

République algérienne démocratique et populaire
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique
Université a. Mira de Bejaia



Faculté de Technologie
Département de Génie des procédés
Laboratoire des matériaux organiques (LMO)

Mémoire

EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE Master

Domaine : Science et Technologie Filière : Génie des Procédés
Spécialité : Génie des Polymères

Présenté par

M. Bouadjadja Redha et M. Guemache Anis

Thème

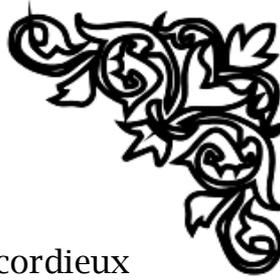
**Modification du polycarbonate (PC) par de l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS)
récupéré des déchets issus des équipements électriques et électroniques obsolètes**

Soutenu le 02/07/2024

Devant le jury composé de :

Nom et Prénom	Grade		
Belaid Taous	Dr	Université de Bejaia	Présidente
Zaidi Lynda	Dr	Université de Bejaia	Examinatrice
Baouz Touffik	Dr	Université de Bejaia	Encadrant
Djerrad Nour El Houda	Mlle	Université de Bejaia	Co- Encadrante

Année Universitaire : 2023/2024



Remerciements

Tout d'abord, louange à « **ALLAH** » le tout puissant, le très miséricordieux qui nous a donné la santé, la force, le courage et l'opportunité de mener ce travail à terme. EL Hamdoulilah.

Nos remerciements vont plus particulièrement à nos familles.

On veut exprimer par ces quelques lignes de remerciements, notre gratitude envers tous ceux, qui par leur présence, leur soutien, leur disponibilité et leurs conseils, nous ont permis de réaliser ce travail.

Nous tenons à exprimer nos vifs remerciements à notre promoteur **M. BAOUZ TOUFFIK** qui nous a fait l'honneur de nous encadrer, on le remercie profondément pour sa gentillesse, le temps qu'il nous a consacré et sa grande compréhension, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans son aide et la qualité exceptionnelle de son encadrement.

Aussi, on tient vivement à remercier notre co-promotrice, **M^{lle} DJERRAD NOUR EL HOUDA** sa disponibilité et sa gentillesse qui nous ont facilité la tâche ainsi que pour ses précieux conseils, ses orientations, sa méthode de travail professionnelle, le temps qu'elle nous a consacré et sa grande compréhension

Qu'ils veuillent bien trouver ici le témoignage de notre gratitude et de notre très profonde reconnaissance.

Nos sincères considérations et remerciements sont également exprimés aux membres du jury :

M^{me} BELAID TAOUS, de nous avoir fait l'honneur et le plaisir de présider ce jury.





M^{me} ZAIDI LYNDA d'avoir accepté de faire partie du jury et de donner de son temps pour examiner ce travail, d'une autre part pour sa gentillesse lorsqu'elle nous a enseignée le module {classe des matériaux et des polymères} en M1.

On est très honorés de leur présence dans ce jury.

Enfin, on ne peut achever ce mémoire sans exprimer notre gratitude à tous les enseignants des Sciences Technologiques ayant contribué à notre formation durant notre cycle d'étude.

Un grand merci à tous



Dédicaces

Tout d'abord, louange à « Allah » qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et m'a inspiré les bons pas et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti. El Hamdoulilah.

Ce modeste travail est dédié :

Tout d'abord à mes parents, que dieu les bénisse. Aucune dédicace ne saurait être assez éloquente pour exprimer ce qu'ils méritent.

En témoignage de ma reconnaissance envers le soutien, les sacrifices et tous les efforts qu'ils ont fait pour mon éducation ainsi que ma formation.

A mon cher père MOHAMED pour qui je dois mon éducation et mon instruction, sa présence en toute circonstance m'a maintes fois rappelé le sens de la responsabilité.

A ma chère mère LYNDIA pour sa sollicitude à mon égard et qui m'a entouré avec sa tendresse, toujours prête à se sacrifier pour le bonheur de ses enfants.

A mes frères et ma sœur : AMINE, SOFIANE et IMENE.

Merci d'être là pour moi. Je vous souhaite un avenir plein de joie, de bonheur, de réussite et de sérénité. Je vous exprime à travers ce travail mes sentiments de fraternité et d'amour.



A tous les membres de ma famille,

Mes grand-mères et mes grands pères que dieu les accueille dans son vaste paradis, J'implore dieu d'accorder miséricorde à mes grands-parents.

A mon binôme GUEMACHE ANIS

Pour son sérieux, sa patience, son soutien moral et sa compréhension, ainsi que toute sa famille.

A tous ceux qui m'ont transmis leur savoir et aidé à avancer.

Affectueuse reconnaissance.

REDHA





Dédicaces

Tout d'abord, Merci au bon DIEU qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et m'a inspiré les bons pas et les justes réflexes. Sans sa miséricorde, ce

Travail n'aura pas abouti.

Je dédie ce modeste travail

À ma famille, elle qui m'a doté d'une éducation digne, son amour a fait de moi ce que je suis aujourd'hui à ceux qui, quels que soient les termes embrassés, je n'arriverai jamais à leur exprimer mon amour sincère

À mes chers parents

Qui n'ont jamais cessé, de formuler des prières à mon égard, de me soutenir et de m'épauler pour que je puisse atteindre mes objectifs

À ma très chère Mère

*La femme qui m'a donnée la vie et qui a souffert sans me laisser souffrir, qui n'a jamais dit non à mes exigences et qui n'a épargné aucun effort pour me rendre heureuse, Quoi que je fasse ou que je dise, je ne saurai point te remercier comme il se doit. Ton affection me couvre, ta bienveillance me guide et ta présence à mes côtés a toujours été ma source de force pour affronter les différents obstacles sans toi je ne serai pas ce que je suis aujourd'hui : mon adorable maman **Saida***

À mon très cher père

*L'homme, qui doit ma vie, ma réussite et tout mon respect, Tu as toujours été à mes côtés pour me soutenir et m'encourager. Que ce travail traduit ma gratitude et mon affection : mon cher père **Said***



A mes sœurs et mon frère

A mes sœurs Sabrina, Lilia que j'apprécie tellement pour leurs gentillesse et à mon chers frère que j'aime et j'estime trop : Redha . Que Dieu les protège et leur offre la chance, le bonheur et la réussite dans leur vie inchallah, je les remercierais jamais assez pour leur aide précieuse, sans eux je ne pourrai pas avancer

Son oublier mes chers petits neveux et nièces : Aya, Aris, Yanis, Anas je vous aime tellement

A tous les autres membres de ma famille Que je n'ai pas cités, mais qui n'en demeurent pas moins chers.

A mon binôme, Redha

Pour son soutien moral, sa patience et sa compréhension tout au long de ce projet ainsi que toute sa famille.

A tous mes ami(e)s et proches sans exception

Une spéciale dédicace à mes deux chères amies Rafik et Yasser pour leur aide précieuse et leur Soutien moral et pour tous les bons moments passés ensemble Enfin à tous ceux qui m'aiment et que j'aime merci pour votre amour, confiance et encouragement

Anis



Sommaire

SOMMAIRE

Remerciements

Dédicaces

Liste des abréviations

Liste des figures

Liste des tableaux

Introduction ----- 01

Partie Théorique

Chapitre I : Généralités sur les polymères et leurs impacts sur l'environnement

I.1. Généralités sur les polymères -----03

I.1.1. Définition -----03

I.1.2. Classification des polymères -----03

I.1.2.1. Selon l'origine -----03

I.1.2.2. Selon les propriétés thermiques -----04

I.1.2.3. Selon leur nature chimique -----04

I.1.2.4. Selon la structure chimique des chaînes -----05

I.1.2.5. Selon l'importance économique -----05

I.1.3. Les méthodes de polymérisation -----06

I.1.4. Domaines d'application des polymères -----06

I.2. Impacts des déchets plastiques sur l'environnement -----07

I.2.1. Impacts sur la faune et la flore -----07

I.2.2. Impacts sur la santé -----08

I.2.3. Impacts sur l'économie -----09

Chapitre II : Déchets d'équipements électriques et électronique (DEEE)

II.1. Définition DEEE -----10

II.2. Le classement des DEEE -----10

SOMMAIRE

II.3.Composition des DEEE -----	11
II.4.L'impact des DEEE -----	11
II.5.Pourquoi gérer les DEEE -----	11
II.6.Répartition des DEEE par type de polymères -----	11
II.7.Le tri des DEEE -----	12
II.7.1.L'éco-conception des DEEE-----	12
II.7.2.La collecte sélective-----	12
II.7.3.Le traitement systématique de certains composants et des substances dangereuses -----	12
II.7.4La réutilisation-----	13
II.7.5.Le recyclage-----	13
II.7.6.La valorisation -----	13

Chapitre III : Revalorisation des déchets plastiques styréniques issus des DEEE

III.1.Les diverses techniques de valorisation des déchets plastiques -----	14
III.1.1.Valorisation énergétique-----	14
III.1.2.Recyclage chimique-----	14
III.1.3.Recyclage mécanique -----	15
III.1.3.1.La collecte -----	15
III.1.3.2.Le tri -----	15
III.1.4.Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères -----	16
III.2.Les stratégies de revalorisation des polymères recyclés -----	17
III.2.1.La stratégie de restabilisation -----	17
III.2.2.La stratégie de dopage -----	17
III.2.3.La stratégie de valorisation par voie de mélange -----	18
III.3. Présentation des polymères valorisés -----	19

SOMMAIRE

III.3.1. Les polycarbonates (PC) -----	19
III.3.1.1. Présentation du PC -----	19
III.3.1.2. Synthèse du PC -----	19
III.3.1.3. Mise en œuvre du PC -----	20
III.3.1.4. Les propriétés du PC -----	20
III.3.1.4.1. Propriétés physiques, chimiques et électriques -----	20
III.3.1.4.2. Propriétés mécaniques -----	21
III.3.1.4.3. Propriétés thermiques -----	21
III.3.1.5. Applications -----	22
III.3.2. Acrylonitrile butadiène styrène -----	22
III.3.2.1. Présentation de l'ABS -----	22
III.3.2.2. Les monomères qui composent l'ABS -----	23
III.3.2.3. Synthèse de l'ABS -----	23
III.3.2.4. Mises en œuvre de l'ABS -----	24
III.3.2.5. Propriétés de l'ABS -----	24
III.3.2.6. Les applications de l'ABS -----	24
Chapitre IV : Les mélanges polymériques	
IV.1. Présentation -----	25
IV.2. Définition des mélanges polymériques -----	25
IV.3. Différents mélanges polymériques -----	25
IV.3.1. Mélanges miscibles -----	25
IV.3.2. Mélanges non miscibles -----	25
IV.3.3. Mélanges partiellement miscibles -----	26
IV.3.4. Mélange de polymères compatibles -----	26
IV.4. Méthodes de préparation des mélanges polymériques -----	26
IV.4.1. Mélange en solution -----	26

SOMMAIRE

IV.4.2.Mélange à l'état fondu	26
IV.5.Comment concevoir un mélange de polymères ?	26
IV.6.Compatibilisations des mélanges de polymères	27
IV.6.1.Définition	27
IV.6.2.Objectifs de la compatibilisation	27
IV.6.3.Différentes voies de compatibilisation	28
IV.6.3.1.Procédé physique	28
IV.6.3.2.Procédé réactif	28
IV.7. Revue bibliographique	29

Partie Pratique

CHAPITRE V : Matériel et Méthodes

V.1.Objectif	36
V.2.Matériaux utilisés (PC, ABS)	36
V.2.1.Le polycarbonate (PC)	36
V.2.2.L'acrylonitrile butadiène styrène (ABS)	36
V.3.Préparation des mélanges	37
V.4. Procédure expérimentale	38
V.5.Méthodes de caractérisation	38
V.5.1.Caractérisation physique (détermination de la densité)	38
V.5.1.1.Matériel nécessaire	38
V.5.1.2.Préparation	39
V.5.2.Caractérisation mécanique (essai de traction)	39
V.5.3.Caractérisations rhéologiques {l'indice de fluidité (IF)}	40
V.5.4.Caractérisations de surface (angle de contact)	41

SOMMAIRE

Chapitre VI : Résultats et discussions

VI.1. Mesures de la densité-----	42
VI.2. Propriétés mécaniques en traction -----	42
VI.3. Indice de fluidité-----	44
VI.4. Angle de contact-----	44
Conclusion -----	46
Perspectives-----	47
Références bibliographiques	
Résumé	



Liste des Abréviations

Liste des abréviations

ABS: Acrylonitrile Butadiène Styène.

BPA: Bisphénol A.

DEEE: Déchets d'Équipements Électriques et Électroniques.

DSC: Analyse calorimétrie différentielle.

EVA-g-MA: l'Éthylène-Acétate de Vinyle Greffé par Anhydride Maléique.

HDT: Heat Deflection Temperature.

IF: Indice de Fluidité.

IRTF: Infrarouge à Transformée de Fourier.

LMNM: Laboratoire des Matériaux Non Métalliques.

LOI: L'Indice Limitant d'Oxygène.

MABS: Tétramère de Méthacrylate de Méthyle Greffé sur l'Acrylonitrile Butadiène Styène.

MBS: Méthacrylate-Butadiène-Styène.

MEB: Microscopie Électronique à Balayage.

MFI: Melt Flow Index.

PC: Polycarbonate.

PE: Polyéthylène.

PP: PolyPropylène.

PS: Polystyrène.

PVC: Polychlorure de Vinyle.

SEBS-g-MAH: Styène Éthylène Butylène Styène Greffé par l'Anhydride Maléique.

Tg: Transition vitreuse.

TGA: Analyse Thermogravimétrique.

UV: Ultraviolets.



Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1: Représentation schématique des différentes structures moléculaires des polymères -----	05
Figure I.2: Représentation schématique de différents exemples de polymères linéaires a) homopolymère b) copolymère statistique c) copolymère alterné d) copolymère séquencé---	05
Figure I.3: Une tortue de mer avec un sac en plastique dans le nez -----	08
Figure I.4: Tortue <i>Tartaruga</i> morte, prise dans les filets dérivants -----	08
Figure II .1: Déchets d'équipements électriques et électroniques -----	10
Figure II.2: Composition des déchets des équipements électriques et électroniques -----	11
Figure II.3: Répartition des DEEE par types de polymères -----	12
Figure III .1: Plages de températures de mise en œuvre des principaux plastiques-----	16
Figure III.2: Synthèse du PC de bisphénol A -----	19
Figure III.3: Schéma de synthèse du PC par polycondensation du Bisphénol A avec le phosgène -----	20
Figure III.4: Schéma de synthèse du PC par transestérification -----	20
Figure III.5: Structure chimique de l'ABS -----	23
Figure III.6: Structures chimiques de l'acrylonitrile, du butadiène et du styrène-----	23
Figure V.1: Extrudeuse bi-vis de type micro 15cc Twin Screw Compouder -----	37
Figure V.2: Mini-presse à injection -----	37
Figure V.3: Schéma représentant les étapes principales du travail -----	38
FigureV.4: Machine de traction Zwick-Roell de typeZ050-----	40
FigureV.5: Appareil de mesure de l'indice de fluidité-----	41
FigureV.6: L'appareil de mesure d'angle de contact -----	41

Liste des figures

Figure VI.1: Résistance à la traction du PC, de l'ABS et des mélanges PC/ABS-----	43
Figure VI.2: Module de Young en fonction de la composition d'ABS -----	43
Figure VI.3: Indice de fluidité du PC, de l'ABS et des mélanges PC/ABS -----	44



Liste des tableaux

Liste des tableaux

Tableau I.1: Les domaines d'application des polymères -----	07
Tableau III.1: Les propriétés physiques, chimiques et électriques du PC -----	21
Tableau III.2: Propriétés mécaniques du PC -----	21
Tableau III.3: Propriétés thermiques du PC -----	22
Tableau III.4: Les différentes applications du PC -----	22
Tableau III.5: Les différentes utilisations de l'ABS -----	24
Tableau V.1: Principales caractéristiques du PC -----	36
Tableau V.2: Principales caractéristiques de l'ABS -----	36
Tableau VI.1: Valeurs de la densité du PC, de l'ABS et des mélanges PC/ABS -----	42
Tableau VI.2: Angle de contact du PC, de l'ABS et des mélanges PC/ABS -----	45



Introduction

Introduction

Les innovations technologiques et industrielles dans le domaine des équipements électriques et électroniques (EEE) ont engendré une forte croissance de leur consommation et un renouvellement plus fréquent des matériels au profit d'appareils plus modernes. En 2018, par exemple, 939 millions d'EEE toutes catégories confondues ont été mis sur le marché, ce qui représente 8 % de plus qu'en 2017 et 19 % de plus qu'en 2016 [1,2]. Cette augmentation de la consommation en EEE est responsable d'une quantité croissante de déchets. Ces derniers peuvent être sources de multiples pollutions s'ils contiennent des métaux lourds et des polluants organiques persistants.

Pour limiter cette pollution ainsi que la consommation de ressources non renouvelables, de nouveaux objectifs de recyclage et de valorisation des déchets électriques et électroniques ont été mis en place dans plusieurs pays. Les petits appareils, tels que les équipements ménagers et les équipements informatiques, par exemple, doivent être valorisés à 75 % et préparés en vue du réemploi et recyclés à 55 %. Les gros appareils devront être valorisés à 85 % et préparés en vue du réemploi et recyclés à 80 % [3].

Parmi les polymères présents dans les déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE), l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) se distingue. L'alliage ABS/polycarbonate (PC) est notable pour ses excellentes propriétés mécaniques et sa capacité à ajuster la composition pour optimiser des caractéristiques spécifiques. Le recyclage des polymères techniques tels que l'ABS est encore peu étudié, offrant ainsi des perspectives prometteuses pour réintroduire l'ABS recyclé sur le marché en tant que matière première secondaire.

Les mélanges PC/ABS sont des mélanges de polymères commerciaux qui présentent les avantages combinés du PC et de l'ABS. Le PC apporte une bonne ténacité et les propriétés de température de déformation thermique, tandis que l'ABS améliore la transformation et réduit les coûts des mélanges [4]. Par conséquent, ce dernier est largement utilisé dans les produits électriques et électroniques, tels que ceux que l'on trouve dans l'industrie automobile et dans les boîtiers de téléphones portables, les fournitures de bureau et les appareils électroménagers [5].

L'objectif de notre travail est de valoriser l'ABS recyclé provenant des équipements électriques et électroniques pour modifier les propriétés mécaniques, rhéologiques et physico-chimiques des mélanges PC/ABS. Pour cela, des mélanges de PC/ABS à différentes compositions en masse (100/0, 90/10, 80/20, 70/30, 0/100) ont été préparés.

