés à l'entreprise Electro-industries de FREHA sur la machine ZWICK 5102 illustré à la figure III.6

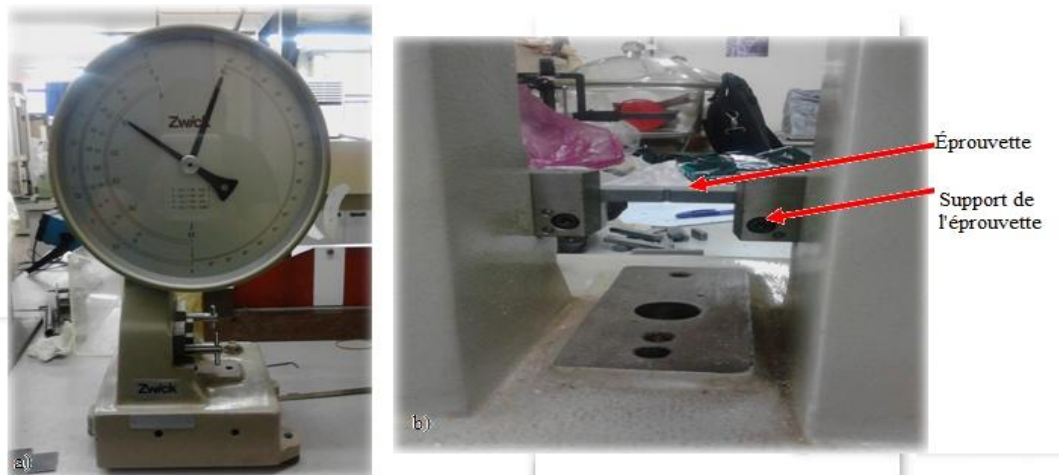


Figure III.6 : a) Machine charpy de marque ZWICK b) éprouvette placée sur le dispositif Charpy

Comme pour la caractérisation des propriétés mécaniques, cinq échantillons par lots ont été testés afin de vérifier la reproductibilité de l'essai et une moyenne des valeurs a été déterminée.

II.4 Essai de micro dureté

La micro dureté a été définie comme la résistance d'un matériau à la pénétration permanente d'un autre matériau plus dur. La mesure est faite auprès de la dimension de l'empreinte laissée (surface ou profondeur) après que la force d'essai ait cessé. La connaissance de la valeur de la micro dureté nous permet d'accéder aux caractéristiques mécaniques du matériau, ainsi que de prévoir son comportement à l'usure lors d'un contact avec d'autres matériaux.

III.4.1 Principe

Les tests de micro dureté ont été réalisés sur un appareil semi automatique de type ZWICK ROELL donné par la figure III.8 a). Ce micro Duromètre est constitué d'un microscope permettant d'avoir une image agrandie à 400 fois et d'un système d'indentation.

Matériels et dispositifs expérimentaux

Le pénétrateur utilisé est en diamant de forme de pyramide (essai Knoop) la phase à indenter est localisée est ramenée en un point connu de la réglette (deux Droites superposées). En actionnant l'indentation, le pénétrateur est déplacé de sorte à indenter la phase ciblée laisse une empreinte figure III.8 b). la taille de l'empreinte est comprise entre 0.01 et 0.1mm ($D=7d$). La charge est appliquée pendant 20 seconds puis retirée automatiquement. Le microscope se repositionne sur l'empreinte et permet de mesurer, par déplacement des deux droites, les deux diagonales de l'empreinte. L'appareil affiche les mesures effectuées et le programme calcul alors la valeur de la micro dureté correspondante.

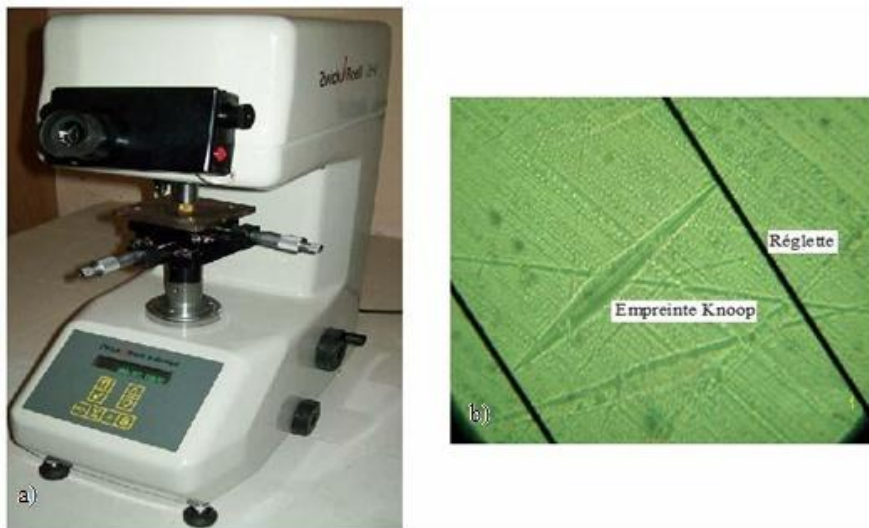


Figure.III.7:a) Microduromètre **b)** Empreinte Knoop

III.5.Microscopie à balayage électronique

Les caractérisations morphologiques des différents faciès de rupture, ont été réalisées grâce au Microscope Électronique à Balayage (MEB) effectuées au niveau du laboratoire de chimie de HASNAOUA ce microscope est représenté sur la figure III.8.

III.5.1 Principe

Le principe de fonctionnement du MEB est le suivant : un faisceau d'électrons balaie la surface de l'échantillon réfléchis (ou rétrodiffusés) sont collectés par un détecteur ;le signal ainsi obtenu est transformés en un point lumineux sur l'écran de ce tube à rayons

Matériels et dispositifs expérimentaux

cathodique ; la brillance de ce point dépend de l'intensité du signal détecté ,et sa position sur l'écran correspond à celle du point frappé par le faisceau d'électron : l'image résultante permet d'étudier les caractéristiques de la surface de l'échantillon et elle peut être Photographiée .



Figure III.8 : Microscope électronique à Balayage

Matériels et dispositifs expérimentaux

Conclusion

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

La caractérisation mécanique nous permet de connaître le comportement fragile ou ductile de nos mélanges, elle permet aussi de déterminer les caractéristiques intrinsèques du produit élaboré tels que son module de Young sa résistance maximum, ainsi que sa déformation.

La caractérisation morphologique, via l'essai de traction, permet de déterminer la relation entre la disposition des différents grains dans le mélange à l'échelle microscopique et ce qui se passe à l'échelle macroscopique.

CHAPITRE IV

ÉLABORATION DES MÉLANGES ET RÉALISATION DES ÉPROUVETTES.

Élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes

IV.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter la méthode utilisée pour élaborer de différents mélanges, PP/DEEE, PP/DEEE/SBR pour des différentes pourcentages. Pour y'arriver à réaliser des éprouvettes.

Ce travail a été réalisé à l'Entreprise Nationale de Plastique et de Caoutchouc, filiale SISCOPLAST de Dràa EL Mizan.

IV.2. Présentation des différents composants des mélanges élaborés

Trois polymères distincts ont été employés dans cette étude. Le polypropylène, le styrène butadiène rubber et les DEEE

IV.2.1. Polypropylène (PP) [62]

Les polypropylènes sont des thermoplastiques semi cristallins obtenus par la polymérisation du propylène avec éventuellement en quantité mineure, un ou plusieurs comonomères du type éthylène, butène ou hexane.

Il existe sous trois formes suivantes qui dépendent du mode d'organisation des groupes méthyles par rapport au plan contenant la chaîne carbonée principale :

- ✓ **polypropylène iso tactique ipp** : Les groupes méthyles sont repartis de même côté du plan.
- ✓ **Polypropylène syndiotactique spp**: Les groupes méthyles sont disposés

Alternativement de part et d'autre du plan

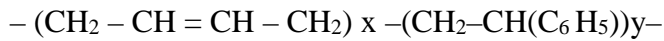
- ✓ **Polypropylène à tactique app** : Dans ce cas, la répartition des groups Méthyles est aléatoire.



Figure IV.1.la matière première utilisée est le polypropylène (PP)

IV.2.2. Styrène butadiène (SBR)

Le copolymère statistique de butadiène et de styrène (SBR : styrène-butadiène rubber), dont la formule chimique est :



Avec x allant de 84 à 60 % et y de 16 à 40 % est fabriqué par polymérisation radicalaire en émulsion et contient 23,5 % de styrène.

✓ Les copolymères butadiène-styrène (SBR) :

Seuls les mélanges renforcés sont utilisés industriellement. Les propriétés de traction et la résistance à l'abrasion sont bonnes. La résilience est assez moyenne et l'échauffement interne est relativement important, ce qui limite l'utilisation en régime dynamique. La résistance au déchirement et à la propagation d'entailles est plutôt moyenne, mais la résistance aux flexions répétées est bonne. La tenue aux différents vieillissements est limitée. Les SBR représentent la classe la plus importante de tous les élastomères, avec près de 40 % de la consommation mondiale. (8)

Il existe des SBR froids (température de polymérisation 5°C), des SBR chauds (température de polymérisation 50°C), des SBR étendus à l'huile (par addition d'huile naphénique ou aromatique). Le bloc de SBR 1502 (polymérisée à froid) utilisé, est coupé en petits morceaux à l'aide d'un ciseau afin d'améliorer l'homogénéisation de nos mélanges, comme le montre la figure suivante :



Figure IV .2. : Avant et après le découpage de l'SBR

IV.3. DEEE étudiées au cours de Ce travail

Les matières plastiques étudiées issus des équipements électronique et informatique hors usage telle que (carcasse d'imprimante et ordinateur, souris, clavier,)



Figure IV.3 : Collecte des déchets des Equipements Electriques et Electroniques hors d'usage.

IV.4. Procédé de recyclage réalisé dans le cadre de notre étude

IV.4.1 Décontamination des déchets

« Décontamines », c'est-à-dire que les étiquettes, mousses, tampons en Caoutchouc, vis, les colles... sont systématiquement enlevés.

IV.4.2 Lavage et nettoyages

Les DEEE sont nettoyés et lavés à l'eau savonneuse pour éviter la présence des impuretés de poussière et de graisses.



Figure IV.4 : Déchets découpés à la cisaille en petits morceaux avant broyage.

Élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes

IV.4.3. Broyage des déchets

Le broyage pour obtenir des granulés réintégrables dans les cycles d'extrusion et injection comme Il indique dans la figure IV .5



Figure IV .5: Broyages des DEEE au niveau de SICOPLAST Drâa-El-Mizan.

Pour éviter la présence des particules métallique dans les déchets, on a utilisé un Aimant par précaution et s'assurer que le mélange ne contienne pas de métal



Figure IV.6: Vérification de la présence des particules métallique dans les déchets.



Figure IV.7: Les DEEE à l'état granulaire après le broyage.

IV.5. Réalisation et Élaboration des mélanges

Ce travail a été réalisé au groupe de l'Entreprise Nationale de Plastique et de Caoutchouc (ENPC), filiale de **SISCOPLAST de Dràa EL Mizan**. L'objectif est de réaliser des éprouvettes en plastiques en différents pourcentages en masses, des polymères présentés ci-dessus.

Nous présenterons ci-dessous les différentes étapes suivies pour la réalisation de ce Travail:

IV.5.1.1^{er} étape : Préparation des mélanges

Cette étape consiste à préparer des mélanges des différents pourcentages du pp, DEEE et du SBR de façon à avoir **5kg** pour chaque mélange, et les mélangés ensuite, à l'aide d'un mélangeur électrique (mélanges à froid) (Figure. IV.8), qui sert à faire disperser les grains des deux polymères entre eux, afin d'obtenir une répartition plus au moins régulière.

Élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes



Figure IV.8: L'opération de pesée des mélanges PP, SBR et les déchets de DEEE

Les tableaux suivants représentent les différents pourcentages demandés et leurs quantités en masse associées:

1^{er} mélange : Représente des déchets de DEEE+PP sans SBR (500g) :

Mélanges	DEEE+ PP	DEEE(g) +PP(g)
H	100 DEEE+0 PP	500g DEEE+0g PP
I	80 DEEE+20 PP	400gDEEE+100g PP
J	60 DEEE+40 PP	300gDEEE+200g PP

Élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes

K	50 DEEE 50 PP	250gDEEEE+250g PP
L	40 DEEE +60PP	200gDEEE+300g PP
M	20 DEEE +80PP	100gDEEE+400g PP
N	0 DEEE+100PP	0gDEEE+500g PP

2^{ème} mélange : en ajoutant 5 SBR (25g SBR) à ce mélange :

Mélange	DEEE+ PP+5 SBR	DEEE(g)+PP(g)+25g SBR
H1	100 DEEE+0 PP+25g SBR	475g DEEE+0g PP+25g SBR
I1	80 DEEE+20 PP+25g SBR	387.5 g DEEE+87.5g PP+25g SBR
J1	60 DEEE+40 PP+25g SBR	287.5g DEEE+187.5g PP+25g SBR
K1	50 DEEE+50 PP+25g SBR	237.5g DEEE+237.5g PP+25g SBR
L1	40 DEEE+60 PP+25g SBR	187.5g DEEE+287.5g PP+25g SBR
M1	20 DEEE+80 PP+25g SBR	87.5g DEEE+387.5g PP+25g SBR
N1	0 DEEE+100 PP+25g SBR	0g DEEE+475g PP+25g SBR

3^{ème} mélange : Avec 10 SBR (50g SBR) :

Mélange	DEEE+ PP+10 SBR	DEEE(g)+PP(g)+50g SBR
H2	100 DEEE+0 PP+10 SBR	450g DEEE+0g PP+50g SBR

Élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes

I2	80 DEEE+20 PP+10 SBR	375g DEEE+75g PP+50g SBR
J2	60 DEEE+40 PP+10 SBR	275g DEEE+175g PP+50g SBR
K2	50 DEEE+50 PP+10 SBR	225g DEEE+225g PP+50g SBR
L2	40 DEEE+60 PP+10 SBR	175g DEEE+275g PP+50g SBR
M2	20 DEEE+80 PP+10 SBR	75g DEEE+375g PP+50g SBR
N2	0 DEEE+100 PP+10 SBR	0 DEEE+450g PP+50g SBR

4^{ème} mélange : Avec 15 SBR (75g SBR) :

Mélange	DEEE+ PP+75 SBR	DEEE(g)+PP(g)+75g SBR
H3	100 DEEE+0 PP+15 SBR	425g DEEE+0g PP+75g SBR
I3	80 DEEE+20 PP+15 SBR	362.5g DEEE+62.5g PP+75g SBR
J3	60 DEEE+40 PP+15 SBR	262.5g DEEE+162.5g PP+75g SBR
K3	50 DEEE+50 PP+15 SBR	213g DEEE+213g PP+75g SBR
L3	40 DEEE+60 PP+15 SBR	163g DEEE+263g PP+75g SBR
M3	20 DEEE+80 PP+15 SBR	63g DEEE+363g PP+75g SBR
N3	0 DEEE+100 PP+15 SBR	0g DEEE+425g PP+75g SBR



Figure IV.9 .Mélangeur électrique

IV.5.2. 2^{ème} étape : L'étape d'extrusion

Elle consiste à faire passer les mélanges dans une extrudeuse mono vis de Marque NEBEL NEGRI-LUINO de façon à assurer le mélanges à chaud et l'homogénéisation et la répartition régulière de la phase minoritaire dans la Phase majoritaire notons que la machine d'extrusion travaille en continue , la matière sort sous forme pâteux , épousant la forme circulaire de la filière , elle est entraînée par une étireuse passant par un bain d'eau à température ambiante pour assurer le refroidissement des longues tiges formées qui seront en suite coupées pour avoir des petites tiges d'environ 50 cm



Figure IV.10: Extrudeuse mono vis Marque NEBEL NEGRI-LUINO

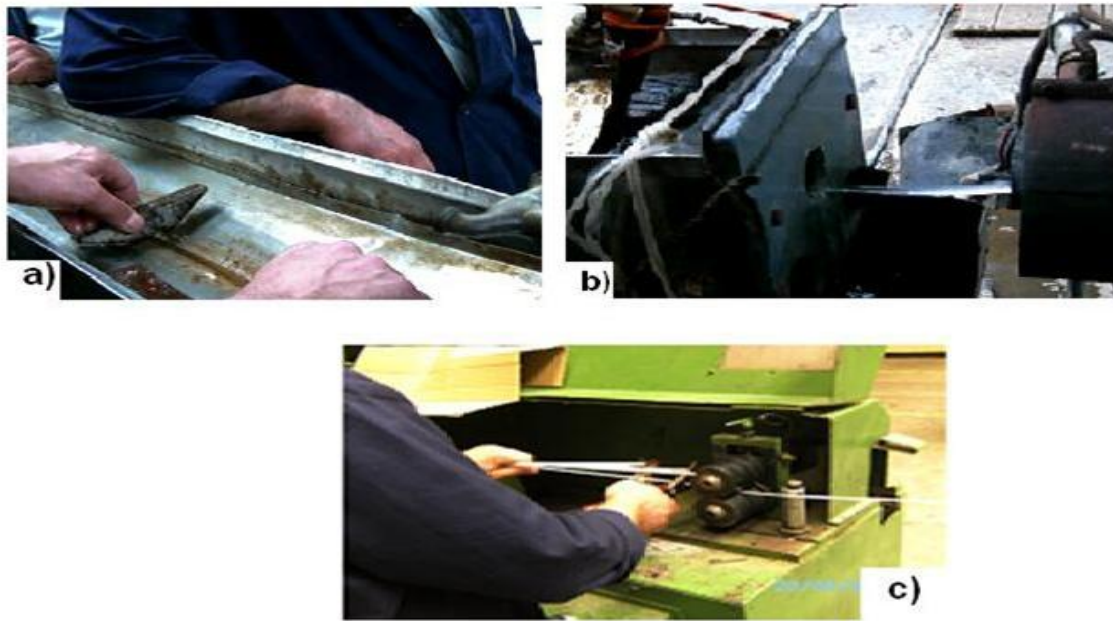


Figure IV.11: a) Système de refroidissement de la matière. b) La sortie de la matière de l'extrudeuse. c) Etireuse et découpage à l'aide de sécateur.

IV.5.3.3^{ème} étape : Opération du broyage

Après avoir réalisé nos mélanges extrudés, leur passage dans l'injection nécessite la réduction des tiges en grains, pour cela, il a fallu en premier lieu, réduire encore les bâtonnés à l'aide d'une découpeuse mécanique et les faire passer ensuite dans un broyeur.



Figure IV.12 : Présentation de l'appareil de Découpe (a) et du broyeur (b)

Les mélanges sous forme de joncs obtenus après extrusion et destinés au broyage pour être enfin injecté pour la réalisation des éprouvettes sont représentés sur la figure suivante .

Élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes



Figure IV.13 : Les mélanges après extrusion

Après l'opération d'extrusion, on a broyée les mélanges une autre fois et On les a sécher à l'air libre, les matières comme indique dans la Figure IV.14 pour les préparer à l'opération d'injection.



Figure IV.14 L'opération de séchage des matières broyées

Élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes

IV.5.4.4^{ème} étape : L'étape de l'injection

Comme dans l'extrusion, l'injection consiste à faire passer les mélanges (extrudés et coupés) dans un système vis fourreaux chauffé, ou la matière sera malaxée et fondu, puis, elle est injecté dans un moule qui comporte l'empreinte de l'éprouvette à réaliser.



Figure IV.15 Machine à injection

Moule éprouvette

IV.6. Présentation de l'extrudeuse et de la machine à injection

IV.6.1. Procédure d'extrusion

La matière d'œuvre, sous forme de granulés, est introduite dans l'extrudeuse à travers la trémie, elle est chauffée, malaxée, de façon à obtenir une matière homogène fluide pour pouvoir être transformée dans le fourreau. On dit que la matière a été plastifiée.

La plastification est obtenue grâce à des résistances chauffantes, et surtout grâce à la rotation en continu de la vis de plastification qui provoque le cisaillement des granulés. Cette dernière a aussi pour fonction l'homogénéisation et l'entraînement de la matière vers l'avant de l'extrudeuse.

La matière plastifiée est entraînée vers la tête de l'extrudeuse déterminant la géométrie du produit voulu, cela, à l'aide d'une filière placée dans la tête.

La rotation de la vis est obtenue par un moteur alimenté électriquement, et à travers une boîte de vitesse, en réglant la rotation de la vis, et donc le débit de matière, la pression en bout de vis, et la qualité de la plastification.

Élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes

Dans le cas des tubes, des profilés, des feuilles, des plaques, les côtés finales sont obtenues après passage de la matière dans un conformateur en sorti de tête de l'extrudeuse.

L'extrudeuse possède (3) zones différentes correspondant , à trois zones de fonctionnement (figure IV16)

- **La zone de convoyage ou d'alimentation :** Destinée à transporter et à compacter le polymère initialement sous forme de granulés vers les autres zones.
- **La zone de plastification :** Dans laquelle le polymère se trouve à la fois sous forme solide et sous forme fluidifiée permet de transformer la matière solide en « fluide ». Le polymère, en contact avec le fourreau, est « fondu » par conduction.