Introduction

Les caractéristiques physique, mécanique, rhéologique et enfin physico-chimique des différents mélanges ont été évaluées par des mesures de densité, de résistance à la traction, d'indice de fluidité et d'angle de contact, respectivement.

Le travail élaboré pour atteindre cet objectif est divisé en six chapitres :

- **Le premier chapitre** est dédié à la présentation des généralités sur les polymères et leurs impacts sur l'environnement.
- **Le deuxième chapitre** est consacré à une étude sur les déchets d'équipement électrique et électronique.
- **Le troisième chapitre** est consacré à étudier les diverses techniques de valorisation des déchets plastiques.
- **Le quatrième chapitre** présente des généralités sur les mélanges polymériques.
- **Le cinquième chapitre** présente les polymères valorisés dans cette étude (PC, ABS) ainsi qu'une étude bibliographique récente des études des mélanges PC/ABS.
- **Le sixième chapitre** présente les matériaux et les méthodes de caractérisations utilisés.
- **Le septième chapitre** couvre tous les résultats de la caractérisation du mélange ainsi que leurs discussions.

Et pour finir, une conclusion générale qui permet de résumer les résultats trouvés.

Partie
théorique

CHAPITRE I

*Généralités sur les polymères et
leurs impacts sur
l'environnement*

I.1. Généralités sur les polymères

I.1.1. Définition

Un polymère se compose d'une multitude de petites molécules, appelées monomères, qui se répètent en grand nombre et sont généralement reliées entre elles par des liaisons primaires, souvent covalentes. Ces molécules peuvent être organiques ou inorganiques, formant ainsi des macromolécules [1].

I.1.2. Classification des polymères

I.1.2.1. Selon l'origine

Les polymères sont classés en trois catégories distinctes : les polymères naturels, artificiels et les polymères synthétiques.

➤ **Les polymères naturels** : les polymères naturels, provenant des règnes végétal, animal ou minéral, occupent une position privilégiée en raison de leur importance économique et de leur rôle crucial dans les processus vitaux [2].

❖ Exemple :

-Les polysaccharides (cellulose, amidon).

-Les protéines (la laine, la soie...), le caoutchouc naturel.

➤ **Les polymères artificiels (dérivés des polymères naturels)** : ils sont dérivés de modifications chimiques apportées aux polymères naturels, permettant ainsi de changer certaines de leurs propriétés [2].

❖ Exemple :

-Les esters cellulosiques, (nitrocellulose, acétate de cellulose...etc.).

-Ebonite (caoutchouc fortement réticulé par le soufre).

➤ **Les polymères synthétiques** : les monomères nécessaires pour fabriquer ces molécules n'existent pas dans la nature. Cependant, il est observé que les structures obtenues par synthèse présentent souvent des similitudes avec celles des polymères naturels [2].

I.1.2.2. Selon les propriétés thermiques

Il existe trois principales classes de polymères : les thermoplastiques, les élastomères et les thermodurcissables.

- **Les thermoplastiques** : les thermoplastiques sont des polymères dérivés de chaînes linéaires ou légèrement ramifiées. Ils se ramollissent lorsqu'ils sont chauffés au-dessus d'une température spécifique, mais retrouvent leur état solide en refroidissant. Ces matériaux conservent leur thermoplasticité initiale de manière réversible. Des exemples incluent le PE, le PVC, le PP, le PC et le PMMA... [3].
- **Les thermodurcissables** : les polymères thermodurcissables se solidifient à des températures élevées et conservent leur forme même lorsque la température diminue. Parmi les plus couramment utilisés figurent les polyuréthanes et les résines phénoliques. Contrairement aux thermoplastiques, ces plastiques ne fondent pas lorsqu'ils sont exposés à la chaleur ; ils se décomposent en émettant des produits volatils et en laissant des résidus carbonisés [4].
- **Les élastomères** : les élastomères sont des polymères constitués de chaînes longues et flexibles, dotés de la remarquable capacité à supporter d'importantes déformations. Leur caractéristique distinctive est leur capacité à retrouver presque complètement leurs propriétés initiales une fois que la contrainte cesse. Cette récupération est rendue possible par la vulcanisation, un processus qui crée des liaisons chimiques entre les chaînes macromoléculaires, formant ainsi un réseau tridimensionnel stable [5].

I.1.2.3. Selon leur nature chimique

- **Polymères minéraux** : ils sont formés soit de chaînes composées d'un unique élément simple, comme le diamant, le graphite, le phosphore, le soufre, soit de chaînes contenant plusieurs hétéroatomes, tels que les silicates acides polyphosphoriques ou le chlorure de polyphosphonitrile [6].
- **Polymères organiques** : c'est la classe la plus riche comme : les polydiènes, les polyacryliques, les polyamides et les polyvinyles [6].
- **Polymères mixtes** : ces polymères possèdent des caractéristiques remarquables, notamment une résistance thermique élevée, atteignant généralement environ 300 °C à 350 °C, à l'exemple des silicones [6].

I.1.2.4. Selon la structure chimique des chaînes

Les macromolécules peuvent adopter différentes structures, telles que linéaires, branchées ou réticulées, comme illustré dans la (**Figure I.1**). Elles peuvent être constituées soit d'un seul type de monomère (homopolymère), soit de plusieurs types de monomères (copolymère), comme le montre la (**Figure I.2**) [7].

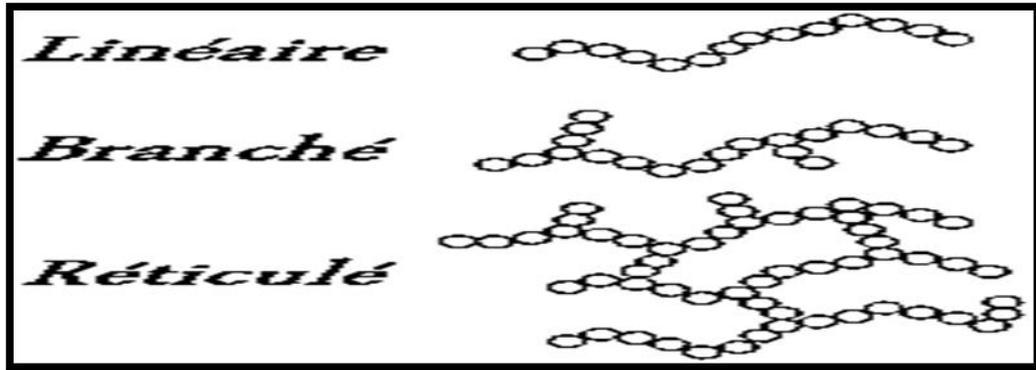


Figure I.1: Représentation schématique des différentes structures moléculaires des polymères [6]

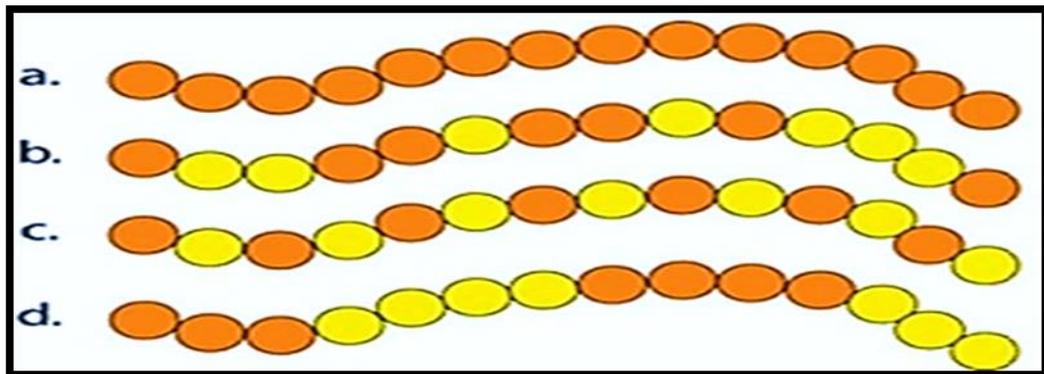


Figure I.2: Représentation schématique de différents exemples de polymères linéaires a) homopolymère b) copolymère statistique c) copolymère alterné d) copolymère séquencé [8]

I.1.2.5. Selon l'importance économique

- **Les polymères de grande diffusion :** dont le volume des ventes et de production est élevé et dont le prix est faible. Exemple : (PE), (PP), (PS), (PVC) [9].
- **Les polymères à haute performance :** dont le volume des ventes est le plus faible et les prix les plus élevés [9].

- **Les polymères techniques** : dont le volume et le prix sont intermédiaires entre les deux catégories précédentes. Exemple : polyamide [9].

I.1.3. Les méthodes de polymérisation

La polymérisation est un processus chimique où des monomères sont combinés par des liaisons covalentes pour former des polymères, transformant ainsi des matières premières liquides ou gazeuses en plastiques. Il en existe deux types principaux : la polymérisation par étape et la polymérisation en chaîne [10] :

- **Polycondensation** : la polycondensation est un processus de polymérisation par étapes où des monomères contenant des groupes fonctionnels réagissent entre eux sous l'effet d'un catalyseur, souvent un acide, pour former des polymères à chaîne longue. Au cours de cette réaction, des étapes de condensation éliminent les molécules indésirables telles que l'eau. Les monomères se combinent pour former de petites sections de chaînes qui progressivement s'associent pour former des dimères, trimères, oligomères, et finalement des polymères séquencés. La masse molaire augmente au fur et à mesure que la réaction progresse, réduisant ainsi la concentration en monomères.
- **Polyaddition** : la polyaddition est une réaction permettant de lier de manière successive et contrôlée des monomères sur une extrémité de la chaîne macromoléculaire. Le nom de la réaction dépend du type de monomère à cette extrémité : radicalaire en présence de radicaux chimiques ou ionique avec des extrémités ioniques (anionique ou cationique). La polyaddition comprend trois étapes principales : amorçage, propagation et terminaison.

I.1.4. Domaines d'application des polymères

Les polymères ont été l'une des avancées majeures du XXe siècle en matière de technologie. Ils sont utilisés dans une multitude d'applications à toutes les échelles de la vie quotidienne [11]. Le tableau I.1 présente de manière générale les différents domaines d'application des polymères.

Tableau I.1: Les domaines d'application des polymères [11]

Domaines	Exemples
Secteur de la construction	Portes, conduites d'eau et d'assainissement, peinture des murs et des plafonds, revêtement du sol...
Industrie de l'emballage	Bouteilles, pots de yaourt, boîtes aux lettres....
Médecine et santé	Poches de sang, gants, lentilles, verres de lunettes, les organes artificiels, Seringues, industrie dentaire, prothèses, outils de chirurgie....
Articles ménagers	Poubelles, vaisselle.....
Matériel électrique et électronique et les communications	Isolation, ordinateurs, caméras, radio, télévision, téléphone.....
Industrie automobile	Système vitre claire, tapis, carrosserie, optiques, tableau de bord, habillage intérieur.....
Industrie textile	Vêtements, fibres textiles synthétiques, sacs, ski, similicuir....

I.2. Impacts des déchets plastiques sur l'environnement

I.2.1. Impacts sur la faune et la flore

Les déchets plastiques peuvent poser de multiples menaces à la faune et à la flore. Leur présence croissante expose les animaux à divers dangers, engendrant ainsi les problèmes suivants [12]:

- **Ingestion** : les animaux, y compris ceux vivant dans les océans, peuvent consommer des déchets plastiques, ce qui provoque des problèmes digestifs, la famine et même la mort (**Figure I.3**).



Figure I.3: Une tortue de mer avec un sac en plastique dans le nez [13]

- **Destruction de l'habitat :** les déchets plastiques s'accumulent souvent dans les habitats naturels de la faune et de la flore, entraînant la destruction de l'habitat et perturbant la chaîne alimentaire.
- **L'enchevêtrement :** la faune, notamment les créatures marines, peut se retrouver piégée dans des débris plastiques, subissant des blessures physiques, voire la mort (**Figure I.4**).



Figure I.4: Tortue Tartaruga morte, prise dans les filets dérivants [14]

I.2.2. Impacts sur la santé

Les déchets plastiques représentent aussi un danger majeur pour la santé humaine. Voici quelques problèmes de santé associés à l'exposition à ces déchets [12] :

- **Exposition chimique :** l'exposition aux déchets plastiques peut conduire à l'absorption de substances chimiques nocives telles que le bisphénol A (BPA) et les phtalates dans le corps humain. Ces substances peuvent perturber le système hormonal, affecter le développement et potentiellement augmenter le risque de cancer.

- **Ingestion de microplastiques** : des particules microscopiques de plastique, connues sous le nom de microplastiques, ont été détectées dans les aliments et l'eau. Cela signifie que les humains peuvent ingérer ces particules, ce qui peut avoir des effets inconnus sur la santé.

I.2.3. Impacts sur l'économie

L'impact économique de la pollution plastique est important. Les coûts associés au nettoyage des déchets plastiques, à la mise en œuvre de systèmes de gestion des déchets et à la lutte contre les conséquences environnementales et sanitaires de la pollution plastique imposent un fardeau financier aux communautés et aux gouvernements. Les industries qui dépendent d'écosystèmes propres, comme la pêche et le tourisme, peuvent subir des pertes économiques en raison de la pollution plastique [15].

Références bibliographiques

- [1]:Teraoka, I. (2000). Polymer solutions: An introduction to physical properties. Brooklyn, NY: Polytechnic University.
- [2]:Ehrenstein, G. W., & Montagne, F. (2000). Matériaux polymères: Structure, propriétés et application. Paris, France: Hermès Science Publications.
- [3]:Richeton,J.,Ahzi, S., Daridon, L., & Rémond, Y. (2005). A formulation of the cooperative model for the yield stress of amorphous polymers for a wide range of strain rates and temperatures. Polymer, pp 6035-6043.
- [4]:Fouozi, D. (2008). Introduction à la physique (2ème et 3ème éd.). Paris, France: École de l'ingénieur.
- [5]:Polymérisation; Techniques de l'ingénieur, Traité plastiques et composites; (A3 040).
- [6]: Teraoka, I. (2002). Polymer solutions: An introduction to physical properties. Polytechnic University, Brooklyn, New York.
- [7]:La Commission européenne. (2007). Fabrication des polymères [Document de référence sur les meilleures techniques disponibles pour la fabrication des polymères].
- [8]: Weiss, P. (2010). La chimie des polymères. Support de Cours (Version PDF). Université Médicale Virtuelle Francophone, Société Francophone de Biomateriaux Dentaires.
- [9]:Zaidi, L. (2023). Matériaux organiques [Support de cours].
- [10]:PAPREC. (2022). La fabrication des polymères et matières plastiques [Consulté le 26 avril 2024].
<https://www.paprec.com/fr/comprendre-le-recyclage/tout-savoir-sur-les-matieres-recyclables/plastiques/la-fabrication-du-plastique-et-des-polymeres/>
- [11]:Blond, E., Elie, G., & Kay, D.La spécification des géomembranes de polyéthylène vis-à-vis de la durabilité [Groupe CTT – Division Géosynthétiques (SAGEOS), St-Hyacinthe, Québec, Canada].
- [12]:Waste Trade. (2024). Conséquences des déchets plastiques [Consulté le 25 avril 2024].
<https://www.wastetrade.com/fr/resources/plastic-waste-management/consequences-of-plastic-waste/>
- [13]:REMEDI. (2020). Pourquoi les tortues marines adorent manger du plastique ? [Consulté le 25 avril 2024].
<https://www.remed-zero-plastique.org/articles/pourquoi-les-tortues-marines-adorent-manger-du-plastique>
- [14]:Futura Science. (2024). Les effets du plastique sur les animaux et l'environnement [Consulté le 25 avril 2024].
-

Références bibliographiques

<https://www.futura-sciences.com/planete/dossiers/pollution-dechets-plastique-mer-septieme-continent-1898/page/4/>

[15]:Greenfield, E. (2024). Quel est l'impact du plastique sur l'environnement ? [Consulté le 25 avril 2024].

https://sigmaearth.com/fr/what-is-the-impact-of-plastic-on-the-environment/#google_vignette

CHAPITRE II

*Déchets d'équipement électrique
et électronique (DEEE)*

II.1. Définition DEEE

Les DEEE, pour déchets d'équipements électriques et électroniques, désignent tous les appareils électriques en fin de vie : ordinateurs, téléphones, appareils électroménagers, téléviseurs... Ces déchets, dont les volumes croissent de manière importante, constituent une source de matières premières récupérables et réutilisables [1].



Figure II .1: Déchets d'équipements électriques et électroniques [2]

II.2. Le classement des DEEE

Les DEEE sont regroupés en 10 catégories distinctes [3] :

- Catégorie 1 : gros appareils ménagers.
- Catégorie 2 : petits appareils ménagers.
- Catégorie 3 : équipements informatiques et de télécoms.
- Catégorie 4 : matériel grand public.
- Catégorie 5 : matériel d'éclairage.
- Catégorie 6 : outils électriques et électroniques.
- Catégorie 7 : jouets, équipements de loisir et de sport.
- Catégorie 8 : dispositifs médicaux.
- Catégorie 9 : instruments de surveillance et de contrôle.
- Catégorie 10 : distributeurs automatiques.

II.3. Composition des DEEE

Les DEEE présentent une grande diversité et complexité en ce qui concerne les types, les tailles et les formes des composants et matériaux qu'ils contiennent [4].

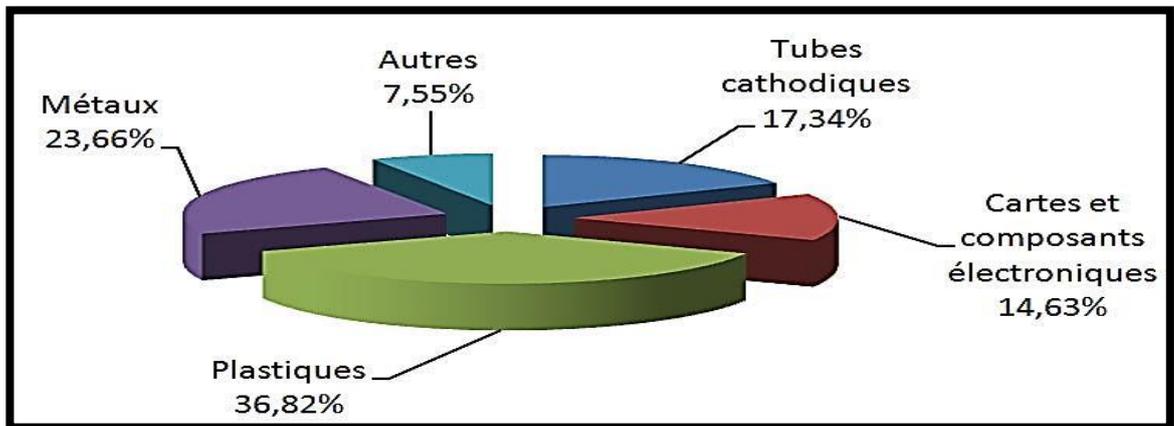


Figure II.2: Composition des déchets des équipements électriques et électroniques [5]

II.4. L'impact des DEEE

Les DEEE posent un problème significatif en raison de leur complexité et de la présence potentielle de substances dangereuses telles que le mercure, les retardateurs de flamme bromés et le plomb. Si ces matériaux ne sont pas manipulés de manière appropriée, ils peuvent entraîner des risques graves pour la santé humaine et l'environnement [6].