Lorsque la quantité de matière plastifiée et la pression sont suffisamment importantes ce polymère déjà « fondu » va venir déformer le polymère solide compacté dans le chenal de la vis, ce qui, par conduction et dissipation d'énergie du cisaillement, va enrichir la zone de polymère « liquide ».

- **La zone de pompage :** Dans laquelle la pression du polymère « fondu » est progressivement élevée jusqu'à la pression nécessaire à l'extrusion. Cette élévation progressive de la pression est due à une augmentation du diamètre interne de la vis entre la zone d'alimentation et la zone terminale de l'extrudeuse.



Figure IV .16 : Extrudeuse mono vis *Marque NEBEL NEGRI-LUINO*

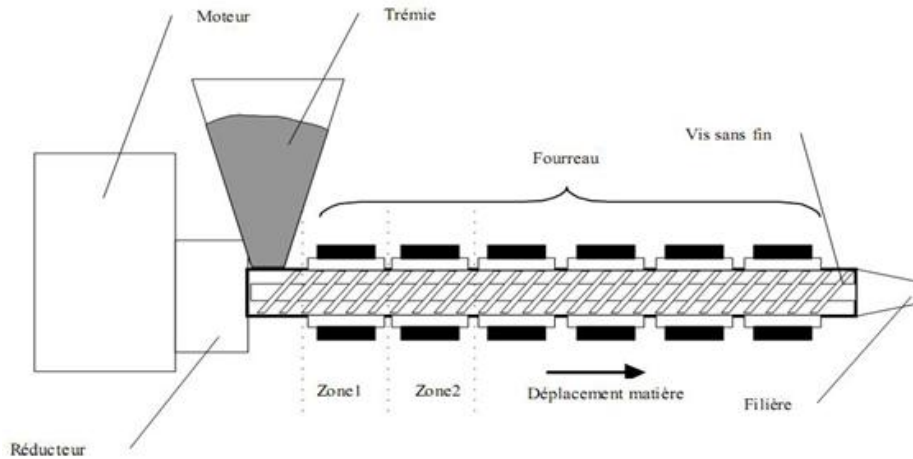


Figure IV .17 : Zones d'une extrudeuse Mono vis

✓ **Les caractéristiques de la vis sont :**

- La vis d'extrudeuse est du type sans fin,
- Diamètre $D=25\text{mm}$,
- Longueur $L=28D$,
- Vitesse de rotation $V= 60\text{tr/min}$.

✓ **Profil de température :**

Zone géométrique de la vis	Zone d'alimentation	Zone de compression	Zone de pompage	Tête (filière)
Température (°C)	150	180	200	230

IV.6.2 Procédure d'injection

Après l'opération de séchage et de préparation des mélanges, une étape d'injection est nécessaire afin de réaliser des éprouvettes destinées à être caractérisées par la suite.

L'injection d'éprouvettes s'effectue sur une machine à injection ARBURG (305-210-700) qui est illustrée sur la figure suivante IV.18



Figure IV.18 Presse d'injection Marque ARBURG 305-210-700

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 IV19)



Figure IV.19 : Éprouvettes obtenues après injection.

Contrairement à l'extrusion, l'injection est un procédé de mise en œuvre, en discontinue, il présente de multiples avantages ,tels que :

Élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes

- ✓ mise en œuvre économique ;
- ✓ très grandes séries, très grandes cadences ;
- ✓ très peu ou pas d'opération de finition ;
- ✓ fabrication de pièces d'une très grande complexité ;
- ✓ Concevoir des pièces plus légères avec moins d'éléments moins d'opération d'assemblage.

IV.6.2.1 Principe de l'injection

Au départ cette technique est similaire à l'extrusion :

Sous forme de granulés, la matière est introduite dans la presse à travers la trémie, puis elle est plastifiée dans le fourreau à l'aide des résistances chauffantes et une vis de plastification.

Contrairement à l'extrudeuse cette vis peut se déplacer en translation .le mouvement de cette vis piston est assuré par un moteur hydraulique , il ya deux phase distinctes :

- ✓ le dosage : la vis recule avec un mouvement de rotation jusqu'à ce que la quantité de matière plastifiée sont amenée et stockée en bout de vis ;
- ✓ l'injection : la vis avance avec un mouvement de translation de façon à injecter la matière stockée à travers la buse d'injection jusqu'au moule
- ✓ Cycle d'injection : il est constitué de (6) étapes
 - ☞ Fermeture du moule et verrouillage ;
 - ☞ Recule de la vis et tassement de la matière plastifiée a lavant du cylindre ;
 - ☞ Injection dans le moule ;
 - ☞ Maintien du moule fermé pour le refroidissement de la matière ;
 - ☞ Déverrouillage et recule du cylindre, ouverture du moule ;
 - ☞ Avance des injecteurs et éjection de la pièce.

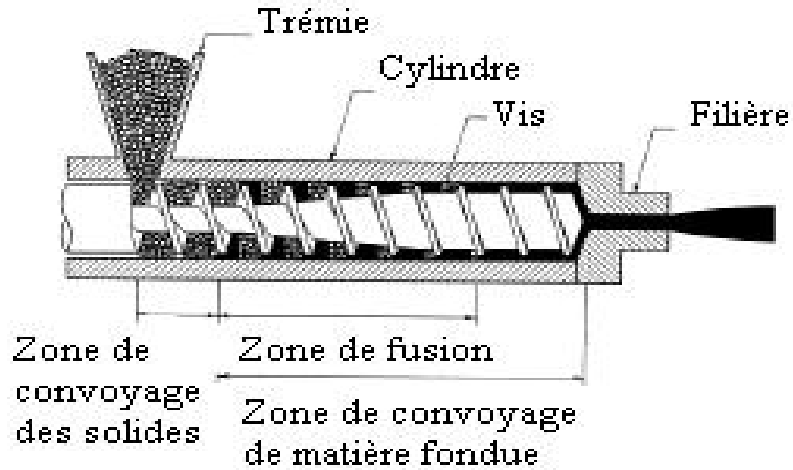


Figure IV.21: le schéma d'une extrudeuse mono vis

Les différentes phases du cycle d'injection, décrites à la Figure.IV20, se déroulent de la manière suivante :

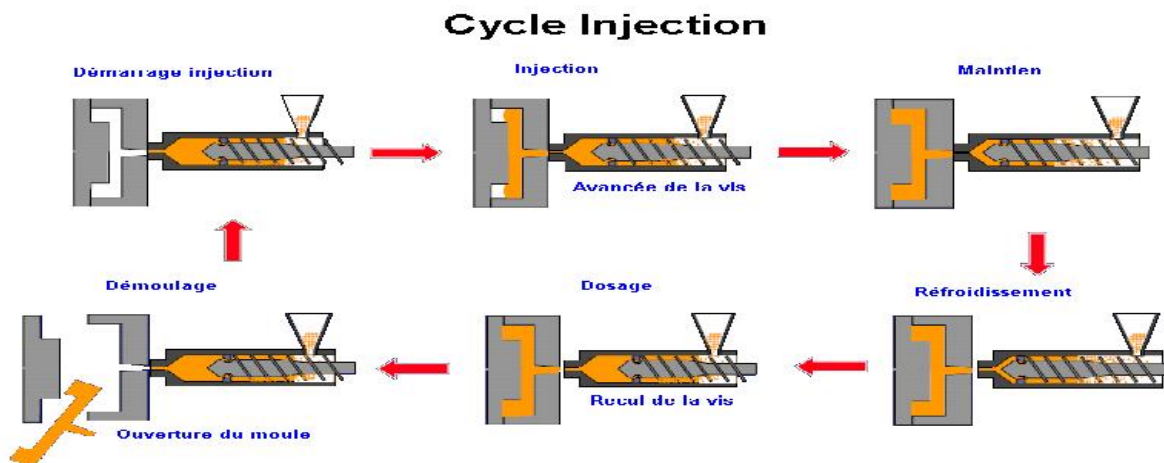


Figure IV.20: Les différentes phases du cycle d'injection

✓ Paramètres d'injection:



Figure IV.22: Dispositif d'injection

Élaboration des mélanges et réalisation des éprouvettes

Tous les mélanges ont été injectés avec une température de buse de 260°C, et une vitesse d'injection de 76 mm/s (figure IV.22)

Les paramètres d'injection standards sont récapitulés dans le tableau suivant:

Tableau IV.3 : Paramètre standards d'injection

Températures				
T buse	T1 (°C)	T2 (°C)	T3(°C)	
250 °C	190 °C	220 °C	240 °C	
Pressions				
P injection	P maintien		P Contre pression	
160 Bar	80 Bar		16 Bar	
Dosage				
76 mm				
Temps				
t 1 injection (s)	t 2 maintiens (s)	t 3 Refroidissements (s)	t 4 ouvertures moule (s)	t 5 fermetures (s)
1,5	3,6	18	1	0,4

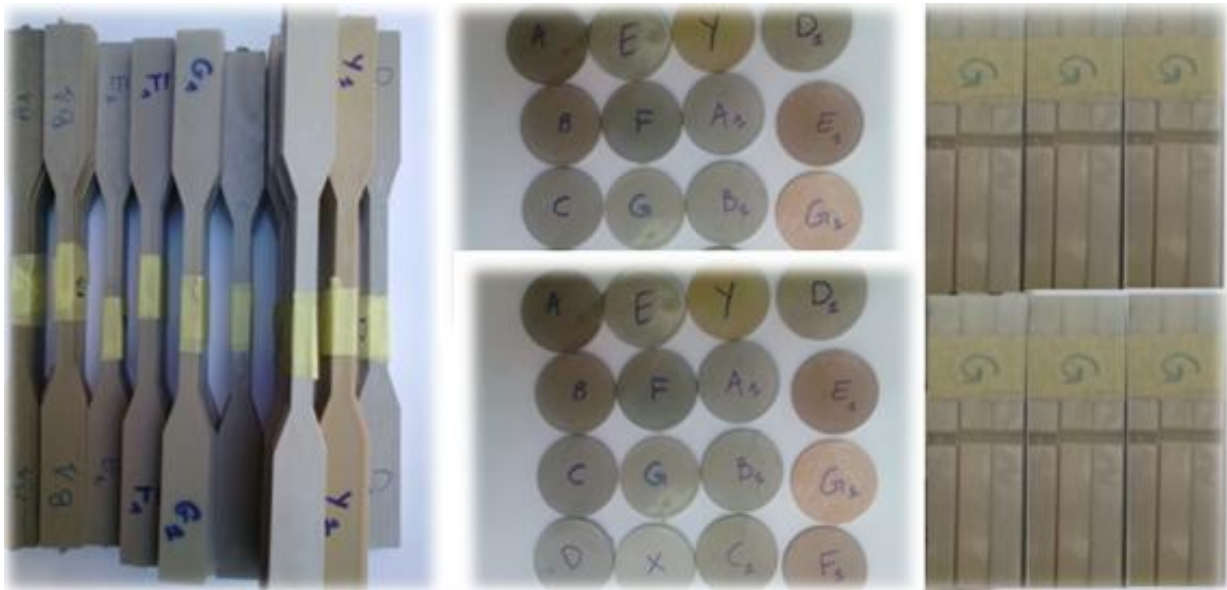


Figure IV.23 : Préparation des Éprouvettes pour les différents essais.

IV.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté le mode opératoire ainsi que le protocole expérimental qui nous permettra d'élaborer les éprouvettes, puis les caractériser mécaniquement et morphologiquement. Nous avons aussi montré la constitution des déchets, l'élaboration des mélanges, les paramètres des machines d'extrusion, d'injection et la géométrie des éprouvettes.

CHAPITRE V

RÉSULTATS

ET

DISCUSSIONS

Résultats et discussions

V.1.Introduction

On s'intéresse ici à la présentation des résultats obtenus suite aux différents essais effectués sur les différentes éprouvettes à savoir :

- ❖ Essais de traction
- ❖ Essai de résistance aux Chocs
- ❖ Essai de microdureté Knoop
- ❖ Une caractérisation Morphologique au MEB

Une interprétation et discussion suivra chaque résultat.

Dans cette partie, on se propose d'étudier le comportement mécanique des mélanges (DEEE/PPH) puis [DEEE/PPH) +SBR], le SBR est utilisé dans notre étude comme un comptabilisant dont le rôle essentiel est de lier entre les différentes particules du mélange et de renforcer certaines propriétés notamment la résistance aux chocs.

Nous déterminons d'abord pour chaque mélange Via (5) éprouvettes, les courbes contrainte-déformation ; Puis, nous déterminons les propriétés mécaniques, caractéristiques usuelles telles que le module de Young, les contraintes aux seuils d'écoulement ainsi que les déformations à la rupture.

V.2.Caractérisation Mécanique

V.2.1.Courbes Contrainte-Déformation

➤ **Courbes Contrainte-Déformation des mélanges sans SBR**

➤ **Mélange 100%DEEE**

Le mélange élaboré par injection pour notre étude est formé de déchets polymériques issus des équipements électriques et électroniques (DEEE). C'est donc un mélange de plusieurs polymères tels que l'ABS, le PP, le PA le HIPS et le PC. Aucun tri, aucun traitement n'ont été faits au préalable.

Résultats et discussions

La courbe de traction du mélange 100%DEEE présente une rupture fragile avec une déformation qui ne dépasse pas 5,1%. Elle montre aussi une contrainte maximale de l'ordre de 32MPa.

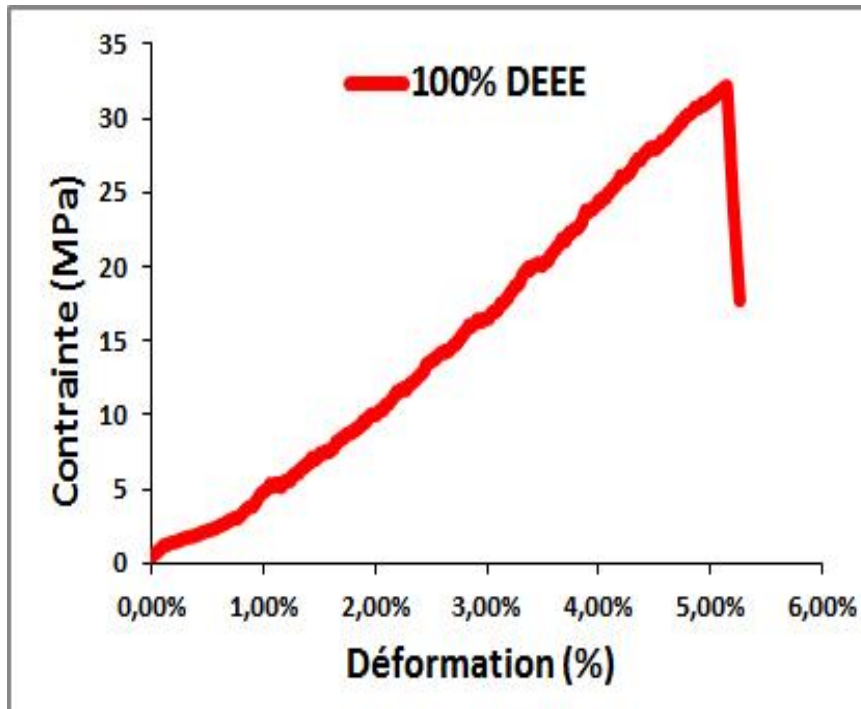


Fig. V.1. Courbe contrainte déformation du mélange 100% DEEE

➤ **Polymer 100% PPH**

Le PPH, polypropylène homopolymère, est un polymère de grande diffusion dans l'industrie plastiques, il est bon marché, nous l'avons choisi comme polymère d'addition à nos déchets DEEE.

La courbe de traction du polymère 100% PPH donnée par la figure V.2 nous renseigne sur le caractère ductile du PPH, en effet il peut atteindre dans notre cas une déformation à la rupture de 345%, avec une contrainte maximale de 32MPa.

Résultats et discussions

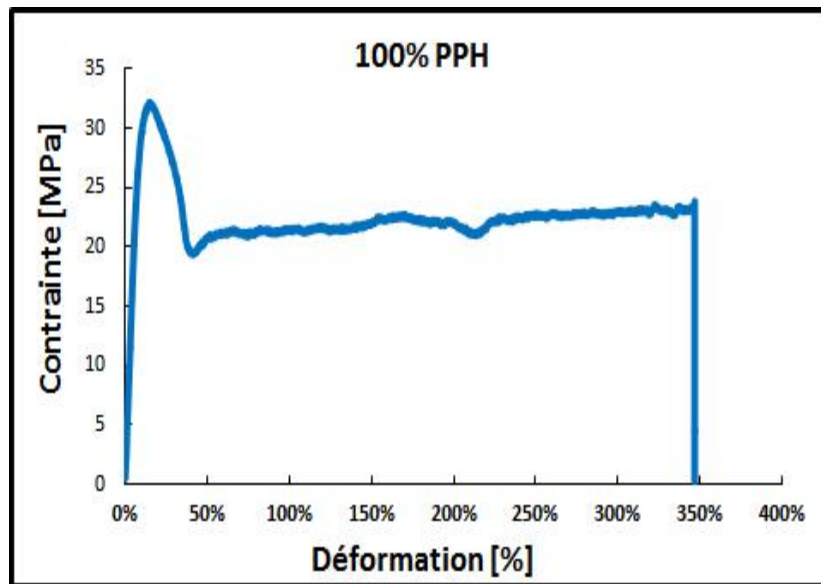


Fig. V.2. Courbe contrainte - déformation du mélange 100% PPH.

La superposition des courbes de traction PPH et des DEEE (Fig. V.3) montre que les déchets recyclés ont des propriétés mécaniques de résistance équivalentes. Par contre, la ductilité est très faible par rapport à celle du PPH vierge. On constate aussi une faible variation de la rigidité donnée par la tangente à la partie courbe élastique.

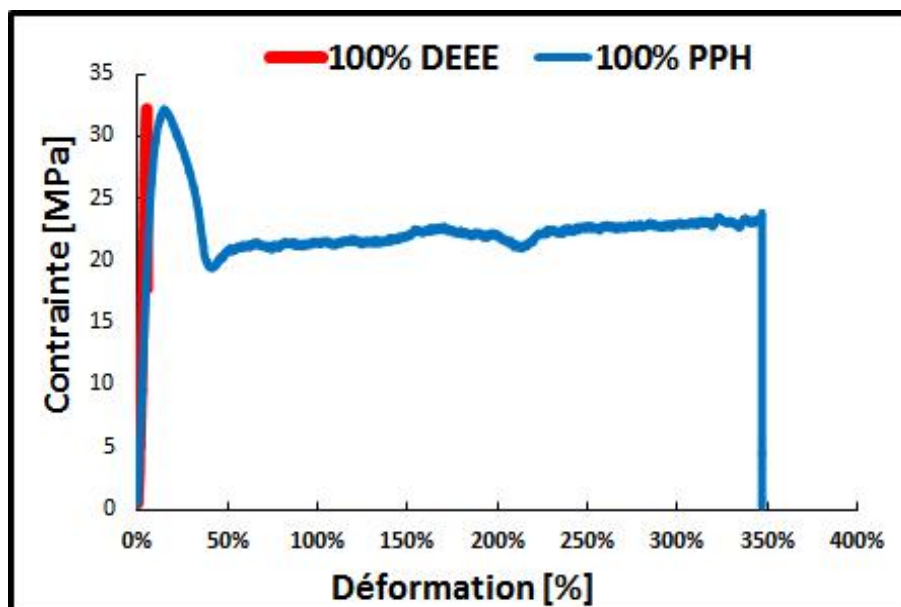


Fig. V.3. Superposition des Courbes contrainte - déformation
Des polymères 100%DEEE et 100%PPH.

Résultats et discussions

Le mélange mécanique, sans liaisons chimiques des différents constituants des DEEE, a produit un matériau fragile sans aucun caractère de ductilité.

➤ Mélange 80%DEEE/20%PPH

La courbe de traction du mélange 80%DEEE/20%PPH donnée par la figure V.4, montre que l'ajout de 20% de PPH à la matrice DEEE engendre une diminution des propriétés de résistance et de ductilité.

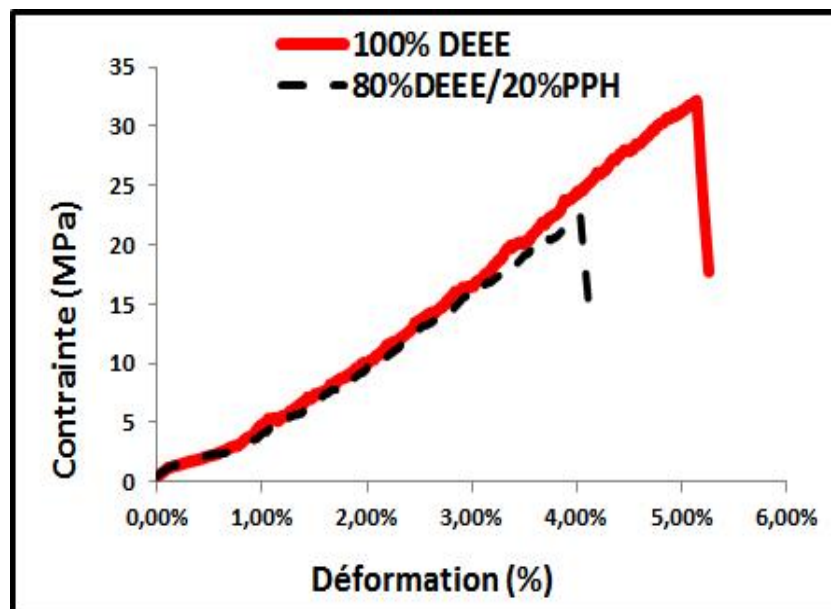


Fig. V.4. Courbe Contrainte - Déformation du mélange 80%DEEE/20%PPH

➤ Mélange 60%DEEE/40% PPH

La courbe de traction du mélange 60%DEEE/40%PPH donnée par la figure V.5 montre que l'ajout de 40% de PPH au DEEE une diminution des propriétés de résistance et de ductilité pour le mélange même comportement déjà observé pour le mélange 80%DEEE/20%PPH.

Résultats et discussions

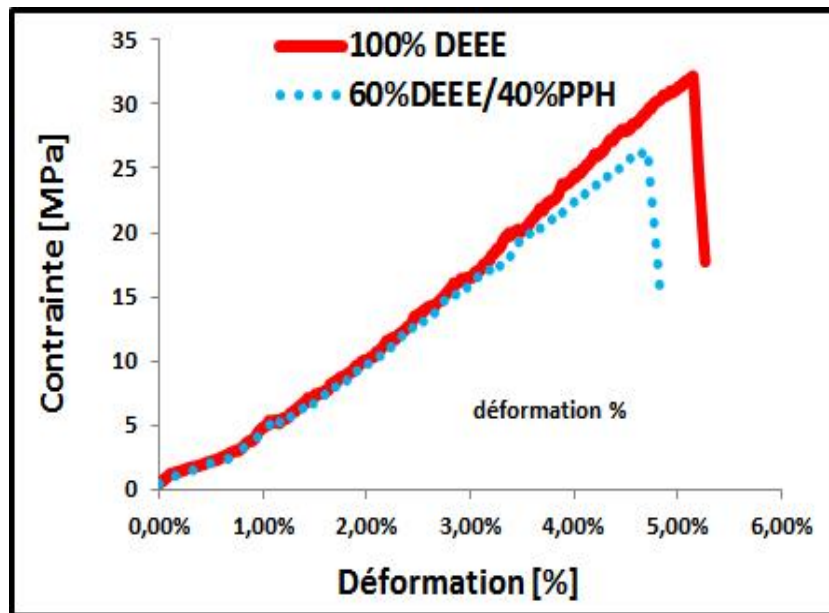


Fig. V.5. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 60%DEEE/40%PPH

➤ Mélange 50%DEEE/50%PPH

La courbe de traction du mélange 50%DEEE/50%PPH, donnée par la figure V.6, montre que l'ajout de 50% en masse de PPH à la matrice DEEE engendre une contrainte maximale à la rupture inférieure à celle des DEEE avec une ductilité équivalente.

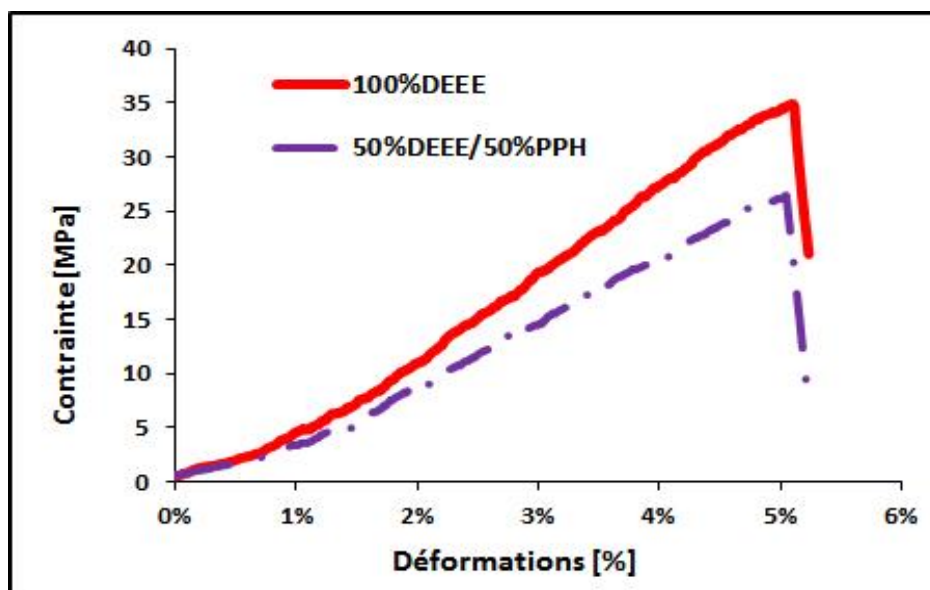


Fig. V.6. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 50%DEEE/50%PPH

Résultats et discussions

➤ Mélange 40%DEEE/60%PPH

La courbe de traction du mélange 40%DEEE/60% PPH, donnée par la figure V.7, montre l'amélioration de la ductilité par rapport aux DEEE.

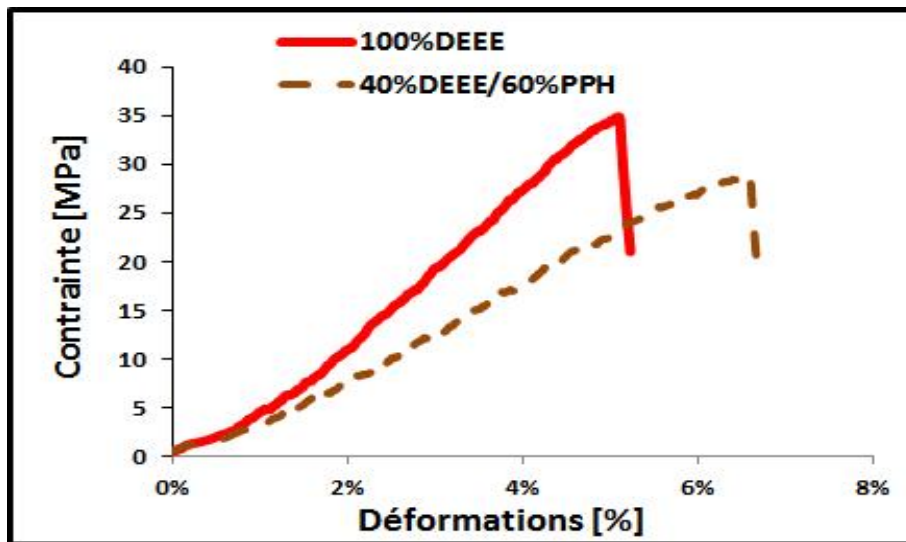


Fig. V.7. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 40%DEEE/60%PPH.

➤ Mélange 20%DEEE/80%PPH

La courbe de traction du mélange 20%DEEE/80% PPH, donnée par la figure V.8, montre l'amélioration de la ductilité qui dépasse 70% par rapport au DEEE.

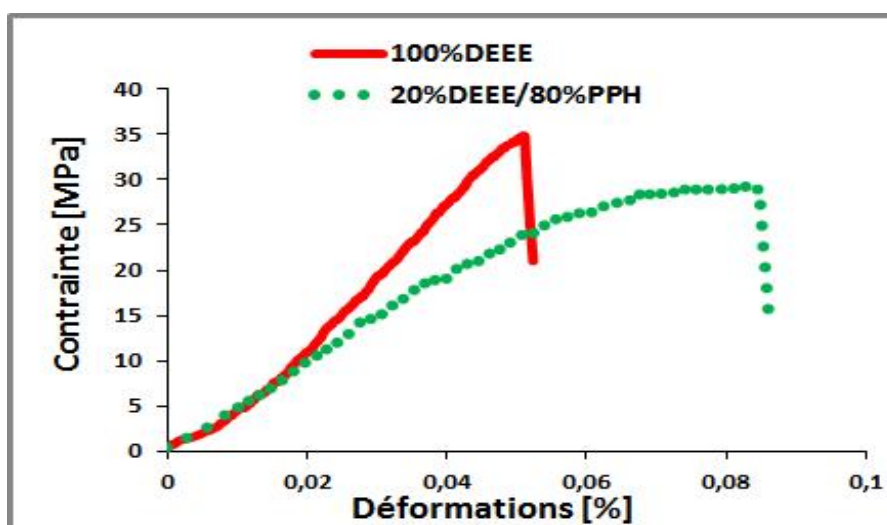


Fig. V.8. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 20%DEEE/80%PPH.

Résultats et discussions

a) Courbes Contrainte-Déformation des mélanges DEEE/PPH avec SBR

Le second objectif de ce travail est de considérer l'influence de l'ajout d'un élastomère, le Styène Butadiène Rubber (SBR) sur les propriétés mécaniques des mélanges DEEE/PPH. Ainsi, nous avons rajouté 5, 10 et 15% en masse pour chaque mélange. La même procédure expérimentale leur est appliquée pour la réalisation des éprouvettes et la caractérisation. L'essai de traction, nous permet d'avoir les courbes de la relation Contrainte-Déformation.

- **DEEE/SBR**

Les courbes de traction des mélanges DEEE/5%SBR, DEEE/10%SBR et DEEE/15%SBR données respectivement par les figures V.9, V.10 et V.11, montrent que l'ajout du SBR à la matrice DEEE engendre une diminution des propriétés de résistance et de ductilité.

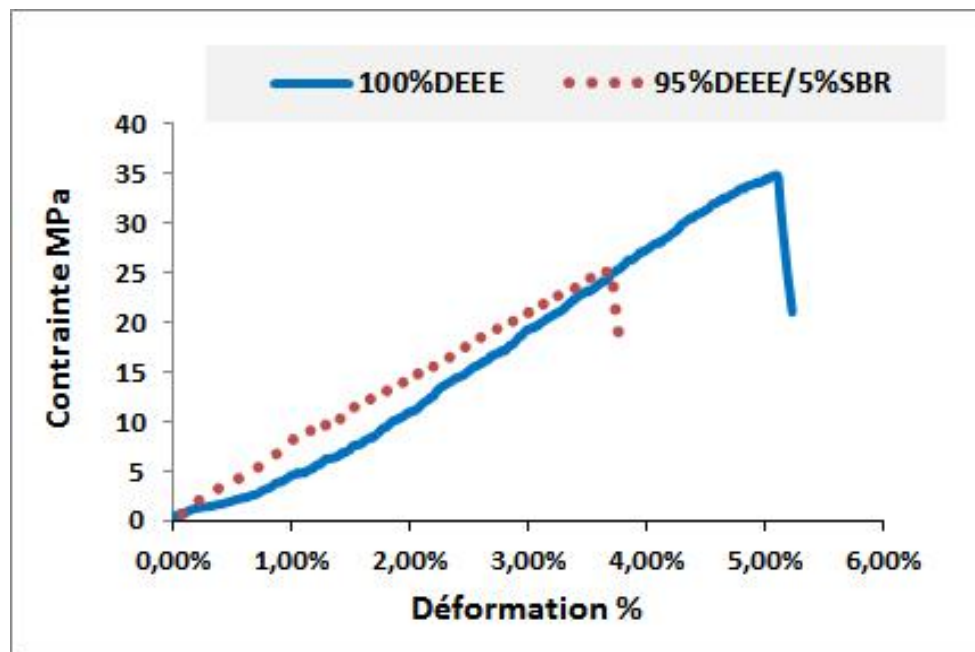


Fig. V.9. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 95% DEEE/5% SBR

Résultats et discussions

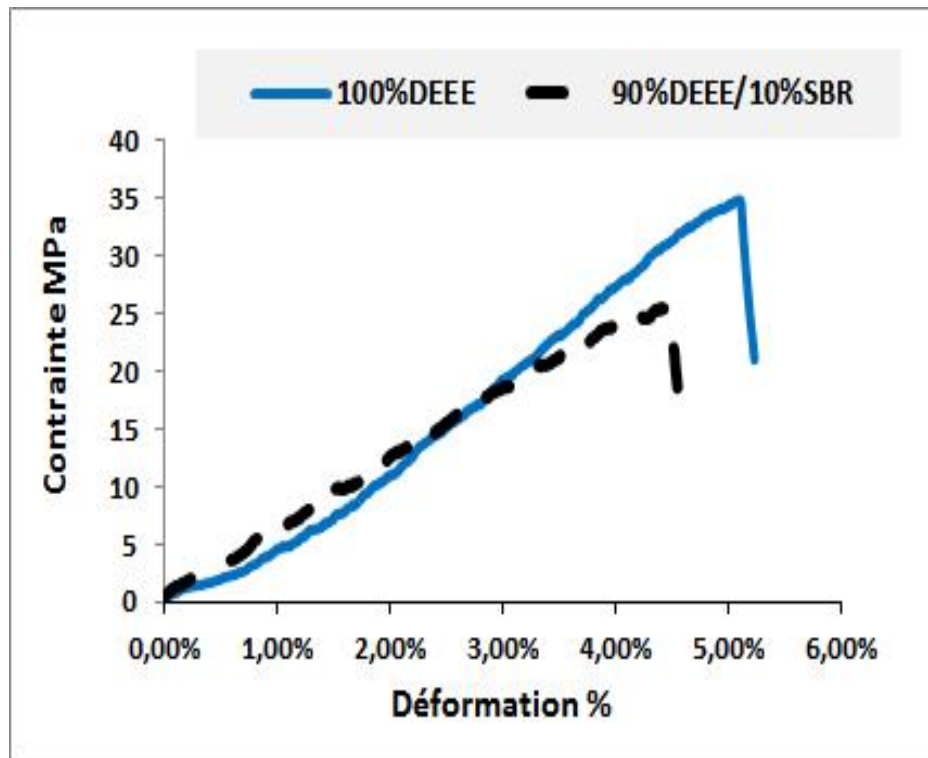


Fig. V.10. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 90% DEEE/10% SBR.

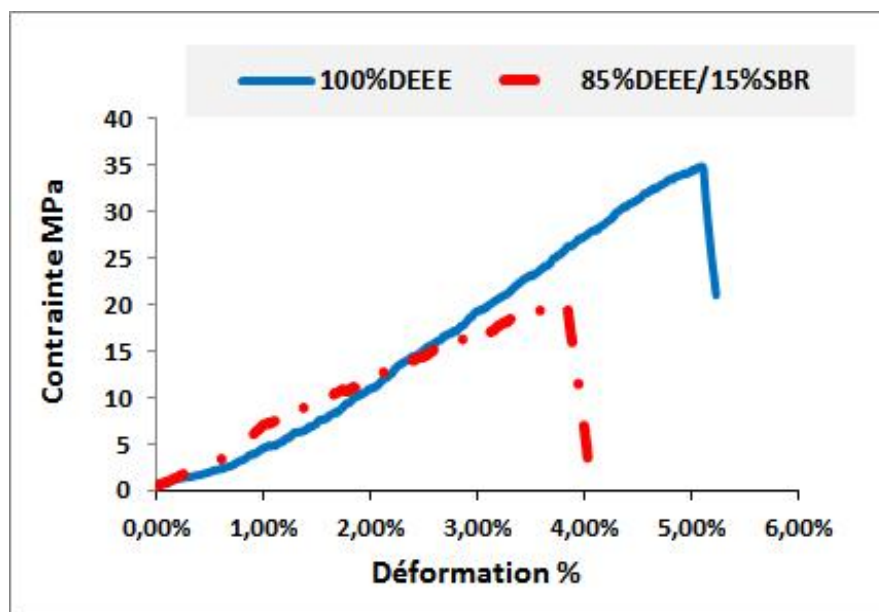


Fig. V.11. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 85% DEEE/15% SBR

Résultats et discussions

La figure V.12 représente la superposition des courbes de traction des mélanges 100% DEEE, (95%DEEE+5% SBR), (90%DEEE+10%SBR) et (85%DEEE+15% SBR). On constate que la présence du SBR dans la matrice DEEE, engendre une diminution de la résistance à la rupture avec une ductilité quasi équivalente

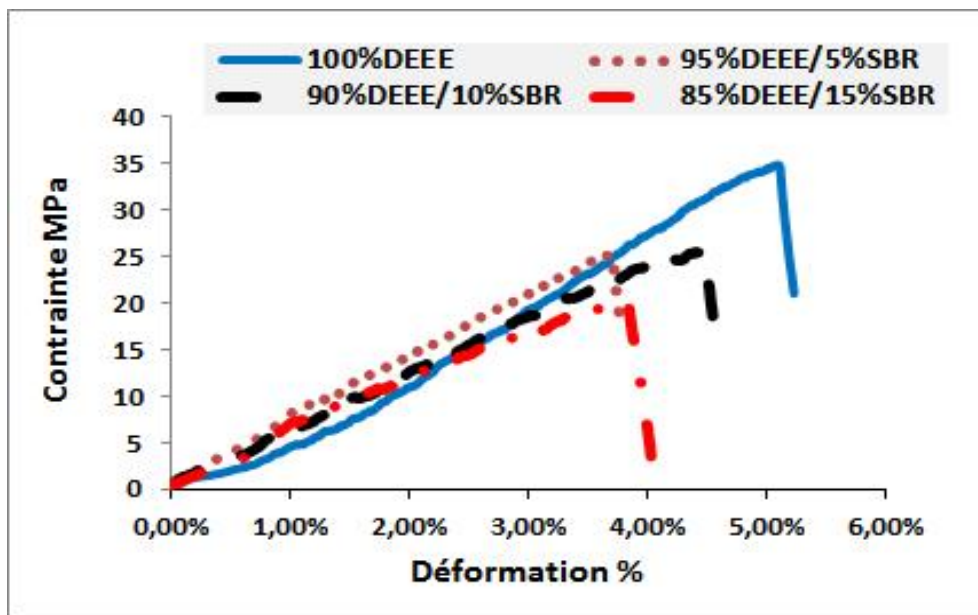


Fig. V.12.Courbe de traction des mélanges DEEE et DEEE avec SBR.

- **PPH/SBR**

Les courbes de traction des mélange PPH/5%SBR, PPH/10%SBR et PPH/15%SBR données respectivement par les figures V.13, V.14 et V.15, montrent que l'ajout du SBR au polymère PPH engendre une diminution de la contrainte maximale ainsi que de la déformation à la rupture de tous les mélanges.

Plus la quantité du SBR augmente dans la matrice, plus les propriétés mécaniques de résistance et de ductilité diminuent

Résultats et discussions

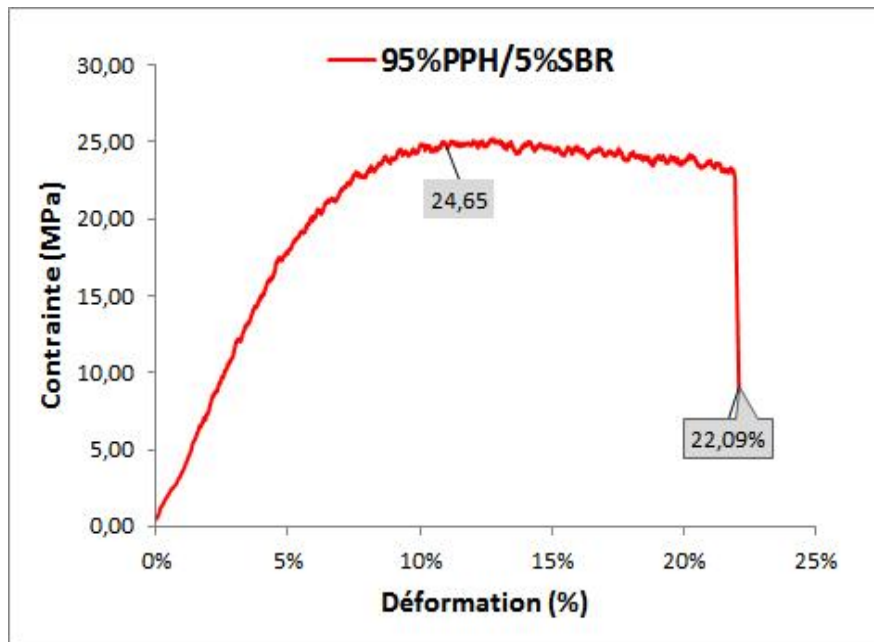


Fig. V.13. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 95% PPH /5%SBR

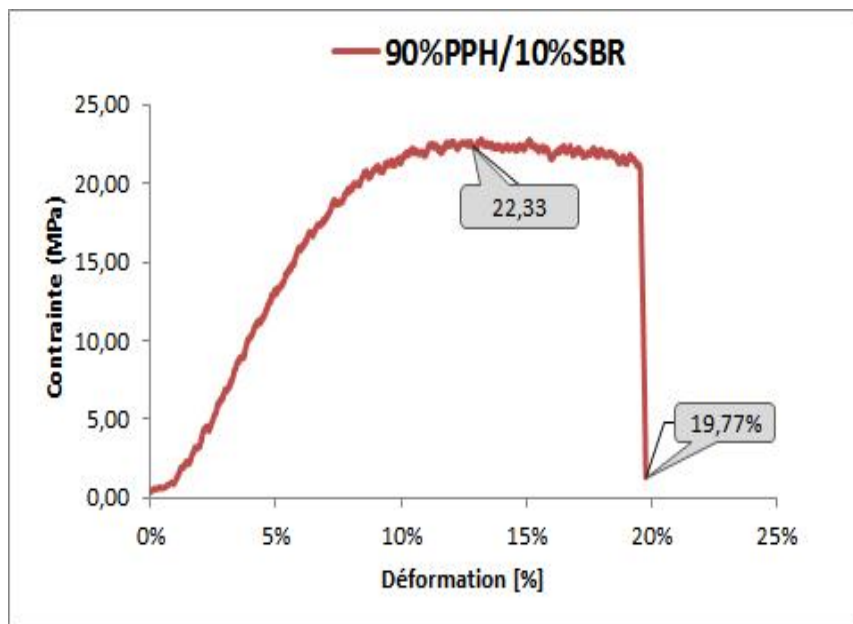


Fig. V.14. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 90% PPH/10%SBR

Résultats et discussions

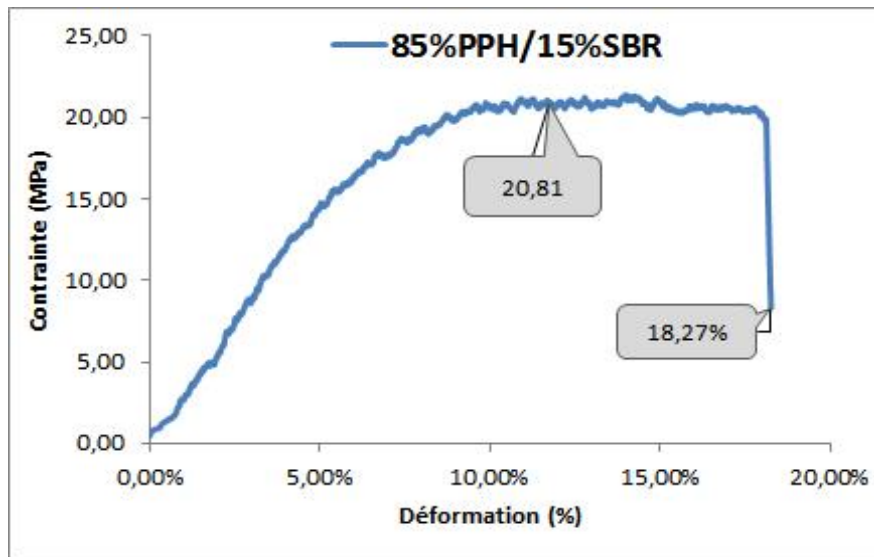


Fig. V.15. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 85% DEEE/15% SBR.