II.5. Pourquoi gérer les DEEE

Les DEEE sont composés de matériaux polluants et des matériaux valorisables. La collecte et le traitement des DEEE permettent de limiter le gaspillage des ressources naturelles et d'éviter la propagation des substances polluantes, tels que les chlorofluorocarbures, le plomb, le mercure [7].

II.6. Répartition des DEEE par type de polymères

La figure II.3 illustre les différents types de polymères dérivés des déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE).

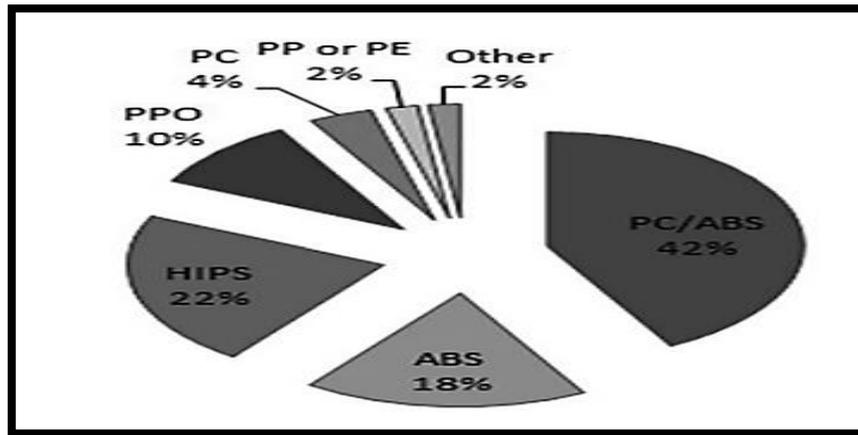


Figure II.3: Répartition des DEEE par types de polymères [8]

II.7. Le tri des DEEE

II.7.1. L'éco-conception des DEEE

Tout commence dès la conception du produit électrique ou électronique qui deviendra fatalement, tôt ou tard, un déchet d'équipement électrique et électronique. Tout producteur d'équipement électrique et électronique doit anticiper la fin de vie de ses produits. Pour cela, cette notion doit être intégrée dès les phases de conception et de développement. On parle alors d'éco-conception [9].

II.7.2. La collecte sélective

Lorsque la production de déchets est inévitable, il est essentiel d'organiser la gestion de cette filière. La deuxième étape du tri des déchets électroniques va être leur collecte sélective. Pour les petits déchets générés par les particuliers ou les collaborateurs d'une organisation, une solution s'est très largement développée en France. Il s'agit de contenants, souvent des grandes boîtes en carton, dans lesquelles les personnes viennent déposer directement leurs DEEE [9].

II.7.3. Le traitement systématique de certains composants et des substances dangereuses

Les DEEE renferment fréquemment des substances potentiellement nocives pour l'environnement, telles que le cadmium, le mercure, le chrome hexavalent, le nickel et le plomb. La collecte de ces déchets est essentielle pour éviter le rejet de ces produits dangereux

dans la nature, leur incinération ou leur enfouissement dans les décharges. Cependant, il est inévitable d'utiliser ces substances, qui demeurent irremplaçables, notamment dans la fabrication de batteries [9].

II.7.4. La réutilisation

La prochaine étape implique la réutilisation ou le réemploi de tout ce qui est encore fonctionnel. Certains équipements sont jetés simplement parce qu'ils sont devenus obsolètes pour leur propriétaire, même s'ils sont toujours en parfait état de marche. Cela inclut des appareils tels que les téléphones mobiles ou fixes, ainsi que les ordinateurs vieillissants. Il existe cependant d'autres personnes ou organismes qui pourraient être intéressés par ces produits d'occasion, même s'ils sont moins performants, mais également moins coûteux [9].

II.7.5. Le recyclage

Les DEEE collectés, qui ne peuvent pas être réutilisés, passent ensuite à l'étape suivante : le recyclage. Ces déchets sont centralisés par des sociétés spécialisées. Les DEEE sont alors triés par type de déchets de manière fine avant d'être ensuite regroupés et expédiés dans des centres de traitement spécialisés [9].

II.7.6. La valorisation

À cette étape, les DEEE sont décomposés pour isoler chaque composant, passant par des phases telles que le démantèlement, le broyage, la séparation électromagnétique, le tri optique pour les cartes électroniques, et la séparation des métaux non-ferreux et des plastiques. L'objectif est de valoriser chaque substance ou composant des DEEE afin qu'ils puissent être réutilisés dans la fabrication de nouveaux produits, dans une approche d'éco-conception. Cette démarche rend le cycle vertueux en permettant aux DEEE d'être triés et réintégrés dans le processus de fabrication, complétant ainsi la boucle de manière écologiquement responsable [9].

Références bibliographiques

[1]:Veolia. (2024). Traitement des DEEE : déchets d'équipements électriques et électroniques [Consulté le 22 février 2024].

<https://www.veolia.com/fr/ressources/economie-circulaire/traitement-deee-dechets-dequipements-electriques-electroniques>

[2]:Paprec. (2022). Déchets d'équipements électriques et électroniques - Easy Recyclage [Consulté le 21 février 2024].

<https://easyrecyclage.com/dechets-dequipements-electriques-et-electroniques/>

[3]:Directive DEEE. (2003). Directive 2002/96/CE du Parlement Européen et du Conseil du 27 janvier 2003 relative aux déchets d'équipements électriques et électroniques (DEEE). Journal officiel de l'Union européenne, 13 février 2003.

[4]:Cui, J., & Forssberg, E. (2003). Mechanical recycling of waste electric and electronic equipment: A review. Journal of Hazardous Materials, pp 243-263.

[5]:ANGED. (2018). Déchets en équipements électriques et électroniques (DEEE) [Consulté le 23 février 2024].

<http://www.anged.nat.tn/dechet-electronique-deee.html>

[6]:ONU Habitat. (2021). Bulletin #11 : Déchet électronique [Consulté le 26 février 2024].

https://unhabitat.org/sites/default/files/2021/06/wwc_newsletter_vol11-fre.pdf

[7]:Cogetrad. (2016). Recycler matériel électriques [Consulté le 26 février 2024].

<https://cogetrad.com/recycler-materiel-electriques/>

[8]:Ramesh, V., et al. (2014). Recycling of engineering plastics from waste electrical and electronic equipment: Influence of virgin polycarbonate and impact modifier on the final performance of blends. Waste Management & Research, pp 884-894.

[9]:Ecologique. (2024). Les 6 étapes de tri pour les appareils électroniques - DEEE [Consulté le 28 février 2024].

<https://www.e-dechet.com/deee/6-etapes-de-tri-appareils-electroniques>

CHAPITRE III

*Revalorisation des déchets
plastiques styréniques issus des
DEEE*

III.1. Les diverses techniques de valorisation des déchets plastiques

III.1.1. Valorisation énergétique

Il s'agit du processus de gestion des déchets plastiques par incinération, impliquant une combustion complète, avec ou sans la récupération d'énergie. Les déchets plastiques présentent un potentiel calorifique significatif pouvant être exploité par la récupération de la chaleur générée, utilisable directement pour le chauffage ou convertie en énergie électrique. Pratiquement tous les types de plastiques peuvent subir une incinération. Cependant, la décomposition de certains matériaux peut entraîner la libération de composés toxiques tels que l'acide chlorhydrique pour le polychlorure de vinyle, l'acide nitrique pour le polyamide et l'acide sulfurique pour certains caoutchoucs [1].

III.1.2. Recyclage chimique

Le recyclage chimique consiste à décomposer le polymère en constituants de base (monomères, oligomères). Les processus classiquement utilisés font appel à la pyrolyse, l'hydrogénation, la gazéification, la décomposition chimique par voie liquide (hydrolyse, alcoololyse...) [2,3]. Les matières premières sont alors réutilisables dans les raffineries ou dans les filières de la pétrochimie et de la chimie [4].

On distingue ainsi [1] :

- **La pyrolyse** : il s'agit de la fragmentation des molécules par chauffage sous vide. Ce processus génère des hydrocarbures liquides ou gazeux qui peuvent être ensuite employés dans les raffineries.
- **L'hydrogénation** : il s'agit du processus de traitement des macromolécules par l'application d'hydrogène et de chaleur, provoquant ainsi leur décomposition en huiles hydrocarbonées. Ces huiles peuvent ensuite être employées dans les raffineries et les installations de production chimique.
- **La gazéification** : les plastiques sont soumis à un processus de chauffage en présence d'air ou d'oxygène. Le gaz produit lors de cette synthèse est composé de monoxyde de carbone et d'hydrogène, pouvant être employé dans la fabrication de méthanol, d'ammoniac, ou en tant qu'agent réducteur lors de la production d'acier.
- **La décomposition chimique proprement dite** : des méthodes telles que l'hydrolyse et l'alcoololyse sont mises en œuvre. Bien que le concept de cette approche soit attrayant, ses applications demeurent jusqu'à présent restreintes aux polymères tels que le polyamide

(PA), le polyéthylène téréphtalate (PET), et le polyméthacrylate de méthyle (PMMA), en raison de défis pratiques et de considérations de rentabilité. Ce modèle de recyclage est encore à une phase préliminaire [1].

III.1.3. Recyclage mécanique

Il englobe toutes les techniques visant à valoriser les déchets plastiques en réutilisant les matériaux soit tels quels, soit après une modification chimique. Cette approche semble être la plus efficace pour traiter les déchets solides, contrairement aux méthodes précédemment mentionnées, qui sont toutes de nature destructive. Avant d'entamer le recyclage mécanique, il est nécessaire de planifier plusieurs opérations, incluant la collecte et le tri [1].

III.1.3.1. La collecte

L'efficacité organisationnelle dans la collecte est cruciale pour réduire les coûts de transport, ce qui, une fois maîtrisé, contribuera significativement à résoudre les problèmes liés à la récupération. Les déchets post-consommation, souvent mélangés et pollués lors de la collecte municipale, nécessitent des incitations à la séparation, en particulier pour les plastiques facilement identifiables tels que les bouteilles ou les sacs de supermarché. Il y a diverses méthodes de collecte disponibles :

-La collecte globale : il s'agit d'une collecte multimatières dans laquelle les déchets organiques domestiques sont combinés avec l'ensemble des autres types de déchets.

-La collecte sélective : son but est de choisir, dès la source domestique, un ou plusieurs matériaux spécifiques pour simplifier leur valorisation ou leur élimination ultérieure.

-La collecte spécifique : exemple : bouteilles PET transparentes.

III.1.3.2. Le tri

La récupération des matières plastiques dans les déchets municipaux mélangés nécessite actuellement une main-d'œuvre importante. Il est crucial de se concentrer sur le développement de systèmes automatisés économiquement efficaces pour séparer efficacement les plastiques des autres fractions telles que les papiers, les textiles, les métaux et les verres, ainsi que pour différencier les divers types de matières plastiques. Ce processus se déroule généralement en plusieurs étapes :

-Le tri généralement manuel sur un tapis convoyeur.

-Le broyage grossier d'abord, puis fin des matières plastiques.

-Le lavage.

-Le tri automatique des constituants qui met à profit les différences de propriétés physiques caractérisant les composants des déchets : la taille, la densité, la susceptibilité magnétique, la conductivité électrique, la couleur, etc.

-La séparation chimique peut aider à extraire sélectivement un polymère spécifique des déchets plastiques en utilisant des processus de dissolution et de précipitation différenciés. Cependant, cette méthode rencontre des défis importants en raison de son coût élevé et de sa viabilité économique limitée, qui ne sont justifiés que pour des produits de grande valeur [1].

III.1.4. Recyclage sous forme de mélanges de déchets de polymères

Recycler des déchets plastiques sous forme de mélanges peut présenter des avantages pratiques et économiques en évitant le tri et en réduisant les coûts de recyclage. Cependant, le défi principal réside dans l'incompatibilité des polymères utilisés. Pour obtenir un mélange efficace, il est crucial d'optimiser la dispersion des phases. Cela peut nécessiter l'ajout de composés supplémentaires pour rendre le mélange compatible et améliorer ses propriétés [5]. Plusieurs facteurs peuvent être responsables des difficultés rencontrées dans la mise en œuvre du recyclage des matières plastiques sous forme de mélanges:

- La gestion de l'origine des déchets représente un défi complexe, mais semble essentielle afin d'obtenir une connaissance précise de la composition des déchets. Ceci permettrait ensuite de traiter des mélanges présentant une composition constante et prévisible.
- La plage de température pour la transformation des plastiques est souvent limitée. Lorsqu'il s'agit de mélanges, sélectionner la température de transformation est crucial, car elle influe sur la dégradation et le comportement à l'état fondu. Un choix inapproprié peut entraîner des changements indésirables dans les propriétés du mélange final (Figure III.1.).

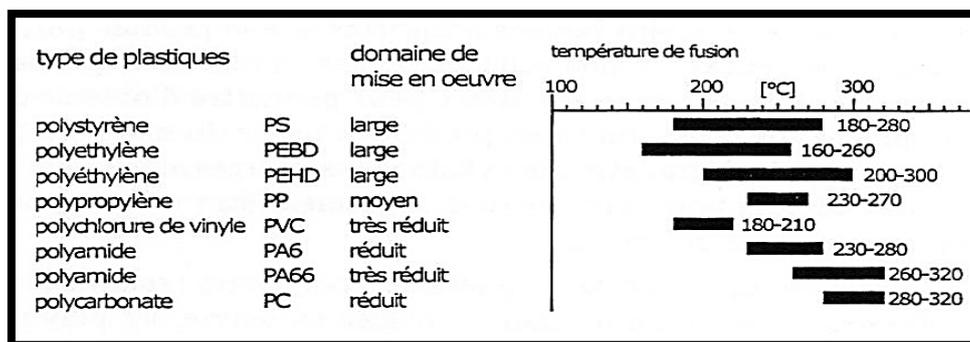


Figure III .1: Plages de températures de mise en œuvre des principaux plastiques [5]

III.2. Les stratégies de revalorisation des polymères recyclés

Il semble que les matériaux recyclés obtenus présentent des caractéristiques altérées, que ce soit lorsqu'ils sont recyclés individuellement ou en combinaison. Afin de rendre le recyclage mécanique économiquement viable, diverses approches visant à améliorer les propriétés des matériaux recyclés ont été suggérées [6].

III.2.1. La stratégie de restabilisation

La technique de restabilisation n'apporte pas réellement d'améliorations aux propriétés des polymères recyclés, mais elle vise plutôt à prévenir ou ralentir leur dégradation future. Cette méthode implique l'ajout de stabilisants tels que des agents thermiques, UV, ou liés à la mise en œuvre, afin de "rajeunir" les matériaux recyclés et de prévenir leur détérioration lors des étapes ultérieures de transformation [7,8]. Les équipes de Tsenoglou (Grèce) et de Pfaender (Allemagne) ont continué à travailler sur cette technique en l'appliquant à plusieurs polymères recyclés comme les polyoléfines [9].

La notion de reconstruction, avancée par l'équipe de la Mantia [10,11], étend le concept de stabilisation en proposant de modifier la structure chimique du polymère recyclé afin d'en améliorer les propriétés. Cette approche implique l'incorporation d'additifs chimiques, tels que des générateurs de radicaux libres, pendant le processus de recyclage mécanique. Ces additifs ont la capacité d'induire des branchements moléculaires, des réactions de réticulation, permettant ainsi d'augmenter les masses molaires et d'améliorer les propriétés mécaniques du polymère. Cette stratégie a été appliquée avec succès, par exemple, sur le PE recyclé [12] et le PET recyclé, où des allongeurs de chaîne ont été greffés lors de l'extrusion réactive [13].

III.2.2. La stratégie de dopage

Cette approche implique d'améliorer les propriétés des polymères recyclés en les enrichissant avec des charges organiques [14], telles que des fibres naturelles ou cellulosiques, ainsi que des charges inorganiques [15]. Comme c'est le cas pour tous les composites à base de polymères, il est crucial d'assurer la compatibilité entre la charge et la matrice polymère pour obtenir les propriétés finales souhaitées du composite. Les composites constitués de matrices polymères recyclées associées à des charges naturelles ont rencontré un succès notable en raison de leur faible impact environnemental [16]. Il est intéressant de noter que certaines études indiquent que, en raison de la présence d'impuretés, les matrices

polymères recyclées peuvent parfois présenter une meilleure compatibilité avec les charges organiques et/ou réduire l'absorption d'eau de ces composites [17].

III.2.3. La stratégie de valorisation par voie de mélange

La dernière stratégie, largement étudiée, repose sur le principe de valorisation par mélange. Selon Paul et ses collaborateurs [18], ils ont observé que les mélanges dont la composition était directement déterminée par les proportions des matières présentes dans les gisements de déchets présentaient des propriétés considérablement dégradées. Pour remédier à cela, ils suggèrent de modifier la composition du mélange en la déplaçant vers une zone présentant des propriétés améliorées. Une approche relativement simple et courante pour y parvenir consiste à mélanger du polymère recyclé avec du polymère vierge afin d'ajuster la composition [19]. Cette méthode est notamment largement utilisée dans le recyclage des rebuts industriels. Il est important de souligner que l'objectif de valoriser les déchets recyclés par le mélange a suscité de nombreuses recherches portant notamment sur la relation entre la composition des mélanges et leurs propriétés. Afin de faciliter et d'affiner l'étude, il est courant de réaliser une étude préliminaire sur des polymères vierges (non recyclés) [18]. Cette approche permet notamment de contourner les problèmes de contamination et de dégradation, ainsi que d'éviter l'étape de broyage et de lavage nécessaire avant de transformer les déchets recyclés. Cependant, il est clair que cette étape initiale ne constitue qu'une première phase, durant laquelle l'objectif fixé en termes de propriétés doit absolument être atteint, sans pour autant garantir le succès final lors de l'utilisation de matières recyclées.

Enfin, une stratégie très répandue pour améliorer les propriétés mécaniques de mélanges de polymères non miscibles est la compatibilisation [20]. De nombreuses procédures efficaces de compatibilisation existent pour la plupart des combinaisons de polymères, et de nombreux mélanges de polymères compatibilisés sont disponibles sur le marché. Un agent de compatibilisation peut être introduit dans le mélange en tant que troisième composant ou être créé in situ au cours d'un processus réactif. L'agent de compatibilisation ajouté doit migrer vers l'interface, réduire la tension interfaciale, diminuer la taille de la phase dispersée et/ou améliorer l'adhésion interfaciale. Cela contribue à améliorer les propriétés mécaniques du matériau. Cependant, la compatibilisation des mélanges de déchets polymères est une tâche plus complexe en raison de la présence de polymères dégradés. De plus, l'étape de compatibilisation doit être économique et relativement simple [21].