- **Courbes Contraintes-Déformation des mélanges DEEE/PPH/SBR**

Nous allons présenter, dans ce qui suit, les courbes Contraintes-Déformations des mélanges DEEE/PPH avec incorporation du SBR aux concentrations de 5, 10 et 15%.

- ❖ **Mélanges 80% DEEE/20% PPH/SBR**

La figure V.16 représente la courbe Contrainte-Déformation du mélange 80% DEEE/20% PPH/5% SBR (76% DEEE/19% PPH/5% SBR)

Résultats et discussions

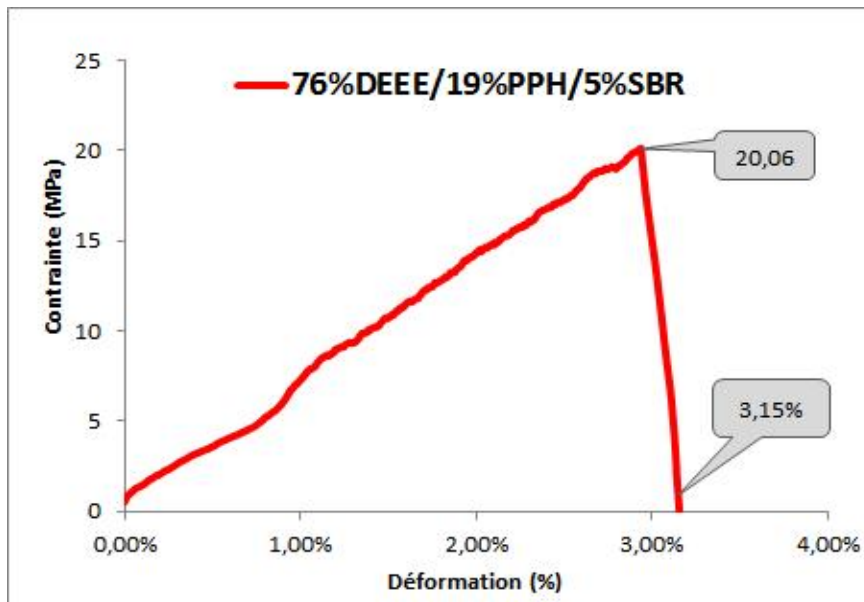


Fig. V.16. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 76% DEEE/19% PPH/5% SBR

La figure V.17 représente la courbe Contrainte-Déformation du mélange 80% DEEE/20% PPH/10% SBR (72% DEEE/18% PPH/10% SBR)

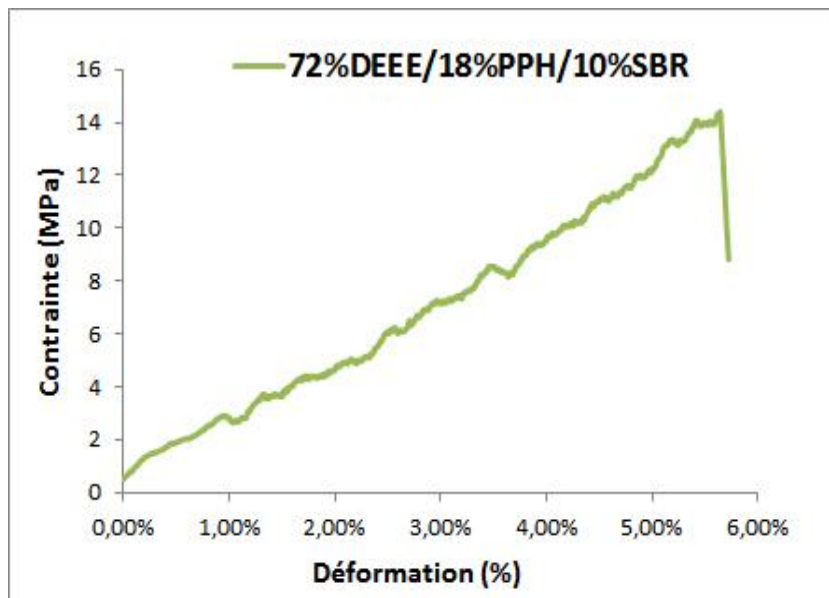


Fig. V.17. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 72% DEEE/18% PPH/10% SBR

La figure V.18 représente la courbe Contrainte-Déformation du mélange 80% DEEE/20% PPH/15% SBR (68% DEEE/17% PPH/15% SBR)

Résultats et discussions

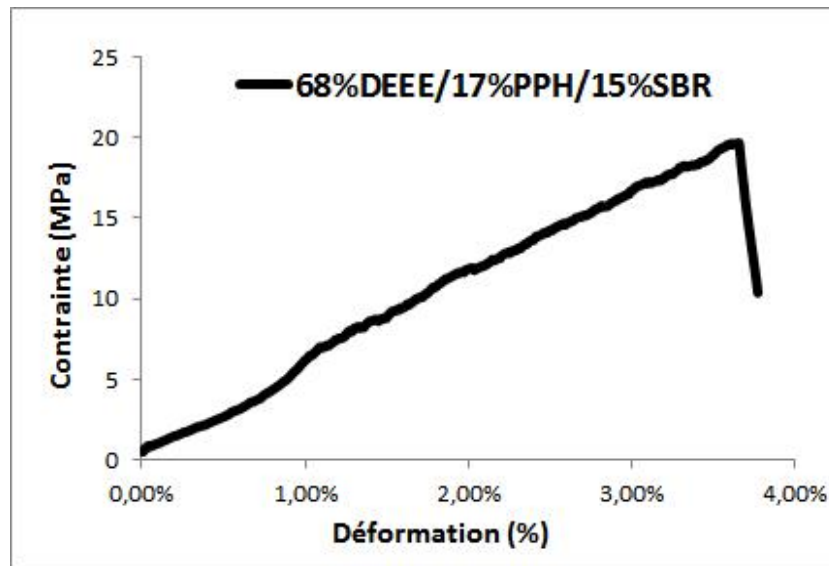


Fig. V.18. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 68% DEEE/17%PPH/15%SBR

Les figures V.16, V.17 et V.18 montrent que le comportement mécanique des mélanges 80%DEEE/20%PPH avec les différentes concentrations de SBR est le même comportement mécanique des mélanges 80%DEEE/20%PPH sans SBR qui reflète un comportement fragile.

❖ Mélanges 60%DEEE/40%PPH/SBR

La figure V.19 représente la courbe Contrainte-Déformation du mélange 60%DEEE/40%PPH/5%SBR (57%DEEE/38%PPH/5%SBR)

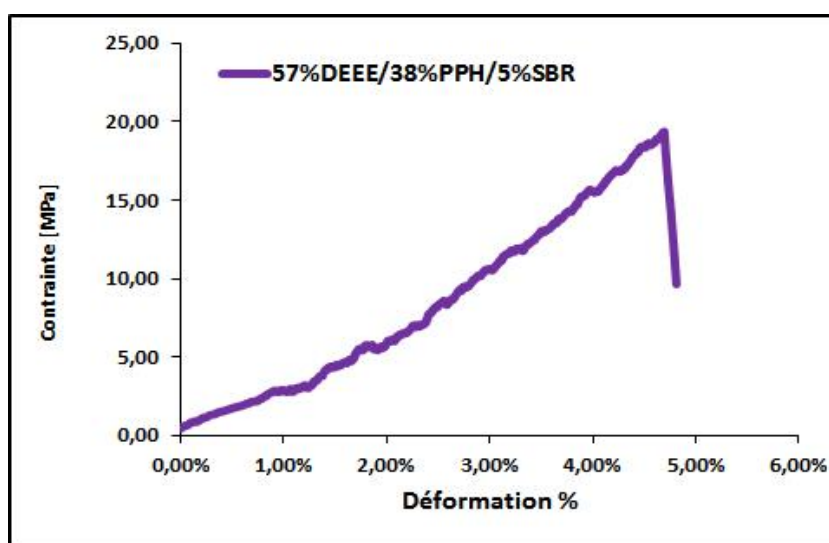


Fig. V.19. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 57% DEEE/38%PPH/5%SBR.

Résultats et discussions

La figure V.20 représente la Courbe Contrainte-Déformation du mélange 60%DEEE/40%PPH/10%SBR (54%DEEE/36%PPH/10%SBR).

La figure V.21 représente la courbe Contrainte-Déformation du mélange 60%DEEE/40%PPH/15%SBR (51%DEEE/34%PPH/15%SBR).

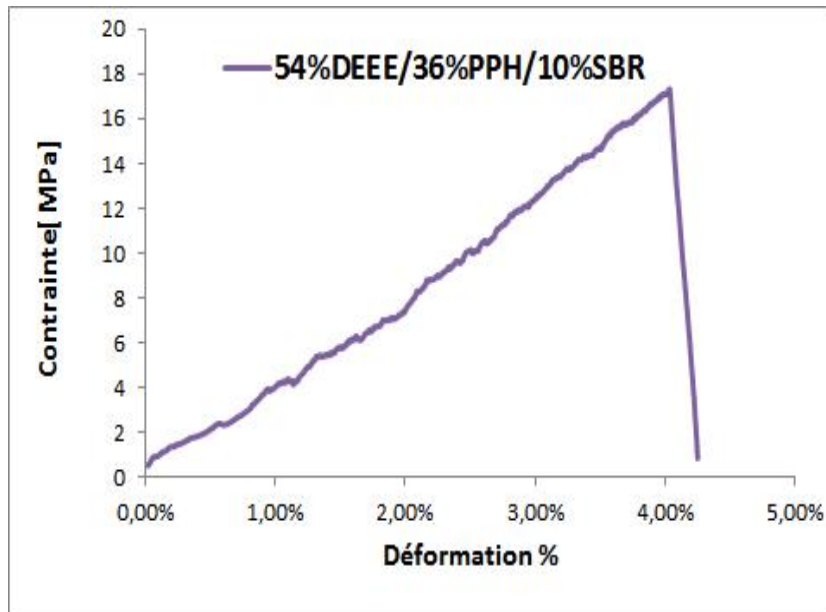


Fig. V.20. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 54% DEEE/36%PPH/10%SBR.

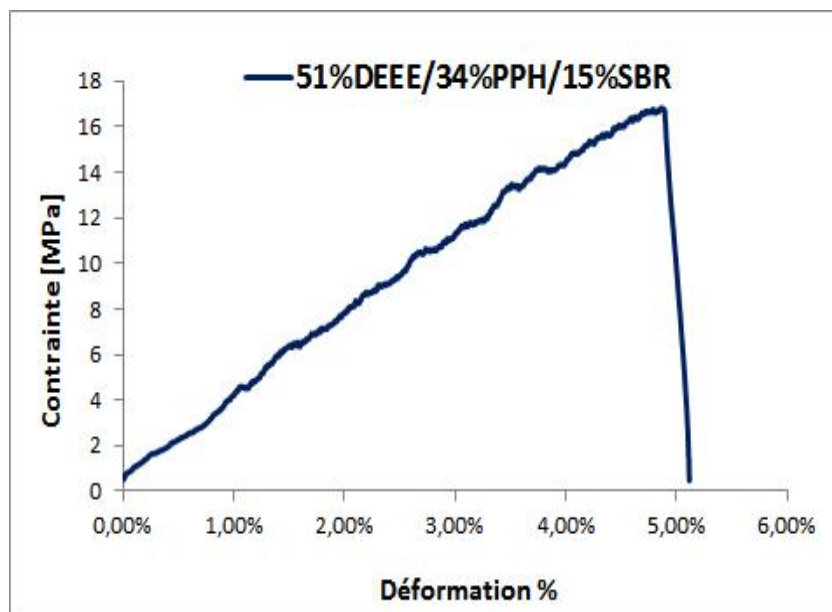


Fig. V.21. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 51% DEEE/34%PPH/15%SBR.

Résultats et discussions

Les figures V.19, V.20 et V.21 montrent que le comportement mécanique des mélanges 60%DEEE/40%PPH avec les différentes concentrations de SBR est le même comportement mécanique des mélanges 60%DEEE/40%PPH sans SBR qui reflète un comportement fragile.

❖ Mélanges 50%DEEE/50%PPH/SBR

La figure V.22 représente la Courbe Contrainte-Déformation du mélange 50%DEEE/50%PPH/5%SBR (47,5%DEEE/47,5%PPH/5%SBR).

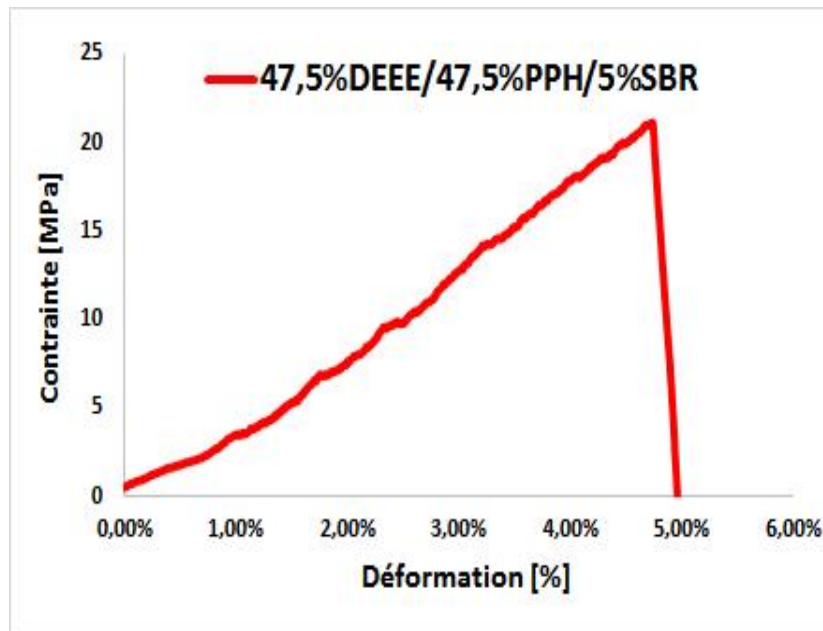


Fig. V.22. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 47,5% DEEE/47,5%PPH/5%SBR

La figure V.23 représente la Courbe Contrainte-Déformation du mélange 50%DEEE/50%PPH/10%SBR (45%DEEE/45%PPH/10%SBR).

Résultats et discussions

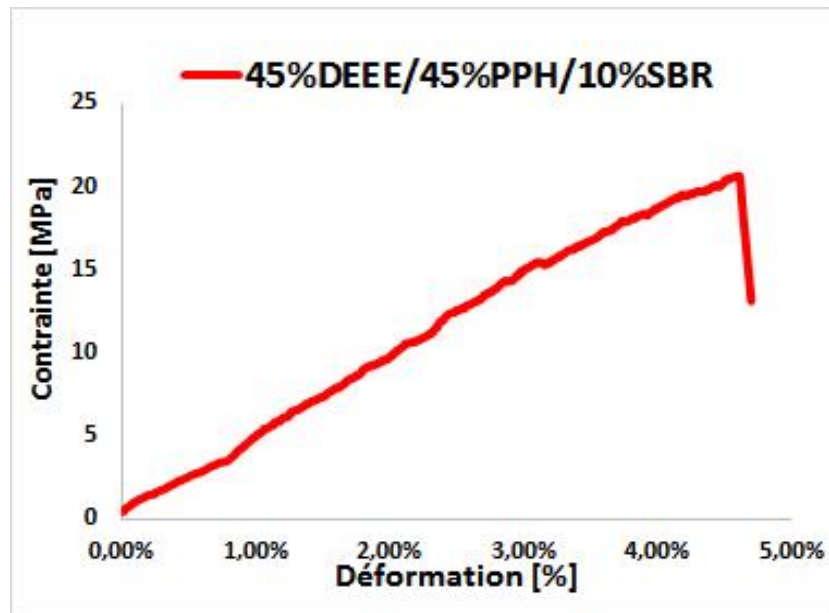


Fig. V.23. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 45% DEEE/45%PPH/10%SBR

La figure V.24 représente la Courbe Contrainte-Déformation du mélange 50%DEEE/50%PPH/15%SBR (42,5%DEEE/42,5%PPH/15%SBR).

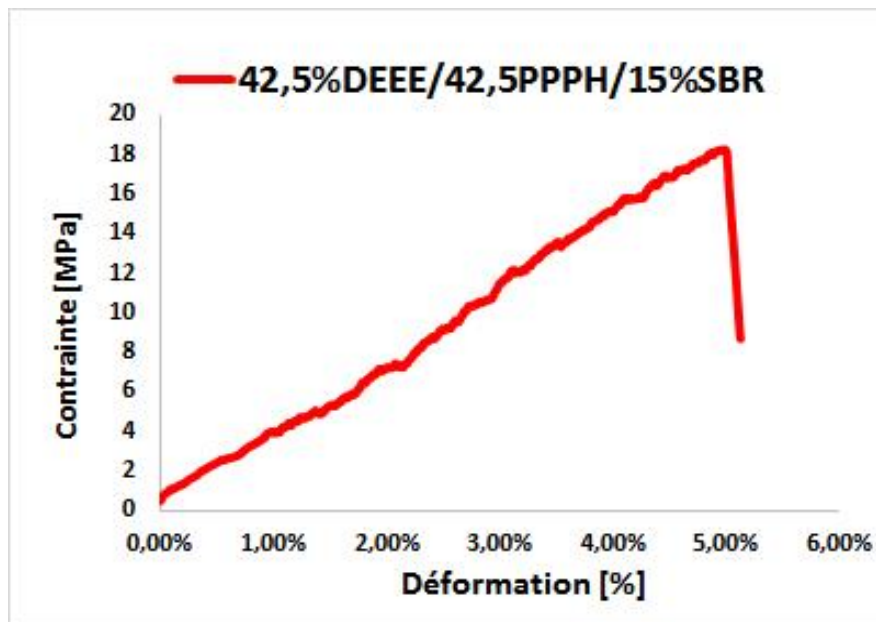


Fig. V.24. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 42,5% DEEE/42,5%PPH/15%SBR

Résultats et discussions

Les figures V.22, V.23 et V.24 montrent que le comportement mécanique des mélanges 50%DEEE/50%PPH avec les différentes concentrations de SBR est le même comportement mécanique des mélanges 50%DEEE/50%PPH sans SBR qui reflète un comportement fragile.

❖ 40%DEEE/60%PPH/SBR

La figure V.25 représente la Courbe Contrainte-Déformation du mélange 40%DEEE/60%PPH/5%SBR (37,5%DEEE/57,5%PPH/5%SBR).

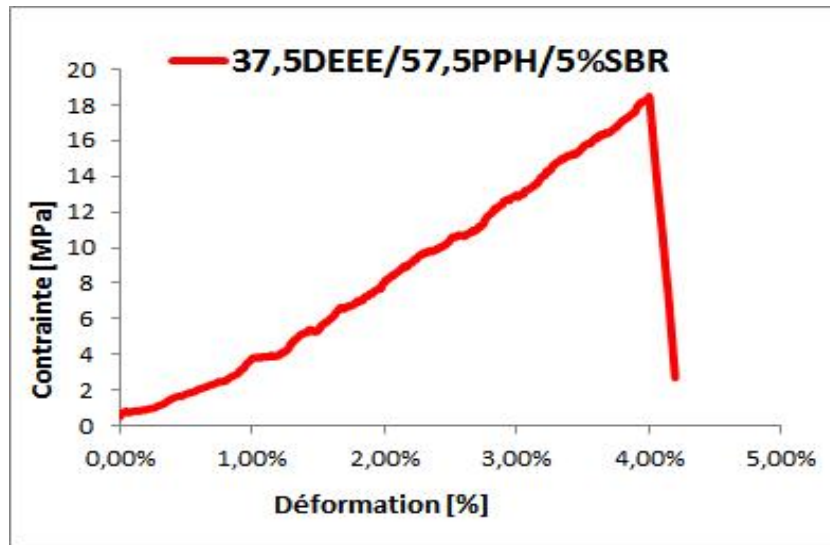


Fig. V.25. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 37,5% DEEE/57,5%PPH/5%SBR

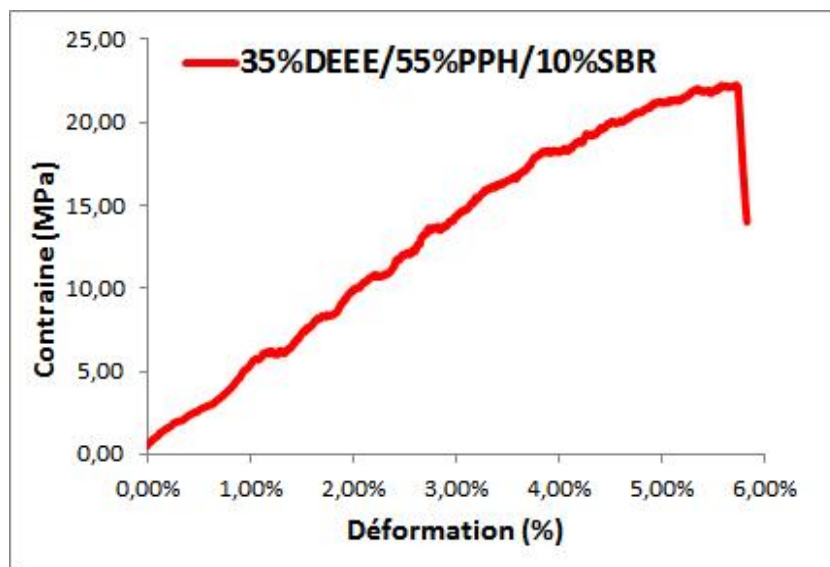


Fig. V.26. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 35% DEEE/55%PPH/10%SBR

Résultats et discussions

La figure V.26 représente la courbe Contrainte-Déformation du mélange 40%DEEE/60%PPH/10%SBR (42,5%DEEE/42,5%PPH/10%SBR).

La figure V.27 représente la Courbe Contrainte-Déformation du mélange 40%DEEE/60%PPH/15%SBR (32,5%DEEE/52,5%PPH/15%SBR).

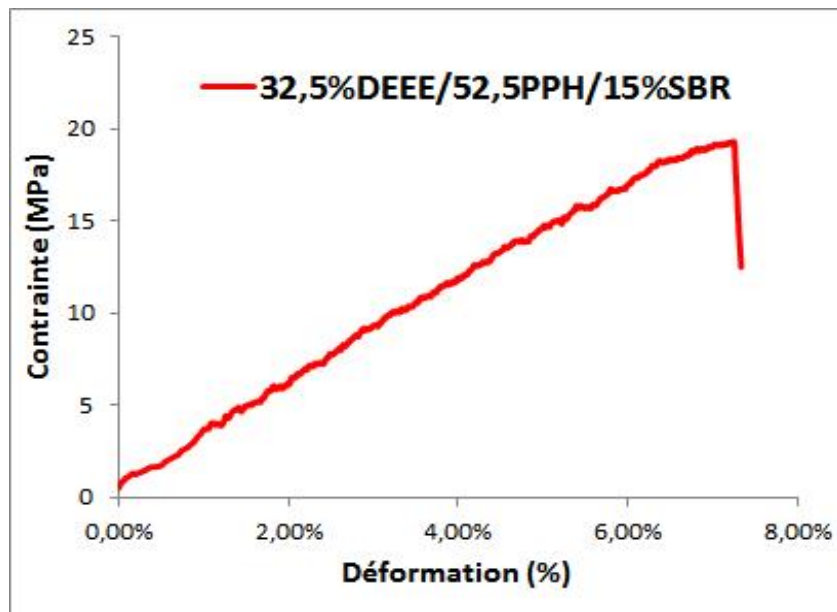


Fig. V.27. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 32,5% DEEE/52,5%PPH/15%SBR

Les figures V.25, V.26 et V.27 montrent que le comportement mécanique des mélanges 40%DEEE/60%PPH avec les différentes concentrations de SBR est le même comportement mécanique des mélanges 40%DEEE/60%PPH sans SBR qui reflète un comportement fragile

❖ 20%DEEE/80%PPH/SBR

La figure V.28 représente la courbe contrainte-déformation du mélange 20%DEEE/80%PPH/5%SBR (17,5%DEEE/77,5%PPH/5%SBR).

On remarque sur la figure ci-dessous que la pente de la courbe diminue comparativement avec les pente des courbes des mélanges avec SBR précédents, ceci montre que le mélange est moins fragile et possède un pseudo plateau ductile.

Résultats et discussions

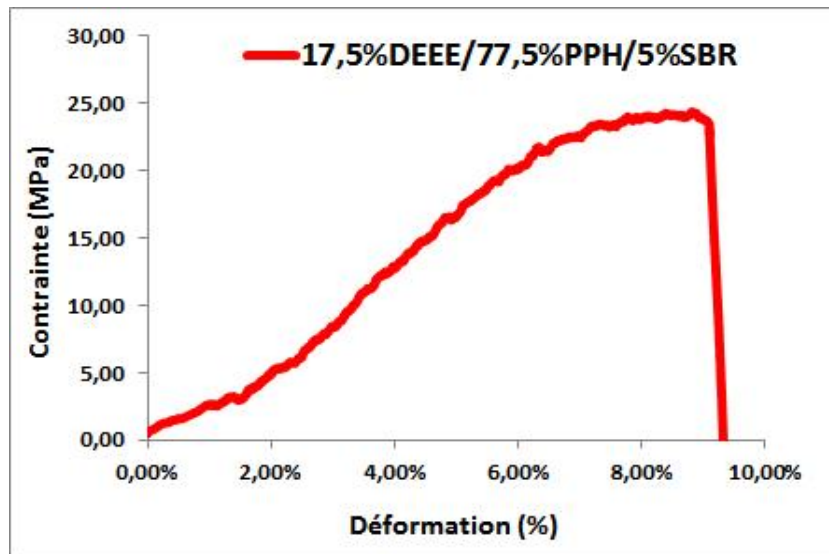


Fig. V.28. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 17,5% DEEE/77,5% PPH/5% SBR

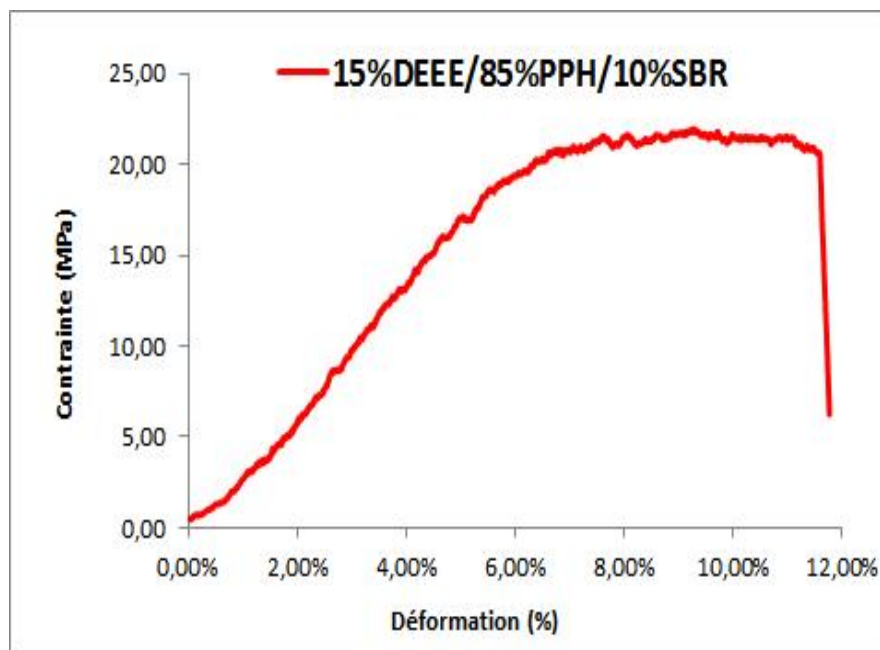


Fig. V.29. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 15% DEEE/85% PPH/10% SBR

La figure V.29 représente la Courbe Contrainte-Déformation du mélange 20% DEEE/80% PPH/10% SBR (15% DEEE/75% PPH/10% SBR).

Résultats et discussions

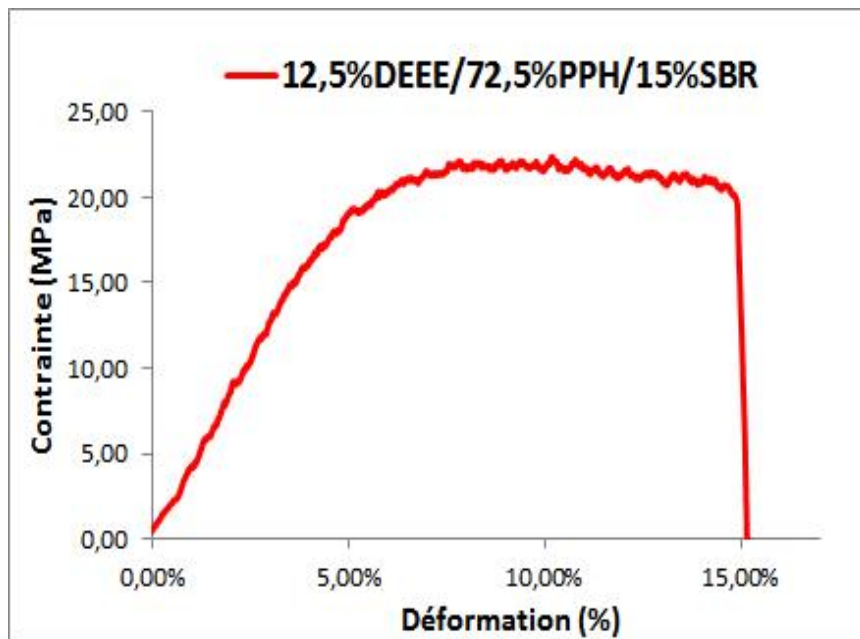


Fig. V.30. Courbe Contrainte-Déformation du mélange 12,5% DEEE/72,5% PPH/15% SBR

Pour ce dernier cas des courbes contraintes déformation nous superposons les (3) courbes de contraintes pour les différents taux de SBR et nous obtenons la courbe V.31

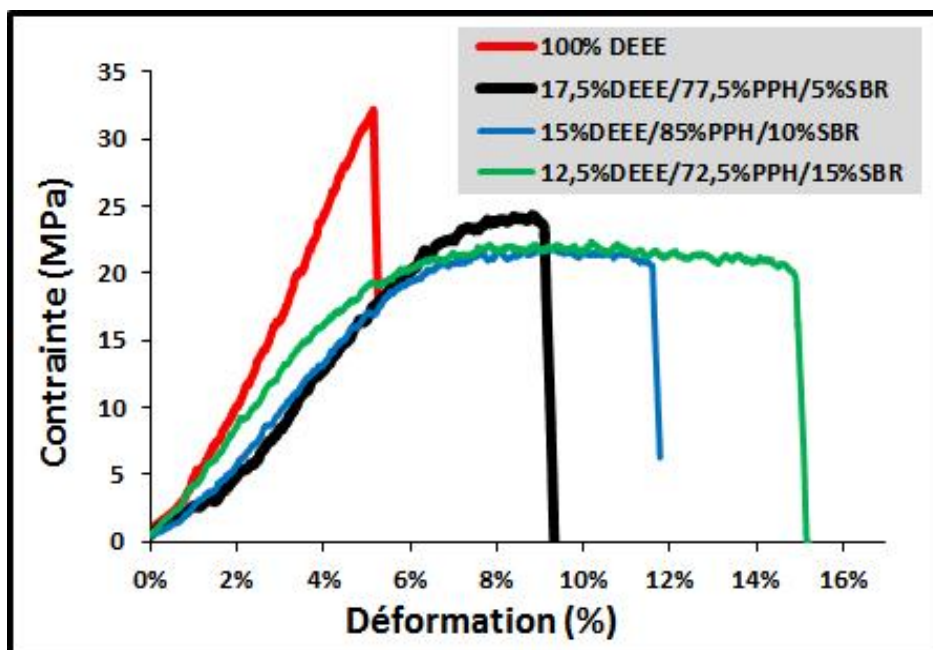


Fig. V.31. La superposition des mélanges DEEE avec différents pourcentage de SBR.

Résultats et discussions

V.2.2 Variations du module d'élasticité des différents mélanges

V.2.2.1. Variations du module d'élasticité des différents mélanges sans SBR

partir de la figure V.32, nous déterminons la variation du module d'élasticité des mélanges en fonction de la concentration de PPH dans les mélanges [DEEE/PPH] que nous reportons sur la figure V.32. Elle montre que le module d'élasticité diminue avec l'augmentation de la concentration du PPH dans le mélanges (DEEE/PPH).

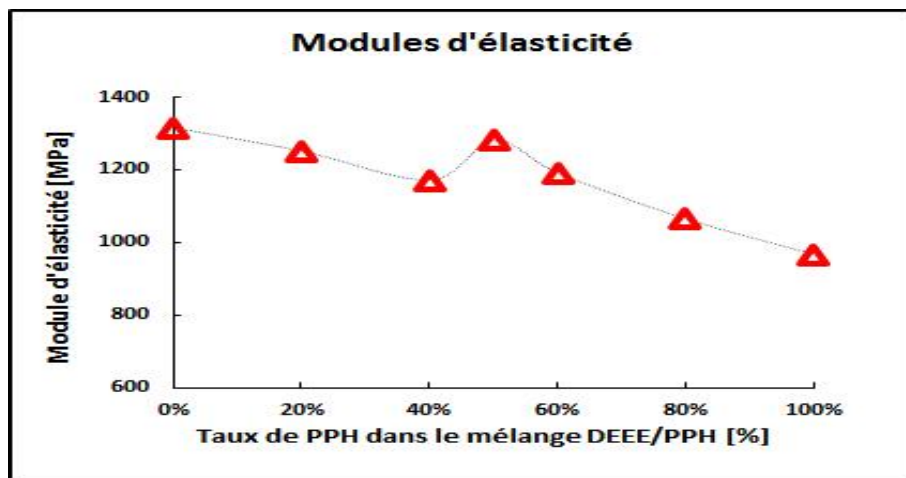


Fig. V.32. Variation du module d'élasticité en fonction du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH)

V.2.2.2 Variations du module d'élasticité des différents mélanges avec SBR

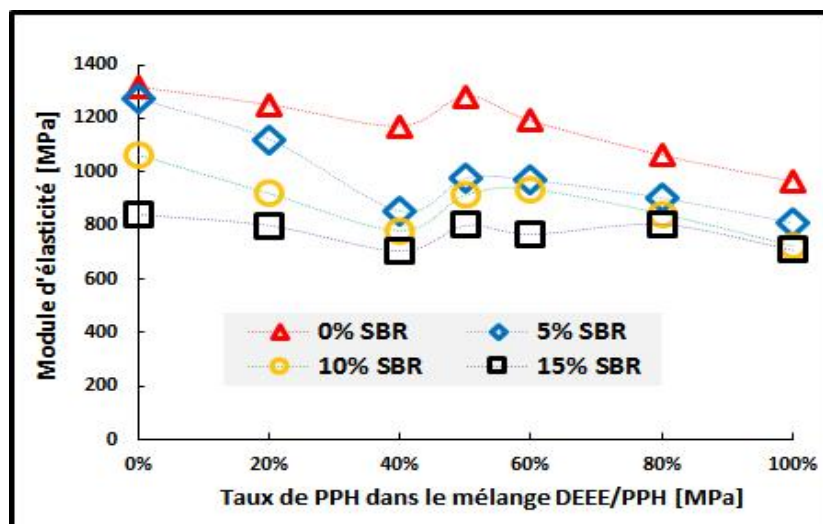


Fig. V.33. Variation du module d'élasticité en fonction du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH/SBR)

Résultats et discussions

La figure V.33, nous donne deux informations, la première concerne la variation du module d'élasticité pour un même mélange, en fonction de la quantité, en fonction de la concentration en SBR . où nous constatons que plus la quantité de SBR augmente de 5, 10 et 15%, plus le module d'élasticité diminue, et ce pour tous les mélanges. La seconde information donnée par la figure est la variation du module d'élasticité en fonction du taux de PPH dans le mélange DEEE/PPH à concentration en SBR fixé, nous constatons dans ce cas de figure une légère diminution de la valeur du module d'élasticité avec l'augmentation du taux de PPH dans le mélange DEEE/PPH/SBR.

V.2.3. Variations de l'allongement à la rupture des différents mélanges

Comme pour le module d'élasticité, on détermine l'allongement à la rupture pour chaque mélange et qu'on représente sur la figure V.34.

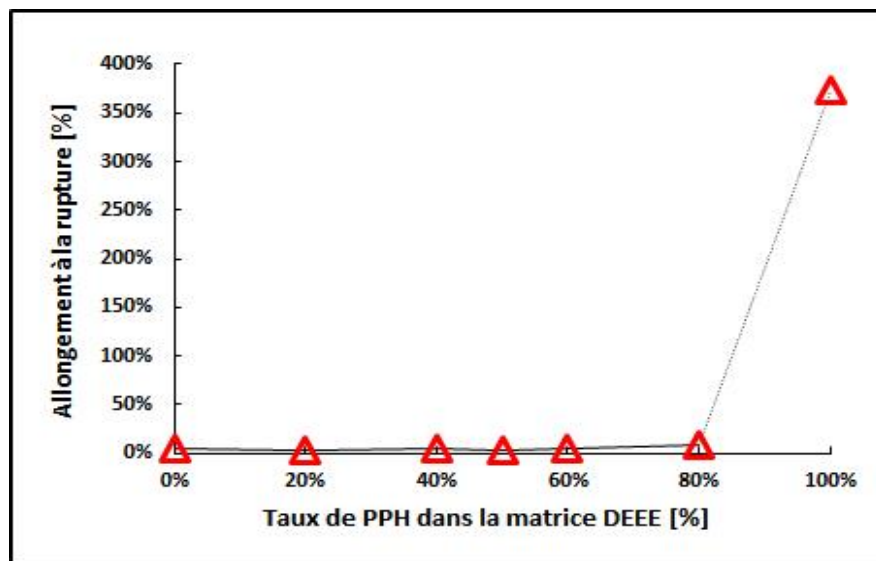


Fig. V.34. Variation de l'allongement à la rupture du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH)

Nous constatons une différence entre les mélanges sur le caractère fragile de tous les mélanges [DEEE/PPH] en comparaison avec le caractère très ductile du 100%PPH.

Résultats et discussions

V.2.4. Variations de la contrainte au seuil de l'écoulement pour les mélanges

V.2.4.1. Variations de la contrainte au seuil de l'écoulement pour les mélanges DEEE/PPH sans SBR

Comme pour le module d'élasticité, des courbes de la figure V.33 on détermine la contrainte au seuil d'écoulement pour chaque mélange et qu'on représente sur la figure V.35. Nous constatons sur le graphe que la contrainte au seuil d'écoulement diminue pour la concentration de 20, 40 et 50% de PPH dans la matrice DEEE, puis augmente pour les concentrations de 60 et 80%.