III.3. Présentation des polymères valorisés

III.3.1. Les polycarbonates (PC)

III.3.1.1. Présentation du PC

Il existe deux grandes classes de polycarbonates : aliphatiques et aromatiques [22]. Les polycarbonates aliphatiques n'ont trouvé aucune utilisation commerciale significative en tant que thermoplastiques. La plupart des polycarbonates aliphatiques sont des matériaux semi-cristallins à bas points de fusion [23]. Ils sont utilisés comme plastifiants [24], ou comme comonomères [25].

Le polycarbonate aromatique le plus courant est celui dérivé du bisphénol A, le polycarbonate de bisphénol A, également connu sous le nom de polycarbonate (PC), est un polymère amorphe qui présente une résistance élevée à la chaleur, et une très bonne transparence [26,27].

III.3.1.2. Synthèse du PC

Il est produit en combinant le bisphénol A avec du phosgène [28], et il existe deux méthodes alternatives pour sa fabrication.

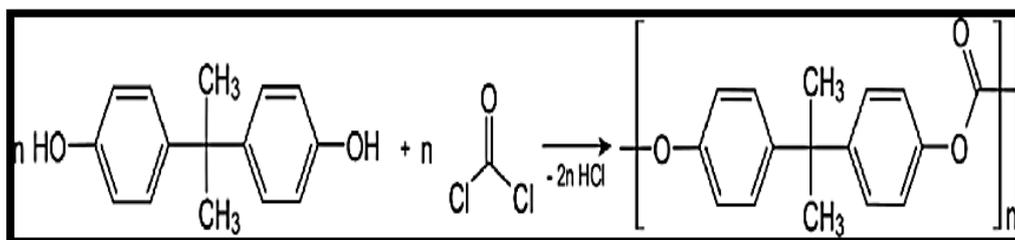


Figure III.2: Synthèse du PC de bisphénol A [28]

➤ La polycondensation

La méthode prédominante, utilisée dans 95% de la production de polycarbonate, repose sur la polymérisation chimique. Elle met en œuvre une réaction entre une solution aqueuse de bisphénol A et de la soude en présence de phosgène. La gestion précise de l'utilisation du phosgène est cruciale pour maîtriser les coûts de fabrication du polycarbonate [29].

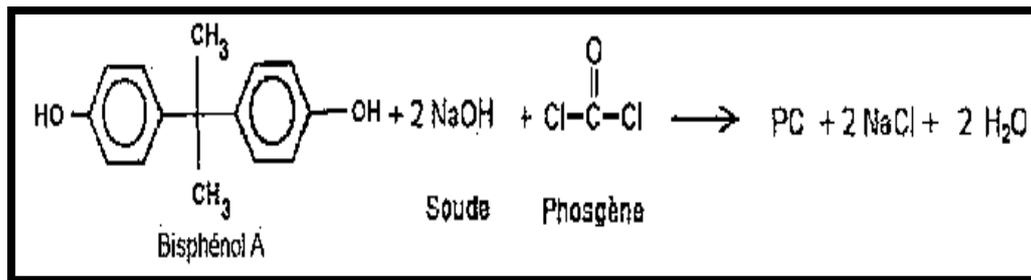


Figure III.3: Schéma de synthèse du PC par polycondensation du Bisphénol A avec le phosgène [28]

➤ La Transestérification

Il s'agit d'une méthode qui implique la réaction entre le bisphénol A et le carbonate de diphényle, en présence d'un catalyseur et à une température élevée (entre 150 et 350 °C) [29].

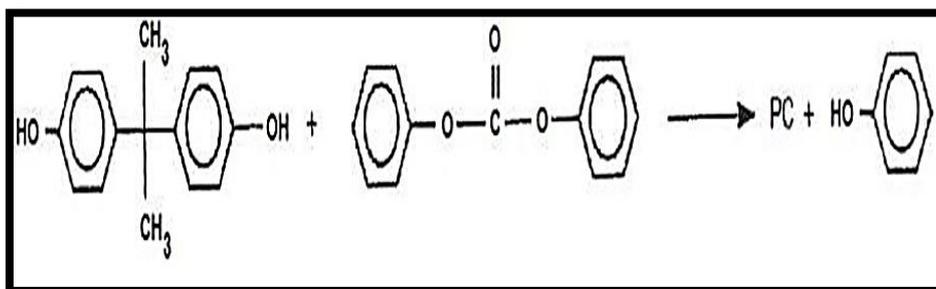


Figure III.4: Schéma de synthèse du PC par transestérification [30]

III.3.1.3. Mise en œuvre du PC

Le polycarbonate peut subir différents processus de mise en forme tels que l'injection, l'extrusion, le thermoformage et le surmoulage. Avant d'entamer ces procédés, il est impératif de soumettre le polycarbonate à un étuvage à une température de 120 °C pendant au moins 4 heures [30-32]. Lors de l'injection-moulage, les températures utilisées se situent entre 280 °C et 320 °C, avec une plage de température pour le moule de 80 °C à 120 °C. En ce qui concerne l'extrusion, la température décroît le long de la vis, passant de 300 °C à 270 °C [31, 32].

III.3.1.4. Les propriétés du PC

III.3.1.4.1. Propriétés physiques, chimiques et électriques

Le tableau III.1 résume les principales propriétés physiques, chimiques et électriques du polycarbonate.

Tableau III.1: Les propriétés physiques, chimiques et électriques du PC [33]

Propriétés	Valeurs / Caractéristiques
Tg	148 °C
Reprise d'humidité	Faible
Masse volumique	1,2 à 1,25 g/cm ³
Transparence	86 à 90% sous 1mm d'épaisseur
Absorption UV	Importante, coupure à 400 nm
Perméabilité aux gaz	Hydrogène, hélium, gaz carbonique, anhydride sulfureux, oxyde d'éthylène
Résistance à l'eau chaude	Jusqu'à 60°C pour de longues durées
Réactivité chimique	Résiste aux hydrocarbures aliphatiques, sensibilité à l'hydrolyse
Permittivité relative	2,9 à 1 MHz
Facteurs de pertes diélectriques	10 x 10 ⁻⁴ à 50 Hz 100 x 10 ⁻⁴ à 1 MHz à 23°C
Résistivité spécifique superficielle	10 ¹⁵ Ω pour les PC standards et ignifugés, 10 ¹⁴ Ω pour les PC renforcés de fibres de verre

III.3.1.4.2. Propriétés mécaniques

Les propriétés mécaniques du polycarbonate sont influencées par des facteurs tels que la masse molaire des résines, la présence de fibres de verre et éventuellement la formule d'ignifugation [33].

Tableau III.2: Propriétés mécaniques du PC [34]

Module d' Young (MPa)	Contrainte maximale (MPa)	Elongation maximale (%)	Résistance au choc entaillée (KJ/ m ²)
2300-2400	62-65	110	850

III.3.1.4.3. Propriétés thermiques

Le tableau III.3 présente les caractéristiques thermiques du (PC) dans les conditions ambiantes.

Tableau III.3: Propriétés thermiques du PC [35]

Propriété	Valeur
Température d'utilisation	de -40°C à 150° C
Conductivité thermique (c)	0,2W.m ⁻¹ .K ⁻¹
Capacité calorifique (Cp)	1,2 J.g ⁻¹ .K ⁻¹
Vitesse du son (Vs)	2270 m.s ⁻¹
Masse volumique (ρ)	1,2 g.cm ⁻³
Coefficient de dilatation thermique	65-70 × 10 ⁻⁶ K ⁻¹

III.3.1.5. Applications

Le tableau III.4 résume les diverses applications du polycarbonate dans différents secteurs d'activité.

Tableau III.4: Les différentes applications du PC [33]

Domaine	Utilisations
Enregistrement optique	Disques optiques pour données
Electroménager	boîtiers d'appareils photographiques, boîtiers de téléphones portables, boîtiers de rasoirs électriques, réservoirs d'eau transparents de fer à repasser
Médical	cartouches de filtres de dialyse, masques inhalateurs en anesthésie, récipients de stérilisation, biberons
Protection	visières et casques, lunettes de protection contre les chocs, les infrarouges, les lasers, masques de soudeur
Automobile	phares monoblocs

III.3.2. Acrylonitrile butadiène styrène

III.3.2.1. Présentation de l'ABS

L'ABS est un polymère thermoplastique appartenant à la famille des polymères styréniques. Il se compose de longues chaînes de monomères liés chimiquement, formant un terpolymère. Ce terpolymère est produit par la copolymérisation de trois monomères distincts

: le styrène, le butadiène et l'acrylonitrile (AN). Ces monomères se répètent pour constituer la structure polymère de l'ABS [36].

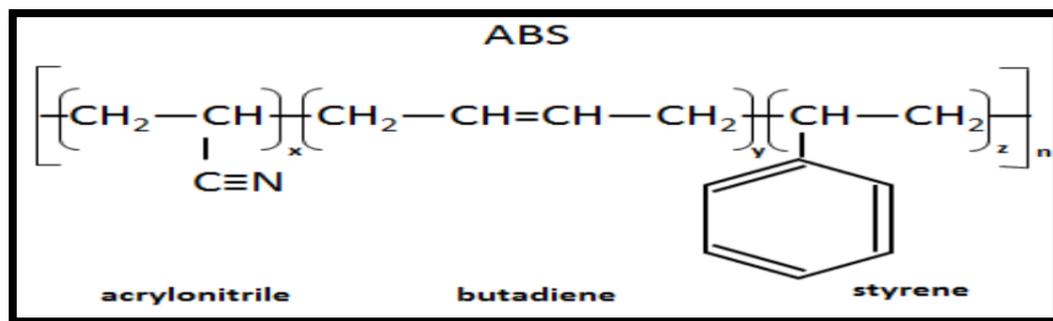


Figure III.5: Structure chimique de l'ABS [37]

III.3.2.2. Les monomères qui composent l'ABS

Il est composé de trois monomères principaux [38] :

- **Acrylonitrile** : confère à l'ABS une capacité à résister à divers produits chimiques et agents corrosifs, notamment les acides et les bases peu concentrés.
- **Butadiène** : confère à l'ABS sa résistance aux chocs et sa force.
- **Styrène** : permet à l'ABS d'être plus rigide comparativement aux plastiques tels que le PVC tout en lui conférant un fini plus lisse et esthétique.

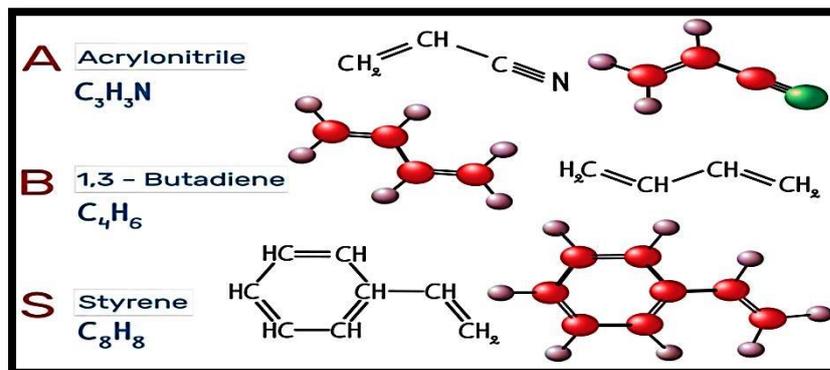


Figure III.6: Structures chimiques de l'acrylonitrile, du butadiène et du styrène [39]

III.3.2.3. Synthèse de l'ABS

La polymérisation utilisée pour créer l'ABS implique une réaction en chaîne de type radicalaire. Cependant, le processus de synthèse nécessite des étapes préliminaires. La réaction de polymérisation se déroule à 180 °C, où le styrène-acrylonitrile (SAN) est solide et l'acrylonitrile (AN) est sous forme de caoutchouc. Les molécules d'ABS s'alignent perpendiculairement et possèdent des liaisons polaires, contribuant ainsi à sa résistance globale.

Le styrène confère à l'ABS son aspect brillant, sa concentration variant selon l'application envisagée [36].

III.3.2.4. Mises en œuvre de l'ABS

Avant d'être utilisé, il est recommandé de chauffer légèrement l'ABS, qui a une légère tendance à absorber l'humidité, à une température de 80-85°C pendant 2 à 4 heures. L'ABS peut être mis en forme par divers procédés tels que l'extrusion, l'injection, le thermoformage et le soufflage. En ce qui concerne l'injection-moulage, les températures varient généralement entre 200°C et 300°C, selon le grade de l'ABS (standard, résistant à la chaleur, etc.). La température du moule doit être maintenue entre 40°C et 70°C. Pour l'extrusion, la plage de température de travail se situe généralement entre 210°C et 250°C à la sortie de la filière [40].

III.3.2.5. Propriétés de l'ABS

L'ABS est un matériau polyvalent, résistant aux acides dilués, aux alcalis et aux hydrocarbures aliphatiques. Il possède d'excellentes propriétés isolantes et peut être facilement soudé. Il est également résistant à l'abrasion et à la déformation, avec une stabilité dimensionnelle robuste. Sa surface offre une qualité supérieure avec une luminosité importante, et il est remarquablement rigide, ce qui en fait un choix idéal pour diverses applications structurelles [41].

III.3.2.6. Les applications de l'ABS

Tableau III.5: Les différentes utilisations de l'ABS [42]

Secteur	utilisations
Automobile	Les pièces intérieures : boîtes à gants, tableaux de bord, garnitures des portes, et les pièces extérieures : grille de calandre, couvercles de roue
Électrique	les téléphones et les supports de téléphone, les pièces de radio et télévision, les coffrets de tourne-disque, les haut-parleurs
Équipements ménagers	aspirateurs, mixers, moulins à café, parties de machines à coudre, casques de coiffure.
Ameublement de bureau	les machines à écrire, à calculer, les sièges, armoires.

Références bibliographiques

- [1]:Mohammedi, A. (2016). Thèse de doctorat de Valorisation Par Recyclage Des Déchets Polymériques Issus Des Équipements Électriques et Électroniques.
- [2]:Al-Salem, S. M., Lettieri, P., & Baeyens, J. (2009). Recycling and recovery routes of plastic solid waste (PSW): A review. *Waste Management*, pp 2625-2643.
- [3]:Siddique, R., Khatib, J., & Kaur, I. (2008). Use of recycled plastic in concrete: A review. *Waste Management*, pp 1835-1852.
- [4]:Kallel, T. K. (2003). Étude de mélanges PE/PS : Contribution au recyclage (Thèse de doctorat). Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, Lyon.
- [5]:Rakem, D. (2013). Mémoire de master de l'élaboration et caractérisation de mélange de polymères (PEMD-déchets automobile).
- [6]:Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2008). Quality concepts for the improved use of recycled polymeric materials: A review. *Macromolecular Materials and Engineering*, pp 274-297.
- [7]:Pospíšil, J., Sitek, F. A., & Pfaendner, R. (1995). Upgrading of recycled plastics by restabilization—an overview. *Polymer Degradation and Stability*, pp 351-358.
- [8]:Pfaendner, R., et al. (1995). Recycling and restabilization of polymers for high quality applications: An overview. *Die Angewandte Makromolekulare Chemie*, pp 193-227.
- [9]:Tsenoglou, C., et al. (2001). Modeling the role of stabilizing additives during melt recycling of high-density polyethylene. *Journal of Applied Polymer Science*, pp 2207-2217.
- [10]:La Mantia, F. P., & Tzankova Dintcheva, N. (2005). Processability and properties of re-graded, photo-oxidized post-consumer greenhouse films. *Macromolecular Materials and Engineering*, pp 970-975.
- [11]:Scaffaro, R., Tzankova Dintcheva, N., & La Mantia, F. P. (2006). On the effectiveness of different additives and concentrations on the re-building of the molecular structure of degraded polyethylene. *Polymer Degradation and Stability*, pp 3110-3116.
- [12]:Scaffaro, R., La Mantia, F. P., & Tzankova Dintcheva, N. (2007). Effect of the additive level and of the processing temperature on the re-building of post-consumer pipes from polyethylene blends. *European Polymer Journal*, pp 2947-2955.
- [13]:Kiliaris, P., Papaspyrides, C. D., & Pfaendner, R. (2007). Reactive-extrusion route for the closed-loop recycling of poly(ethylene terephthalate). *Journal of Applied Polymer Science*, pp 1671-1678.
- [14]:La Mantia, F. P., et al. (2004). Green composites of organic materials and recycled post-consumer polyethylene. *Polymer International*, pp 1888-1891.
-

Références bibliographiques

[15]:Sahnoune, F., Lopez Cuesta, J. M., & Crespy, A. (2003). Improvement of the mechanical properties of an HDPE/PS blend by compatibilization and incorporation of CaCO₃. *Polymer Engineering & Science*, pp 647-660.

[16]:Vilaplana, F., Strömberg, E., & Karlsson, S. (2010). Environmental and resource aspects of sustainable biocomposites. *Polymer Degradation and Stability*, pp 2147-2161.

[17]:Espert, A., Vilaplana, F., & Karlsson, S. (2004). Comparison of water absorption in natural cellulosic fibres from wood and one-year crops in polypropylene composites and its influence on their mechanical properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, pp 1267-1276.

[18]:Paul, D., Vinson, C., & Locke, C. (1972). The potential for reuse of plastics recovered from solid wastes. *Polymer Engineering & Science*, pp 157-166.

[19]:La Mantia, F. (1998). Reprocessing and properties of homopolymer blends of virgin and recycled polymers. In *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling*, pp 371-385. Springer.

[20]:Koning, C., et al. (1998). Strategies for compatibilization of polymer blends. *Progress in Polymer Science*, pp 707-757.

[21]:Radusch, H.-J., Ding, J., & Akovali, G. (1998). Compatibilization of heterogeneous polymer mixtures from the plastics waste streams. In *Frontiers in the Science and Technology of Polymer Recycling*, pp 153-189. Springer.

[22]:Freitag, D., Grigo, U., Muller, P. R., & Nouvertne, W. (1987). Polycarbonates. In J. Marks et al. (Eds.), *Polym. Eng. Sci. Encyl.*, Wiley Interscience, New York.

[23]: Schnell, H. (1964). *Chemistry and Physics of Polycarbonates*. Wiley Interscience, New York.

[24]: Hostettler, F., & Cox, E. F. (1964). Compositions containing polycarbonate plasticizers. U.S. Patent 3,305,605.

[25]:Campbell, R. W., Claesen, C. A. A., Vrooman, T. O. N., Fontana, L. P., Miller, K. F., Quinn, C. B., & VanEs, P. W. (1994). Phenolic compound end capped polyester carbonate. U.S. Patent No. 5,321,114.