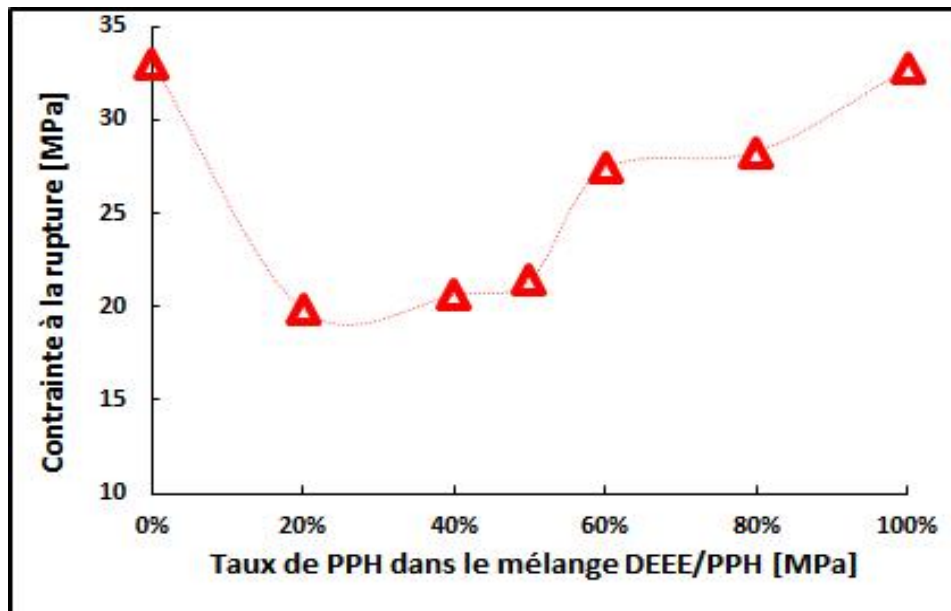


Fig. V.35. Variation de la contrainte au seuil d'écoulement en fonction du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH) sans SBR

Résultats et discussions

V.2.4.2. Variations de la contrainte au seuil d'écoulement pour les mélanges DEEE/PPH avec SBR

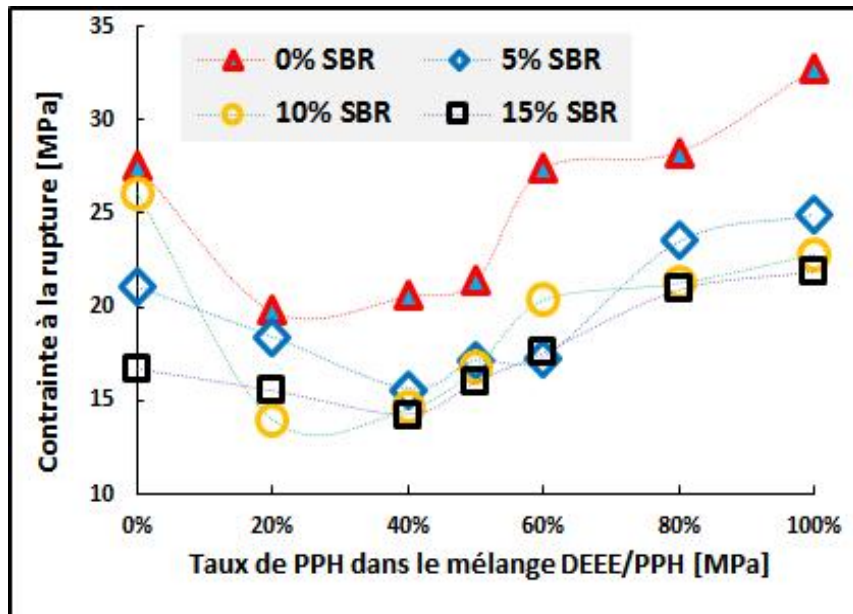


Fig. V.36. Variation de la contrainte au seuil d'écoulement en fonction du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH) avec SBR

La figure V.36, nous donne deux informations, la première concerne la contrainte au seuil d'écoulement pour un même mélange en fonction de la concentration en SBR, où nous constatons que cette contrainte est plus faible que celle du mélange sans SBR. La seconde information donnée par la figure est la variation de la contrainte au seuil d'écoulement en fonction du taux de PPH dans le mélange DEEE/PPH, au concentration en SBR fixé, nous constatons que cette contrainte au seuil d'écoulement diminue pour les concentrations de 20, 40 et 50% de PPH dans la matrice DEEE, puis augmente pour les concentrations de 60, 80 et 100%.

V.3 La résilience

Pour la caractérisation concernant la résistance aux chocs, nous avons effectué des essais de résilience sur (5) éprouvettes pour chaque échantillon, et, nous retenons la valeur moyenne et que nous résumons dans les tableaux ci dessous :

V.3.1. La résilience des mélanges sans SBR

Le tableau V.1 résume les valeurs de résilience des mélanges DEEE/PPH sans SBR

Résultats et discussions

Tableau V.1 : Valeurs de la résilience des mélanges DEEE/PPH. Sans SBR.

Mélange	Résilience [kJ/m ²]
Taux de PPH	
0%	1,71
20%	1,77
40%	1,82
50%	1,80
60%	1,64
80%	1,70
100%	1,81

D'après le tableau ci-dessus, nous traçons la courbe de variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans la matrice DEEE/PPH et est présentée par la figure V.37.

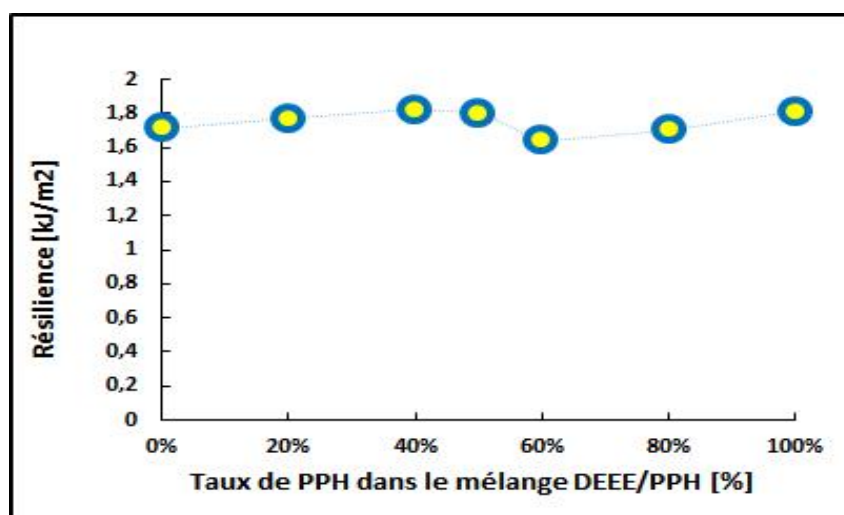


Figure V.37. Variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH)

Résultats et discussions

Le graphe ci-dessus montre que la résilience reste quasi constante avec la concentration de PPH dans le mélange (DEEE/PPH), toutefois la résilience du PP est plus grande que celle du mélange 100%DEEE, et on note une légère augmentation de la résilience avec l'augmentation de la quantité de PPH dans le mélange DEEE, jusqu'au mélange 60% PPH/40%DEEE.

V.3.2.La résilience des mélanges avec SBR

V.3.2.1.La résilience des mélanges avec 5% SBR

Tableau V.2 Valeurs de la résilience des mélanges DEEE/PPH avec 5% SBR.

Mélange avec 5% SBR	Resilience [kJ/m ²]
Taux de PPH	
0%	2
20%	1,96
40%	1,89
50%	1,60
60%	2,26
80%	2,22
100%	2,17

Résultats et discussions

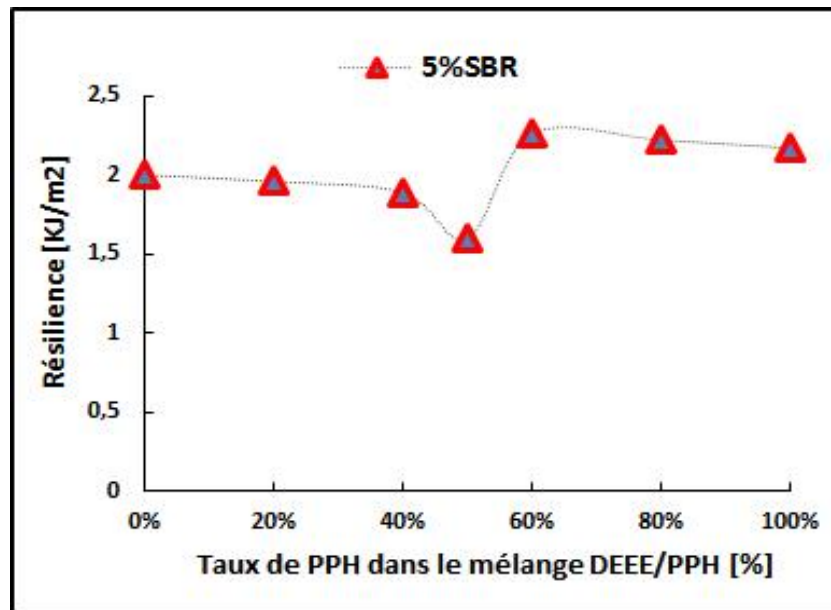


Figure V.38. Variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans le mélange (DEEE/PPH/5%SBR)

L'introduction de 5% de SBR dans les mélanges DEEE/PPH fait augmenter la résilience de tous ces mélanges sauf pour le mélange 50%DEEE/50%PPH, celui-ci sa résilience diminue de 1,8[kJ/m²]à 1,6. [kJ/m²].Le SBR joue un rôle de liaison entre les différents éléments constituant le DEEE, il augmente même la résilience du polymère 100 PPH.

V.3.2.2.La résilience des mélanges avec 10 % SBR

Tableau V.3 Valeur de la résilience des mélanges DEEE/PPH avec10.% SBR.

Mélange avec 10% SBR	Resilience [kJ/m ²]
Taux de PPH	
0%	1,8
20%	1,92
40%	1,95

Résultats et discussions

50%	1,94
60%	1,73
80%	1,57
100%	2,11

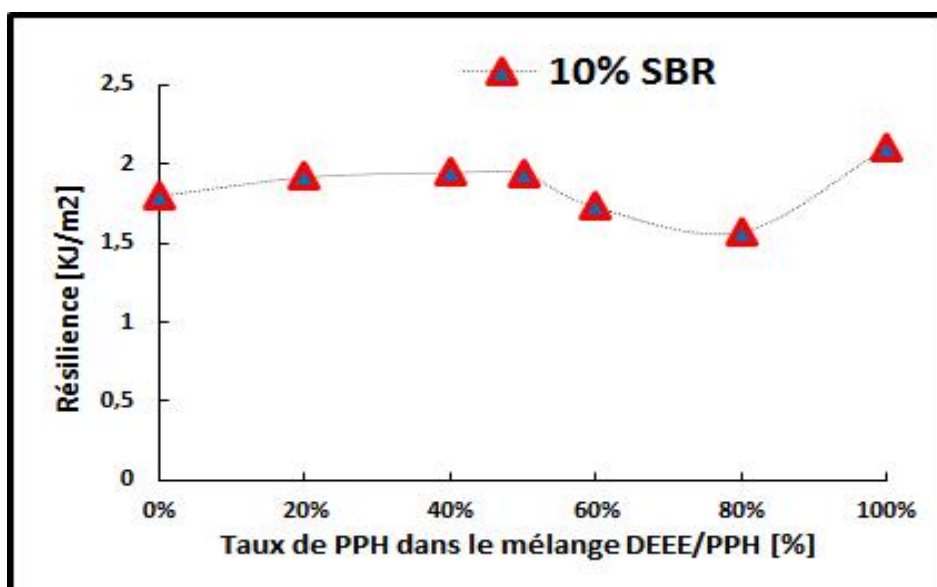


Figure V.39. Variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans les mélanges (DEEE/PPH/10%SBR)

Le graphe ci-dessus montre que l'SBR augmente la résilience des mélanges jusqu'au mélange 50% ,la résilience diminue pour le mélange 60% et 80% tout de même toutes ces valeurs de résilience restent plus importante que la valeur de la résilience des mélanges équivalent sans SBR.

Résultats et discussions

V.3.2.3. La résilience des mélanges avec 15 % SBR

Tableau V.4 Valeurs de la résilience des mélanges DEEE/PPH avec 15.% SBR.

Mélange avec 15% SBR	Résilience [kJ/m ²]
Taux de PPH	
0%	2,37
20%	2,47
40%	2,32
50%	1,85
60%	1,87
80%	1,90
100%	1,87

D'après le tableau ci-dessus nous traçons la courbe de variation de la résilience en fonction du taux de PP dans la matrice DEEE/PP avec 15% d'SBR et présentée par la *Figure V.40*

Résultats et discussions

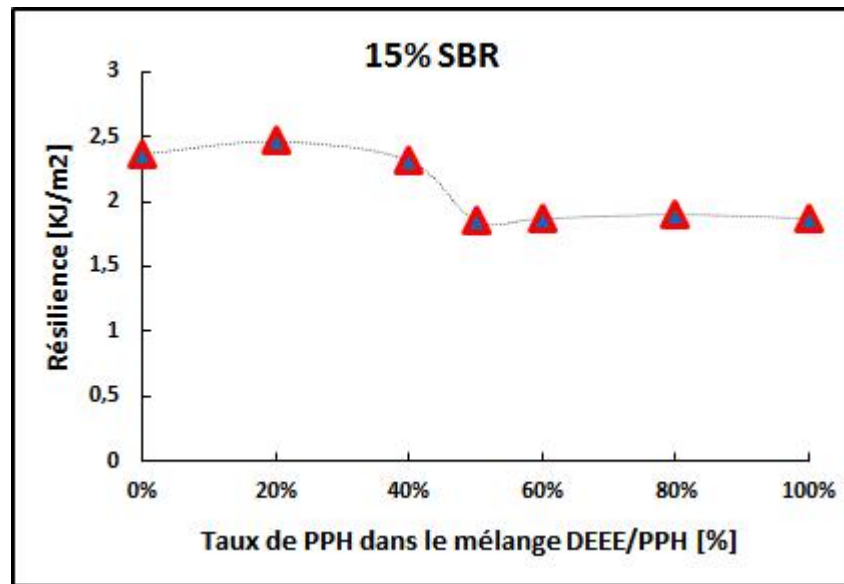


Figure V.40. Variation de la résilience en fonction du taux de PPH dans les mélanges (DEEE/PPH/15% SBR)

Le graphe ci-dessus montre que Lorsqu'on ajoute 15 d'SBR aux différents mélanges , on remarque que la résilience des mélanges se stabilise , à une valeur de l'ordre de 2.4 [kJ/m²] pour les mélanges 100% DEEE, 20% et 40% DEEE. La résilience du mélange (50% DEEE/50%PPH), diminue jusqu'à 1,8 [kJ/m²] puis se stabilise à peu près à cette valeur pour les mélanges qui restent.

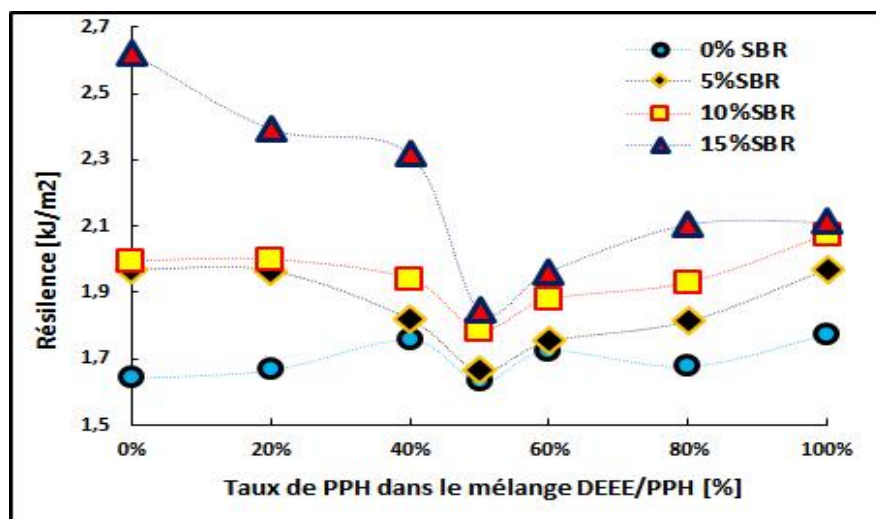


Figure V.41. Superposition des courbes de résilience des différents mélanges avec différents taux d'SBR.

Résultats et discussions

La figure V.41 représente la superposition des courbes de résiliences des mélanges DEEE/PPH/SBR, nous notons que tant que les DEEE joue le rôle de matrice dans le mélange (présence de quantité de DEEE supérieur à 50%,) le SBR augmente la résilience du mélange et plus la quantité d'SBR est élevée, plus la résilience est importante. Le mélange 50%DEEE/50%PPH

V.3.3.L'influence du SBR sur la résilience des mélanges

➤ Le mélange 100%PPH

**Tableau V.5 : valeurs de la résilience en fonction
Du taux d'SBR de la matrice 100 PP.**

Le polymère 100%PPH	
Concentration de PPH [%]	Résilience [kJ/m ²]
0%	1,81
5%	2,17
10%	2,11
15%	1,87

D'après le tableau ci-dessus , nous traçons la courbe de la résilience du PP en fonction du taux de SBR dans la matrice100%PPH est présentée par la Figure V.42

Résultats et discussions

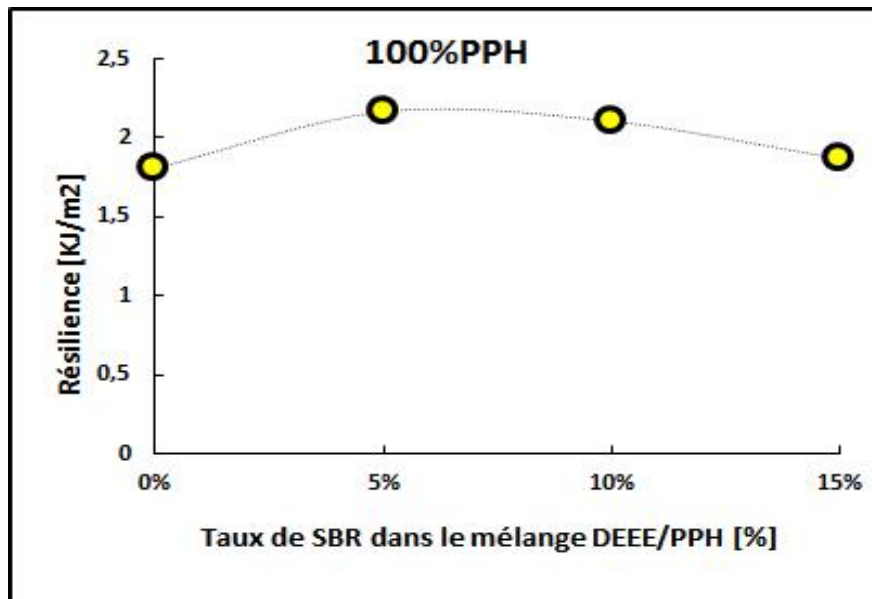


Figure V.42 : Variation de la résilience en fonction du taux de SBR
Dans la matrice 100% PP

La figure V.42 montre que l'ajout de 5% et 10% de SBR fait augmenter la résilience du PPH par contre l'ajout de 15 % n'a aucune influence sur la résilience.

➤ Mélange 80 %PP 20 %DEEE

Mélange 80%PP/20%DEEE	
%SBR	Résilience [kJ/m ²]
%0	1,7
5%	2,22
10%	1,57
15%	1,9

Tableau V.6 : valeurs de la résilience en fonction du taux de l' SBR
De la matrice 80% PP et 20% DEEE

Résultats et discussions

D'après le tableau ci-dessus , nous traçons la courbe de la résilience du PPH en fonction du taux de SBR dans la matrice 80 %PP 20 %DEEE est présentée par la figure V.43

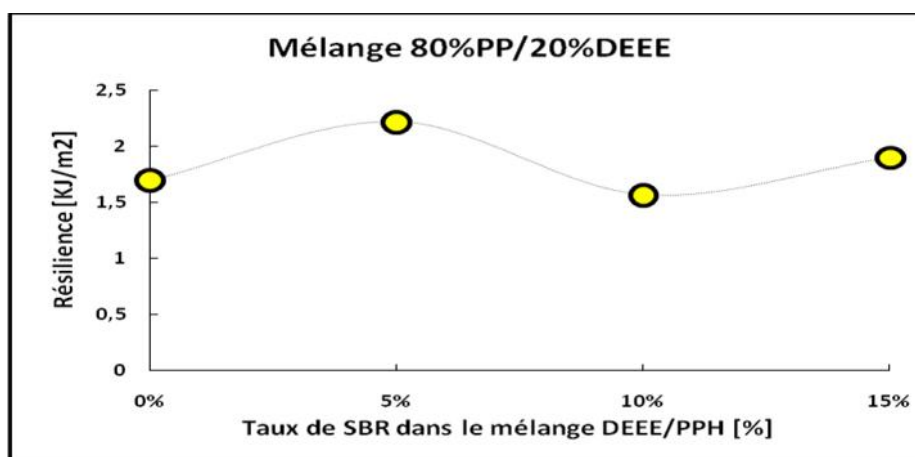


Figure V.43 : Variation de la résilience en fonction du taux de l'SBR Dans la matrice 80%PP

La figure V.43 montre qu'en ajoutant 5% de SBR au mélange, la résilience augmente mais pour l'ajout de 10% de l'SBR cette dernière diminue ; On ne note aucune influence de l'ajout de 15% SBR au mélange 80% PP 20% DEEE

➤ mélange 60% PP 40% DEEE

Tableau V.7 : valeurs de la résilience en fonction Du taux d'SBR de la matrice 60% PP et 40% DEEE

Mélange 60% PP 40% DEEE	
%SBR	Résilience [kJ/m ²]
0%	1,64
5%	2,26
10%	1,73
15%	1,87

Résultats et discussions

D'après le tableau ci-dessus , nous traçons la courbe de la résilience du PP en fonction du taux de l'SBR dans la matrice 60% PP 40% DEEE est présentée par la figure V.44

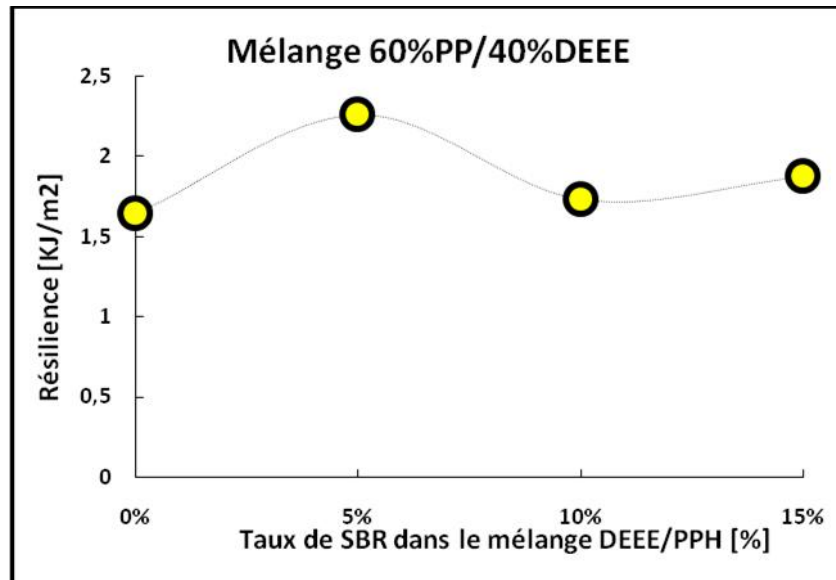


Figure V.44 : Variation de la résilience en fonction du taux de l'SBR dans la matrice 60%PP

On remarque que la résilience augmente à 5 SBR , puis se stabilise.

➤ **Mélange 50% PP et 50% DEEE**

Tableau V.8 : Valeurs de la résilience en fonction du taux de l'SBR de la matrice 50% PP et 50% DEEE

Mélange 50% PP et 50% DEEE	
%SBR	Résilience [kJ/m ²]
0%	1,8
5%	1,6
10%	1,94
15%	1,85

Résultats et discussions

D'après le tableau ci-dessus , nous traçons la courbe de la résilience du PP en fonction du taux de l'SBR dans la matrice 50% PP 50% DEEE est présentée par la Figure V.45

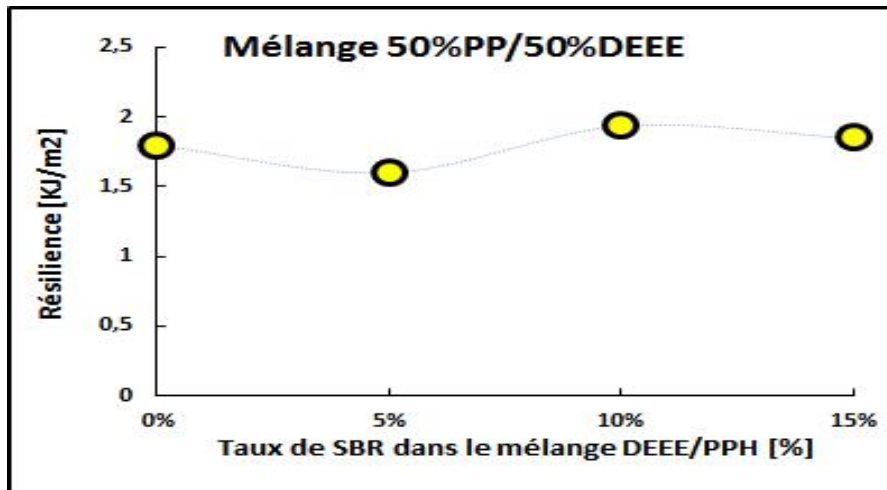


Figure V.45 : Variation de la résilience en fonction du taux de l'SBR dans la matrice 50%PP

Commentaire :

En ajoutant 5% SBR on remarque que la résilience diminue jusqu' 1.6[kJ/m²] , par contre la résilience de ce mélange 50%PP+50%DEEE augmente à 10% et à 15% SBR

➤ Mélange 40% PP et 60% DEEE .

Tableau V.9 : valeurs de la résilience en fonction du taux d'SBR de la matrice 40% PP et 60% DEEE

Mélange 40% PP et 60% DEEE	
%SBR	Résilience [kJ/m ²]
0%	1,82
5%	1,89
10%	1,95
15%	2,31682147

Résultats et discussions

D'après le tableau ci-dessus nous traçons la courbe de la résilience du PP en fonction du taux de l'SBR dans la matrice 40% PP 60% DEEE est présentée par la figure V.46

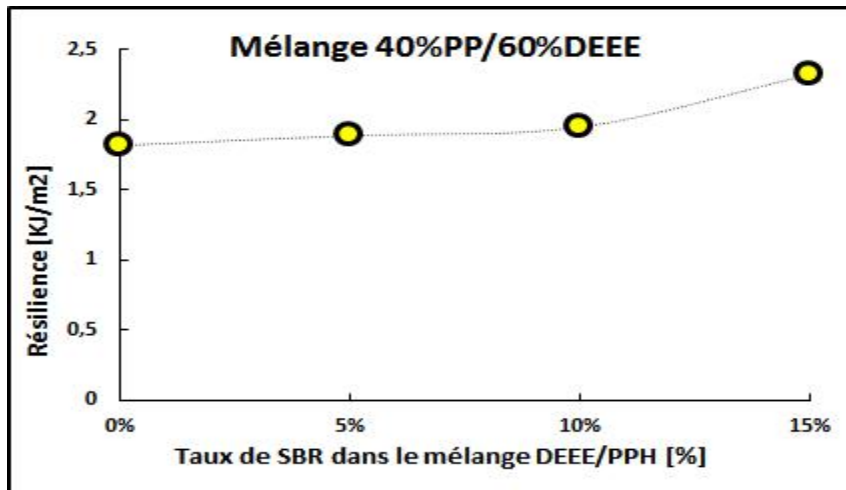


Figure V.46 : Variation de la résilience en fonction du taux de l'SBR dans la matrice 40%PP

On remarque que la résilience de ce mélange augmente avec l'augmentation du l'SBR

➤ **Mélange 20% PP 80% DEEE :**

Tableau V.10 : valeurs de la résilience en fonction du taux de SBR de la matrice 20% PP et 80% DEEE

Mélange 20% PP 80% DEEE	
%SBR	Résilience [kJ/m ²]
0%	1,77
5%	1,96650718
10%	1,92
15%	2,47

D'après le tableau ci-dessus nous traçons la courbe de la résilience du PP en fonction du taux d'SBR dans la matrice 20% PP 80% DEEE est présentée par la figure V.47

Résultats et discussions

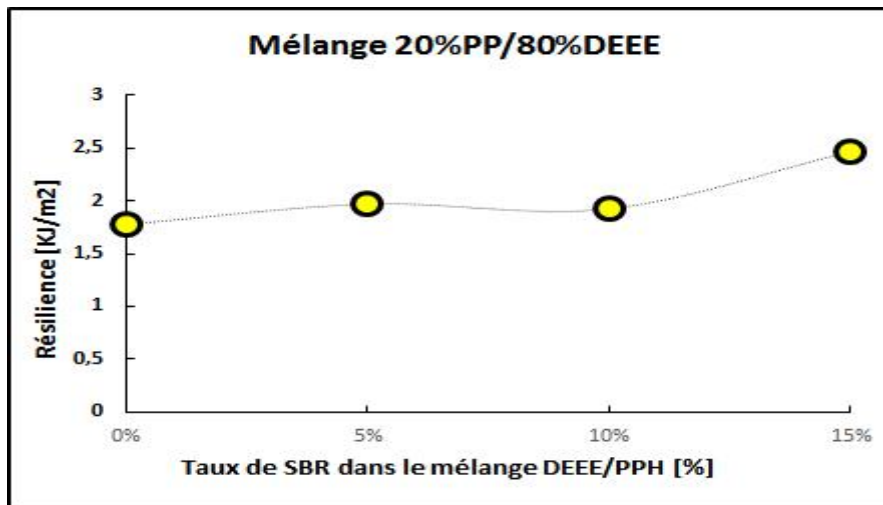


Figure V.47: Variation de la résilience en fonction du taux d’SBR dans la matrice 20%PP

On remarque que la résilience augmente légèrement lorsque on ajoute 5% et 10% SBR et elle augmente plus à 15% pour atteindre une valeur maximale de 2.47 [kJ/m²]

➤ **Mélange 0% PP 100% DEEE :**

Tableau V.11 : Valeurs de la résilience en fonction du taux De l’SBR de la matrice 0% PP et 100% DEEE

Mélange 0% PP 100% DEEE	
%SBR	Résilience [kJ/m ²]
0%	1,71
5%	2
10%	1,8
15%	2,37

D’après le tableau ci-dessus nous traçons la courbe de la résilience du PP en fonction du taux d’SBR dans la matrice 100%DEEE est présentée par la figure V.48

Résultats et discussions

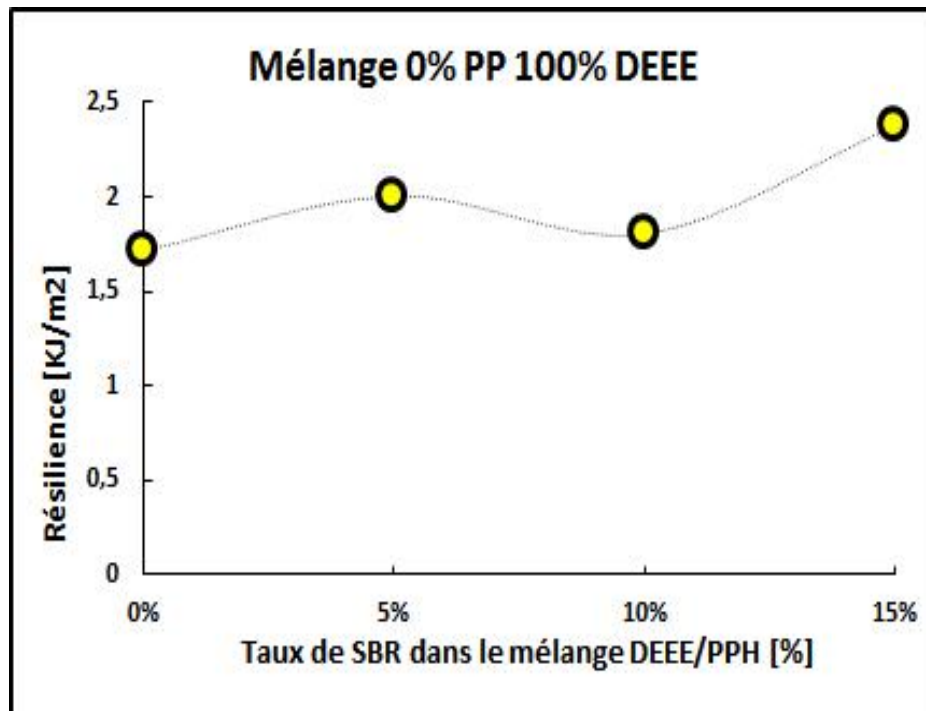


Figure V.48 : Variation de la résilience en fonction du taux de l'SBR dans la matrice 0%PP100%DEEE.

Commentaire

La résilience augmente un peu à 5% et à 10% SBR et elle augmente de plus à 15% elle atteint une valeur de 2.37 [kJ/m²]

V.4. Microdureté Knoop

Nous avons aussi procédé à la mesure des micro-duretés Knoop pour tous les mélanges.

Sur chaque échantillon, nous avons relevé les valeurs de (5) points d'indentation. Ces valeurs sont reportées sur le tableau suivant :

Résultats et discussions

Tableau V.12 : Valeurs de la microdureté des mélanges.

Mélanges	Duretés HK des différents essais	La moyenne
100% PPH/0% DEEE	3, 4, 4, 5, 5	4,2
80 % PPH/20% DEEE	2, 2, 3, 3, 3	2,6
60% PPH/40% DEEE	5, 5, 4, 4, 4	4,4
50% PP/50% DEEE	4, 4, 4, 4, 4	4,0
40% PPH/60% DEEE	2, 3, 4, 4, 4	3,2
20% PPH/80% DEEE	4, 4, 4, 4, 5	4,2
0% PPH/100% DEEE	6, 6, 6, 7, 7	6,4

La figure V.49 représente la variation de la microdureté pour chaque mélange.

La seule information : Nous constatons que l'ajout du PPH au DEEE engendre la diminution de la microdureté.

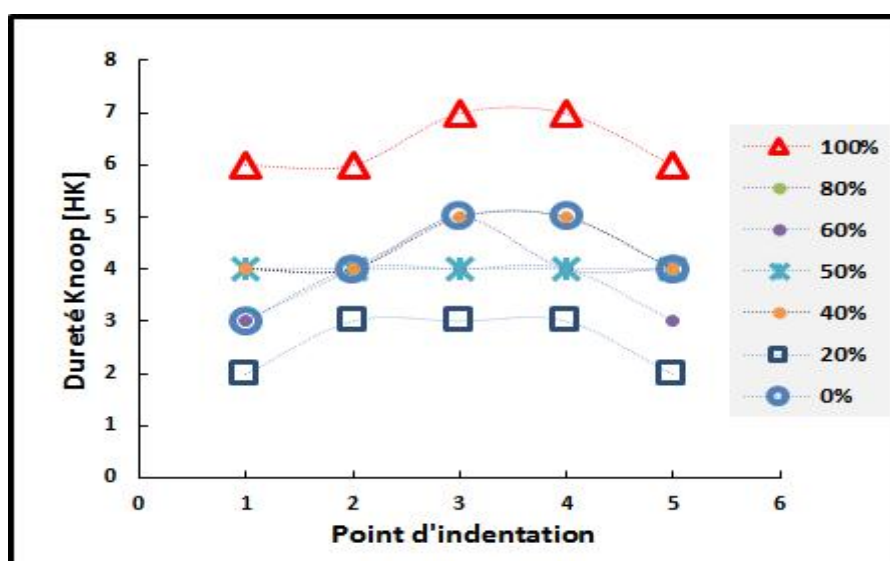


Figure V49. Variation de la microdureté pour les différents mélanges (DEEE/PPH)

Résultats et discussions

V.4.1. Caractérisation morphologique

Après la rupture des éprouvettes lors de l'essai de traction, le faciès de rupture est soumis à une observation au microscope électronique à balayage. Ces observations au MEB ont été réalisées au niveau de l'université MOULOUD MAMMARI de Tizi-Ouzou, sur un microscope de type Phillips ESEM XL 30 à filament en tungstène, couplé à un système complet de microanalyse par dispersion d'énergie (EDS X).

V.4.1.1. Observation des éléments du mélange: 100%PPH et 100%DEEE

La figure V.50 représente le faciès de rupture du polymère 100%PP, en analysant l'agrandissement 50 μ m, on remarque une homogénéité de la matrice PP une même matière (pas de contraste de couleur et pas d'inclusions). La surface de rupture est constituée d'un très grand nombre de zone (de grains) qui traduit le caractère ductile de la rupture, rupture dans le sens de l'écoulement, en effet le polymère avant sa rupture s'est transformé en très grand nombre de filaments, qui après rupture nous donnent une surface constituée de plusieurs zones de planéité variante.

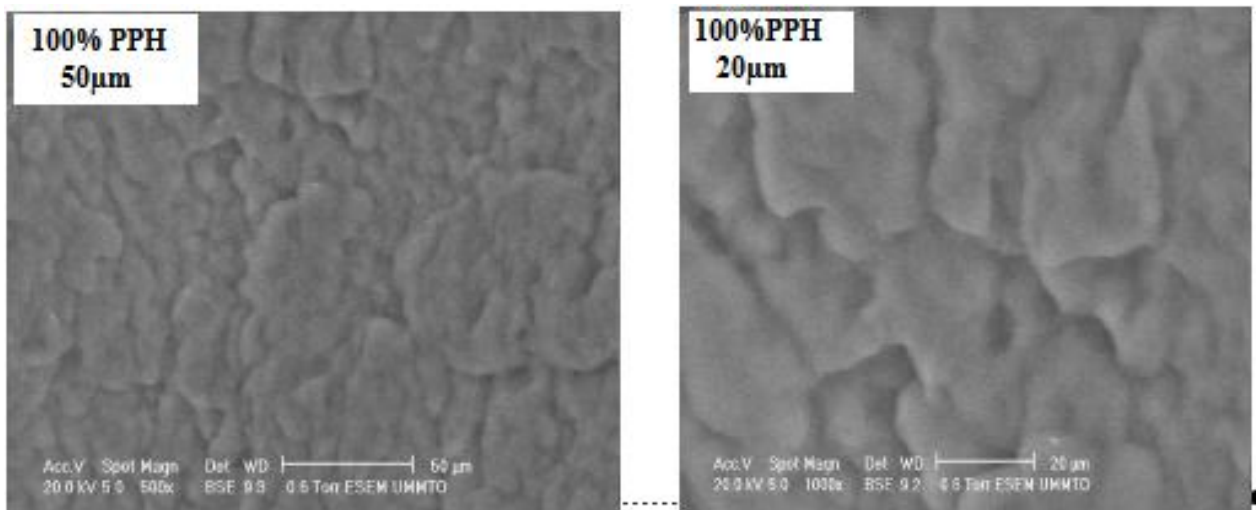


Figure V.50. Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 100%PPH.

La figure V.51 représente le faciès de rupture d'une éprouvette représentant le mélange 100% DEEE, déchets constitués de plusieurs polymères tel que l'ABS, le PS, le PC,

Résultats et discussions

le PA et le HIPS. Le faciès de rupture du mélange présente une plus grande dispersion de particules de polymères et une rupture dans le sens perpendiculaire à l'écoulement. Sur la micrographie on voit des zones de rupture franches et larges traduisant une rupture fragile comme constaté sur la Courbe Contraintes-Déformations illustrée par la figure V.51

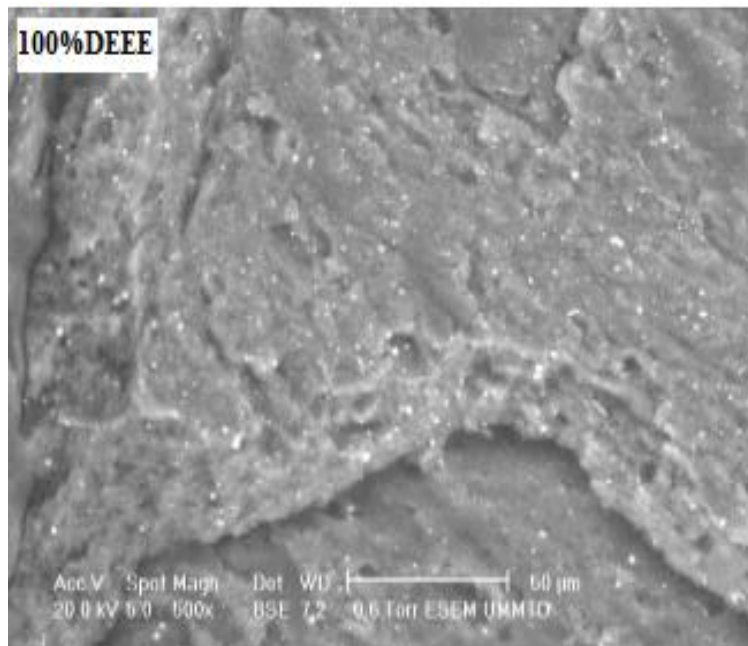


Figure V.51. Observation au MEB des faciès de rupture du mélange 100%DEEE

V.4.1.2.Observation des mélanges : DEEE/PPH sans SBR

On comparant la figure V.52 du mélanges 80%DEEE/20%PPH, à la figure précédente, figure V.51, nous constatons la présence des grains de PPH dans la matrice DEEE par l'existence d'un plus grand nombre de grains de couleur blanche, des grains de forme sphériques différents aux grains déjà existants dans le mélange 100%DEEE.

Sur la figure V.52, nous notons la présence de plus de pores (vides laissés par les grains PPH lors de la rupture de l'éprouvette), ce nombre important de pores induit une rupture encore plus fragile que celle induite par le mélange DEEE sans ajout de PPH, cette augmentation de la fragilité est très bien illustrée dans la figure V.52

Résultats et discussions

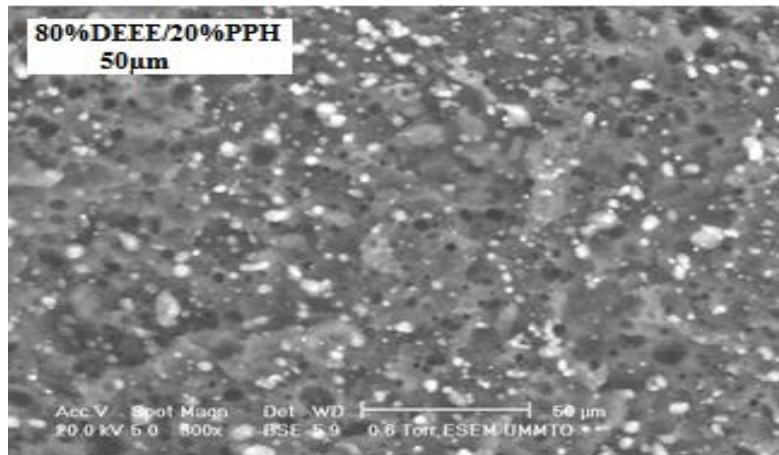


Figure V.52. Observation au MEB des faciès de rupture du mélange **80%DEEE/20%PPH**

En observons la figure V.53 qui représente le mélange 50%DEEE/50%PPH, on constate que la quantité de grains de PPH est visiblement plus importante sur la micrographie de la figure V.52, la rupture toutes fois demeure fragile.