[26]: Odian, G. (1981). *Principles of Polymerization*, 2nd ed. Wiley Interscience, New York.

[27]:Lazear, N. R. (1995). Polycarbonate-high performance resin. *Adv. Mat. Proc.*, pp147.

[28]:Labisi, M., & Show, L. (1979). "Robeson, polymer." *Polymer Mixibility Academic*: (N.Y).

Références bibliographiques

[29]:Khan, M., Liang, R., & Agarwal, S. (2005). Rheological and mechanical properties of ABS/PC blends. Journal Korea Australia Rheology, pp 1-7
[30]:Dumont, J. M. (2007). Polycarbonates, Plastiques et Composites. Techniques de l'ingénieur, AM3 381.
[31]:Carrega, M., Agassant, J. F., Biron, M., Clozza, C., Duval, C., Haudin, J. M., Houdret, C., Machon, J. P., Queslel, J. P., Seguela, B., Villoutreix, G., & Wirth, R. (2000). Matériaux industriels - Matériaux polymères. Ed. DUNOD.
[32]:Pham, H. T., Munjal, S., & Bosnyak, C. P. (1997). Polycarbonates. In O. Olabisi (Ed.), Handbook of Thermoplastics,pp 609-631.
[33]:Carrega, M., & Verney, V. (2017). Matière plastiques. DUNOD, pp 366-367.
[34]:Benmesli, S., & Riahi, F. (2014). Propriétés mécaniques et thermiques dynamiques d'un mélange d'élastomère thermoplastique polypropylène/caoutchouc naturel chimiquement modifié. Test de polymère, pp 54-61.
[35] :Frantz, C. (2011). Synthèse électrochimique de nanofils de Bi ₂ Te ₃ dans des matrices poreuses en polycarbonate (Thèse de doctorat, Université PAUL VERLAINE – METZ).
[36]:Zhao, Z., Wang, C., Yang, J., et al. (2009). Effect of rubber types on synthesis, morphology, and properties of ABS resins. Polymer Engineering & Science, pp 2249-2256.
[37]:Deng, Y. (2022). Usinage CNC ABS : Tout ce que vous devez savoir – ProLean. [Consulté le 13.04.2024]. https://proleantech.com/fr/abs-cnc-machining/
[38]:PolyAlto. (2023). Qu'est-ce que l'ABS.[Consulté le 13.04.2024]. https://blogue.polyalto.com/abs#:~:text=L'acrylonitrile%20butadi%C3%A8ne%20styr%C3%A8ne%2C%20ou,plus%20grande%20vari%C3%A9t%C3%A9%20d'applications.
[39]:Dianjin. (2023). Qu'est-ce que le moulage par injection ABS ? [Consulté le 13.04.2024]. https://moldie.net/fr/what-is-abs-injection-molding/
[40]:Chang, C., David, B., Ray, C., et al. (1997). Acrylonitrile-Butadiene-Styrene (ABS) polymers. In O. Olabisi (Ed.), Handbook of Thermoplastics,pp135-153.
[41]:Rapide Direct. (2021). Matériau ABS : matière plastique pour le prototypage et les pièces. [Consulté le 13.04.2024]. https://www.rapiddirect.com/fr/blog/abs-material-guide/
[42]:Carrega, M., & Verney, V. (2017). Matière plastiques. DUNOD, pp 231-232.

CHAPITRE IV

Les mélanges polymériques

IV.1. Présentation

Le concept de mélange de polymères consiste à combiner deux polymères ou plus afin d'obtenir des propriétés souhaitées ou optimisées. Cette approche est souvent plus pratique et économique que la création de nouveaux monomères ou de nouvelles méthodes de polymérisation [1].

IV.2. Définition des mélanges polymériques

On désigne par le terme "mélange de polymères" toute combinaison d'au moins deux polymères ou copolymères. Ces polymères peuvent présenter une miscibilité variable, qu'elle soit totale ou partielle [2]. Il s'agit de mélanges de polymères ayant des natures chimiques différentes, formant principalement des systèmes multiphasiques dont la structure dépend de la composition et des conditions de transformation. La classification de ces mélanges peut se baser sur leur miscibilité ainsi que sur la méthode de préparation utilisée [3].

IV.3. Différents mélanges polymériques

IV.3.1. Mélanges miscibles

Il s'agit d'un système présentant une homogénéité moléculaire totale à toutes les échelles, avec des propriétés situées entre celles des constituants purs. Dans ce contexte, l'évolution des propriétés suit la loi des mélanges. Quelques exemples de mélanges miscibles, capables de former une unique phase dans des conditions spécifiques de température, de pression et de composition, incluent les combinaisons polystyrène/polyoxyde de phénylène et polychlorure de vinyle/polycaprolactone [4].

IV.3.2. Mélanges non miscibles

Ce type de mélanges est caractérisé par une séparation de phases à l'échelle microscopique [4]. Cette incompatibilité est due soit à la structure chimique complètement différente, comme dans le cas du mélange polychlorure de vinyle/polyéthylène (PVC/PE), soit à la masse molaire relative très élevée. Par conséquent, ces mélanges sont caractérisés par 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 [5].

IV.3.3. Mélanges partiellement miscibles

La miscibilité des mélanges se manifeste uniquement pour des compositions spécifiques [6]. À titre illustratif, on peut mentionner les mélanges constitués de polystyrène et de polycarbonate, tels que le (PS/PC) [7].

IV.3.4. Mélange de polymères compatibles

Il s'agit d'un ensemble de mélanges de polymères non miscibles entre eux, mais compatibles de manière à ce qu'un mélange approprié permette de former des structures où la taille des domaines de phases miscibles est inférieure à celle des domaines de phases des polymères incompatibles. Les propriétés mécaniques, notamment la résistance aux chocs, sont améliorées grâce aux forces d'adhésion interfaciales [8].

IV.4. Méthodes de préparation des mélanges polymériques

IV.4.1. Mélange en solution

La préparation de mélanges polymériques en solution implique l'utilisation de solutions contenant les deux polymères dans un même solvant. On peut récupérer le mélange par précipitation ou évaporation du solvant. Cette méthode est couramment employée en recherche académique en laboratoire, mais elle présente des défis à l'échelle industrielle en raison de coûts élevés, de la non-disponibilité des solvants et de la difficulté à éliminer d'importantes quantités de solvants organiques potentiellement toxiques [9].

IV.4.2. Mélange à l'état fondu

L'extrusion et le malaxage figurent parmi les procédés les plus fréquemment employés pour le mélange de polymères. Ces méthodes prédominent dans l'industrie de la transformation des polymères en raison de leur pertinence pratique. Cependant, il convient de noter que la dégradation thermomécanique des polymères constitue une limitation majeure de cette approche [10].

IV.5. Comment concevoir un mélange de polymères ?

Pour concevoir un mélange de polymères ayant les propriétés désirées, il est nécessaire de prendre en compte divers facteurs :

- **Étape 1** : établir les caractéristiques physiques et chimiques requises pour atteindre le mélange optimal.
- **Étape 2** : choisir les polymères capables d'exprimer ces caractéristiques spécifiques.
- **Étape 3** : énumérer les points forts et les faiblesses des polymères choisis.
- **Étape 4** : parmi les polymères potentiels, choisir ceux qui offrent le meilleur ensemble de propriétés complémentaires.
- **Étape 5** : évaluer la possibilité de mélanger les polymères choisis et/ou appliquer une méthode visant à les rendre compatibles.
- **Étape 6** : analyser les aspects économiques tels que le coût des polymères, les dépenses liées à la compatibilisation, la maintenance, etc. En cas de coûts élevés, retourner à l'étape 4 pour choisir d'autres polymères.
- **Étape 7** : établir la morphologie optimale garantissant la meilleure performance du produit final.
- **Étape 8** : choix des caractéristiques rhéologiques des éléments du mélange, y compris la concentration des composants et la quantité de compatibilisants.
- **Étape 9** : établir la méthode de stabilisation de la morphologie, telle que la cristallisation, la réaction chimique, etc.
- **Étape 10** : choisir la méthode de fabrication optimale garantissant la morphologie finale. Si la morphologie obtenue ne correspond pas à l'objectif optimal, revenir à l'étape 8[11].

IV.6. Compatibilisations des mélanges de polymères

IV.6.1. Définition

La compatibilisation d'un mélange de polymères non miscibles représente de loin la méthode la plus appropriée pour transformer un système hétérogène en un alliage hautement performant, qui se distingue par des propriétés stables et reproductibles. Étant donné que les performances d'un matériau dépendent non seulement de ses composants et de leurs concentrations, mais aussi de sa morphologie, il est impératif que toute opération de compatibilisation garantisse une stabilité qui ne soit pas altérée par les conditions ultérieures de transformation [12].

IV.6.2. Objectifs de la compatibilisation

Les principales tâches qu'une compatibilisation doit accomplir sont généralement les suivantes :

- La diminution de la tension interfaciale, qui représente le principal défi pour atteindre une dispersion optimale, conduit à des systèmes instables. Ainsi, le processus de compatibilisation vise à favoriser une dispersion fine de la phase dispersée au sein de la matrice polymérique.
- Assurer que la structure générée reste intacte lors des étapes ultérieures de transformation.
- Améliorer l'adhérence entre les phases distinctes afin d'optimiser le transfert de contraintes entre elles, ce qui contribue à prévenir la rupture catastrophique des défauts qui se forment au niveau de l'interface [12-14].

IV.6.3. Différentes voies de compatibilisation

Les trois stratégies les plus fréquemment utilisées pour la comptabilisation des mélanges de polymères immiscibles sont [15] :

- Le mélange par cisaillement, appelé aussi procédé physique.
- Les additifs physiques.
- Les procédés réactifs.

IV.6.3.1. Procédé physique

Cette méthode est utilisée sur des mélanges de polymères présentant un niveau de compatibilité particulier. Par exemple, dans le cas d'un mélange de deux polyoléfines, leur faible polarité est assez proche, ce qui rend le processus physique adéquat pour assurer une meilleure compatibilité. Toutefois, les procédés physiques se révèlent insuffisants pour les mélanges composés d'un polymère apolaire associé à un autre présentant une forte polarité [6].

La technique physique la plus couramment employée dans les mélanges de polymères est le cisaillement thermomécanique, notamment à travers des procédés tels que l'extrusion. Cette opération favorise une dispersion efficace du polymère minoritaire au sein de domaines de plus en plus réduits, souvent entraînant une amélioration des propriétés mécaniques [6].

IV.6.3.2. Procédé réactif

C'est un processus où un copolymère bloc ou greffé est généré sur place par réaction chimique entre des composés fonctionnalisés. Cela crée des copolymères compatibilisants avec une architecture très diverse. La structure résultante du copolymère

compatibilisant dépend à la fois du type de réaction en cours et de l'emplacement des groupes réactifs sur les macromolécules impliquées dans le processus de compatibilisation [16].

Pour réussir une compatibilisation réactive efficace, plusieurs éléments cruciaux sont indispensables :

- Une vitesse de cisaillement adéquate pour obtenir la dispersion souhaitée.
- La concentration des groupements réactifs qui assureront la formation des liaisons.
- La vitesse de la réaction de compatibilisation doit être en adéquation avec le temps d'élaboration [17].

IV.7. Revue bibliographique

Cette partie présente un bref aperçu des divers travaux consacrés à l'amélioration des propriétés mécaniques, morphologiques et de la compatibilité des mélanges de PC/ABS.

Devi K. et Hatna S. [18] ont étudié l'effet du styrène maléique anhydride (SMA) en tant que compatibilisant sur les mélanges PC/ABS. Des mélanges avec 40, 50 et 60 % en poids d'ABS et 5 % en poids de SMA ont été préparés par extrusion double vis et moulage par injection. L'ajout de SMA a amélioré significativement les propriétés de traction et de résistance aux chocs des mélanges par rapport aux mélanges non compatibilisés. Les analyses IRTF ont confirmé la réaction du compatibilisant, montrée par des changements d'intensité et de position des pics. La fluidité et la résistance thermique (HDT) des mélanges ont également été améliorées avec l'ajout de SMA. Les tests par calorimétrie différentielle à balayage (DSC) ont indiqué une miscibilité partielle des composants du mélange, et les observations au microscope électronique à balayage ont montré des interactions moléculaires améliorées entre le PC et l'ABS grâce au compatibilisant.

Bano S. et al. [19] ont étudié la caractérisation mécanique de surface des mélanges ABS/PC en utilisant la nano-indentation. Ils ont fabriqué des feuilles de mélanges de polymères avec différentes proportions d'ABS/PC (75:25, 50:50 et 25:75) par traitement thermique et pressage thermique. Les interactions intermoléculaires entre les composants des mélanges ont été analysées par spectroscopie infrarouge à transformée de Fourier (FTIR). Les tests de nano-indentation ont été effectués pour évaluer les propriétés mécaniques de surface, montrant une augmentation du déplacement avec la teneur en ABS, tandis que la dureté et le module d'élasticité tendaient à diminuer avec une augmentation de la teneur en ABS. Cette

étude vise à ouvrir la voie au développement de nouveaux mélanges de polymères offrant des performances mécaniques améliorées.

Seo J.S. et al. [20] ont étudié les propriétés rhéologiques des mélanges de PC/ABS à différentes températures. Ils ont constaté que la viscosité des mélanges variait en fonction du rapport de mélange et de la température, avec des comportements inattendus pour certains mélanges. Des analyses ont révélé que des structures internes se forment dans les mélanges, influençant leur comportement rhéologique à différents niveaux de cisaillement et de température. Les résultats ont également montré des variations dans la résistance des mélanges en fonction du rapport de mélange et de la température, mettant en évidence l'importance de la structure interne sur les propriétés mécaniques des mélanges PC/ABS.

Wang Y. et al. [21] ont étudié l'utilisation du polycarbonate/acrylonitrile-butadiène-styrène recyclé en l'enrichissant avec du styrène-butadiène-méthacrylate de glycidyle (SBG) pour améliorer ses propriétés. Ils ont constaté que l'ajout de SBG a amélioré la compatibilité entre le polycarbonate et le ABS, confirmée par des analyses chimiques et morphologiques. Les résultats ont également montré une augmentation du poids moléculaire et des propriétés rhéologiques améliorées dans les échantillons modifiés. De plus, une amélioration significative des propriétés mécaniques, en particulier la résistance aux chocs, a été observée avec une teneur en SBG de 6 % en poids.

Debbah I. et al. [22] ont étudié l'effet du compatibilisant SEBS-g-MAH sur les propriétés des mélanges de PC et de l'ABS. Ils ont préparé des mélanges à différents ratios de PC et d'ABS avec diverses concentrations de compatibilisant, utilisant une extrusion bi-vis et un moulage par injection. L'ajout de SEBS-g-MAH a amélioré la résistance à la traction, le module d'élasticité, l'allongement à la rupture, la résistance aux chocs, la viscosité complexe et la stabilité thermique. Ces améliorations ont été particulièrement notables à 1 % en poids de compatibilisant. Les analyses rhéologiques ont révélé des morphologies variées et ont montré l'effet du compatibilisant sur la tension interfaciale, augmentant ainsi les interactions entre le PC et l'ABS.

Nishino et al. [23] ont étudié l'impact d'un polymère réactif sur les propriétés des mélanges PC/ABS, utilisés notamment dans l'industrie automobile et pour les équipements de bureautique. Leur recherche a révélé que, bien que le groupe hydroxyle terminal du PC soit généralement bloqué pour améliorer diverses propriétés, un polymère réactif contenant un

groupe anhydride maléique peut réagir avec ce groupe hydroxyle en présence de sels métalliques. Cette réaction améliore la résistance aux chocs des mélanges PC/ABS.

Kaseem M. et Hamad K. [24] ont étudié le comportement d'écoulement du mélange PC/ABS. Ils ont préparé des mélanges avec différentes proportions de PC et d'ABS et ont utilisé un rhéomètre capillaire pour mesurer le taux de cisaillement apparent, la contrainte de cisaillement apparente, la viscosité apparente, l'indice de loi de puissance et l'énergie d'activation d'écoulement. Leurs résultats ont montré un comportement pseudo-plastique des mélanges, avec le PC se comportant de manière relativement newtonienne tandis que l'ABS montrait un important amincissement sous cisaillement. L'énergie d'activation d'écoulement des mélanges diminuait avec l'augmentation du taux de cisaillement, mais augmentait avec l'augmentation de la contrainte de cisaillement.

Heidar P. R. et al. [25] ont étudié les nanocomposites PC/ABS avec des concentrations variables de particules de graphène à couches multiples (GNP) fabriquées par extrusion par fusion. Les propriétés d'inflammabilité, thermiques, mécaniques et morphologiques ont été examinées. L'ajout de GNP a amélioré la retardation de la flamme, réduisant jusqu'à 30,4 % le taux de libération de chaleur maximale et augmentant l'indice limite d'oxygène (LOI) jusqu'à 26 %. Les nanocomposites ont obtenu une classification UL-94 V-2 avec moins de gouttes par rapport au PC/ABS pur. L'analyse thermogravimétrique (TGA) a montré une meilleure stabilité thermique et un rendement en char (cendre) amélioré. La microscopie électronique à balayage a révélé une orientation unidirectionnelle des nanoplaquettes de GNP dans le PC/ABS.

Liu Y. et al. [26] ont étudié des mélanges de PC/ABS afin d'analyser certaines de leurs propriétés mécaniques, morphologiques et de stabilité thermique. Ils ont utilisé deux types de compatibilisants, le méthacrylate-butadiène-styrène (MBS) et l'anhydride maléique-styrène (SMA), pour améliorer la compatibilité entre le PC et l'ABS. Le SMA a montré une amélioration de la résistance aux chocs des mélanges par rapport au MBS, avec une augmentation maximale d'environ 36,4 % avec 15 % en poids de SMA. Les micrographies de microscopie électronique à balayage ont révélé une diminution de la taille des particules de l'ABS dans la phase continue du PC lors de l'utilisation des compatibilisants. De plus, les courbes de DSC ont indiqué que le MBS et le SMA pouvaient rapprocher la température de transition vitreuse (T_g) des deux phases. Les tests TGA ont montré que le MBS et le SMA avaient peu d'effet sur la stabilité thermique du mélange PC/ABS.

Farzadfar A. et al. [27] ont étudié des mélanges de PC recyclé et d'ABS, en utilisant des compatibilisants pour améliorer leurs propriétés. Ils ont comparé les effets de deux compatibilisants, (ABS-g-MA) et (éthylène-acétate de vinyle)-g-(anhydride maléique) (EVA-g-MA), sur la résistance à la traction et la résistance au choc des mélanges. Les résultats ont montré que l'EVA-g-MA améliorerait davantage la résistance au choc que l'ABS-g-MA. Les micrographies ont révélé une réduction de la taille des particules de la phase dispersée, et les mélanges avec compatibilisant ont montré un comportement de rupture plus ductile par rapport à ceux sans compatibilisant.

Win Khun N. et Liu E. [28] ont étudié les propriétés thermiques, mécaniques et tribologiques des mélanges PC/ABS en modifiant la teneur en ABS. Ils ont constaté que l'augmentation de la teneur en ABS réduisait la stabilité thermique des mélanges, mais améliorait leur résistance à la traction grâce à une meilleure transformabilité. Cependant, cela entraînait également une augmentation du frottement et de l'usure des mélanges, en raison de la nature plus abrasive de l'ABS. Les tests de rayure ont révélé une meilleure résistance à la rayure pour le PC, en particulier dans les mélanges avec une proportion plus élevée de PC. Ces résultats suggèrent que l'incorporation de PC dans les mélanges PC/ABS peut améliorer leur résistance à la rayure.

Zhao B. et al. [29] ont étudié l'amélioration de la compatibilité entre le PC et l'ABS en utilisant un nouveau compatibilisant réactif, le tétramère de méthacrylate de méthyle greffé sur l'ABS (MABS). Les mélanges PC/ABS (70/30) avec différents ratios de MABS ont été examinés pour leurs propriétés mécaniques et morphologiques. L'ajout de MABS a rapproché les températures de transition vitreuse (T_g) des phases PC et ABS, diminué la taille des domaines de la phase dispersée d'ABS, amélioré la répartition de cette phase et renforcé la cohésion interfaciale. Ces changements ont conduit à une augmentation significative de la résistance à l'impact entaillé et de l'allongement à la rupture, avec une légère diminution de la résistance à la traction.

Ahmed F. et al. [30] ont étudié l'effet de l'irradiation par un faisceau d'ions argon sur le PC et l'ABS. À des temps de traitement courts, le PC reste inchangé tandis que l'ABS développe une structure nanomousse à la surface. Avec des temps de traitement plus longs, les deux polymères forment des nanostructures mesurant 100 à 120 nm de longueur et environ 35 nm de diamètre. Les analyses par spectroscopie Raman et IRTF ont montré une rupture des chaînes polymères. La nano-indentation a révélé que la dureté et le module d'élasticité du

PC/ABS diminuent de 0,22 à 0,18 GPa et de 3,39 à 2,98 GPa respectivement, en raison des nanostructures de surface induites par le faisceau d'ions argon.

Wong A. C. Y. [31] a étudié deux systèmes binaires de PC/ABS avec des ratios de mélange différents, préparés dans une extrudeuse à double vis. Les deux types d'ABS (PA-747 et PA-757) différaient largement en termes de fluidité, comme le montraient leurs différents indices de fluidité à l'état fondu. Les résultats des tests de propriétés mécaniques ont indiqué que le système PC/ABS-757 était généralement supérieur au système PC/ABS-747. La ténacité aux chocs des deux systèmes PC/ABS augmentait avec l'augmentation de la teneur en PC. La ténacité aux chocs du PC/ABS-747 était supérieure à celle du PC/ABS-757 uniquement pour une teneur en PC inférieure à 40 %; au-delà de ce seuil, elle devenait inférieure. Les micrographies obtenues par microscopie électronique à balayage (MEB) ont soutenu ces observations.

Más.J. et al. [32] ont étudié les mélanges de PC et de l'ABS avec diverses compositions en utilisant des mesures mécaniques dynamiques. Les échantillons ont présenté une séparation de phase. Le décalage dans les températures de relaxation mécanique dynamique principale des mélanges par rapport à celles des composants purs a été attribué à la migration des oligomères de l'ABS vers le PC lors du mélange à l'état fondu. Des comparaisons avec d'autres techniques, telles que l'analyse diélectrique et calorimétrique, ainsi que l'application du modèle à trois blocs de Takayanagi, ont confirmé cette hypothèse. Dans toutes les compositions de mélange étudiées (jusqu'à 28,6 % en poids d'ABS), le PC a agi comme matrice avec une phase dispersée d'ABS. Les micrographies par MEB et par transmission ont montré que la taille des particules d'ABS augmentait avec la proportion d'ABS dans le mélange. Les résultats de la spectroscopie IRTF ont révélé que l'interaction entre les deux composants était de nature non polaire et pouvait être améliorée par la procédure de préparation.

Lee W. S. et al. [33] ont étudié la déformation par cisaillement et le comportement de fracture d'un mélange de PC/ABS soumis à une forte déformation par cisaillement à une vitesse de déformation élevée, en utilisant une barre de Hopkinson fendue en torsion. Des éprouvettes de tubes à paroi mince ont été déformées à température ambiante à des vitesses de déformation allant de 102 à 5.103 s⁻¹. Les effets de la vitesse de déformation sur la réponse au flux de cisaillement, la sensibilité à la vitesse de déformation, le volume d'activation thermique et le module de cisaillement ont été évalués. L'initiation des dommages, la

propagation et les mécanismes de fracture ont été étudiés par microscopie MEB. Les résultats montrent que la réponse dynamique au cisaillement du mélange PC/ABS est fortement influencée par la vitesse de déformation appliquée, avec une augmentation de la contrainte et du module de cisaillement à mesure que la vitesse de déformation augmente. Les déformations de fracture diminuent avec l'augmentation de la vitesse de chargement, et les mécanismes de fracture par déchirement et par cisaillement dépendent fortement de la vitesse de déformation.

Tjong S. C. and Meng, Y. Z. [34] ont étudié les effets des compatibilisants sur les mélanges de PC et d'ABS moulés par injection. Ils ont examiné l'incorporation de polypropylène greffé à l'anhydride maléique (MA) et de résine époxy solide de type bisphénol A. Les mélanges, testés pour leurs propriétés mécaniques et leur morphologie, ont montré une amélioration significative de la ductilité et de la résistance à l'impact avec l'ajout d'époxy à un taux de 2 parties par centaines au mélange PC/ABS 70/30 greffé avec MA. Les compatibilisants se sont avérés efficaces jusqu'à une teneur en ABS de 30 %, réduisant la taille des domaines d'ABS dispersés dans la matrice de PC. Au-dessus de 40 % en poids de contenu en ABS, la résistance à l'impact a diminué significativement.

Wildes G. S. et al. [35] ont étudié l'utilisation d'un polymère styrène acrylonitrile-amine fonctionnalisé comme compatibilisant réactif pour les mélanges de polycarbonate de bisphénol-A/acrylonitrile-butadiène-styrène (PC/ABS). Ce polymère est conçu pour être miscible avec la matrice de copolymère styrène/acrylonitrile (SAN) des matériaux ABS, et ses groupes d'amine secondaire réagissent avec le PC au niveau de la liaison carbonatée pour former un copolymère SAN-g-PC. Cette réaction devrait renforcer l'interface PC/ABS et stabiliser la morphologie à des températures élevées en évitant la coalescence des phases. La synthèse du compatibilisant réactif et sa réaction avec les motifs carbonatés ont été décrites, avec une caractérisation effectuée par spectroscopie de résonance magnétique nucléaire et chromatographie par perméation de gel. La morphologie des mélanges PC/SAN compatibilisés et non compatibilisés a été étudiée par microscopie électronique en transmission.

Babbar I. et Mathur G. N. [36] ont étudié les mélanges de PC/ABS avec des compositions variant de 10 à 90 % d'ABS pour analyser l'effet de l'ajout d'ABS sur les propriétés d'écoulement du PC. Utilisant un rhéomètre de couple Haake System 90, ils ont collecté des données à des températures de 210 à 230 °C et des vitesses de 40 à 80 tr/min. Les

résultats ont montré que la viscosité des mélanges diminuait avec l'augmentation du taux de cisaillement, particulièrement pour les compositions riches en ABS. De plus, la viscosité diminuait avec l'augmentation de la température. Les énergies d'activation étaient plus élevées pour les compositions riches en PC et plus basses pour celles riches en ABS. En conclusion, l'ajout d'ABS au PC améliore les propriétés d'écoulement et la transformabilité des mélanges.

Steeman P. A. M. et al. [37] ont étudié les propriétés diélectriques à basse fréquence des mélanges de PC/ABS dans une plage de température de 100 à 170 °C, en se concentrant sur un mélange PC/ABS de 60/40 en masse. Les résultats ont été comparés avec des mesures mécaniques dynamiques en torsion et des observations morphologiques via la microscopie (MEB). En plus des relaxations observées aux températures de transition vitreuse des composants, une forte dispersion diélectrique à basse fréquence a été détectée, absence notée lors des mesures mécaniques. Ce phénomène est dû à la polarisation interfaciale entre l'ABS conducteur et le PC non conducteur ou légèrement conducteur. Les modèles diélectriques pour les matériaux hétérogènes à deux phases, notamment le modèle de Looyenga, ont décrit de manière satisfaisante ces effets. Les mesures diélectriques des mélanges PC/ABS de 75/25, 60/40 et 45/55 en masse ont montré que la connectivité de la phase ABS peut être déduite de la conductivité électrique du mélange, tandis que les mesures mécaniques sont sensibles à la connectivité de la phase PC.

Notre recherche bibliographique a démontré que les mélanges PC/ABS avec un ABS recyclé n'ont pas été étudiés jusqu'à ce jour. Cela nous a motivés à étudier ce mélange (PC/ABS) afin de valoriser l'ABS provenant des déchets des équipements électriques et électroniques et de modifier les propriétés du PC.

Références bibliographiques

[1]: Ignatov, V. N., Carraro, C., Tartari, V., Pippa, R., Berti, C., Pilati, F., Scapin, M., Fiorini, M., & Toselli, M. (1997). <i>Polymer</i> , pp 195.
[2]: Utracki, L. A. (1983). Melt flow of polymer blends. <i>Polym. Eng. and Sci.</i> , pp 602.
[3]: Coleman, M. M., Graf, J. F., & Painter, P. (1991). Specific interactions and the miscibility of polymer blends. Paris: Technomic, pp. 20-46.
[4]: Gaudin, S. (2008). Étude de la durabilité photochimique de composites bio-polymères biodégradables (Thèse de doctorat, Université Blaise Pascal-Clermont-Ferrand II).
[5]: Schwach, E. (2004). Étude de systèmes multiphasés biodégradables à base d'amidon de blé plastifié: relations structure-propriétés, approches de la compatibilisation (Thèse de doctorat, université Reims).
[6]: Li, J., Li, H., Wu, C., Ke, Y., Wang, D., Li, Q., Zhang, L., & Hu, Y. (2009). Morphologies, crystallinity, and dynamic mechanical characterizations of polypropylene/polystyrene blends compatibilized with PP-g-PS copolymer: Effect of the side chain length. <i>European Polymer Journal</i> , pp 2619-2628.
[7]: Wang, D., & Xie, X. M. (2006). Novel strategy for ternary polymer blend compatibilization. <i>Polymer</i> , pp 7859-7863.
[8]: Olabisi, O., Robeson, L. M., & Shaw, M. T. (1979). <i>Polymer-Polymer miscibility</i> . Academic Press, New York.
[9]: Horák, Z., Fortelný, I., Kolařík, J., Hlavata, D., & Sikora, A. (2005). Polymer Blends. In <i>Encyclopedia of Polymer Science and Technology</i> , pp. 1-59. John Wiley & Sons, New York.
[10]: Debbah, I. (2010). Étude de la compatibilité et des propriétés des mélanges de polyoléfines et polyéthylène téréphtalate (Thèse de doctorat, Université Ferhat Abbas, Sétif).
[11]: Kossentini Kallel, T. (2003). Étude de mélange PE/PS contribution au recyclage (Thèse de l'INSA de Lyon).
[12]: Utracki, L. A. (1998). <i>Commercial Polymer Blends</i> . Chapman and Hall, London.
[13]: Koning, C., Van Duin, V., Pagnouille, C., & Jérôme, R. (1998). <i>Prog. Polym. Sci.</i> , pp707.
[14]: Ajjji, A., & Utracki, L. A. (1996). <i>Polym. Eng. Sci.</i> , pp 1574.
[15]: Guo, HF, Packirisamy, S., Mani, RS, Aronson, CL, Gvozdic, NV, & Meier, DJ. (1998). Compatibilizing effects of block copolymers in low-density polyethylene/polystyrene blends. <i>Polymer</i> , pp 2495-2505.

Références bibliographiques

- [16]:Cervantes-Uc, J.M., Cauch-Rodríguez, J.V., Vázquez-Torres, H., Garfias-Mesías, L.F., & Paul, D.R. (2007). Thermal degradation of commercially available organoclays studied by TGA–FTIR. *Thermochimica Acta*, pp 92-102.
- [17]:Wang, D., & Xie, X.M. (2006). Nouvelle stratégie pour la compatibilité des mélanges de polymères ternaires. *Polymère*, pp 7859-7863.
- [18]:Devi, S. K., & Hatna, S. (2021). The effect of styrene maleic anhydride compatibilizer on the performance of polycarbonate/acrylonitrile butadiene styrene blends. *Materials Today: Proceedings*, 46, 2510-2514.
- [19]:Bano, S., Iqbal, T., Ramzan, N., & Farooq, U. (2021). Study of surface mechanical characteristics of ABS/PC blends using nanoindentation. *Processes*, 9(4), 637.
- [20]:Seo, J. S., Jeon, H. T., & Han, T. H. (2020). Rheological investigation of relaxation behavior of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blends. *Polymers*, 12(9), 1916.
- [21]:Wang, Y., Li, Y., Wang, W., Lv, L., Li, C., & Zhang, J. (2019). Recycled polycarbonate/acrylonitrile–butadiene–styrene reinforced and toughened through chemical compatibilization. *Journal of applied polymer science*, 136(21), 47537.
- [22]: Debbah, I., Krache, R., Aranburu, N., Fernández, M., & Etxeberria, A. (2018). Effect of SEBS-g-MAH addition on the mechanical, rheological, and morphological properties of polycarbonate/acrylonitrile–butadiene–styrene blends. *Journal of Elastomers & Plastics*, 50(7), 611-633.
- [23]: Nishino, K., Shindo, Y., Takayama, T., & Ito, H. (2017). Improvement of impact strength and hydrolytic stability of PC/ABS blend using reactive polymer. *Journal of Applied Polymer Science*, 134(9).
- [24]: Kaseem, M., & Hamad, K. (2016). Capillary flow behavior of polycarbonate (PC)/Acrylonitrile–butadiene–styrene (ABS) blends. *J Composit Biodegrad Polym*, 4, 11-15.
- [25]: Pour, R. H., Soheilmoghaddam, M., Hassan, A., & Bourbigot, S. (2015). Flammability and thermal properties of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene nanocomposites reinforced with multilayer graphene. *Polymer Degradation and Stability*, 120, 88-97.
- [26]: Liu, Y., Li, H., Ding, X., Zhu, J., Zhang, L., Pan, W., & Cai, R. (2014). Effect of the compatibilizers on polycarbonate (PC)/acrylonitrile-butadiene-styrene (ABS) blend. *Am J Mater Res*, 1(3), 48-52.
- [27]: Farzadfar, A., Khorasani, S. N., & Khalili, S. (2014). Blends of recycled polycarbonate and acrylonitrile–butadiene–styrene: comparing the effect of reactive compatibilizers on
-

Références bibliographiques

mechanical and morphological properties. *Polymer international*, 63(1), 145-150.

[28]: Khun, N. W., & Liu, E. (2013). Thermal, mechanical and tribological properties of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blends. *Journal of Polymer Engineering*, 33(6), 535-543.

[29]: Zhao, B., Wang, Q., Hu, G., Wang, B., Li, Y., Song, J., ... & Li, Q. (2012). Effect of methyl methacrylate graft acrylonitrile-butadiene-styrene on morphology and properties of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene blend. *Journal of Macromolecular Science, Part B*, 51(11), 2276-2283.

[30]: Ahmed, S. F., Yi, J. W., Moon, M. W., Jang, Y. J., Park, B. H., Lee, S. H., & Lee, K. R. (2009). The morphology and mechanical properties of polycarbonate/acrylonitrile butadiene styrene modified by Ar ion beam irradiation. *Plasma Processes and Polymers*, 6(12), 860-865.

[31]: Wong, A. C. Y. (2003). Polycarbonate effects on selected mechanical properties of polycarbonate/acrylonitrile-butadiene-styrene (PC/ABS) binary blending systems. *Polymer-Plastics Technology and Engineering*, 42(2), 171-180.

[32]: Más, J., Vidaurre, A., Meseguer, J. M., Romero, F., Pradas, M. M., Ribelles, J. G., ... & Pérez-Folch, J. (2002). Dynamic mechanical properties of polycarbonate and acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer blends. *Journal of applied polymer science*, 83(7), 1507-1516.

[33]: Lee, W. S., Lin, C. F., & Shen, H. C. (2001). Shear deformation and fracture behaviour of polycarbonate-acrylonitrile/butadiene/styrene blend at high strain rates. *Plastics, rubber and composites*, 30(10), 484-489.