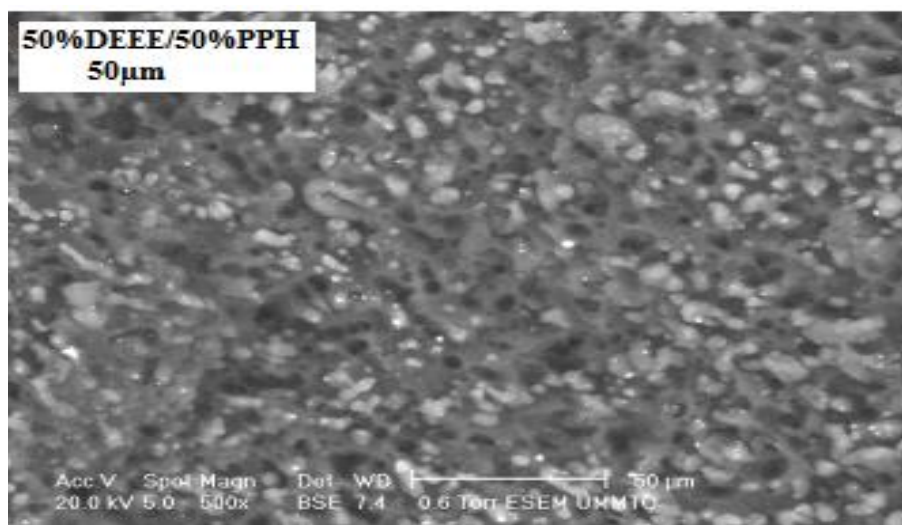


Figure V.53. Observation au MEB des faciès de rupture du mélange **50%DEEE/50%PPH**

V.4.1.3.Observation des éléments des mélanges avec SBR

Nous avons aussi procédé à l'observation au MEB de certains échantillons contenant le SBR , La figure V.54 présente les micrographies au MEB du polymère PPH : (a)100%PPH,déjà observée en figure V.51, la micrographie (b) représente le mélange PPH plus 5% de SBR, les grains SBR sont visible sur la micrographie, l'aspect de la surface de rupture a varié à cause

Résultats et discussions

de cette inclusion de SBR, la rupture, comme constatée sur la figure V.13, devient moins ductile, la déformation passe de 345% à 22%.

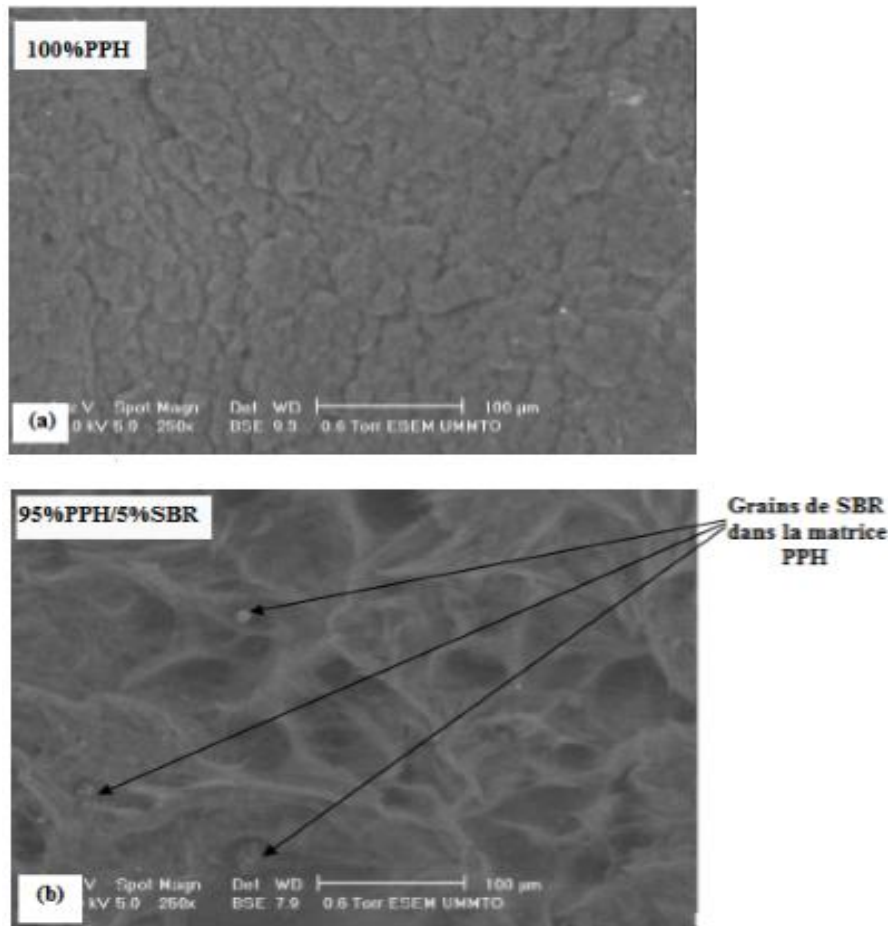


Figure V.54. Micrographies au MEB des échantillons de PPH/SBR (a) 100%PPH, (b) PPH/5%SBR,

V.5.Conclusion

Après élaboration des éprouvettes, nous avons procédé à la caractérisation mécanique et morphologique des mélanges. Nous avons montré que les caractéristiques mécaniques des DEEE varient considérablement avec l'ajout du PPH et l'incorporation du SBR. L'ajout du PPH à la matrice DEEE n'engendre pas d'amélioration de la résistance et la ductilité des mélanges. La résilience reste quasi constante. L'ajout du SBR aux mélanges améliore considérablement la résilience.

Conclusion générale

Ce travail a porté sur le recyclage des déchets polymériques issus des équipements électriques et électronique. Nous avons procédé comme suit : après la collecte des DEEE, nous les avons lavés pour les débarrasser du maximum d'impuretés telles que les graisses et les poussières puis découpés et broyés et réduits en granulés. Nous avons choisi le PPH comme élément d'addition au DEEE, polymère de très grande ductilité (350% d'allongement à la rupture) et son prix bon marché. Nous avons élaborés deux groupes de mélanges. Le premier constitué de DEEE et de PPH à des taux de 0%, 20%, 40%, 50%, 60%, 80% et 100%. Le second lot est constitué de ces mêmes mélanges auxquels on a rajouté 5, 10 puis 15% d'un élastomère en l'occurrence le Styène Butadiène RUBBER (SBR). L'élaboration des éprouvettes normalisées s'est faite par procédé d'injection après homogénéisation par extrusion. Les échantillons ont été soumis aux différents tests, en l'occurrence l'essai de traction, l'essai de résilience et l'essai de microdureté. Nous avons aussi soumis les faciès de rupture par traction de nos échantillons à une observation au Microscope Electronique à Balayage (MEB).

Après analyse des courbes de traction, nous avons constaté que le mélange 100% DEEE a un comportement fragile avec un allongement à la rupture de l'ordre de 5% et une contrainte à la rupture de 32MPa.

L'ajout du PPH aux DEEE n'améliore en rien sa fragilité et diminue sa résistance mécanique, par contre, la résilience reste quasi constante. L'observation des faciès de rupture du PPH a révélé une matrice homogène. Le faciès de rupture du mélange DEEE présente une plus grande dispersion de particules de polymères et une rupture dans le sens perpendiculaire à l'écoulement, où, on observe des zones de rupture franches et larges, traduisant une rupture fragile corroboré par l'essai de traction. Les mélanges DEEE/PPH/SBR voient leur résilience augmentée avec l'augmentation du taux de SBR dans les mélanges. Le SBR n'apporte aucune amélioration pour les autres caractéristiques mécaniques.

Introduction générale

L'évolution de l'humanité, qui se traduit par l'amélioration de notre qualité de vie, est liée aux évolutions technologiques et industrielles. Mais ces progrès ne sont pas sans conséquences sur l'environnement. Ces progrès sont consommateurs de ressources naturelles non renouvelables et donc limitées. Ils génèrent des déchets en quantité croissante, pouvant être des sources de pollution, parmi eux les déchets des matériaux polymères

Ces déchets de matières plastiques constituent un gisement très important, réparti depuis le secteur industriel jusqu'au niveau du consommateur, en passant par les différents réseaux de distribution et de commercialisation. Cette masse mondiale de matière plastique utilisée ne cesse de s'accroître à cause de fait qu'ils ne sont pas biodégradables ainsi que leurs quantités de déchets s'accumulent de manière inquiétante.

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 des différentes opérations de recyclage.

Le recyclage mécanique aussi appelé valorisation " matière " consiste à récupérer les polymères issus 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 bon marché peut constituer une alternative non négligeable pour produire de la matière première et préserver l'environnement mais les mélanges des polymères ne donnent pas vraiment des résultats fiables car les matériaux polymères sont très rarement miscibles.

Les polymères forment en général des mélanges immiscibles, caractérisés par l'existence d'une tension à l'interface entre les phases limitant les propriétés mécaniques de ces matériaux. Pour améliorer les propriétés mécaniques d'un mélange immiscible est de modifier l'interface par la compatibilisation . Cette modification permet d'améliorer l'adhésion entre les phases et entraîne une diminution de la taille des particules de la phase dispersée. Elle est faite par l'introduction d'un composé tensioactif (agent interfacial) qui migre à l'interface des phases et qui possède une affinité avec les deux polymères du matériau. En utilisant cette technique, de nombreuses propriétés peuvent être améliorées.

Cette étude portera sur le recyclage des déchets polymériques issus des équipements électriques et électronique. Le mélange avec un PPH bon marché permet de les réintroduire dans le cycle de la production de matières premières par recyclage. Nous avons aussi procédé à l'ajout d'un élastomère en l'occurrence le Styrène Butadiène RUBBER (SBR) pour une éventuelle amélioration des propriétés mécaniques.

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 les mélanges de polymères. Le troisième chapitre abordera le matériel et les dispositifs expérimentaux utilisés pour la réalisation des mélanges et leur caractérisation. Dans le quatrième chapitre nous présenterons la procédure expérimentale utilisée pour l'élaboration des mélanges et la réalisation des éprouvettes. Le cinquième chapitre sera consacré à l'analyse et à l'interprétation des résultats. Nous terminons notre travail par une conclusion générale.

Bibliographie :

[01] *I. Teraoka, Polymer Solutions, An introduction to physical properties, Ed. Polytechnic University Brooklyn, New York. 2002.*

[02] *Introduction-polymères-composites. Etudier.com. à partir de:*

<http://www.etudier.com/dissertations/Introduction-Polymères-Composites/519312.html>

[03] *"Polymère" Microsoft ® Encarta ® 2007.*

[04] *F. Moingeon, Synthèse de polymères dendronisés par polymérisation anionique vivante et fonctionnalisation de leur surface. Thèse de Doctorat; Université Louis Pasteur, Strasbourg I. 2006.*

[05] *A-C. Brosse, Dispersion des nanotubes de carbone à l'aide de copolymères triblocs dans des matrices en polyamide: Relation morphologie-propriétés électriques, Thèse de Doctorat. Univ. Pierre et Marie CURIE. 2009.*

[06] *D.A. Tomalia, J. M .J. Fréchet. Polym. Chemistry , J. Polym. Sci. 40: 2719. 2002.*

[07] *P.J. Flory. Principles of Polymer Chemistry; Ithaca, NY: Cornell University Press. 11: 521. 1953.*

[08] *E. Buhleier, W. Wehner, F. Vögtle, Cascade and Nonskid-chain-like Synthesis of Molecular Cavity Topologies. Synthesis, 9:155. 1978.*

[09] *Tomalia, D. A. Baker, H. Dewald, J. Hall, M. Kallos, G. Martin, S. Roeck, J. Ryder, J. Smith. Polym. Vol.17: 117, 1985.*

[10] *G.R. Newkome, Z.Q. Yao, Baker, V.K.G. Gupta, Micelles. Part 1. Cascade molecules: a new approach to micelles, J. Org. Chem. Vol. 1985: 50. 2003.*

[11] *S. Jouenne. Structuration et renforcement du polystyrène par des copolymères styrène/butadiène à gradient de composition, Thèse de Doctorat; Université Pierre et Marie Curie. 2005.*

[12] *"Différents types de matières plastiques":*

http://capsciences.net/upload/differents_plastiques

- [13] *J.P. Mercier, E. Maréchal, Traité des Matériaux, Chimie des Polymères, Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, Lausanne, vol. 13. 1993.*
- [14] *M. Fontanille et V. Jean-Pierre, Polymérisation, Traité plastiques et composites, Technique de l'Ingénieur, A3040, 1994.*
- [15] : *william D .Callister, Jr. science et génie des matériaux, john Wilely et Sons, Inc[2007] .*
- [16] *TOMITA Y. constitutive modelling of deformation behavior of glacy polymers and applications International Journal of science,42, 1455-146, 2000.*
- [17] *HAUDIN, J.M. « Structure et morphologie des polymères semi-cristallins ». Dans Introduction à la mécanique des polymères. Institut National polytechnique de Lorraine,Nancy, France, 97-115, 1995.*
- [18] *NITTA, K. H, TAKAYANAGI, M. Role of Tie molecules in the Yielding Deformation of Isotactic Polypropylene. Journal of Polymer Science, Part B: Polymer Physics, Vol. 37, 357-368, 1999.*
- [19] *MEMOIRE de BENCEUR Raouf «prévision du comportement mécanique et de l'adhérence du polyéthylène armé dans le domaine pipelines »*
- [21] : *L. Mosleh, « Propositions d'une modélisation du comportement mécanique sous traction uniaxiale d'un thermoplastique à différentes vitesses de déformations ». Stage de DEA, Université de Technologie de Compiègne, Année 2001.*
- [22].- *M.F.Ashby, Materials Selection in Mechanical Design, ,pergamon press,1993.*
- [23] -*Hulka, K. (1997). High strength large diameter pipe plate from standard production to X80/X100. Niobium information 13/1997, CBMM/NPC, Dusseldorf (Germany).*
- [24] - *Modern plastics encyclopedia '96©1995, the McGraw-hill companies.*
- [25] -*Mc Graw-Hill Chemical Engineering Serie, Washington, (1997)*
- [26] *M. Coulibaly. Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastoviscoplastiques. Application à la valorisation des polymères recyclés*
- [27] *Lemaitre, J. ; Chaboche, J. L.. Mécanique des matériaux solides. Dunod, 2, Paris, 1988.*

[28] Jaziri M. *Etude du greffage à l'état fondu de l'anhydride maléique sur l'ABS Influence du composé obtenu sur l'élaboration et les propriétés des mélanges PC/ABS.* Thèse Université Jean Monnet - Saint Etienne, 1992, p. 5-6.

[29] Meynie L. *Évolution et contrôle de la morphologie d'un mélange thermoplastique/thermodurcissable polymérisé sous cisaillement.* Thèse INSA de Lyon, 2003.

[30] Colbeaux A. *Compatibilisation de mélanges polypropylène/polyéthylène par extrusion réactive.* Thèse INSA de Lyon, 2001.

[31] : L. LEIBLER, « *Thermodynamique des mélanges de polymères – Aspect théorique - Diagramme de phase* », *Ecole supérieure de physique et de chimie industrielle, Paris, (2003), pp : 38.*

[32] : D. R. PAUL et J. W. BARLOW, « *Polymer blends or alloys* », *international plastics Exposition Conference, Chicago, (1979).*

[33] : O. OLABISI, L. M. ROBESON et M. T. SHAW, « *Polymer-Polymer miscibility* », *Academic Press, New York, (1979)*

[34] : W. J. WORK, K. HORIE, et al., « *Definition of terms related to polymer blends composites and multiphase polymeric materials* », *Pure Appl. chem., Vol. 76, N° 11, (2004), pp: 1985-2007.*

[35] : C. Z. CHAUI, K. ALMADAL et I. JOHANNSEN, « *Miscibility evolution of polycarbonate/ polystyrene blends during compounding*», *Poly. Eng. Sci. Vol. 42, N° 5, (2002), pp: 961-968.*

[36] : J. E. MCGRATH, L. M. ROBENSON et M. MATZNER, « *Recent advanced in polymer blends, block and grafts*», *Plenum Press, New York, (1975).*

[37] Colbeaux A. *Compatibilisation de mélanges polypropylène/polyéthylène par extrusion réactive.* Thèse INSA de Lyon, 2001

[38] Utracki L. *Commercial Polymer Blends London: Chapman & Hall, 1998, p 658.*

- [39] *Tucker P.S. and Paul D.R. Simple model for enthalpic effects in homopolymer/block copolymer blends. Macromolecules, 1988, vol 21, p 2801-2807.*
- [40] *Whitmore K. and Noolandi J. Theory of phase equilibria in block copolymer-homopolymer blends. Macromolecules, 1985, vol 18, p 2486.*
- [41] *Guo H., Packirisamy S and Many R. Compatibilizing effects of block copolymers in Low density polyethylene/polystyrene blends. Polymer, 1998, vol 39, p 2495-2505.*
- [42] *Yang L., Smith T. and Bigio D. Melt blending of linear low density polyethylene and polystyrene in an Haake internal mixer. I. Compatibilization and Morphology development. Journal of applied polymer science, 1995, vol 58, p 117-127.*
- [43] *Cigana P., Favis B. and Jérôme R. Diblock copolymers as emulsifying agents in polymer blends: Influence of molecular weight, Architecture, and chemical composition. Journal of applied polymer science: Part B: Polymer physics, 1996, vol 34, p 1691-1700.*
- [44] *Wei G., Sue H. and Chu J. Toughening and strengthening of polypropylene using the rigid_rigid polymer toughening concept Part I. Morphology and mechanical properties investigations. Polymer, 2000, vol 41, p 2947-2960.*
- [45] *Hellmann G. and Dietz M. Random ad block copolymers as compatibilizers, Directly compared. Die Makromolekulare Chemie, Macromolekulare Symposium, 2000, vol 170, p1-8.*
- [46] *Mocosko C., Guégan P. and Khandpur A. Compatibilizers for melt blending: Premade block copolymers. Macromolecules, 1996, vol 29, p 5590-5598.*
- [47] *Fayt R., Jérôme R. and Teyssié P. Molecular design of multicomponent polymer systems, 13. Control of the morphology of polyethylene/polystyrene blends block copolymers. Macromolekulare Chemistry, 1986, vol 187, p 837-852.*
- [48] *Tang T. and Huang B. Interfacial behavior of compatibilizers in polymers blends. Polymer, 1994, vol 35, no 2, p 281-285.*
- [49]- *Ir. F. Monfort-Windels. « Recyclage des produits manufacturés : le recyclage mécanique des polymères », European journal of mechanical and environmental engineering, vol 42, n0 1, pp32-40 (1997).*

- [50]- *M. Reyne. « Les plastiques : polymères, transformations et applications » Hermes, Paris (1991).*
- [51]- *P. Gautron. « Plastiques : valorisation et recyclage des déchets », Techniques de l'Ingénieur, A3830, (1993).*
- [52]- *H. Bockhorn, J.Hentschel, A. Hornung & U. Hornung. « Environmental engineering*
- [53]- *A.C . Abertsson & S..karlsson. « Degradable polymers for the future », Acta polymer, 46, pp 114-123 (1995).*
- [54]- *F. Khabbaz, A.C. Albertsson & S. Karlsson. « Chemical and morphological changes of environmentally degradable polyethylene films exposed to thermo-oxydation », polymer degradation and stability, 63, pp 127-138 (1999).*
- [55]- *Les polymères biodégradables, caoutchoucs et plastiques, n°765, p80, février (1998).*
- [56] *Naudin, C. A. ; Clozza, C.. Charges. Techniques de l'ingénieur, traité Plastiques et Composites.*
- [57] *M. Coulibaly , Modélisation micromécanique et caractérisation expérimentale du comportement des matériaux hétérogènes élastoviscoplastiques. Application à la valorisation des polymères recyclés 01/07/2008.*
- [58] - *Arrêté du Gouvernement de la Région Bruxelles-Capitale du 18/07/2002 instaurant une obligation de reprise de certains déchets en vue de leur valorisation ou de leur élimination, M.B. 27/09/2002, 43849 – 43863.*
- [59] *ABOUBAKER ALKHUDER Thèses Structuration des Mélanges ABS/PC en vue du Recyclage des DEEE.*
- [60] *Raab, M., Scudla, J., Kolarik, J. The effect of specific nucleation on tensile mechanical behaviour of isotactic polypropylene. European Polymer Journal, , Vol. 40, 1317–1323, 2004.*
- [61] *NA, B., LV, R. Effect of Cavitation on the Plastic Deformation and Failure of Isotactic Polypropylene. Journal of Applied Polymer Science, , Vol. 105, 3274–3279, 2007)*
- [62] *(livre marc carrega et coll ,materiaux et polymeres)*

[63] **Matthieu KOSCHER** *THESE Présentée à l'école nationale supérieure des mines de paris.*