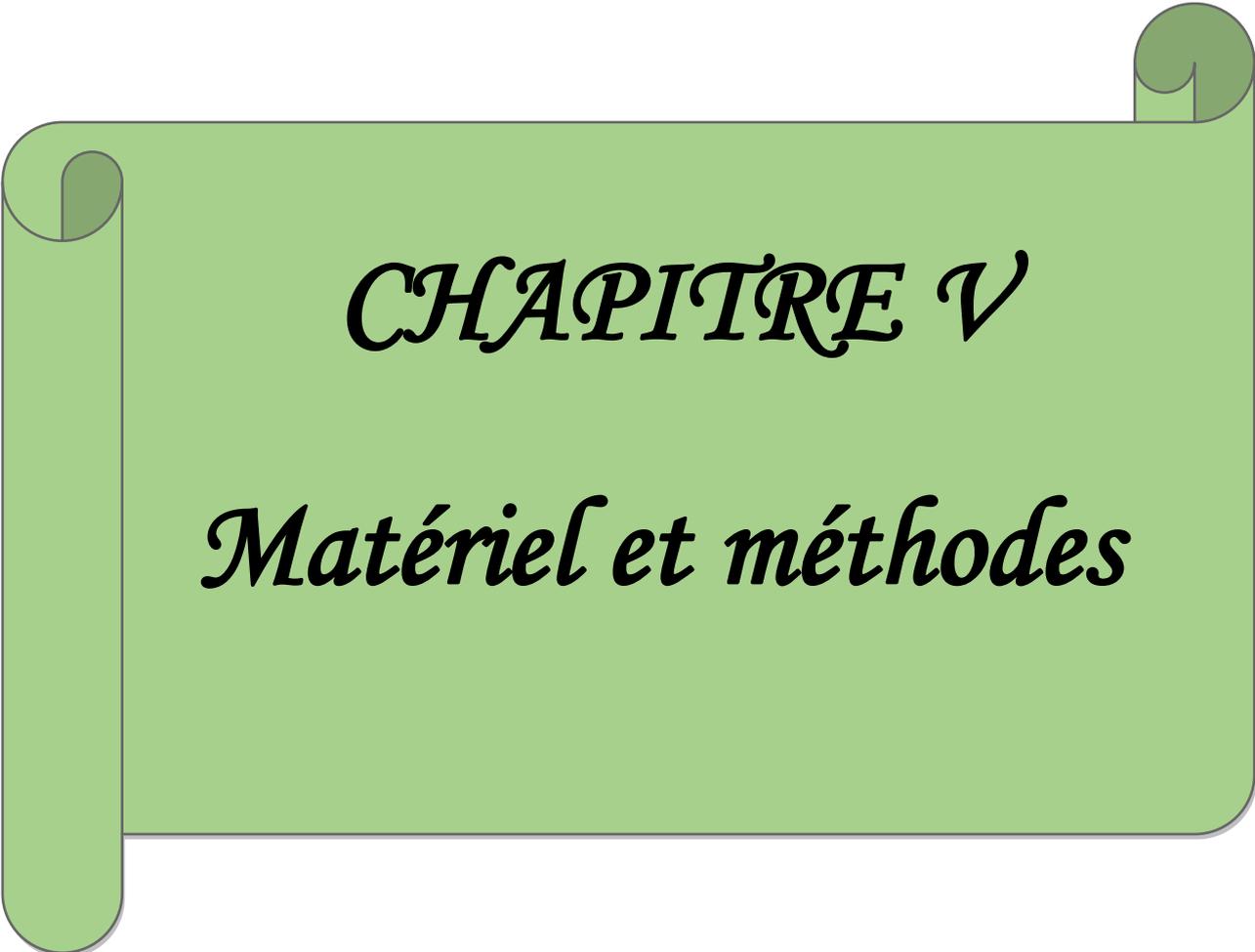
[34]: Tjong, S. C., & Meng, Y. Z. (2000). Effect of reactive compatibilizers on the mechanical properties of polycarbonate/poly (acrylonitrile-butadiene-styrene) blends. *European Polymer Journal*, 36(1), 123-129.

[35]: Wildes, G. S., Harada, T., Keskkula, H., Paul, D. R., Janarthanan, V., & Padwa, A. R. (1999). Synthesis and characterization of an amine-functional SAN for the compatibilization of PC/ABS blends. *Polymer*, 40(11), 3069-3082.

[36]: Babbar, I., & Mathur, G. N. (1994). Rheological properties of blends of polycarbonate with poly (acrylonitrile-butadiene-styrene). *Polymer*, 35(12), 2631-2635.

[37]: Steeman, P. A. M., Maurer, F. H. J., & Van Turnhout, J. (1994). Dielectric properties of blends of polycarbonate and acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer. *Polymer Engineering & Science*, 34(9), 697-706.

Partie
expérimentale



CHAPITRE V

Matériel et méthodes

V.1. Objectif

L'objectif du présent travail est de présenter les matériaux utilisés, de décrire le procédé de mise en œuvre pour la réalisation des mélanges PC/ABS, ainsi qu'à exposer les techniques de caractérisation employées au cours de cette étude pour examiner les propriétés des mélanges de PC/ABS.

V.2. Matériaux utilisés (PC, ABS)

V.2.1. Le polycarbonate (PC)

Dans cette étude, le PC utilisé est un polycarbonate transparent fourni par Direct Plastics Ltd, avec une densité de $1,20 \text{ g/cm}^3$. D'autres caractéristiques sont résumées dans le (Tableau V.1).

Tableau V.1: Principales caractéristiques du PC

Propriétés	Valeur
Résistance à la traction à la limite d'élasticité (50mm/min)	60 MPa
Résistance à la traction à la rupture (50mm/min)	70 MPa
Allongement à la limite d'élasticité (50mm/min)	6 %
Allongement à la rupture (50mm/min)	120 %

V.2.2. L'acrylonitrile butadiène styrène (ABS)

L'ABS recyclé, récupéré des pièces électroménager (réfrigérateur de l'unité IRIS, Sétif), connu sous le nom commercial HF380 (grade injection), a été fourni par LG Chem Ltd, avec un indice de fluidité MFI=42g/10 min à 220 °C sous une charge de 10 kg et une densité de $1,04 \text{ g/cm}^3$. Les autres caractéristiques sont résumées dans le (Tableau V.2).

Tableau V.2: Principales caractéristiques de l'ABS

Propriétés	Valeur
Résistance à la traction à la limite d'élasticité, 23 °C , 50mm/min, 3.2mm	44 MPa
Allongement à la limite d'élasticité	5 %
Allongement à la rupture	10 %
Module de traction	2050 MPa

V.3. Préparation des mélanges

Avant de procéder au mélange à l'état fondu, il est essentiel de déshydrater le polycarbonate et l'acrylonitrile butadiène styrène afin d'éliminer toute trace d'humidité.

Le polycarbonate (PC) et l'acrylonitrile butadiène styrène (ABS) ont été séchés pendant 2 heures à 80 °C. Des mélanges de PC et ABS avec différentes compositions en masse (0, 70, 80, 90 et 100 %) ont été préparés. Ces mélanges ont été désignés sous les noms ABS, PC70, PC80, PC90 et PC, respectivement.

Le PC et l'ABS sont d'abord mélangés à l'état fondu, puis introduits dans une extrudeuse bi-vis de type micro15cc Twin Screw Compouder (**Figure V.1**), à une température de 251°C et à une vitesse de rotation de 120 tr/min. À la fin, on récupère l'extrudât à la sortie de l'extrudeuse (filière). Ensuite, celui-ci est mis en forme à l'aide d'une mini-presse à injection (**Figure V.2**), dans les mêmes conditions pour obtenir des éprouvettes conforme à une norme.

Cette manipulation a été effectuée au Laboratoire des Matériaux Organiques de l'Université Abderrahmane Mira Bejaïa.



FigureV.1: Extrudeuse bi-vis de type micro 15cc Twin Screw Compouder



FigureV.2: Mini-presse à injection

V.4. Procédure expérimentale

L'organigramme ci-dessous récapitule les différentes phases du travail :

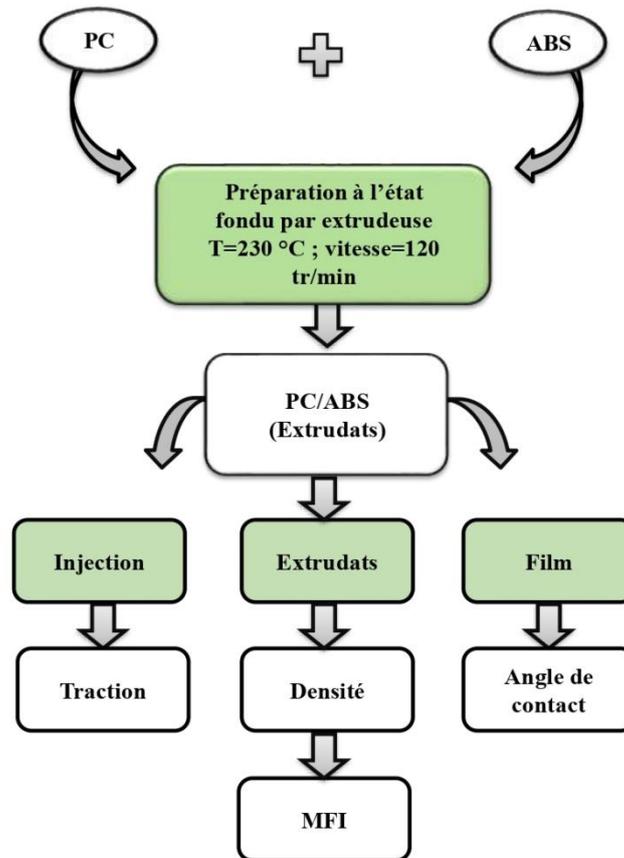


Figure V.3: Schéma représentant les étapes principales du travail

V.5. Méthodes de caractérisation

V.5.1. Caractérisation physique {détermination de la densité}

Pour déterminer la densité du polycarbonate et de l'acrylonitrile butadiène styrène, la méthode pycnométrique a été utilisée.

V.5.1.1. Matériel nécessaire

- **Pycnomètre** : un flacon de volume calibré précis (généralement en verre) avec un bouchon muni d'un capillaire permettant d'éviter les bulles d'air.
- **Balance analytique** : pour mesurer les masses avec une grande précision.
- **Eau distillée** : utilisée comme liquide de référence pour les mesures.

- **Équipement de nettoyage** : pour s'assurer que le pycnomètre et l'échantillon sont libres de contaminants (par exemple, brosses, solvants de nettoyage, etc.).

V.5.1.2. Préparation

- Placer le pycnomètre vide sur la balance et noter sa masse (m_1).
- Remplir le pycnomètre avec de l'eau distillée jusqu'au repère de calibration.
- Placer le pycnomètre rempli d'eau sur la balance et noter sa masse (m_2).
- Placer une quantité connue de polymère (échantillon) sur la balance et noter sa masse.
- Placer le pycnomètre contenant l'échantillon de polymère sur la balance et noter sa masse (m_3).
- Après avoir introduit l'échantillon de polymère, compléter de nouveau le pycnomètre avec de l'eau distillée jusqu'au repère de calibration.
- Placer le pycnomètre contenant l'échantillon de polymère et l'eau sur la balance et noter sa masse (m_4).

Pour déterminer la densité on utilise les équations suivantes :

❖ Densité relative = $\rho_{\text{corps}}/\rho_{\text{eau}}$ **Eq. (V.1)**

❖ Densité relative = $(m_3 - m_1) / (m_2 + m_3 - m_4 - m_1)$ **Eq. (V.2)**

❖ Masse volumique du solide = densité relative * Masse volumique de l'eau.... **Eq. (V.3)**

V.5.2. Caractérisation mécanique {essai de traction}

L'essai de traction est l'essai mécanique le plus classique et le mieux étudié. Il consiste à appliquer sur une éprouvette une force croissante ou une déformation constante, ce qui provoque une déformation progressive jusqu'à la rupture de l'éprouvette [1].

Les essais mécaniques de traction sur divers types d'éprouvettes sont réalisés à température ambiante avec une machine de traction Zwick-Roell Z050 (**Figure V.4**) au Laboratoire des Matériaux Non Métalliques (LMNM) de l'Université Ferhat Abbas de Sétif. La machine est dotée d'une cellule de charge de 50 KN et connectée à un logiciel d'acquisition de données. La vitesse de déplacement est maintenue constante à 3 mm/min lors des essais. La contrainte σ , exprimée en MPa, est définie comme la force F (en newtons) divisée par la section A de l'éprouvette. La section A est calculée en multipliant l'épaisseur par la largeur de l'éprouvette [1]. Formellement, $\sigma = F/A$ **Eq. (V.4)**

Le module de Young E (MPa) représente la pente de la partie linéaire de la courbe contrainte-déformation [2]. $E = \sigma / \epsilon$ **Eq. (V.5)**

Où ϵ est la déformation (sans unité).



Figure V.4: Machine de traction Zwick-Roell de type Z050

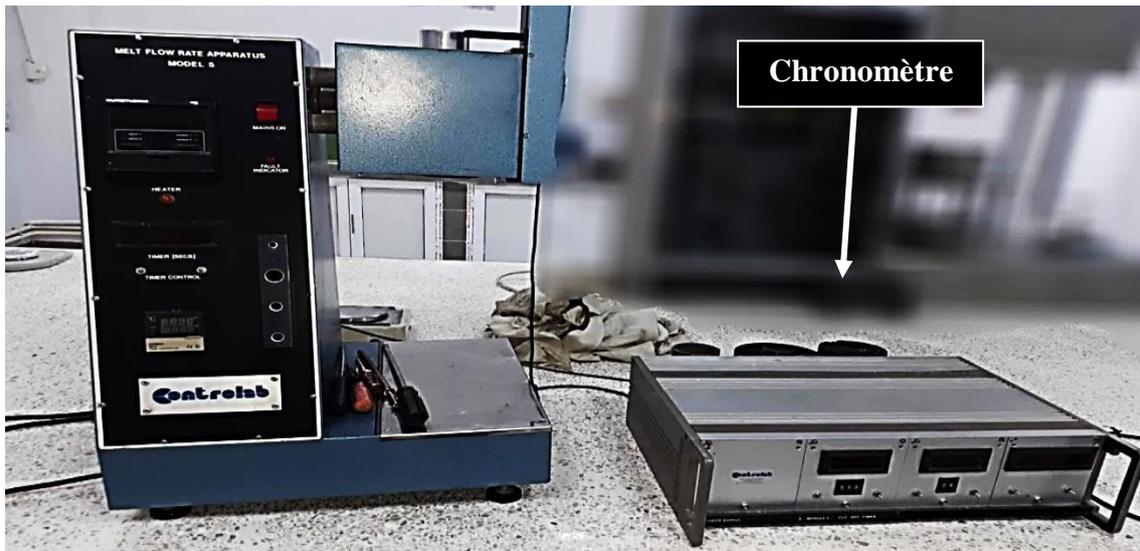
V.5.3. Caractérisations rhéologiques {l'indice de fluidité (IF)}

L'indice de fluidité à chaud (MFI) est une mesure utilisée pour évaluer la fluidité ou la viscosité à chaud d'un polymère. Il fournit une indication de la facilité avec laquelle un polymère peut être traité par différents procédés [3].

Le test a été réalisé à l'aide d'un appareil « Melt Flow Rate Apparatus Model 5 » de la marque Controlab (**Figure V.5**). La matière granulée des mélanges est extrudée à travers une filière, à une température de 230 °C et sous une charge de 2,16 kg. La relation suivante a été utilisée pour le calcul [4] : $IF = (600 \text{ seconde} \cdot m) / t$ **Eq. (V.6)**

Avec :

- IF: Indice de fluidité (g /10min).
- m : Masse de l'extrudât en gramme.
- t : Intervalle de temps entre deux coupes d'un extrudât en seconde.



FigureV.5: Appareil de mesure de l'indice de fluidité (MFI)

V.5.4. Caractérisations de surface {angle de contact}

L'angle de contact est défini comme l'angle formé à l'interface entre une goutte de liquide et une surface plane solide, également appelée substrat [5]. Les mesures de l'angle de contact ont été effectuées à température ambiante à l'aide d'un appareil de marque KRÜSS (Drop Shape Analyzer) (**FigureV.6**).



FigureV.6: L'appareil de mesure d'angle de contact

Références bibliographiques

[1]: CVM. (2023). L'essai de traction. [consulté le 23 juin 2024].

<https://cvm-france.com/ressources-techniques/lessai-de-traction/>

[2]: Mymaxicours. (2024). La résistance des matériaux. [consulté le 23 juin 2024].

<https://www.maxicours.com/se/cours/la-resistance-des-materiaux/#:~:text=Le%20module%20d'%C3%A9lasticit%C3%A9%20longitudinale,et%20%CE%B5%20l'allongement%20relatif.>

[3]: Omnexus. (2024). Melt Flow Index - Assess the Flowability of Polymers. [consulté le 23 juin 2024].

<https://omnexus.specialchem.com/polymer-property/melt-flow-index>

[4]: Prestogroup. (2024). What Is The Specific Melt Flow Index Formula For Calculating MFI Of The Materials? [consulté le 23 juin 2024].

<https://www.prestogroup.com/articles/what-is-the-specific-melt-flow-index-formula-for-calculating-mfi-of-the-materials/>

[5]: Calnesis. (2024). Mesure d'angle de contact. [consulté le 23 juin 2024].

<https://www.calnesis.com/mesures/angle-contact/>



CHAPITRE VI

Résultats et Discussions

VI.1. Mesures de la densité

L'influence de l'ABS sur les propriétés physiques des mélanges PC/ABS comprend le test de densité dont le résultat est présenté dans le (**Tableau VI.1**).

Tableau VI.1: Valeurs de la densité du PC, de l'ABS et des mélanges PC/ABS

Composition PC/ABS (%)	100/0	90/10	80/20	70/30	0/100
Densité (g/cm ³)	1,181	1,125	1,015	0,993	0,994

À partir du résultat obtenu de la densité, en utilisant la méthode du pycnomètre, on constate que l'ajout des différents % en masse de l'ABS diminue la densité du mélange PC/ABS. La densité d'un matériau est influencée par le vide créé dans le mélange polymérique, dû à la grande tension interfaciale existant entre la matrice PC et la phase dispersée d'ABS. La matrice PC et la phase dispersée d'ABS sont mal liées, entraînant une faible densité en raison de la distribution non-uniforme de la densité des agrégats de l'ABS dans le volume de la matrice et la diminution probable du taux de cristallinité dû au remplacement d'une proportion plus cristalline du PC par la plus amorphe d'ABS [1].

VI.2. Propriétés mécaniques en traction

La détermination des propriétés mécaniques d'un matériau est fondamentale pour son utilisation dans des domaines d'application spécifiques [2]. La **figure VI.1** montre les courbes contrainte-déformation représentatives pour le PC, l'ABS et leurs mélanges. On peut observer clairement que les propriétés mécaniques du PC sont largement supérieures à celles de l'ABS (**Figure VI.1**). Le PC présente la limite d'élasticité la plus élevée ainsi que la contrainte et l'allongement à la rupture les plus importants et montre un comportement ductile. En revanche, l'ABS présente une faible ductilité et une faible limite d'élasticité due à son recyclage.

D'après la **figure VI.1**, on constate que l'ajout de l'ABS engendre une diminution des propriétés mécaniques, en particulier l'allongement à la rupture et la contrainte maximale. Ceci peut être expliqué par la faible adhésion interfaciale entre les phases polymériques ; du coup, cette incompatibilité à entrainer un faible transfert de contrainte entre la matrice et la phase dispersée [3]. Il a été rapporté dans la littérature que l'ajout d'ABS diminue la limite d'élasticité, réduit la capacité d'étirage à froid de la matrice PC et l'allongement à la rupture

des mélanges, qui en résulte une diminution initiale de la limite d'élasticité, attribuée à l'influence de la concentration de contrainte élevée créée par les particules d'ABS dans la matrice PC. Cela pourrait induire un mécanisme de cisaillement microscopique local diminuant la limite d'élasticité globale du PC.

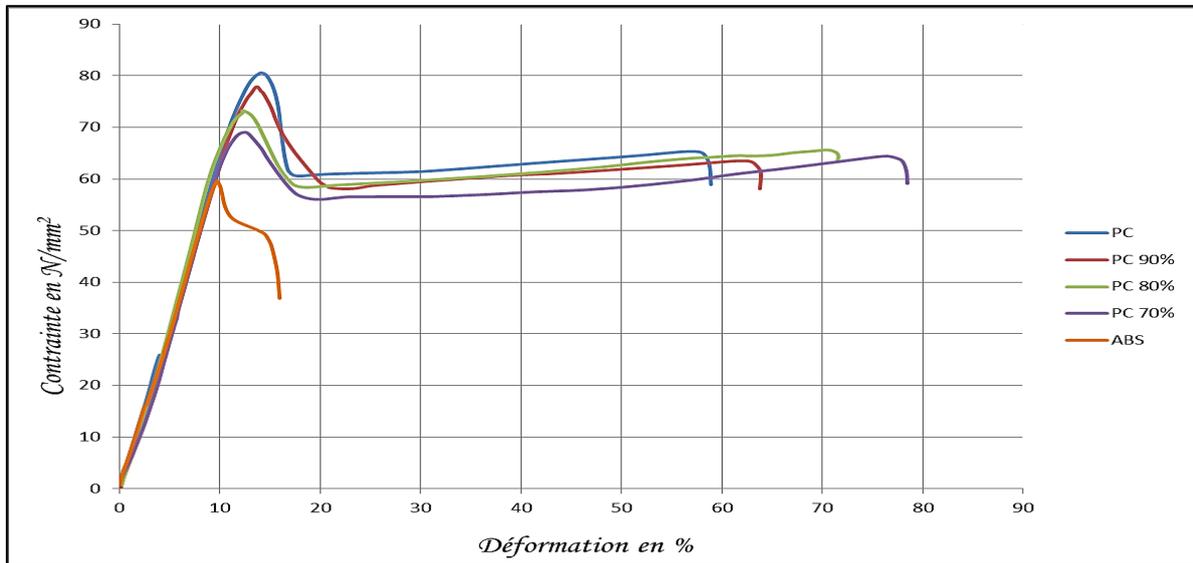


Figure VI.1: Résistance à la traction du PC, de l'ABS et des mélanges PC/ABS

La figure VI.2 présente la variation du module de Young en fonction de différents % en masse de l'ABS.

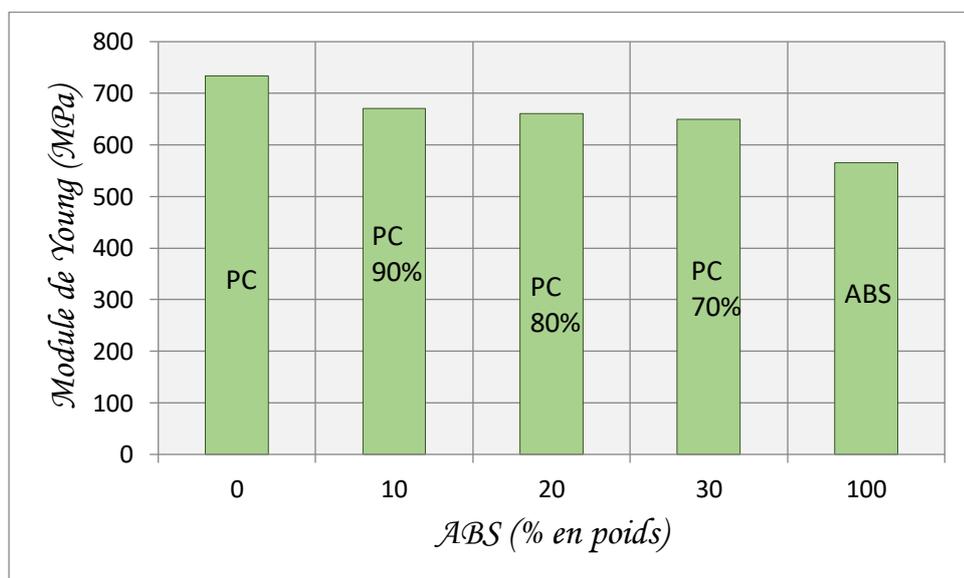


Figure VI.2: Module de Young en fonction de la composition d'ABS

On remarque que le module de Young du PC est plus élevé que celui d'ABS. De même, le module d'élasticité diminue au fur et à mesure de l'incorporation de l'ABS. Cela

implique que la rigidité du PC s'améliore considérablement avec l'augmentation de la teneur en ABS. L'ABS contient des composants butadiène qui contiennent les doubles liaisons C=C. Lorsqu'elles sont mélangées avec du PC, ces doubles liaisons pourraient augmenter la flexibilité des mélanges et ainsi améliorer le module [4].

VI.3. Indice de fluidité

La figure VI.3 représente la variation de l'indice de fluidité du mélange PC/ABS préparé en fonction de la concentration en ABS.

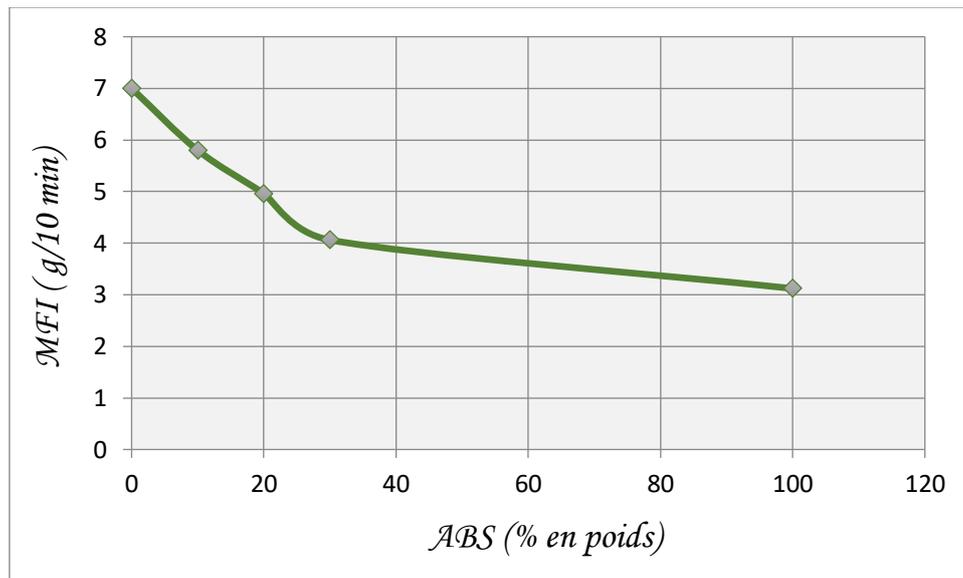


Figure VI.3: Indice de fluidité du PC, de l'ABS et des mélanges PC/ABS

La propriété rhéologique de la matière plastique fondue a été caractérisée par le nombre de grammes de matériau par 10 minutes de temps d'écoulement, c'est-à-dire l'indice de fluidité en fusion (IF). L'augmentation de la quantité d'ABS dans le mélange PC/ABS tend à réduire la valeur de l'IF. Le PC pure a une valeur IF de 7 g/10 min, avec l'ajout de 10, 20 et 30 % en poids d'ABS, la valeur IF diminue respectivement à 5,80, 4,96 et 4,09 g/10 min. Cela signifie que la viscosité à l'état fondu de PC/ABS a augmenté. Ceci peut être attribué à la propagation de la phase caoutchouteuse au sein de la matrice PC. L'existence de la double liaison C=C du butadiène présenté dans l'ABS entravait la capacité d'écoulement de la masse fondue et augmentait la viscosité de la masse fondue de polymère [5].

VI.4. Angle de contact

Les résultats de l'angle de contact des surfaces de PC, d'ABS et les mélanges PC/ABS sont présentés dans le **tableau VI.2**.

Tableau VI.2: Angle de contact du PC, de l'ABS et des mélanges PC/ABS

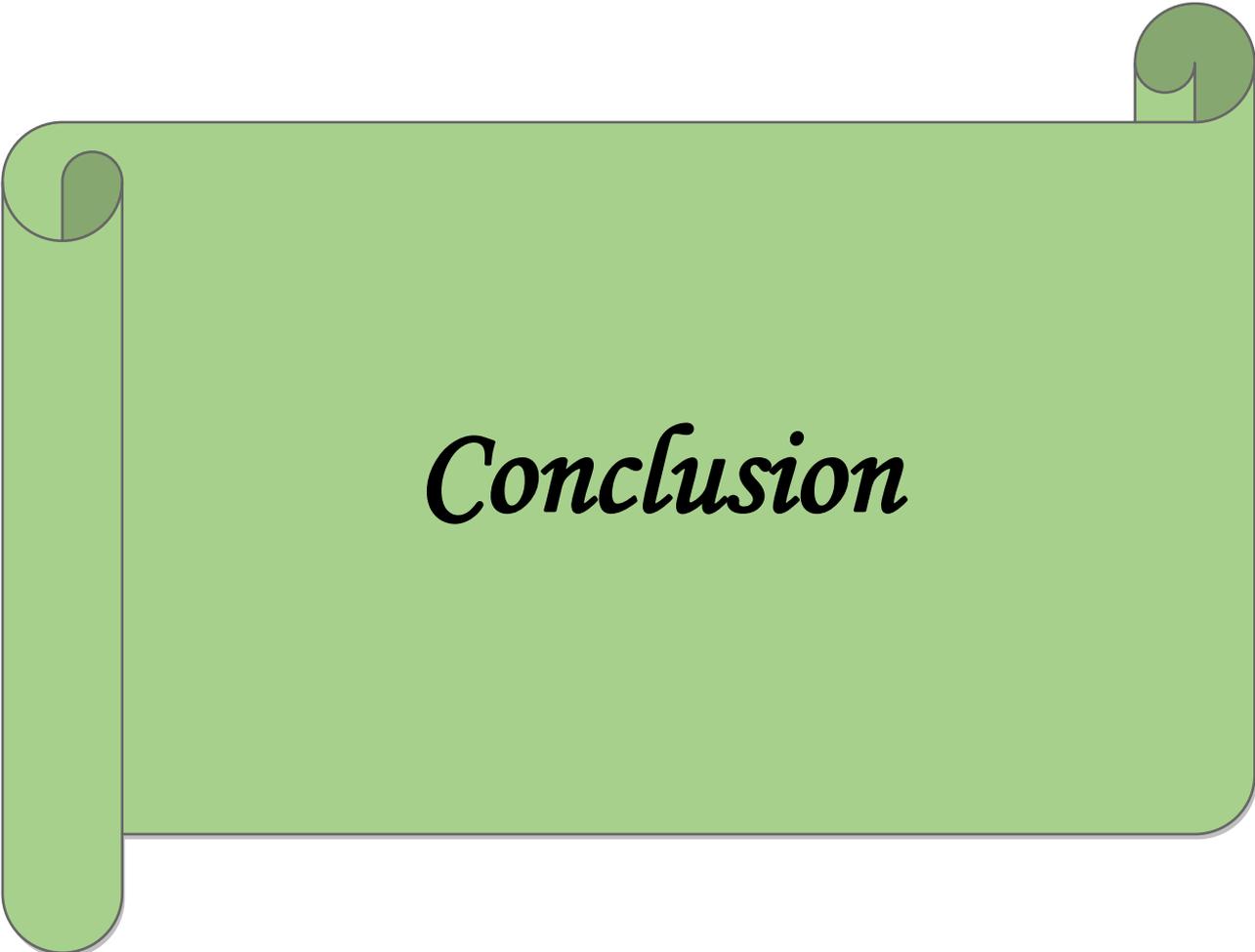
Angle de contact (α)	PC	PC90	PC80	PC70	ABS
(t= 30s)	91,0°	81,0°	82,4°	70,3°	89,4°

La mouillabilité est l'un des facteurs les plus importants pour étudier la propriété hydrophile et, généralement, sa modification est réalisée par mesure de l'angle de contact. La valeur de l'angle de contact du PC vierge a été mesurée à 91°, indiquant une mouillabilité relativement faible et montrant que le polycarbonate est un polymère légèrement hydrophile et super oléophile. Par contre, l'ABS a une valeur de 89° moins faible que celle du PC, indiquant que l'ABS a une nature hydrophile peu élevée que le PC.

Une réduction significative des résultats de l'angle de contact pour les mélanges PC/ABS testés à l'air libre a été observée. La réaction de l'ABS a été peu énergique pour diviser seulement quelques monocouches de la surface du PC pour générer des sites actifs. Le changement d'énergie de surface du mélange PC et donc de mouillabilité a été obtenu après ajout de différents ratios d'ABS à l'air ambiant. La réduction de l'angle de contact avec l'eau peut s'expliquer par l'augmentation de la composante polaire de l'énergie de surface [6].

Références bibliographiques

- [1]:Nurhajati, D. W., Sholeh, M., Indrajati, I. N., & Setyorini, I. (2017). Pengaruh bahan pengisi serat kaca terhadap sifat fisik dan kristalinitas polipaduan PC/ABS. *Majalah Kulit, Karet, dan Plastik*, pp 43-48.
- [2]:Peydro MA., Parres F., Crespo JE., Navarro R. (2013). "Récupération de l'acrylonitrilebutadiène-styrène recyclé, par mélange avec du styrène-éthylène/butylène-styrène". *Journal de la technologie de traitement des matériaux*,pp 1268-1283.
- [3]:Krache R and Debah I. (2011). " Quelques propriétés mécaniques et thermiques des mélanges PC/ABS. " *Sciences et applications des matériaux*, 02(05), pp 404-410.
- [4]:Dong, W., Tang, R., & Chen, D. (2020). Preparation and Characterization of ModifiedPolycarbonate/ABS Blends.
- [5]:Derakhsanfard, F. (2022). Investigating the influence of mixing speed in mechanical physical properties of Acrylonitrile Butadiene Styrene/Poly Carbonate alloy and simulating laboratory data by artificial neural networks. *Organic ChemistryResearch*, pp 21-28.
- [6]:Abenojar, J., Torregrosa-Coque, R., Martínez, M. A., & Martín-Martínez, J. M. (2009).Surface modifications of polycarbonate (PC) and acrylonitrile butadiene styrene (ABS)copolymer by treatment with atmospheric plasma. *Surface and Coatings Technology*,pp 2173-2180.
-

A green scroll graphic with a light green background and a darker green border. The scroll is unrolled, with the top and bottom edges curled up. The word "Conclusion" is written in the center in a black, italicized serif font.

Conclusion

Conclusion

Ce travail est voué au contexte spécifique du recyclage des DEEE, qui constitue un enjeu environnemental crucial en raison de l'augmentation récente et significative de la quantité de ces déchets. Cette croissance est principalement due à l'évolution rapide des équipements électroniques et électriques, ainsi qu'à leur obsolescence rapide. Le recyclage des DEEE pose également un véritable défi technologique et scientifique, étant donné les nombreuses difficultés à résoudre pour établir une filière de valorisation économiquement viable.

Différentes techniques expérimentales ont été utilisées dans notre travail pour la caractérisation des mélanges PC/ABS. Les résultats ainsi obtenus nous ont permis de tirer les conclusions suivantes :

La densité diminue avec l'augmentation de la teneur en ABS, Cette diminution est due à la tension interfaciale élevée entre la matrice de PC et la phase dispersée d'ABS, créant des vides dans le mélange polymérique.

Les mélanges de PC/ABS exhibent des propriétés de traction peu inférieures à celles des constituants purs, à cause de l'immiscibilité et du manque d'adhésion interfaciale entre les deux polymères. Le mélange PC/ABS est immiscible et nécessite un compatibilisant.

L'indice de fluidité diminue à mesure que la proportion d'ABS dans le mélange augmente. La différence de grade entre le PC de grade injection et de l'ABS de grade extrusion a contribué à cette diminution. De plus, cette réduction du MFI est attribuée à la présence d'ABS, dont les chaînes introduites dans les mélanges occupent le volume libre entre les chaînes de PC, agissant comme des obstacles.

L'essai d'angle de contact révèle que l'augmentation de la quantité d'ABS ajoutée accroît l'état hydrophile des mélanges PC/ABS. Cela suggère que l'énergie de surface des mélanges PC/ABS augmente, probablement en raison de la haute énergie de surface de l'ABS.

Les résultats obtenus dans ce projet prouvent que l'ajout de l'ABS valorisé à partir des DEEE possède un potentiel pour améliorer les propriétés du PC, notamment les propriétés physiques, mécaniques, physico-chimiques et rhéologiques en présence d'un compatibilisant, ce qui pourra constituer un futur projet.



Perspectives

Perspectives

En termes de perspectives, en vue d'approfondir cette recherche, il serait donc indispensable de compléter ces travaux par les études suivantes :

1. L'importance de la compatibilisation de mélanges PC/ABS pour amélioration des interactions intermoléculaires et la miscibilité entre les deux polymères, ensuit amélioration des performances mécanique, thermique et morphologique.
2. Effectuer des analyses thermiques, afin étudier la miscibilité par (DSC) et l'effet de l'incorporation d'un polymère recycle l'ABS sur la et stabilité thermiques du mélanges par l'analyse (ATG).
3. Effectuer le test mécanique de choc Charpy, pour étudier l'effet de l'ABS pour améliorer la résistance au choc du mélange PC/ABS.

Résumé

L'objectif du présent travail est d'étudier l'effet de l'ABS recyclé à partir des équipements électriques et électroniques sur la modification des propriétés physiques, mécaniques, physico-chimiques et rhéologiques des mélanges PC/ABS. Les mélanges PC/ABS à différentes compositions (90/10, 80/20, et 70/30) ont été préparés à l'état fondu dans une extrudeuse double vis co-rotative suivie d'un moulage par injection. La modification a été analysée par une série de tests : test de pycnomètre pour la détermination de la densité, un test de traction, un test rhéologique (MFI) et une mesure d'angle de contact pour déterminer la mouillabilité des mélanges. Il a été observé que les propriétés mécaniques (résistance à la traction, allongement à la rupture et module d'élasticité) diminuent avec l'augmentation de la concentration en ABS. De même, l'indice de fluidité des mélanges diminue au fur et à mesure de l'augmentation du pourcentage en poids d'ABS. Cependant, la mesure d'angle de contact a révélé une amélioration de la mouillabilité des mélanges.

Mots clés : Mélange PC/ABS, Propriétés physiques, Propriétés mécaniques, Propriétés physico-chimiques, Propriétés Rhéologiques.

Abstract

The objective of this work is to study the effect of recycled ABS from electrical and electronic equipment on the modification of the physical, mechanical, physicochemical, and rheological properties of PC/ABS blends. The PC/ABS blends with different compositions (90/10, 80/20, and 70/30) were prepared in the molten state using a co-rotating twin-screw extruder followed by injection molding. The modification was analyzed through a series of tests: pycnometer test for density determination, tensile test, rheological test (MFI), and contact angle measurement to determine the wettability of the blends. It was observed that the mechanical properties (tensile strength, elongation at break, and modulus of elasticity) decrease with the increase in ABS concentration. Similarly, the melt flow index of the blends decreases as the weight percentage of ABS increases. However, the contact angle measurement revealed an improvement in the wettability of the blends.

Keywords: PC/ABS blends, Physical properties, Mechanical properties, Physico-chemical properties, Rheological properties.
